



# Feuille de route biocarburants avancés

**A D E M E**



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Énergie

# Feuille de route biocarburants avancés

## Sommaire

> 1. Contexte et enjeux	4
> 2. Périmètre	9
> 3. Les visions prospectives	11
> 4. Verrous	19
> 5. Besoins de R&D, démonstrateurs, plates-formes, expérimentations	30
> 6. Annexe 1	39
> 7. Annexe 2	46
> 8. Annexe 3	53
> 9. Annexe 4	54

## Liste des membres du groupe d'experts

Nature de l'organisme	Experts	Organismes d'appartenance
Organisme de recherche et centre technique	Mireille Bruschi Jean-Paul Cadoret Lisa Gauvrit Gérard Goma Xavier Montagne Gilles Peltier Jean-François Sassi	CNRS Ifremer Inra Insa-Toulouse IFP Energies Nouvelles CEA Ceva
Entreprise privée	Philippe Costes Pascal Del Gallo Olivier Guerrini Arnaud Muller-Feuga Jean-François Rous Vincent Schachter	Airbus Air Liquide GDF-Suez Microphyt Prolea Total
Organisme public	Gérard Antonini Bruno Jarry	ANR Académie des Technologies

Le groupe d'experts a reçu l'appui d'un secrétariat technique composé d'Alba Departe, Karine Filmon, Aude-Claire Houdon, Jean-Louis Bal, Daniel Clément, Léonard Boniface, Bruno Gagnepain, Pierre Galtier, Michel Gioria, François Moisan et Jean-Christophe Pouet de l'ADEME.

## Préambule

Depuis 2010, l'ADEME gère quatre programmes dans le cadre des Investissements d'avenir<sup>1</sup>.

Des groupes d'experts issus de la recherche dans les secteurs de l'industrie, des organismes de recherche et des agences de financement et de programmation de la recherche, sont chargés, dans le cadre d'un travail collectif, de la réalisation de feuilles de route stratégiques.

Celles-ci sont utilisées pour lancer les appels à manifestation d'intérêt (AMI). Les feuilles de route ont pour objectif :

- d'éclairer les **enjeux industriels, technologiques, environnementaux et sociétaux** ;
- d'élaborer des **visions cohérentes et partagées** des technologies ou du système sociotechnique en question ;
- de mettre en avant les **verrous technologiques, organisationnels et socio-économiques** à dépasser ;
- d'associer aux thématiques de recherche prioritaires, **des objectifs temporels** en termes de disponibilité technologique et de déploiement ;
- de rendre prioritaires les **besoins de recherche industrielle, de démonstrateurs de recherche, d'expérimentation préindustrielle et de plates-formes technologiques d'essai** qui servent ensuite de base pour :
  - > la rédaction des AMI,
  - > la programmation de la recherche au sein de l'ADEME et d'autres institutions comme l'Agence nationale de la recherche (ANR), le Comité stratégique national sur la recherche énergie ou l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (ANCRE).

Ces priorités de recherche et d'expérimentation proviennent du croisement entre les visions et les verrous, mais prennent également en compte les **capacités françaises dans les domaines de la recherche et de l'industrie**. Les feuilles de route peuvent également faire référence à des expérimentations exemplaires à l'étranger et susciter des recommandations en matière de politique industrielle.



<sup>1</sup> - Les Investissements d'avenir s'inscrivent dans la continuité des orientations du Fonds démonstrateurs de recherche géré par l'ADEME.

Quatre programmes sont concernés : Energie renouvelable, décarbonée et chimie verte (1,35 milliard d'euros), Véhicules du futur (1 milliard d'euros), Réseaux électriques intelligents (250 millions d'euros) et Economie circulaire (250 millions d'euros).

## Feuille de route biocarburants avancés

### > 1. Contexte et enjeux

Les **combustibles fossiles** sont responsables de **plus de 55 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique dans le monde**<sup>2</sup>. Les transports, l'agriculture, les industries manufacturières, les bâtiments, les industries de l'énergie, le traitement des déchets représentent 60 % de ces émissions. Les **transports** sont les **principaux contributeurs**, à hauteur de 25 %, soit près de **14 % des émissions totales** dues aux combustibles fossiles.

Les émissions de GES diminuent dans la plupart des secteurs. Elles continuent néanmoins d'augmenter dans le secteur du bâtiment et surtout dans celui des transports, qui **dépend à 98 % du pétrole à l'échelle mondiale (96 % en Europe**<sup>3</sup>). Dans l'Union Européenne, par exemple, **entre 1990 et 2004 les émissions de CO<sub>2</sub> liées aux transports ont augmenté de plus de 25 %**<sup>4</sup>. C'est donc un **secteur particulièrement problématique** au regard de la lutte contre le changement climatique.

Depuis quelques décennies, des **technologies de conversion de la biomasse** se sont développées **pour produire des biocarburants pour les transports**, substituts potentiels aux carburants fossiles (principalement essence et diesel pour les véhicules, mais aussi kérosène et carburéacteur pour les avions à réaction).

La **biomasse** est constituée de **l'ensemble des organismes vivants sur les continents et dans les océans** : micro-organismes, plantes ou animaux.

#### La biomasse selon la commission européenne

Selon la **directive européenne 2009/28/CE** du 23 avril 2009 qui concerne la promotion des énergies renouvelables, la biomasse recouvre la fraction biodégradable d'une part des produits, déchets et résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture (y compris les substances végétales et animales), de la sylviculture (culture des forêts) et des industries connexes, y compris pêche et aquaculture, d'autre part, des déchets industriels et municipaux. Elle a de nombreux usages :

- alimentaires
- primaires non énergétiques : fertilisants organiques des sols, matériaux renouvelables traditionnels (bois et assimilés, textiles), chimie du végétal (amidon/sucres, huiles, bois,...), matériaux biosourcés
- énergétiques : biocarburants, chaleur, cogénération.

La biomasse est aujourd'hui la **première ressource énergétique renouvelable** sur la planète, devant l'hydraulique, le solaire et l'éolien. En **2008**, elle fournissait environ **10 % de l'énergie primaire mondiale** (soit 1 200 millions de tonnes d'équivalent pétrole, Mtep), pour l'essentiel sous forme de biocombustibles solides (87 %) et en usage dit traditionnel. Le bois ou la combustion de déchets organiques sont encore largement utilisés en Afrique sub-saharienne, en Inde ou en Asie, pour cuisiner, s'éclairer ou se chauffer.

### Au niveau mondial

Les nouveaux usages énergétiques de la biomasse représentaient, en **2008**, environ 150 Mtep, soit 1,3 % de l'énergie primaire mondiale<sup>5</sup>. En 2008, les productions mondiales d'**éthanol et de biodiesel** (encadré ci-dessous) représentaient respectivement environ **3,7 % et 1,5 %** en pouvoir calorifique inférieur (PCI, encadré ci-dessous) **des consommations mondiales d'essence et de diesel**<sup>6</sup>.

#### Ethanol et biodiesel

Plusieurs filières de production de biocarburants existent pour produire soit de **l'éthanol** pour les moteurs à essence, soit du **biodiesel** pour les moteurs diesel. L'éthanol est un alcool liquide actuellement produit via la **fermentation de sucres** (canne à sucre, betterave à sucre) ou d'**amidon** (issu de céréales comme le maïs ou le blé, dites plantes amylacées). Le **biodiesel** est surtout produit en Europe à partir d'**huiles végétales** extraites de graines de colza ou de tournesol, ailleurs dans le monde à partir de **palme** ou de **soja**.

L'éthanol peut aussi être incorporé à l'essence sous sa forme d'éther, l'ETBE ou éthyl tertio butyl éther. L'ETBE est produit par réaction avec de l'isobutène issu des raffineries ou de la pétrochimie.

#### Pouvoir calorifique inférieur

Le **pouvoir calorifique** d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par sa combustion complète. Le **pouvoir calorifique inférieur ou PCI** est le pouvoir calorifique lorsque l'eau produite lors de cette combustion reste à l'état de vapeur.

2 - IPCC, 2007, Climate Change 2007: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (ed.)], Geneva, Switzerland, 104 pages.

3 - Panorama 2009 : Les énergies pour le transport, avantages et inconvénients, Institut français du pétrole.

4 - Fischer G., Hiznyik E., Prieler S., Shah M., Van Velthuizen H., 2009. Vienne : IIASA/OFID, 228 pages.

5 - IEA Bioenergy 2009 Annual Report.

6 - Prometheus Institute – Biofuels 2010 Spotting the Next Wave – Executive Summary, GTM Research, décembre 2009.

L'Agence internationale de l'énergie (AIE) a établi en 2008 des scénarios d'évolution du système énergétique mondial à l'horizon 2050, dits ETP (Energy Technology Perspectives). Actualisés en 2010, ils examinent notamment les différentes solutions technologiques de production (à l'exception des algues), conversion, distribution et utilisation finale de l'énergie pouvant y contribuer et la façon dont elles pourraient répondre aux défis environnementaux ou liés aux ressources.

Dans le scénario dit tendanciel, qui sert de référence, l'état du système est présenté en l'absence de changements importants dans la politique énergétique actuelle. La demande énergétique mondiale et l'utilisation de carburants fossiles dans les transports doublent l'un et l'autre en 2050. Tiré par la croissance et l'évolution des modes de vie dans les pays émergents, le nombre de véhicules individuels fait plus que doubler à l'échelle mondiale. Dans ce scénario, la biomasse représente environ 1 900 Mtep, soit 9 % de la demande primaire d'énergie. La part des biocarburants reste limitée à 4 % de la consommation d'énergie pour les transports soit 160 Mtep,

Dans le scénario Blue Map, un scénario volontariste, très ambitieux, qui vise une division par deux des émissions de gaz à effet de serre du secteur énergétique à l'horizon 2050, la quantité d'énergie issue de la biomasse est presque multipliée par trois pour atteindre environ 3 500 Mtep, constituant alors de loin la première source d'énergie primaire renouvelable.

Près de la moitié (en incluant les pertes dues à la conversion de la biomasse) est destinée à la production de biocarburants liquides, l'autre moitié à la production d'électricité, de chaleur et de bioproduits tels que des biopolymères issus de bioraffineries (encadré ci-dessous). La part des biocarburants représenterait environ 27 % de la consommation d'énergie pour les transports à l'horizon 2050, soit 745 Mtep. Le transport routier des marchandises, la navigation et le transport aérien pourraient notamment devenir les principaux utilisateurs de biocarburants, les autres options sans usage d'hydrocarbures risquant de s'avérer trop onéreuses (encadré ci-dessous). Les biocarburants contribueraient ainsi à la nécessaire « décarbonation fossile » du secteur des transports, à condition que leur bilan d'émission GES global soit positif en intégrant notamment les effets dus aux changements d'allocation des sols, qu'ils soient directs (sur le territoire de production) ou indirects (ailleurs), ce qui constitue un défi majeur en termes d'innovation. Certaines des technologies nécessaires sont à développer, de nombreuses autres à perfectionner et à rendre plus économiques.

#### Bioraffineries

Utilisant les plantes comme matières premières, ces raffineries du végétal, sur le modèle des raffineries de pétrole, permettraient de synthétiser des biocarburants et des molécules chimiques de base comme des biopolymères destinés à la pétrochimie. On parle aussi de chimie du végétal.

#### Le cas du transport aérien

Si le transport aérien a pour le moment un impact modéré sur la consommation énergétique et les émissions de GES, puisque la consommation de pétrole pour l'aviation ne représente que 8 à 9 % de la consommation totale, l'accroissement prévisible du trafic aérien pourrait conduire au doublement de son impact à l'horizon 2020.

A moyen terme, les filières biocarburants les plus probables pour fournir des bases de formulation des carburants aéronautiques sont les BtL (encadré Deuxième génération) et les produits de l'hydrotraitement des huiles végétales et des acides gras. Ces filières conduisent à des hydrocarbures paraffiniques exempts de composés aromatiques et de soufre. Après une opération d'hydro-isomérisation, ils pourront être utilisés en mélange dans les carburateurs conventionnels ou bien purs, moyennant des optimisations des formulations, notamment vis-à-vis de certains critères clés, tels que le pouvoir lubrifiant ou la compatibilité avec les matériaux. Aujourd'hui, des procédures de certification de carburants alternatifs pour l'aéronautique ont déjà été engagées avec succès, notamment par le pétrolier Sasol. Plusieurs expérimentations ont déjà été réalisées en élargissant le spectre des produits possibles.

A plus long terme, les carburants tels que le gaz naturel, le biogaz (encadré Méthanisation et biométhane) ou l'hydrogène sont des candidats, mais il s'agit de filières qui demandent de repenser entièrement la conception des avions, tous les circuits d'approvisionnement et de distribution, la logistique et la sécurité.

Pour faire face à cette demande en biocarburants en 2050, environ 160 millions d'hectares (Mha), principalement de terres agricoles et de prairies, devraient être nécessaires, sur les 375 à 750 Mha requis pour la production totale de biomasse. Cela représenterait 3 à 4 % des 6 milliards d'hectares utilisés aujourd'hui par l'agriculture. L'impact pourrait néanmoins être important en termes de déplacement des cultures vivrières et de changement d'affectation des sols si ces surfaces se retrouvaient concentrées dans certains pays ou certaines régions, particulièrement les zones de production alimentaire. Cette évolution interviendra alors même que la population mondiale atteindra probablement 9 milliards en 2050, et que les besoins alimentaires, en habitat, en infrastructures et dans l'industrie se traduiront par une tension très forte sur les espaces fonciers.

## Feuille de route biocarburants avancés

### Au niveau européen

L'Union européenne ambitionne de porter à une moyenne de **20 % la part des énergies renouvelables** dans sa consommation finale d'énergie à **l'horizon 2020 (contre une moyenne de 7% en 2005)**. Cela nécessite notamment un important accroissement de la contribution de la biomasse. La **directive européenne 2009/28/CE** fixe pour chaque Etat membre l'objectif contraignant d'atteindre 10 % d'énergies renouvelables dans sa consommation d'énergie pour les transports en 2020. Cet objectif est assorti de deux conditions importantes concernant les biocarburants :

- leur production doit respecter des critères de durabilité (*annexe 3*),
- en 2020, la production des biocarburants de deuxième génération (*encadrés ci-dessous*) doit être opérationnelle sur le plan industriel et commercial.

D'après les plans nationaux d'actions en faveur des énergies renouvelables, établis dans le cadre de l'application de cette directive, les biocarburants devraient contribuer pour une grande part à atteindre cet objectif, sous réserve du respect des conditions ci-dessus.

Un **autre scénario européen**, établi en 2006 par le **Biofrac** (Biofuels Research Advisory Council), un groupe d'experts issus des grandes entreprises et instituts de recherche, est encore plus ambitieux. Il propose qu'un quart des combustibles fossiles utilisés dans le secteur des transports soit remplacée par des biocarburants à l'horizon 2030.<sup>7</sup>

### De génération en génération

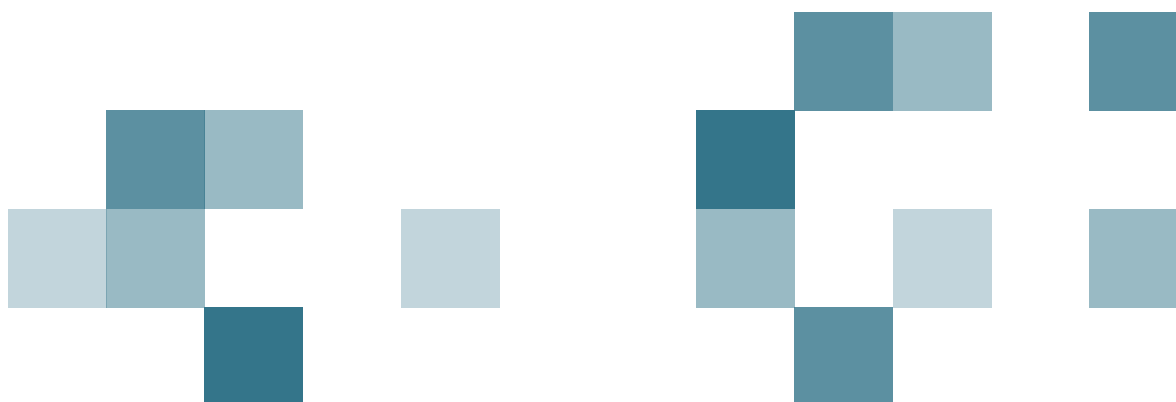
Aujourd'hui, la totalité des biocarburants consommés est produite par des **procédés dits de première génération**, ne valorisant que l'organe de réserve de la plante (grains de blé, de maïs, graine de soja, etc...). Si leurs bilans énergétiques et environnementaux sont positifs par rapport à ceux des carburants fossiles, les bilans d'émission de GES sont très sensibles aux effets du changement d'affectation des sols. Les procédés présentent un certain nombre d'inconvénients : ils limitent le champ des ressources mobilisables pour la production de biocarburants, ils peuvent interférer avec des filières à vocation alimentaire. En revanche, ces filières génèrent des coproduits protéinés valorisables en alimentation animale.

Depuis quelques années, des travaux de recherche et développement sont engagés pour amorcer une transition progressive et cohérente vers d'autres procédés et d'autres vecteurs énergétiques permettant :

- d'augmenter les rendements de production surfaciques,
- de valoriser l'intégralité de la plante et/ou mobiliser d'autres sources de biomasse,
- d'assurer une meilleure complémentarité entre les différents usages de la biomasse, en particulier vis-à-vis du secteur alimentaire,
- de réduire les pressions sur l'environnement.

Cette nouvelle génération de carburants requiert des technologies de transformation sophistiquées permettant de convertir une large gamme de ressources (agricoles et leurs sous-produits comme les pailles de céréales, forestières ainsi que les résidus de bois, cultures dédiées, déchets organiques, etc...).

A plus long terme, des biocarburants pourraient aussi être produits à partir de microalgues ou de micro-organismes.





## Deuxième génération

Les biocarburants dits de deuxième génération peuvent être produits à partir de la biomasse par **voie thermochimique** ou par voie biochimique.

La **voie thermochimique** permet de produire des **carburants de synthèse**, des **liquides**, selon une succession d'opérations : conditionnement de la biomasse, gazéification et traitement du gaz de synthèse pour obtenir du **BtL** (Biomass to Liquids), de type diesel ou kérosène.

Une autre **voie** permet de produire un carburant gazeux, dit **SNG ou BioSNG** (pour Synthetic Natural Gaz), un gaz naturel synthétique d'origine renouvelable qui pourrait être distribué via le réseau de gaz naturel ou incorporé dans le GNV (Gaz naturel pour véhicules).

La **voie biochimique** permet de produire de **l'éthanol**, principalement tiré du constituant principal de la plante, la cellulose. Les différentes étapes sont proches de celles utilisées pour les biocarburants de première génération à partir d'amidon de blé ou de maïs transformé en sucres simples (glucose), si ce n'est que la matière première lignocellulosique nécessite une préparation pour séparer la cellulose du reste et que sa transformation en glucose est bien plus complexe. Les étapes suivantes sont les mêmes : fermentation des sucres en éthanol, distillation et purification de l'éthanol.

## Au niveau français

Le comité opérationnel du Grenelle de l'environnement consacré aux énergies renouvelables (Comop n°10) a prévu qu'il serait nécessaire de mobiliser **près de 10 Mtep de biomasse supplémentaire** pour contribuer à atteindre les **objectifs 2020** en matière d'utilisation des énergies renouvelables.

Les enjeux concernent l'indépendance énergétique et l'indépendance technologique, à travers :

- la limitation de la dépendance aux énergies fossiles et la réduction des émissions de GES dans les transports,
- la mise en place d'une économie plus durable, avec la création d'activités,
- l'innovation industrielle et le positionnement sur les marchés à l'export.

A l'horizon 2020, la France envisage une production indicative de 200 milliers de tonnes équivalent pétrole (ktep) de biocarburants lignocellulosiques (encadré ci-dessus). En se basant sur les données issues du projet européen Renew<sup>8</sup>, **atteindre ce niveau de production de biocarburants lignocellulosiques en 2020 permettrait d'employer directement 1 200 personnes environ**, et impacterait indirectement l'activité d'environ 2 400 personnes, en faisant l'hypothèse d'une production exclusive de biodiesel de synthèse (obtenu par voie thermochimique).



8 - L'étude RENEW21 (Renewable Fuels for Advanced Powertrains), coordonnée par Volkswagen a été réalisée par un consortium de 32 partenaires européens entre 2002 et 2006. Elle propose une évaluation environnementale et économique de différentes technologies de production de biocarburants de seconde génération. [www.renew-fuel.com](http://www.renew-fuel.com).

## Feuille de route biocarburants avancés

La France dispose-t-elle de 10 Mtep de biomasse supplémentaire ? Le **gisement additionnel potentiel** mobilisable pour une valorisation énergétique varie entre **15,7 et 20 Mtep/an** en considérant les trois ressources existantes suivantes (annexe 4) :

- **produits forestiers** (plaquettes forestières, produits connexes des industries du bois et produits bois en fin de vie) : entre 6,2 et 10,2 Mtep,
- **déchets organiques** (huiles et graisses, déchets ménagers, déchets agricoles et des industries agro-alimentaires, boues de stations d'épuration) et **farines animales** : entre 5,2 et 5,5 Mtep,
- **résidus agricoles** (dont pailles) : 4,3 Mtep.

Les **cultures énergétiques** (taillis à courte rotation, triticales) peuvent constituer un gisement potentiel supplémentaire : elles pourraient contribuer à hauteur de 1 à 5 Mtep/an selon le prix du bois. En prenant en compte ces cultures, le gisement additionnel potentiel global varierait alors **entre 16,7 et 25 Mtep/an**.

Sur ce total, pour répondre aux objectifs du Grenelle de l'environnement, on estime qu'environ 11,6 Mtep/an seront consacrés aux nouveaux besoins de chaleur et d'électricité, ce qui laisse, selon les hypothèses, entre 5,1 et 13,4 Mtep/an disponibles pour la chimie et les biocarburants.

La France dispose du troisième potentiel sylvicole et du premier potentiel agricole européens. Elle est en outre la deuxième puissance mondiale en termes d'espace maritime en incluant les départements, régions et territoires d'outre-mer. Cependant elle a accumulé du retard dans le développement des filières de production d'énergie [cogénération, méthanisation (encadré ci-dessous)]. Elle accuse également un manque d'organisation dans la gestion des ressources exploitables : actuellement 20 Mt (environ 5 Mtep) ne sont pas exploitées.

### Méthanisation et biométhane

La **méthanisation**, ou fermentation méthanique, est le **processus naturel biologique de dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène** (digestion anaérobie). On l'observe dans les sédiments, les marais, les rizières, ainsi que dans le tractus digestif de certains animaux (termites, ruminants...). La matière organique dégradée est transformée à 90 % en méthane (CH<sub>4</sub>) et en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) par un écosystème microbien complexe.



La méthanisation peut aussi être mise en œuvre dans un digesteur pour dépolluer des rejets chargés en matière organique aussi divers que les eaux usées, les boues de stations d'épuration, les déjections animales, les déchets de l'industrie agro-alimentaire, les ordures ménagères, les déchets agricoles, etc...

Le **biogaz** produit est composé essentiellement de méthane (principal composant du gaz naturel) et de gaz carbonique. Selon les rejets traités, des quantités variables de vapeur d'eau et de sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S) sont présentes. Ce biogaz peut être valorisé sous forme d'énergie thermique ou électrique ou, via une étape de séparation supplémentaire (condensation de la vapeur d'eau, désulfuration et épuration), être mis aux spécifications gaz naturel avec un pouvoir calorifique et une composition équivalente. **Biométhane et BioSNG** sont deux appellations pour un gaz identique, le premier étant associé à la filière méthanisation, le second à la filière thermochimique (encadré Deuxième génération).





Côté industriel, la France profite de la présence de leaders industriels dans les secteurs de l'énergie, de la chimie et des services, mais possède un nombre limité de PME innovantes en chimie du végétal et biotechnologies blanches (encadré ci-dessous).

### Biotechnologies blanches et vertes

En Europe, les grandes branches de biotechnologies ont été regroupées sous des codes couleur. **Les biotechnologies vertes** regroupent les biotechnologies, parfois très anciennes, qui intéressent **l'agriculture, l'élevage et l'agroalimentaire**. Elles sont tissulaires, cellulaires ou moléculaires. Elles comprennent les techniques de transgénèse végétale ou animale avec lesquelles on obtient des organismes génétiquement modifiés (O.G.M.). **Les biotechnologies blanches** désignent, par opposition, une production en milieu confiné. Elles utilisent les **systèmes biologiques** pour produire des molécules à travers la biocatalyse (avec des enzymes) et la fermentation à partir de ressources renouvelables et de produits d'origine organique.

Concernant les technologies de production de biocarburants de deuxième génération, le développement de programmes technologiques spécifiques, dans le cadre de l'Agence de l'innovation industrielle puis dans celui du Fonds démonstrateurs de recherche de l'ADEME, a pour objectif de combler le retard sur les savoir-faire technologiques avec **trois projets-phares (FuturoL, Gaya et BioTFuel)** évoqués au chapitre 5. Quant aux biocarburants obtenus à partir de microalgues et de micro-organismes, malgré une recherche française performante (première pour les publications, deuxième pour les brevets), la communauté scientifique, technique et industrielle, reste à structurer.

## > 2. Périmètre

Cette feuille de route couvre un horizon temporel jusqu'en **2050**, avec un **stade intermédiaire en 2020**, et analyse l'ensemble des transformations de la biomasse en biocarburants avancés, qu'ils soient liquides, solides ou gazeux :

- pour des usages à finalité énergétique,
- faisant appel à plusieurs filières technologiques,
- mobilisant et utilisant la diversité des bioressources.

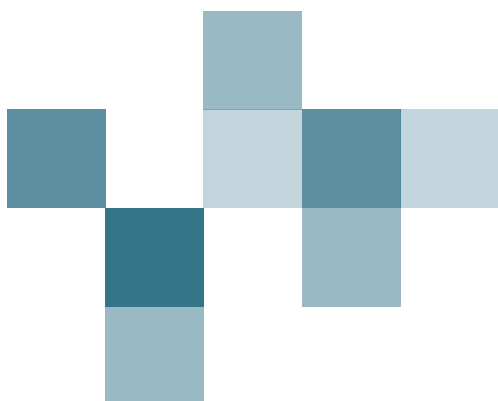
Cela englobe notamment les biocarburants issus de la biomasse lignocellulosique, des algues et de manière plus générale du vivant. Cela fait appel à des technologies en cours de développement industriel, mais aussi à de nouvelles technologies en rupture par rapport à l'existant, utilisant tout le potentiel des biotechnologies.

### Usages énergétiques

Les **biocarburants avancés** seront utilisés dans le secteur des **transports** (terrestres, mais aussi aériens, maritimes, fluviaux, voire ferroviaires) et pourront être envisagés comme **combustibles pour des applications stationnaires**. Ils viendront en substitution ou en complément des actuels vecteurs énergétiques :

- diesel,
- kérosènes et carburéacteurs
- essences,
- carburants et combustibles gazeux (hydrogène, gaz naturel véhicule (GNV), biométhane...).

Ils sont destinés à être transformés en énergie mécanique, thermique ou électrique dans différents convertisseurs (moteurs, réacteurs pour l'aéronautique, piles à combustible). Notons que le secteur aéronautique aura besoin pour longtemps encore de carburants liquides (car à forte densité énergétique) du fait du manque de solutions de substitution par comparaison avec le transport routier par exemple. Leur impact sur l'environnement devra néanmoins être limité (encadré Le cas du transport aérien).



## Feuille de route biocarburants avancés

### Filières technologiques

Suivant leurs usages et leurs spécificités, la production de biocarburants avancés fera appel à **plusieurs technologies de transformation** (encadré Deuxième génération) et/ou à leur combinaison dans des **procédés hybrides** :

- **voies thermochimiques**, autothermique et allothermique (avec apport d'énergie externe), y compris le cotraitement avec des charges fossiles,
- **voies biochimiques et/ou biotechnologiques**, y compris la production directe par des êtres vivants via des systèmes autotrophes (avec des organismes capables de synthétiser les matières organiques qui les composent à partir d'éléments minéraux comme le font la plupart des plantes chlorophylliennes) ou hétérotrophes (avec des espèces qui prélèvent dans le milieu extérieur les substances organiques dont elles ont besoin : cas des animaux, des bactéries, de certains végétaux supérieurs parasites, etc...).

La production de biocarburants génère immanquablement des **coproduits** dont la **valorisation s'avère cruciale** pour obtenir des externalités positives (environnementales, sociales et économiques). Même s'ils ne sont pas étudiés de façon approfondie dans le cadre de cette feuille de route, ces flux de matière devront nécessairement être considérés.

### Bioressources

Toutes les sources de biomasse devront être mobilisées pour réduire les concurrences d'usage et d'occupation des sols et espaces aquatiques :

- ressources agricoles, y compris les cultures dédiées,
- ressources forestières et leurs sous-produits,
- microalgues, macroalgues,
- autres micro-organismes,
- déchets organiques (huiles, graisses, déchets ménagers, déchets agricoles et des industries agroalimentaires, boues de stations d'épuration, bois adjuvantés).

Leur exploitation devra s'accompagner, sur l'ensemble du processus de production, d'études d'impacts environnementaux (émission de GES, consommation d'énergie fossile, d'eau, impact sur la biodiversité, sur la santé humaine), sociétaux [concurrence d'usage (dont alimentaire), emplois créés ou maintenus, développement rural] et stratégiques (opportunités d'alliance avec des partenaires plus avancés, création d'un leadership français).

### Acteurs

Un certain nombre d'acteurs seront amenés à intervenir dans ces développements et à y jouer un rôle varié et évolutif, à des échelles de temps différentes :

- les chercheurs et les technologues,
- les grands groupes industriels (pétroliers, transformateurs du bois, énergéticiens, motoristes...),
- les PME et les start-up,
- les pôles de compétitivité,
- les acteurs de la réglementation, de la normalisation, de la certification et de la législation,
- les acteurs financiers, dont la puissance publique,
- les usagers.

Les stratégies et les regroupements sont essentiels pour rechercher les cofabrications de produits et d'énergie ainsi que des synergies opérationnelles entre énergie et environnement. L'implication des grands groupes apparaît essentielle pour assurer les changements d'échelle, les aspects logistiques et la gestion des flux intégrés, en acceptant les prises de risques que requiert l'innovation technologique.



### > 3. Les visions prospectives

Les visions à long terme (2050) ont vocation à décrire, à traits grossiers, les **modalités de déploiement des options technologiques, organisationnelles et socio-économiques** qui, selon le groupe d'experts, permettraient aux biocarburants d'atteindre des objectifs ambitieux tels que la division par 4 des émissions de GES à l'horizon 2050 par rapport à 1990 (objectif « facteur 4 » issu de la loi Programme d'orientation de la politique énergétique française du 13 juillet 2005).

La priorité reste néanmoins, pour les transports comme pour les autres secteurs consommateurs d'énergie, la réduction des consommations et l'efficacité énergétique, entraînant de fait l'évolution des modes de transport traditionnels et l'émergence de services de mobilité. La place des biocarburants avancés est bien à inscrire dans ce paysage en évolution.

Ces **visions n'ont pas la prétention de décrire ce que sera la réalité à l'horizon 2050**, mais plutôt de définir le champ des possibles pour ensuite en déduire un large ensemble de verrous, de priorités de recherche et de besoins de démonstrateurs de recherche et d'expérimentation associés à leur réalisation. La réalité sera très probablement une combinaison des visions établies dans cette feuille de route.

Le groupe d'experts a introduit un **scénario de moyen terme (horizon 2020)**, qui a vocation à :

- décrire la manière d'atteindre concrètement les objectifs français et européens en matière d'incorporation d'énergies renouvelables, et plus particulièrement de biocarburants, dans la consommation d'énergie du secteur des transports (niveau de production, surface cultivable mobilisée, nombre approximatif de sites de production),
- mettre en évidence les degrés de liberté et les éventuels effets irréversibles introduits par l'atteinte des objectifs du Grenelle de l'environnement sur les options technologiques, organisationnelles et socio-économiques mobilisables.

### Le scénario 2020

Dans le cadre de l'application de la directive européenne 2009/28/CE, la **France** a établi un **plan national d'actions en faveur des énergies renouvelables pour la période 2009-2020** (et une référence de départ en 2005). Il détaille les objectifs de consommation d'énergies renouvelables dans le secteur des transports, donne une trajectoire indicative de progression sur cette période et prévoit :

- **l'utilisation accrue de biocarburants** avec un objectif de consommation de 10,5 % d'énergies renouvelables à l'horizon 2020, les biocarburants apportant la contribution la plus importante,
- **la mise en service de véhicules électriques**, l'électricité provenant en partie de sources renouvelables selon l'évolution du mix électrique national. L'objectif est de mettre en circulation 450 000 véhicules électriques (soit 1,5 % du parc automobile) d'ici à 2015 et 2 millions de véhicules électriques (soit 6,7 % du parc automobile) en 2020.

Tableau 1 : Prévission de croissance de consommation de biocarburants (unité : Mtep)

	2005	2012	2020
<b>Situation 2005 et objectif 2020</b>	0,403	3,102	3,952
<b>Effort additionnel par rapport à 2005</b>	-	2,558	3,408

Source : Plan français d'actions en faveur des énergies renouvelables sur la période 2009-2020



## Feuille de route biocarburants avancés

Dans cette option, **la majeure partie des biocarburants consommés** sur le territoire national est **produite en France**. Le recours aux importations reste relativement limité (50 ktep pour le bioéthanol et ETBE – encadré Ethanol et biodiesel –, soit un maximum de 9 % et 400 ktep pour le biodiesel, soit un maximum de 18 %) dans le but d'utiliser la production de biocarburants comme :

- une voie de diversification des **débouchés de l'agriculture française** dans un contexte européen et international incertain (nouvelle politique agricole commune, tension sur les accords commerciaux mondiaux dans le secteur de l'agriculture),
- un moyen d'encourager les **acteurs de l'industrie** (agro-alimentaire, pétrolière, chimique) à engager des investissements industriels pour de **nouvelles valorisations de la biomasse**.

Pour atteindre ces objectifs, des **travaux significatifs de recherche et de démonstrateurs** sont engagés sur la période **2010-2015** pour tester en condition d'usages réels, mais à échelle réduite, des options technologiques visant à permettre le **déploiement industriel d'unités de deuxième génération à l'horizon 2020**.

Des travaux de recherche et des expérimentations sont également engagés pour accroître la « **productivité cellulosique** » de certaines espèces végétales comme les taillis à courte rotation ou les cultures cellulosiques, pour :

- améliorer les rendements matières (encadré ci-dessous) des différents procédés de production,
- réutiliser et transformer la lignine, dont l'extraction est fortement pénalisante.

### Rendement matière

Le **rendement** est, en **agriculture**, la quantité de produit récolté sur une surface cultivée donnée. Dans le cas d'une culture fourragère, dans laquelle on récolte la culture pour sa matière sèche comme les herbes de prairie, le maïs, on exprimera le rendement en unité de masse de matière sèche par unité de surface, par exemple en **tonnes de matière sèche par hectare (tms/ha)**.

Tableau 2 : Ordre de grandeur des rendements matières et efficacités énergétiques prévus en 2020 pour les différentes voies de transformation (encadré Deuxième génération)

Voie de transformation	Rendement matière (par rapport à la matière sèche)	Efficacité énergétique
<b>Voie thermochimique</b> voie BtL (C5+ <sup>9</sup> ) voie bioSNG (C1+ <sup>9</sup> )	15 % à 17 % 25 % à 35 %	35 % à 40 % 56 % (démonstré)
<b>Voie biochimique</b> (sans C5 <sup>9</sup> )	12 % à 16 %	25 % à 30 %

Source : Groupe d'experts

D'un point de vue industriel, des investissements significatifs (environ 2 milliards d'euros) ont été effectués pour construire des installations de production de première génération qui resteront largement dominantes pour la production française à l'horizon 2020.



9 - Rendements utiles ne prenant en compte que la conversion en substances directement visées pour l'usage recherché : rendements en C5+ pour le BtL, où seuls les composés avec 5 atomes de carbone et plus sont comptabilisés (hors gaz dont le méthane, car ils n'entrent pas dans la composition des carburants liquides produits par cette voie), rendement en C1+ pour le bioSNG, où seuls les composés avec 1 atome de carbone et plus sont comptabilisés.

Tableau 3 : Forces et faiblesses du scénario 2020

Forces	Faiblesses
Objectifs ambitieux de croissance de la production, contribuant à la sécurisation des plans d'investissement	Soutien significatif aux filières de 1re génération qui risque d'augmenter les barrières à l'entrée pour les technologies avancées (risque de blocage technologique)
Volonté d'inscrire le développement des biocarburants dans une politique de diversification des débouchés des produits agricoles nationaux (faible recours aux importations)	Absence de recours au commerce international qui risque d'augmenter le coût global des biocarburants (on ne tire pas profit des avantages comparatifs des pays étrangers)
Scénario reposant sur une vision traditionnelle de l'usage (secteurs des transports routiers) et de la production des biocarburants, remettant faiblement en cause les acteurs économiques (pétrolier, agriculteur/sylviculteur, chimiste) <sup>10</sup>	Faible interaction avec les autres déterminants des usages des biocarburants [électrification ou pas du parc de véhicules, évolution des pratiques de mobilité, segmentation du parc automobile selon les usages (véhicules urbains)], demande du transport aérien à prendre en compte

Source : Groupe d'experts

## La vision prospective 2050

### Quelques ordres de grandeur

Rappelons les indications données dans la nouvelle édition du rapport « Energy Technology Perspectives » de l'AIE (2010) pour la production mondiale de biocarburants en 2050 :

- près de 160 Mtep (principalement des biocarburants de première génération), soit 4 % de la consommation d'énergie du secteur des transports selon le scénario tendanciel,
- 745 Mtep (principalement des biocarburants avancés) dans le scénario Blue Map, soit 27 % de la consommation d'énergie du secteur des transports.

Pour atteindre de tels niveaux de production, le rapport souligne que **deux types de verrous doivent être levés** :

- ceux en lien avec les **technologies** biochimiques ou thermochimiques de transformation de la biomasse ; ,
- ceux en lien avec **l'organisation et le management des filières** (production et collecte de la biomasse, conditionnement, stockage, transport et distribution).

En complément, voici quelques indications sur la **taille des marchés envisagés** à différentes échelles géographiques et temporelles (Tableau 4).

Tableau 4 : estimation de la taille des marchés à l'horizon 2020 et 2050

Horizon temporel	Echelle géographique	Objectifs indicatifs <sup>11</sup>	Productions projetées <sup>12</sup>	Marchés potentiels
A moyen terme (2020)	Mondial	-	E : 10,4 Mtep B : 13,6 Mtep	entre 7,5 et 8,8 Md\$ entre 10,6 et 13,1 Md\$
	National	E/B : 200 ktep	-	entre 144 et 204 M\$
		M : 50 ktep	-	entre 28 et 55 M€
A long terme (2050)	Mondial	-	120,6 Mtep 491,2 Mtep	entre 76,8 et 87 Md\$ entre 313 et 384 Md\$
	National	-		-

E : éthanol, B : biodiesel, M : biométhane

10 - Ce point s'explique en partie par l'horizon temporel resserré qui laisse peu de temps à des acteurs portant des visions radicalement différentes.

11 - Plan national d'action en faveur des énergies renouvelables (2010), établi dans le cadre de l'application de la directive 2009/28/CE

12 - Les projections de production mondiale correspondent à un scénario ambitieux de réduction des émissions de GES à horizon 2050 (scénario Blue Map, AIE, ETP 2008)

## Feuille de route biocarburants avancés

Quel que soit le niveau de production de biocarburant visé, **les exigences de durabilité devront être respectées**. Parmi celles-ci la directive 2009/28/CE fixe des seuils minimaux de réduction des émissions de GES par rapport aux fossiles de 35 % dès 2011 puis de 50 % en 2017. Elle donne aussi des valeurs indicatives pour les carburants du futur, à l'horizon 2020 : selon les filières, elles s'échelonnent entre 76 % (éthanol de bois cultivé) et 95 % (carburant de synthèse à partir de déchets de bois). Toutefois, ces biocarburants n'existant pas encore ou n'étant pas produits à l'échelle industrielle, ces valeurs restent théoriques, établies sur la base d'éléments provenant d'unités pilotes ou d'installations de démonstration, voire de laboratoires. Elles peuvent donc être considérées également comme des objectifs à plus long terme.

### Les paramètres clés

Le déploiement proposé des biocarburants avancés à l'horizon 2050 repose sur l'identification de paramètres clés, des variables dont on sait que l'évolution contrastée aboutira à long terme à des visions radicalement différentes. Cette feuille de route ayant notamment vocation à éclairer les décideurs, le choix a été fait de limiter le nombre de paramètres clés et donc de visions qui en découlent. Ces paramètres clés ne prétendent pas à l'exhaustivité, mais visent plutôt à mettre en avant les quelques variables qui, pour le groupe d'experts, seront de nature à infléchir significativement le déploiement des biocarburants avancés à l'horizon 2050. Ainsi, parmi les différents paramètres discutés, **deux semblent d'importance majeure**.

### 1er paramètre clé : l'ampleur et la rapidité des avancées scientifiques et technologiques dans les domaines en lien avec la production des biocarburants.

Sur le long terme, les technologies mobilisables pour la production de biocarburants avancés seront fortement influencées par la nature et la rapidité des avancées scientifiques et technologiques en **chimie du végétal, biotechnologies, génomique des plantes et des micro-organismes, biologie végétale, intensification et intégration des procédés...**

Au-delà de la nature des technologies et procédés mobilisables (y compris pour les procédés hybrides), **deux variables auront un impact** sur le niveau de production de biocarburants :

- **l'augmentation du champ des ressources mobilisables** (graines, biomasse lignocellulosique, algues, micro-organismes, graisses animales),
- **l'amélioration de l'efficacité des procédés** (meilleurs rendements de transformation).

Tableau 5 : Ordre de grandeur des rendements matières et des efficacités énergétiques attendus à 2050, selon les voies de transformation

Voie de transformation	Rendement matière (par rapport à la matière sèche)	Efficacité énergétique
<b>Voie thermochimique</b> voie BtL (C5+ <sup>9</sup> ) voie BioSNG (C1+ <sup>9</sup> )	30 % 45 %	50 % à 55 % 60 % à 65 %
<b>Voie biochimique</b> (avec C5 <sup>9</sup> )	30 %	55 %

Source : Groupe d'expert (estimation)

On s'attend à ce que ces améliorations techniques s'accompagnent de gains environnementaux comme représenté dans la figure ci-dessous).

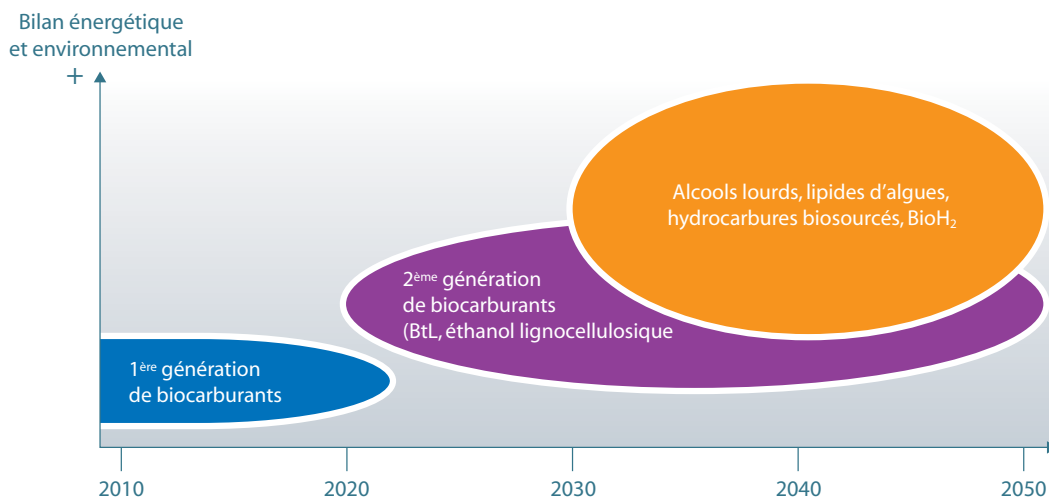


Figure 1 : Vision prospective du déploiement des biocarburants avancés



## 2d paramètre clé : la nature et l'ampleur des contraintes pouvant influencer sur la production de biocarburants avancés.

Le terme « contraintes » est entendu au sens large. Il regroupe les paramètres, questions, défis, incertitudes pouvant limiter ou au contraire favoriser l'exploitation des biocarburants avancés. Ces contraintes doivent être vues sous un angle dynamique : leur importance globale et relative pourra évoluer dans le temps en fonction des avancées de la recherche, des politiques agricoles et forestières, commerciales, publiques dans les différentes régions du monde. Parmi les principales, on citera :

- l'existence et le niveau des soutiens financiers au développement des filières biocarburants,
- la nature des politiques commerciales internationales encadrant le commerce des biocarburants et/ou des matières premières nécessaires à leur production,
- le spectre et le volume des ressources mobilisables en biomasse,
- les surfaces de terres arables mobilisables sans déstabiliser le fonctionnement des marchés des denrées alimentaires, ni provoquer des changements massifs d'affectation des sols,
- la concurrence des usages de la biomasse (chauffage, construction, alimentation, ameublement, industrie...),
- les impacts additionnels négatifs sur la biodiversité et les ressources en eau,
- le bilan environnemental global (évaluation du type analyse de cycle de vie du « puits à la roue », études d'impacts locaux) lié à la production et à la consommation de biocarburants,
- les questions d'acceptabilité sociale de la pénétration des biocarburants avancés sur le marché.

Le tableau 6 présente **4 visions tranchées du déploiement des biocarburants à long terme**, établies à partir des variations contrastées de ces deux paramètres clés.

Tableau 6 : 4 visions contrastées du déploiement des biocarburants avancés

	Technologies reposant faiblement sur les différentes avancées scientifiques et technologiques	Technologies reposant fortement sur les différentes avancées scientifiques et technologiques
Fort niveau de contrainte sur la production de biocarburants	Vision 1 : Les biocarburants comme option de transition	Vision 2 : Biocarburants high-tech dans un environnement très contraint
Faible niveau de contrainte sur la production de biocarburants	Vision 3 : Biomasse ligno-cellulosique optimisée	Vision 4 : Technologies maîtrisées et diversification des usages des biocarburants

Source : Groupe d'experts

## Feuille de route biocarburants avancés

### Descriptif des visions 2050

#### 1. Les biocarburants comme option de transition

Dans cette vision, les avancées scientifiques et techniques dans les différents domaines importants pour les biocarburants (biologie, catalyse, génomique, intensification et intégration des procédés) ne sont pas suffisantes pour influencer avant 2020 le choix d'investissement en matière de procédés de fabrication des biocarburants. Les installations de production reposent donc très largement sur des **voies traditionnelles** avec un faible recours aux technologies les plus avancées. Les **rendements matières et énergétiques** des procédés de production de biocarburants restent **faibles**, les **bilans environnementaux évoluent peu** par rapport à la situation actuelle.

Les **ressources mobilisables** pour la production de biocarburants **restent limitées aux ressources traditionnelles** (plantes sucrières, amylacées) avec toutefois quelques installations de production permettant de transformer de la biomasse lignocellulosique en biocarburant. Construites entre 2020 et 2030, elles ont du mal à pénétrer le marché du fait d'une faible rentabilité économique, de contraintes très fortes sur la production de biocarburants et d'évolutions qui limitent leur intérêt comme les véhicules électriques et hybrides rechargeables, les véhicules urbains et les services de mobilité associés.

Les contraintes autour de la mobilisation de la ressource s'expliquent simultanément par :

- la nature des procédés de production qui ne permettent ni de mobiliser un large spectre de ressources (biomasses hétérogènes, microalgues) ni d'avoir des rendements de conversion élevés en carbone,
- le faible recours, voire l'absence de recours à de la biomasse importée (ex : canne à sucre), du fait des politiques commerciales française et européenne restrictives,
- un scepticisme de l'opinion publique vis-à-vis des biocarburants qui n'encourage pas les décideurs à soutenir le développement de cette filière.

Dans ce cadre, les biocarburants restent une option marginale dans la transition énergétique vers une société bas carbone fossile. Leur usage reste limité au secteur du transport terrestre. Ils sont en concurrence directe avec les autres options et notamment les nouveaux véhicules et services de mobilité associés.

#### 2. Biocarburants high-tech dans un environnement très contraint

Dans cette vision, les **contraintes sur les ressources** restent **fortes**. Elles s'expliquent par des **raisons socio-économiques** (politiques commerciales restrictives, crispation des décideurs et de l'opinion publique autour de l'impact environnemental et sanitaire des biocarburants). Des **avancées scientifiques et technologiques** permettent néanmoins une **production de biocarburants « optimisée »** grâce à :

- la **forte augmentation des rendements matières et énergétiques** des procédés de transformation et de production des biocarburants,
- **l'élargissement du champ des ressources mobilisables**.

Les filières de production sont compatibles avec des exigences très fortes en matière environnementale (consommation d'espace, d'eau, impact sur la biodiversité et sur les changements d'affectation des sols).

La contrainte sur les ressources, relativement moins forte que dans la vision précédente, limite tout de même l'usage des biocarburants dans le secteur des transports routiers et maritimes. Leur **très bonne qualité** et leur **coût élevé** oriente leur utilisation vers les secteurs de consommation où les substituts au pétrole sont les plus difficiles à trouver : plus particulièrement, le transport aérien.

Pour atteindre les objectifs ambitieux de réduction des émissions de gaz à effet de serre, le transport routier doit s'appuyer sur d'autres options que les biocarburants, telles que celles présentées dans l'encadré ci-dessous, extraites de la feuille de route préparée par l'ADEME sur la thématique « Mobilité ».

## Transport et mobilité

Selon les **données de l'AIE**, une **évolution tendancielle** des consommations d'énergie du secteur des **transports de personnes et de marchandises** (sans changements importants dans la politique énergétique) se traduirait par une augmentation de plus de 130 % entre 2006 et 2050. Les **produits pétroliers**, dont les carburants de synthèse BtL, CtL (Coal To Liquids) issu du charbon et GtL (Gaz To Liquids) issu du gaz naturel, représenteraient **94 % de cette consommation**.

Les consommations d'énergie du secteur mondial des transports passeraient d'environ 2 000 Mtep en 2006 à 4 500 Mtep en 2050. Les émissions de GES passeraient d'environ 5 000 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> (MtCO<sub>2</sub>) à 12 000 MtCO<sub>2</sub> en 2050. Un tel scénario n'est naturellement pas compatible avec des objectifs ambitieux de réduction des émissions de GES, car il imposerait un effort démesuré aux autres secteurs émetteurs (bâtiments résidentiels et tertiaires, industries, agriculture).

Différentes voies sont mobilisables dans le secteur des transports. Elles peuvent schématiquement être décomposées entre des actions sur « l'offre d'énergie » ou sur « la demande d'énergie » du véhicule. **Côté offre d'énergie**, on ne modifie pas la nature du véhicule (on garde des véhicules classiques multi-usages), mais on agit sur l'**efficacité énergétique** du groupe motopropulseur ou sur le **vecteur énergétique** alimentant le véhicule. **Côté demande d'énergie** du véhicule, il s'agit de produire des **véhicules moins consommateurs** en jouant sur le poids du véhicule (véhicules allégés), sa fonctionnalité (nouveaux véhicules urbains) et sur les modes d'utilisation (nouveaux services de mobilité). Les évaluations actuelles de l'AIE indiquent que des actions ambitieuses sur l'offre d'énergie des véhicules permettraient de limiter la hausse des émissions de GES : elles passeraient de 5 000 à 6 000 MtCO<sub>2</sub> d'ici à 2050. Les gains additionnels pour baisser les émissions de GES en valeur absolue seraient à chercher du côté des actions sur la demande d'énergie du véhicule.

### 3. Biomasse lignocellulosique optimisée

Comme dans la vision 1, les **avancées scientifiques et techniques** concernant les biocarburants restent **limitées** et **arrivent surtout trop tard** pour influencer significativement les décisions d'investissement.

A contrario, des **progrès significatifs** sont obtenus sur les **rendements énergétiques et rendements matières des technologies traditionnelles**. Cela permet d'**élargir le champ des ressources mobilisables** en exploitant pleinement la **biomasse lignocellulosique**, en particulier grâce à des cultures dédiées, comme les taillis à courte rotation, conduites et exploitées de manière à limiter leur impact sur les consommations d'eau, les changements d'affectation des sols et la biodiversité. De nouvelles unités de production viennent s'insérer dans un outil industriel existant, comme par exemple le raffinage pétrochimique et la trituration de biomasse.

En parallèle, du point de vue de l'ouverture aux ressources extérieures, des **accords commerciaux** seront mis en place entre l'Europe et les groupes de pays exportateurs de biocarburants, mais aussi de biomasse lignocellulosique, quand ils disposent de politiques de traçabilité et de durabilité.

L'ensemble de la biomasse lignocellulosique mobilisée (en France et importée) fait l'objet de **prétraitements poussés**. Des **chaînes logistiques** sont mises en place pour garantir, d'une part, un **approvisionnement optimisé des unités de transformation et de production** (collecte, transport et distribution) et, d'autre part, des **méthodes durables d'exploitation**. C'est le cas pour les surfaces forestières, par exemple dans les pays émergents avec des droits de propriété, des systèmes de rémunération des services environnementaux, des contrats de concession sur le long terme, etc... Cela doit s'accompagner d'une réorganisation de l'ensemble de l'exploitation de la filière bois (bois énergie, pâte à papier, ameublement, bois de construction...).

### 4. Technologies maîtrisées et diversification des usages des biocarburants

Comme dans la vision 2, les **avancées scientifiques et technologiques** en matière de biotechnologies ouvrent de nouvelles possibilités pour la production de biocarburants. Elles sont suffisamment **marquantes** pour convaincre les décideurs et l'opinion publique de relâcher la contrainte sur les ressources mobilisables et un consensus se fait jour sur le **partage de la ressource** entre les usages concurrents.

Dans cette vision, les **biocarburants** jouent pleinement leur rôle dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports. Ils apparaissent comme une **option à part entière** (et non comme une option de transition) toujours en s'inscrivant dans la dynamique générale de réduction importante des consommations d'énergie. Néanmoins, ils s'insèrent bien dans le panel de solutions citées précédemment (véhicules électriques, transferts modaux, services de mobilité, véhicules urbains).

## Feuille de route biocarburants avancés

Les tableaux suivants (7 et 8) résument les caractéristiques et les acteurs concernés dans les 4 visions décrites ci-dessus :

Tableau 7 : Principales caractéristiques des différentes visions

Intitulé des visions	Principales caractéristiques
<b>Vision 1 :</b> les biocarburants comme option de transition	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peu d'avancées scientifiques et techniques significatives</li> <li>• Les bilans économiques et environnementaux des biocarburants restent mitigés</li> <li>• Les biocarburants restent une option marginale au regard de l'ensemble des leviers mobilisés pour la réduction des émissions de GES</li> </ul>
<b>Vision 2 :</b> biocarburants high-tech dans un environnement très contraint	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Production optimisée</li> <li>• Biocarburants réservés aux usages non substituables (notamment transports aériens)</li> <li>• Les usages substituables font appel à d'autres options (transferts modaux, services de mobilité, véhicules urbains)</li> </ul>
<b>Vision 3 :</b> biomasse lignocellulosique optimisée	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recours à des technologies éprouvées.</li> <li>• Adossement des unités de production à des dispositifs de production existants (pétrochimie, pâte à papier)</li> <li>• Apparition d'acteurs industriels intégrés de la ressource à la production et à la distribution</li> </ul>
<b>Vision 4 :</b> technologies maîtrisées et diversification des usages des biocarburants	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les biocarburants sont une option significative dans les politiques de réduction des émissions de GES (quelques dizaines de %)</li> </ul>

Source : Groupe d'experts

Tableau 8 : Principaux acteurs porteurs des différentes visions

Intitulé des visions	Principaux acteurs
<b>Vision 1 :</b> les biocarburants comme option de transition	Acteurs actuellement présents dans la production de biocarburants de 1re génération, industrie agro-alimentaire
<b>Vision 2 :</b> biocarburants high-tech dans un environnement très contraint	Start-up, PMI-PME, pétroliers, énergéticiens, distributeurs, chercheurs, aéronautique, papetiers
<b>Vision 3 :</b> biomasse lignocellulosique optimisée	Groupements d'agriculteurs liés aux forestiers : ils se spécialisent sur la ressource et s'allient aux énergéticiens pour l'industrialisation
<b>Vision 4 :</b> technologies maîtrisées et diversification des usages des biocarburants	Industriels de la chimie du végétal, pétroliers, énergéticiens, fournisseurs de biomasse, logisticiens, chercheurs

Source : Groupe d'experts



## > 4. Verrous

Ce chapitre identifie les verrous d'ordre organisationnel ou technologique à lever pour atteindre les objectifs des scénarios décrits précédemment.

### **Verrous organisationnels**

Sur une surface terrestre émergée de 14 900 millions d'hectares :

- 6 200 ne sont pas couverts de végétation,
- 1 500 sont des terres arables,
- 4 100 sont occupés par les forêts, avec une exploitation moyenne de seulement 1 m<sup>3</sup>/ha/an,
- 3 100 sont des prairies et pâturages permanents<sup>13</sup>.

Ils peuvent également être répartis entre « sols productifs » (3 300 millions d'hectares, soit 22%) et « non productifs » (11 600 millions d'hectares, soit 78%).

Un des principaux verrous concerne la **compétition entre usage alimentaire versus non alimentaire**. Face à une population mondiale en pleine expansion, il faut être prudent en matière d'occupation des sols, en particulier en termes de conversion accélérée de surfaces alimentaires en non alimentaires, sachant que les sols sont également de plus en plus sollicités par la pression foncière (construction de logements, d'infrastructures type route).

### **L'exploitation des résidus de la production agricole et des déchets organiques**

Les résidus agricoles sont constitués des parties végétales laissées au sol après la récolte. Environ 60 % sont utilisés pour l'élevage (litière et alimentation du bétail). En France, le gisement global mobilisable pour les biocarburants et la chimie est estimé autour de 4,3 Mtep.

Quant aux déchets d'origine organique, les gisements sont disséminés et en mélange. L'enjeu réside dans **l'efficacité de la collecte**, le **préconditionnement** et la **capacité pour des installations d'absorber des petites quantités de déchets** (approche décentralisée permettant d'éviter des coûts économiques et environnementaux élevés de collecte et de transport).

### **L'exploitation rationnelle des forêts**

Les forêts doivent être gérées durablement, en évaluant l'âge optimal pour prélever chaque type de biomasse, afin de préserver les stocks. La protection de la biodiversité doit nécessairement être prise en compte dans tous les projets d'exploitation.

Le seul doublement du prélèvement actuel de 1 m<sup>3</sup>/ha/an sur les forêts mondiales porterait la production mondiale à environ 8 milliards de m<sup>3</sup>/an, soit un équivalent de 2,7 Gtep/an supplémentaires. Pour mémoire la production annuelle est de 8 à 12 m<sup>3</sup>/ha/an en zone tempérée et de 40 à plus de 100 m<sup>3</sup>/ha/an en zone tropicale humide.

De plus, de **nouvelles surfaces doivent être mobilisées** pour sécuriser les approvisionnements de l'ensemble des acteurs (industries du bois, etc...). La forêt française s'accroît d'environ 100 millions de m<sup>3</sup> par an (source : IFN), dont seulement 60 % sont prélevés. Les acteurs ont tendance à mobiliser les zones les plus faciles d'accès, parfois avec des taux de prélèvement importants, d'où le risque de surenchérissement des prix et de dérives en matière de gestion durable.

En **France**, le principal enjeu est de **mobiliser la forêt privée**, très morcelée avec 3,5 millions de propriétaires dont 85 % possèdent des petites parcelles. Des modalités organisationnelles (législatives, juridiques, administratives...) devront être déployées pour en permettre l'exploitation optimisée et rentable.

13 - Robert et Cheverry, Le sol, une contrainte pour la sécurité alimentaire mondiale. Editions QUAE, 2009.

## Feuille de route biocarburants avancés

### Le développement des cultures dédiées à vocation énergétique

Les **cultures énergétiques** (type miscanthus, switchgrass, triticale, taillis à courte rotation) peuvent constituer un **gisement supplémentaire** pour répondre à la demande en biocarburant. Il faudra néanmoins tenir compte des usages concurrents des sols (changement d'affectation des sols, direct et indirect) pour bien en mesurer le bénéfice. Ces cultures ne doivent pas entrer en concurrence avec les zones cultivées pour l'alimentaire, mais s'installer sur des terres non ou mal utilisées. Leur productivité est estimée en zone tempérée entre 13 et 20 tonnes de matière sèche par hectare et par an (tms/ha/an), sur des terres arables de bonne qualité. Leur développement pourrait s'effectuer sur des terres de moyenne valeur, avec des rendements plus faibles. Difficile à estimer à ce jour, cette production sera à **considérer à partir de 2020**.

Au niveau français, en considérant un rendement moyen de 10 tms/ha/an (avec un PCI de 0,43 tep/tms), ce gisement représenterait **230 000 à 1,2 million d'hectares par an** soit **1 à 7 % des terres arables** (évaluées à 18,3 Mha en France selon l'INSEE).

### Le développement de schémas de collecte et de préconditionnements adaptés à la biomasse et aux technologies de transformation

De manière générale, la biomasse est dispersée. Il y a un enjeu important, notamment pour son transport, à assurer un **traitement initial** pour augmenter la quantité d'énergie par unité de volume ou de masse. Cela peut aussi être une valeur ajoutée pour le territoire producteur. Ces développements, adaptés aux besoins de chaque filière de production de biocarburant, devraient être coordonnés avec ceux d'autres filières d'utilisation de la biomasse afin d'optimiser en amont la valorisation de la ressource et de mutualiser certains coûts.



### Verrous technologiques

Les biocarburants actuels présentent des caractéristiques et des contraintes diverses concernant leur incorporation dans les produits pétroliers conventionnels (hormis le biométhane qui peut d'ores et déjà se substituer techniquement à 100 % et sans contrepartie au gaz naturel dans les transports), mais aussi leur PCI, leur performance environnementale, les émissions issues de leur combustion, l'évolution des moteurs, leur rendement surfacique, leurs secteurs d'application (terrestre, maritime, aérien)...

Les carburants avancés dits de synthèse (biodiesel et kérosène) sont d'excellente qualité et déjà adaptés aux moteurs actuels. D'autres molécules ou mélanges de molécules ainsi que d'autres technologies sont envisagées pour se substituer ou compléter les carburants existants avec des exigences nouvelles.

L'objectif de la plupart des **recherches** en cours est d'accéder à des **molécules aux bilans énergétiques, massiques, environnementaux et aux rendements surfaciques améliorés**. Les molécules à fort contenu énergétique, des **voies d'accès directs** sont recherchées, tout comme la **valorisation de coproduits et sous-produits** (CO<sub>2</sub>).

Les **verrous technologiques** dans le domaine des biocarburants avancés se situent essentiellement au niveau des **procédés de conversion** de la biomasse en biocarburants, des procédés qui sont variés et nombreux. **Chaque filière** possède ainsi ses **propres verrous technologiques**. Les recherches en cours font appel à la fois à des technologies conventionnelles, à des technologies de rupture et à leur intégration. Nous avons regroupé, dans les paragraphes qui suivent, les verrous selon le produit final ou les intermédiaires de production avec une **attention particulière accordée aux biotechnologies blanches** (en particulier en matière de séquençage et de screening haut débit, d'ingénierie métabolique, de biologie synthétique). Des **avancées notables sont attendues** pour la production de biomasse notamment via l'utilisation des **biotechnologies vertes**.

La figure 2 regroupe l'ensemble des procédés de conversion envisagés par cette feuille de route, que ce soit par les voies biochimiques ou thermochimiques. Certains passent par la production de **grands intermédiaires** comme le gaz de synthèse, les biobruts (par analogie avec un brut pétrolier, car ils peuvent être raffinés comme des coupes pétrolières), les sucres ou les lipides. Certaines voies biochimiques conduisent directement à des biocarburants gazeux tel le biométhane, carburant issu de la méthanisation (considérée comme une technologie mature et ne rentrant alors pas dans le scope des procédés de production de biocarburant avancé) ou le biohydrogène, encore au stade de recherche très amont.



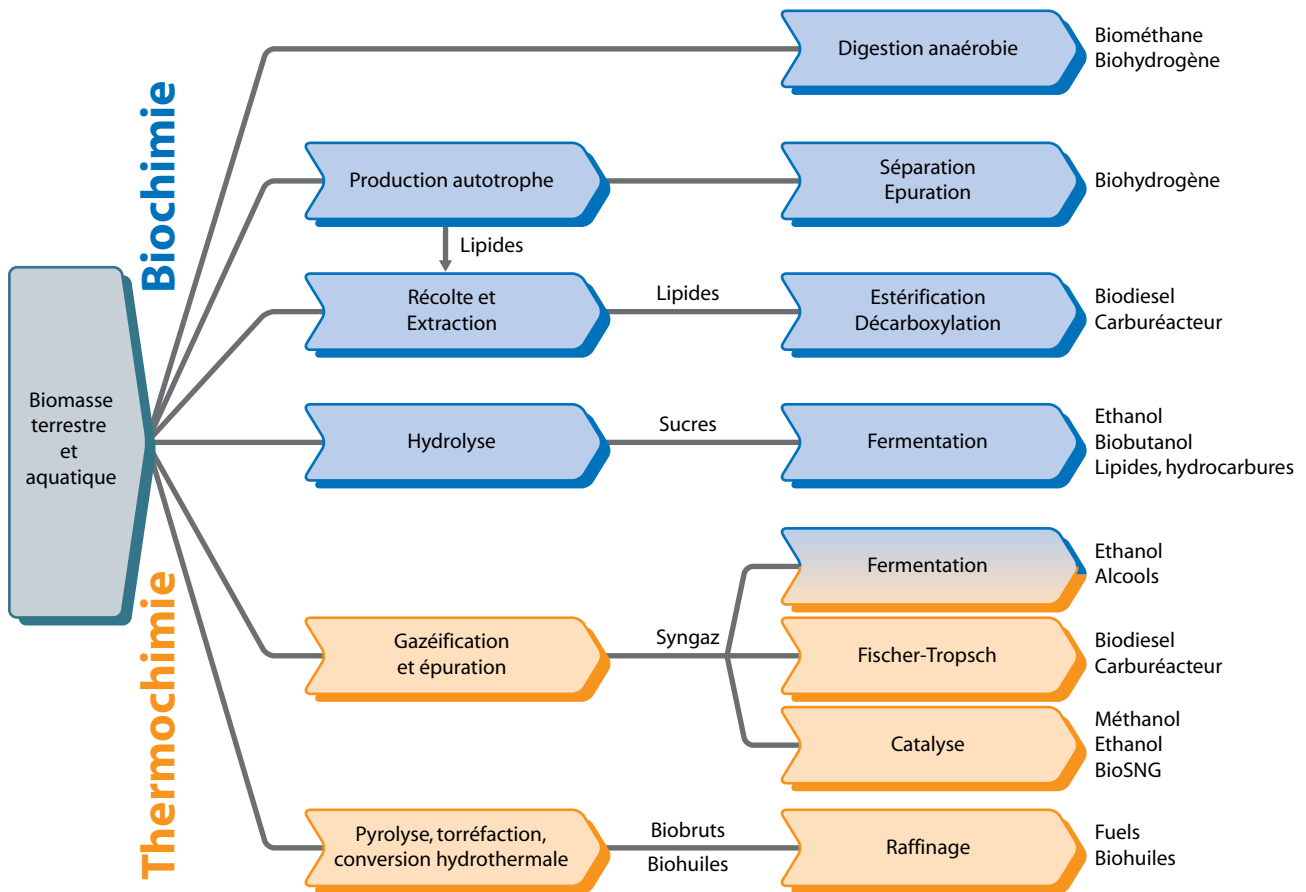


Figure 2 : Procédés de production de biocarburants à partir de différentes biomasses

Ces classifications ne doivent surtout pas faire oublier que les innovations apparaissent souvent à la croisée des chemins et que les différentes voies peuvent être combinées entre elles, donnant lieu à des **procédés hybrides**.

Les différents verrous, organisationnels et technologiques, ont été resitués par rapport aux quatre visions prospectives à l'horizon 2050, pour chacun des procédés de conversion de la biomasse. L'objectif est d'en déduire une hiérarchisation dans la mise en œuvre d'un plan d'action, étant entendu qu'un projet destiné à lever un verrou sera d'autant plus pertinent qu'il sera commun à plusieurs futurs possibles. Les thèmes communs à plusieurs voies (la ressource et sa préparation par exemple) seront ensuite analysés.

Dans les figures 3 à 5, les verrous sont répertoriés par des codes lettres et ordonnés dans les 4 visions prospectives en fonction des deux paramètres clés énoncés au chapitre 3 (portés en abscisse et en ordonnée), à savoir :

- l'ampleur et la rapidité des avancées scientifiques et technologiques dans les domaines en lien avec la production de biocarburants,
- la nature et l'ampleur des contraintes pouvant influencer sur la production de biocarburants avancés.

Les verrous présents dans les quatre visions, donc assez incontournables, sont de code couleur jaune. Les verrous de code couleur bleu-vert concernent deux ou trois des visions prospectives tandis que les verrous de code couleur blanc ne sont attachés qu'à une seule des visions. Ils n'en sont pas moins importants pour ces scénarios-là.

## Feuille de route biocarburants avancés

### Voies thermochimiques

La conversion de la biomasse par voie thermochimique permet d'aboutir à différents types de molécules. Les prétraitements de **pyrolyse et de torréfaction** produisent des **biocombustibles** respectivement **liquides et solides** densifiés plus faciles et plus rentables à transporter, vers une unité de **gazéification**, par exemple. La gazéification produit un gaz de synthèse appelé **syngaz** (mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone). Les biocombustibles liquides obtenus peuvent également être raffinés.

### Production via le syngaz

L'**intérêt du syngaz** est qu'il peut être obtenu à partir de **biomasses très variées** et de résidus carbonés provenant des ordures ménagères ou d'autres origines. Les procédés impliqués découlent principalement de ceux originaires mis au point pour la conversion du charbon en carburant liquide (CtL ou Coal to Liquids). L'adaptation, l'assemblage et l'intégration des différentes étapes ou « briques technologiques », pour pouvoir les utiliser pour une biomasse hétérogène, nécessitent des travaux de recherche et développement. Le cotraitement de la biomasse avec d'autres matières carbonées (charbons, résidus pétroliers, déchets organiques...) peut constituer une solution intermédiaire à moyen terme vis-à-vis de la sensibilité des process et de l'hétérogénéité de la composition de la biomasse.

Le syngaz purifié peut être transformé :

- en **carburants liquides (BtL)** de type diesel ou kérosène par le procédé catalytique Fischer-Tropsch, par exemple (cas du projet BioTfuel évoqué au chapitre 5) ou en différents types d'alcool par catalyse du syngaz ou fermentation en utilisant les biotechnologies blanches,
- en **carburant gazeux BioSNG (gaz naturel synthétique)** par méthanation, un procédé industriel de conversion catalytique de l'hydrogène et du monoxyde de carbone (cas des projets Vegaz, évoqué en annexe 1, et Gaya, cité au chapitre 5).

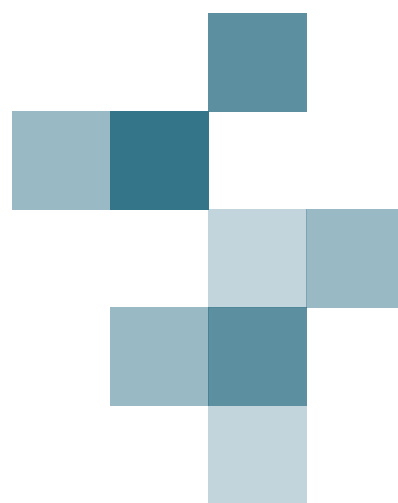
### Production via les biohuiles et biobruts

La pyrolyse et la conversion hydrothermale (ou liquéfaction directe) consistent à chauffer la biomasse brute, de manière plus ou moins ménagée, en l'absence d'oxygène et/ou en présence d'eau dans des conditions de pression et de température proches des conditions critiques, pour produire à la fois des biocombustibles liquides, du charbon et du gaz de pyrolyse.

On distingue :

- la pyrolyse lente (aux environs de 300 °C) qui conduit essentiellement aux charbons de bois,
- la pyrolyse rapide ou pyroliquéfaction (1 000 °C/min jusqu'à 400 °C) pour obtenir des **biohuiles**,
- la liquéfaction directe (environ 350 °C, 220 bars) pour fabriquer des **biobruts**.

Les **biohuiles et biobruts** peuvent ensuite être coraffinés pour produire des **équivalents de combustibles pétroliers**. Ces procédés sont classiquement envisagés pour traiter la biomasse lignocellulosique, mais les algues sont une matière première potentielle. Le **procédé Solray** (Nouvelle-Zélande) peut produire des biobruts de nature aromatique, par simple conversion hydrothermale subcritique de la pâte algale, et ce, avec des rendements énergétiques excédentaires. La composition de ces biobruts les rend compatibles pour entrer dans un coraffinage, en mélange avec des charges fossiles conventionnelles.



### Verrous des voies thermochimiques

Ils concernent :

- l'approvisionnement : les unités de gazéification nécessitent de grands volumes de biomasse en raison de la nature des procédés utilisés,
- la qualité de la biomasse et son adaptation au procédé,
- l'étape de gazéification et de purification des gaz pour éliminer les goudrons, alcalins, poussières, etc...,
- la sensibilité des catalyseurs Fischer-Tropsch aux impuretés contenues dans le syngaz,
- le rendement de conversion en carbone ainsi que le rendement énergétique global.

Les verrous correspondants sont identifiés et listés ci-dessous :

- **A/** Approvisionnement : mise en place de filières d'approvisionnement assurant de grands volumes de biomasse ;
- **S/** Surlignification : modulation de la teneur en lignine des plantes par l'utilisation des biotechnologies vertes ;
- **P/** Prétraitements : accroissement de la densité énergétique de la biomasse (par torréfaction, pyrolyse, conversion hydrothermale...). Ces verrous concernent toutes les voies de production thermochimiques (via le syngaz et les biobruts et biohuiles) ;
- **G/** Purification des gaz : développement de procédés performants et sélectifs ;
- **C/** Catalyseurs : obtention de nouveaux catalyseurs moins sensibles aux polluants ;
- **Rdt/** Rendements : augmentation des rendements de conversion en carbone et du rendement énergétique ; ajout d' $H_2$  produit sans émission de GES au syngaz ; allothermie (apport externe d'énergie) ;
- **V/** Valorisation : valorisation des coproduits et évolution vers le concept intégré de bioraffinerie (encadré Bioraffineries) ;
- **Hyb/** Procédés hybrides : hybridation des procédés thermochimiques et biochimiques ;
- **CoP/** Co-processing : cotraitement avec des charges fossiles.

### Positionnement des verrous dans les visions prospectives

Dans la figure 3, les verrous relatifs aux voies thermochimiques sont reportés dans les quatre visions prospectives, à l'horizon 2050, en fonction des deux paramètres clés. Les « **Hyb/** Procédés hybrides thermo/biochimiques » qui font appel aux nouveaux développements des biotechnologies apparaissent dans les visions 2 et 4, qui requièrent les technologies les plus avancées.

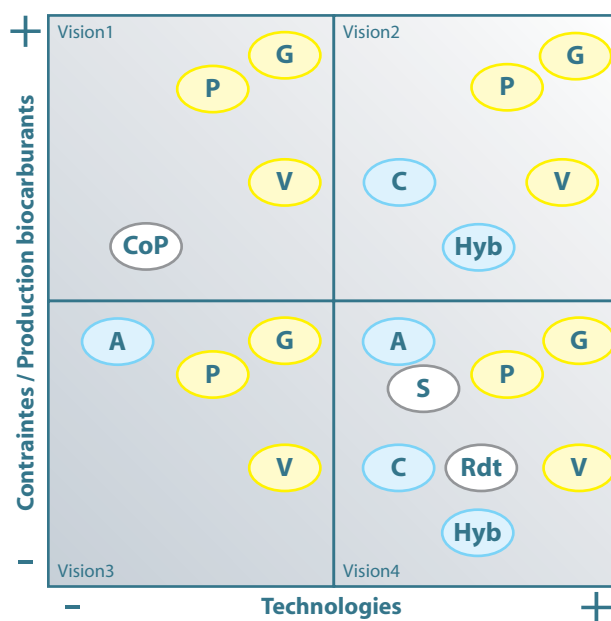


Figure 3 : Positionnement des verrous pour les voies thermochimiques



## Feuille de route biocarburants avancés

### Voies biochimiques

Les procédés peuvent être classés de différentes manières : par le type de matière première, le type de produit final (alcool, biogazole, kérosène...), le type de procédé (fermentation, conversion directe par des micro-organismes...), ou les grands intermédiaires (sucres, lipides).

### Production via les sucres

#### 1. Description succincte

La déstructuration sélective de la biomasse lignocellulosique permet d'accéder à des macromolécules qui peuvent ensuite être transformées en sucres, via par exemple des procédés de **fermentation éthanolique** matures. Les sucres peuvent également provenir de la biomasse aquatique. Les valorisations traditionnelles par la chimie des sucres n'entrent pas dans le périmètre de cette feuille de route.

Des progrès récents en biotechnologies ouvrent la voie à la **production industrielle** (notamment à l'aide de microorganismes génétiquement modifiés) **d'autres molécules d'intérêt** à plus haute densité énergétique que l'éthanol et/ou s'intégrant plus facilement dans les infrastructures existantes. On peut citer certains alcools lourds dont le **biobutanol**, mais également des **lipides**, des **isoprénoides**, ou directement des **hydrocarbures**. Ces molécules permettraient de substituer une part plus importante des carburants actuels (notamment le diesel), tout en améliorant les bilans d'énergie et d'émissions de GES. Des voies technologiquement très proches permettent de produire divers intermédiaires pour la pétrochimie et la chimie de spécialités.



#### 2. Produits (ou exemples de produits) attendus

Comme l'éthanol, le **biobutanol** est un produit issu de la fermentation en utilisant des micro-organismes génétiquement modifiés. Cet alcool, qui a une plus longue chaîne d'atomes de carbone, présente un meilleur contenu énergétique, proche de celui de l'essence (PCI respectifs : essence : 43,2 MJ/kg ; butanol : 36 MJ/kg ; éthanol : 26,8 MJ/kg) De ce fait, il peut être plus facilement mélangé avec l'essence et plus aisément transporté par pipeline que l'éthanol.

Quelques exemples de **biocarburants** dont la production est envisagée essentiellement **par voie biocatalytique** :

- acides gras et alcanes de C8 à C14 et plus (comportant 8, 14 atomes de carbone et plus),
- paraffines,
- butyrate de butyle,
- isoprénoides : isoprène, terpènes,
- biobruts,
- lipides à structures contrôlées,
- ...

Quelques exemples d'avancées pour ces autres molécules carburants :

- production d'isoprène par transfert de gène de la voie du mévalonate de *Artemisia annua*, plante productrice de l'artémisine (un antipaludéen) dans *Escherichia coli*,
- perspectives de production de monoterpènes (C10), carburant compatible avec les exigences de l'aviation, et de diterpènes (C15), candidat potentiel biodiesel,
- production de biodiesels (et biokérosènes) à partir de sucres et de glycérol. Ce sont les huiles dites « microbiennes », plus particulièrement les « huiles de levures ». Elle est à mettre en parallèle avec les productions de lipides par les algues en autotrophie.

Certaines logiques de bioraffinage et de raffinage devraient à terme se compléter pour mener à la **création de bioraffineries** produisant des biobruts pouvant être traités par les pétrochimistes dans des procédés existants ou adaptés.

### 3. Verrous

Ils concernent :

- la déstructuration de la biomasse : accéder aux macromolécules à des coûts compétitifs,
- la fermentation des pentoses : les procédés de transformation de la biomasse permettent d'obtenir un mélange de sucres dont les pentoses et les hexoses (comportant respectivement 5 et 6 atomes de carbone). Avec les technologies actuelles, les pentoses obtenus sont difficilement fermentescibles et il est difficile de concevoir des procédés de fermentation communs aux hexoses (glucose) et aux pentoses, ce qui diminue le rendement global du procédé,
- la production de nouvelles molécules d'intérêt :
  - > concevoir des micro-organismes génétiquement modifiés permettant de produire les molécules en laboratoire,
  - > optimiser ces micro-organismes vers une production en quantité industrielle avec des rendements commercialement viables,
- la valorisation des lignines et autres coproduits.

#### **Verrous pour l'étape d'hydrolyse**

**S/** Sous lignification : disposer de biomasses à degré de lignification optimal pour une valeur d'usage donnée.

**BV/** Biotechnologies vertes : essences végétales contenant des enzymes spécifiques (lignocellulolytiques inducibles).

**P/** Prétraitements : prétraiter et déstructurer les lignocelluloses pour faciliter l'accessibilité aux enzymes hydrolytiques (optimisation du couple « quantité d'enzyme/qualité du prétraitement »; utilisation des celluloses d'origine papetière...).

**Ez/** Hydrolyse enzymatique : obtenir des mix enzymatiques et/ou chimiques sélectifs à coûts compétitifs.

**Bi/** Micro-organismes bifonctionnels : fabriquer des bactéries plus résistantes aux conditions extrêmes, et des micro-organismes bifonctionnels capables, à la fois, d'hydrolyser la biomasse et de transformer le ou les produits de l'hydrolyse en carburants.

#### **Verrous pour les stades ultérieurs de transformation**

**C5/** Pentoses : développer des micro-organismes capables de fermenter les pentoses ou les mélanges hexoses/pentoses. Le développement de techniques de séparation des sucres puis de valorisation ultérieure des pentoses est aussi envisageable pour des applications non énergétiques (alimentation animale, chimie...).

**OH/** Fermentation vers les alcools supérieurs (biobutanol...).

**BB/** Biotechnologies blanches : utiliser des méthodes d'ingénierie métabolique et/ou de biologie synthétique pour modifier le métabolisme de levures, de bactéries ou de phototrophes (organismes vivants qui tirent leur énergie de la lumière, par photosynthèse) en vue de la production de molécules d'intérêt à fort potentiel énergétique (terpènes, lipides...).

**C1/** Microbiologie des C1 : développer des micro-organismes métabolisant des molécules à un seul carbone.

**V/** Valorisation : valoriser les sous-produits telle la lignine (composant à hauteur de 20% de la lignocellulose) comme source d'énergie intégrée dans le procédé industriel, ou pour des utilisations à plus haute valeur ajoutée (matière première pour la chimie du végétal).

**I/** Intensification : optimiser conjointement les micro-organismes génétiquement modifiés et les procédés de fermentation, afin d'aboutir à des procédés biochimiques efficaces à l'échelle industrielle ; croiser les potentiels des bioraffineries et de la chimie industrielle (pétrochimie) pour des produits biosourcés (par exemple : décarboxylation catalytique ou enzymatique pour aboutir à des paraffines).

#### **Verrous pour la production de biométhane et d'hydrogène**

Les verrous de ces voies, détaillées par la suite (voir p26) sont rappelés ici.

**CH<sub>4</sub>/** Biométhane carburant : procédés de méthanisation (considérés comme matures).

**H<sub>2</sub>/** Biohydrogène : production de biohydrogène (recherches très amont).

## Feuille de route biocarburants avancés

### 4. Positionnement des verrous dans les visions prospectives

Dans la figure 4, les verrous relatifs aux voies biochimiques sont reportés dans les quatre visions prospectives, à l'horizon 2050, en fonction des deux paramètres clés. Les « BV/ Biotechnologies vertes » figurent dans la seule vision 4 : même si elles font appel aux technologies les plus avancées, leur déploiement peut être limité à cause de l'utilisation d'OGM dans les milieux naturels :

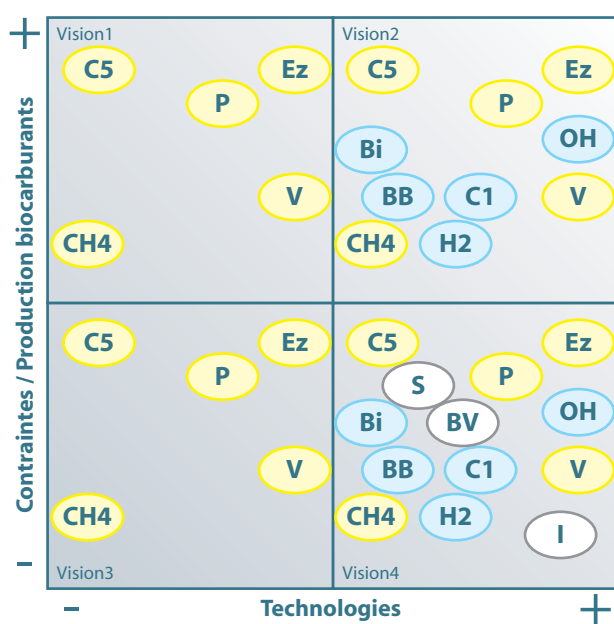


Figure 4 : Positionnement des verrous pour les voies biochimiques via les sucres

### Production de lipides

#### 1. Description succincte

La production massive de lipides par l'agriculture (plantes oléagineuses et sucres convertibles en lipides), par les micro-organismes et par l'algoculture (culture d'algues, à vocation industrielle et commerciale) ouvre la voie à leur transformation en carburant.

Ces lipides proviennent d'origines diverses : végétale, algale, animale, levurienne et fongique (certaines de ces voies étant considérées comme matures car déjà utilisées dans le cadre de la première génération de biocarburants).

#### 2. Produits ou exemples de produits attendus

Les lipides sont transformés en carburants :

- par la **voie traditionnelle des esters méthyliques** ou plus avantageusement **des esters d'alcools supérieurs** (éthanol, isopropanol, butanol),
- par **réaction de décarboxylation** pour conduire aux **alcanes** (hydrocarbures saturés), qu'elle soit obtenue par réduction catalytique, ou par décarboxylation enzymatique, suivant en cela une rupture technologique.

**La filière carburants d'origine algale faisant l'objet du plus grand nombre de travaux**, il a été choisi de la développer spécifiquement dans cette feuille de route. Comme la plupart des espèces végétales, les **macroalgues et microalgues** utilisent la photosynthèse pour fabriquer leur matière carbonée (sucres ou lipides) à partir du CO<sub>2</sub>. Différentes voies d'accès à des carburants sont possibles :

- **biométhane** par fermentation directe (voir en p28),
- **biobruts** par pyrolyse ou conversion hydrothermale pouvant conduire après raffinage à des **biohuiles** ou à des **fuels** (voir en p22),
- extraction des **lipides** qui peuvent être transformés ensuite en **gazole** ou en **carburacteur** (voir ce chapitre).

La plupart des recherches menées aujourd'hui visent à produire des lipides en partant du constat qu'en cas de carence en macronutriments, la croissance de l'algue est ralentie et la voie de synthèse des triglycérides (lipides) est favorisée.



Cette filière laisse entrevoir certains avantages :

- productivité à l'hectare élevée : jusqu'à 70 t/ha/an (10 fois plus que pour l'huile de palme),
- utilisation de surfaces non cultivables : néanmoins, utilisées de façon massive, ces technologies nécessiteront une réflexion sur les espaces de production afin de respecter les zones protégées du littoral et de ne pas entrer en concurrence avec d'autres utilisations (pisciculture...),
- gestion de l'eau non conflictuelle pour les cultures en eau de mer,
- possibilité de diminuer la dépendance climatique de ces cultures si elles sont situées dans des zones favorables (entre les 2 tropiques), offrant ainsi la perspective d'une récolte continue sur l'année,
- couplage possible à une source de CO<sub>2</sub> d'origine industrielle et éventuellement à d'autres composés gazeux (oxydes de soufre et d'azote),
- technologie exploitable dans les pays en voie de développement,
- couplage à des sources de nutriments «gratuites» (eaux usées...).

On sait **produire de façon industrielle les microalgues** :

- en lagunages (bassins naturels) : des populations multialgales s'installent naturellement. Les coûts sont faibles mais la qualité médiocre,
- en systèmes ouverts (bassins artificiels) : les productions monoalgales ne sont possibles que dans des conditions particulières de culture (pH alcalin, hypersalinité), ou bien avec des espèces à croissance très rapide (Chlorella). Par ailleurs, une algue spécialisée de laboratoire, livrée aux aléas extérieurs, ne peut pas dominer une algue contaminante locale à croissance rapide,
- en photobioréacteurs fermés et contrôlés avec éclairages artificiels ou naturels : des productivités élevées sont possibles, mais avec des coûts importants en investissement et en fonctionnement.

Toutefois, pour conquérir le marché de l'énergie, il faudra **travailler sur le coût des procédés et sur la sélection des souches, sur les conditions de culture et d'extraction des produits d'intérêt** et sur une vision **totale intégrée de la filière car** :

- la forte dilution dans l'eau des microalgues nécessite des étapes coûteuses de récolte et de séchage des algues avant extraction de l'huile,
- toutes les formes possibles de valorisation de la biomasse résiduelle devront être recherchées, que ce soit sous forme de biogaz, d'aliments pour animaux ou encore de fertilisants, afin d'augmenter les revenus et de réduire les coûts,
- selon les modes de culture des algues, les bilans énergétiques sont actuellement tantôt positifs, tantôt négatifs : ils dépendent notamment de la consommation énergétique des différents procédés (mise en œuvre de la production, extraction, quantité et nature des intrants...),
- des voies sensiblement différentes ne devront pas être écartées (hétérotrophie, assainissement de l'eau, etc...).

### 3. Verrous

Les difficultés sont multiples et pour les surmonter il sera nécessaire d'associer intimement biotechnologies et génie des procédés.

- **SA/ Sélection et amplification** : choix des phototrophes (cyanobactéries, diatomées, microalgues, macroalgues), écophysiologie, sélection des meilleures souches parmi les dizaines de milliers existantes et procédés amont ; préparation des milieux de culture, amplifications, inoculations...
- **M/ Verrous biologiques et métaboliques** : notamment afin d'atteindre des productions robustes et stables sur de longues périodes ; maximiser la production de lipides par cycle de croissance et par étape ; contrôle de la composition des lipides.
- **Ph/ Photobioréacteurs ouverts et/ou fermés** : choix des réacteurs pour progresser dans la conception de systèmes de production à grande échelle ; bassins, réacteurs flottants, etc... (matériaux pour photobioréacteurs, fibres optiques, capture et transfert optimal de la lumière, réduction de l'encrassement des réacteurs...).
- **RE/ Récolte et extraction** : développer à bas coût des procédés de concentration et d'extraction (décantation/floculation, cyclones, ultrafiltration, membranes, extraction par solvants, osmose...).
- **V/ Valorisation optimisée des coproduits et de la biomasse résiduelle.**
- **Syn/ Synergies à rechercher avec d'autres procédés** (traitement des eaux usées, remédiation CO<sub>2</sub> et oxydes d'azote, valorisation de l'oxygène produit...).
- **Eval/ Evaluation de l'ensemble des externalités** (environnementales, sociales et économiques).
- **G/ Gestion des écosystèmes aquatiques** ; prévention des disséminations indésirables dans les écosystèmes existants ; résistance aux agresseurs biologiques.

## Feuille de route biocarburants avancés

### 4. Positionnement des verrous dans les visions prospectives

Dans la figure 5, les verrous relatifs aux voies algales sont reportés dans les quatre visions prospectives, à l'horizon 2050, en fonction des deux paramètres clés. Les synergies à rechercher avec d'autres procédés (Syn) sont nécessaires au déploiement des 4 visions.

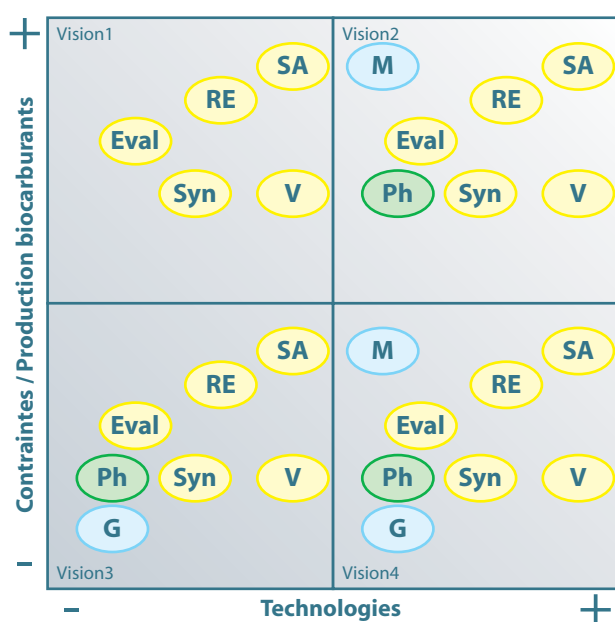


Figure 5 : Positionnement des verrous pour les voies biochimiques via la production de lipides

Les microalgues seront probablement développées en premier lieu pour un usage dans le traitement des eaux usées et pour la production de composés à haute valeur ajoutée. Les avancées dans ces domaines bénéficieront ainsi ensuite à la production des biocarburants.

### Production directe de biocarburants gazeux par voie biochimique

Le **biométhane** et le **biohydrogène** peuvent être obtenus à travers les quatre grandes catégories d'intermédiaires citées précédemment (voir figure 2). Ils peuvent aussi être produits directement. Les matières organiques (ou biomasse) servant de substrats pour produire ces biocarburants gazeux peuvent être de deux types :

- les ressources dites fatales, déchets solides ou effluents, qu'ils soient forestiers, agricoles, domestiques ou industriels...,
- les cultures énergétiques agricoles et forestières (taillis à très courte rotation, miscanthus...).

#### 1. Biométhane carburant

Le biogaz (mélange de méthane et dioxyde de carbone) peut être produit par fermentation anaérobie de matières organiques (encadré Méthanisation et biométhane) ou par méthanation (voir en p22).

Le biométhane obtenu à partir de ce biogaz peut être **valorisé comme biocarburant gazeux** : on parle alors de **biométhane carburant**. D'une qualité similaire à celle du gaz naturel, il peut être **incorporé dans le GNV** (Gaz naturel pour véhicules), quelle qu'en soit la proportion, sans modification des véhicules ni des infrastructures de distribution associées. Son introduction sur le réseau en substitution du gaz naturel permettrait d'envisager un fort potentiel de développement avec à la clé un impact très large sur les secteurs domestique, industriel et des transports.

Plusieurs voies de production sont envisageables :

- **à court terme**, il s'agit d'utiliser des **déchets ou effluents d'origine** organique. Cette filière est déjà bien développée dans de nombreux pays d'Europe. En France, elle est en plein développement ces dernières années. Les technologies sont aujourd'hui matures et font l'objet d'un déploiement industriel ;
- **à moyen terme**, la production pourra être éventuellement réalisée par méthanisation de cultures énergétiques (sorgho par exemple) et de macro et/ou microalgues ;
- **à moyen et long terme**, la production de bioSNG par **gazéification** de la biomasse issue de ressources lignocellulosiques suivie d'une méthanation est une voie prometteuse (cas du projet Gaya, évoqué au chapitre 5).

Les verrous relatifs à « **CH<sub>4</sub>** / Biométhane carburant » sont répertoriés avec l'ensemble des voies biochimiques (figure 4)

## 2. Biohydrogène

L'hydrogène est un vecteur énergétique pouvant contribuer à limiter significativement les émissions de gaz à effet de serre ou de particules polluantes, notamment s'il est utilisé à grande échelle. Il peut être employé dans des procédés de combustion ou dans des piles à combustible.

L'hydrogène peut être obtenu à partir de **certains déchets organiques**, utilisés comme substrats. Ces procédés devraient constituer la base des premiers pilotes de **bioproduction d'H<sub>2</sub>**.

A **plus long terme**, plusieurs bioprocédés pourraient être utilisés et générer des bénéfices environnementaux secondaires.

De **très nombreux micro-organismes** produisent de l'hydrogène grâce à une enzyme, **l'hydrogénase** (figure 6). Les sources d'énergie utilisables, de l'énergie solaire aux différentes formes de biomasse ainsi que les propriétés métaboliques et les caractéristiques des hydrogénases de différents organismes doivent être évaluées et comparées afin d'estimer quels procédés sont économiquement viables. Un effort particulier doit être fourni pour identifier et sélectionner des souches de production d'hydrogénase et d'hydrogène potentiellement intéressantes et dont l'optimisation peut être développée par génie génétique ou génie métabolique.

Un des principaux verrous scientifiques limitant le développement des bioprocédés réside dans la sensibilité à l'oxygène de la plupart des enzymes productrices d'H<sub>2</sub>, notamment les plus actives. Disposer d'une hydrogénase insensible à l'oxygène et produite en grande quantité permettra de coupler, dans un organisme photosynthétique, la photolyse de l'eau à la production d'hydrogène.

Enfin, développer un système optimisé et rentable de production d'hydrogène à partir de micro-organismes pose de nombreux problèmes, qu'ils soient généraux comme la culture en masse de cellules (problèmes de transfert, de mélange, de contrôle) ou spécifiques (réalisation des protocoles à grande échelle, gestion des gaz, amélioration de l'utilisation de la lumière dans le cas d'organismes photosynthétiques...). La mise au point de tels systèmes nécessite une démarche intégrée alliant une approche de type génie des procédés aux recherches en physiologie.

Les verrous relatifs à « H<sub>2</sub>/ Biohydrogène : production de biohydrogène » sont répertoriés avec l'ensemble des voies biochimiques (figure 4).

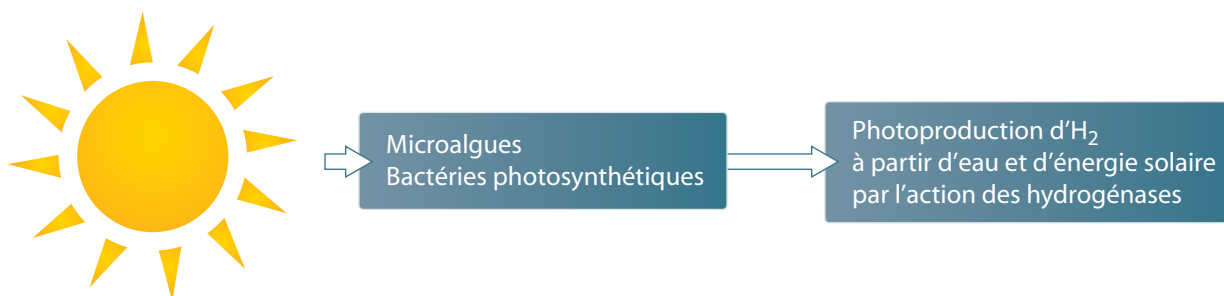


Figure 6 : Voies de production de biohydrogène

## Feuille de route biocarburants avancés

### > 5. Besoins de R&D, démonstrateurs, plates-formes, expérimentations

La feuille de route n'étant pas destinée à orienter les seules actions de l'ADEME, les besoins de l'ensemble de la chaîne de développement de la recherche amont jusqu'au déploiement commercial sont répertoriés, qu'ils soient d'ordre technologique, scientifique, réglementaire ou sociétal.

Les besoins sont présentés en fonction de leur degré de maturité, en classant les actions à conduire en :

- **recherche amont** : fondamentale et/ou exploratoire ;
- **recherche industrielle** : finalisée, complétée par le développement expérimental de briques technologiques ;
- **développement préconcurrentiel** permettant, en conditions réelles, mais à échelle réduite, la validation et l'intégration du procédé industriel. Il peut porter sur une ou un ensemble de briques technologiques. C'est le rôle des démonstrateurs de recherche, de l'expérimentation et du prototypage préindustriels ;
- **déploiement commercial** : cela commence avec la première unité de production et suppose une faisabilité technico-économique, un plan d'affaires, des études d'impacts et des autorisations sur la base d'un cadre réglementaire et fiscal, éventuellement assorti d'incitations financières.

Un certain nombre de recommandations ont été tirées afin d'orienter les travaux à conduire.

En France, certaines briques technologiques et filières sont déjà à l'étude dans des projets soutenus par les pouvoirs publics, par l'ADEME dans le cadre du Fonds démonstrateurs de recherche, par Oseo et par le FUI (Fonds unique interministériel) :

- sur les **voies biochimiques** : le projet **FuturoL**,
- sur les **voies thermochimiques** : les projets **Gaya** et **BioTfuel**,
- pour les **procédés de culture et de transformation des algues** : les premières phases du projet **Salinalgue**.

#### FuturoL

Ce projet d'innovation stratégique industrielle, financé par Oseo, démarré en 2008 pour une durée de huit ans, étudie **l'éthanol lignocellulosique obtenu par voie biochimique** à partir de sources de biomasse variées (résidus agricoles et forestiers, cultures dédiées...). Il prévoit une phase de recherche dans 14 laboratoires publics et privés, suivie d'une étape de développement sur un pilote, puis d'une phase finale de démonstration (prototype industriel).

#### Gaya

Ce démonstrateur de recherche, sélectionné dans le cadre du Fonds démonstrateurs « biocarburants de deuxième génération », étudie la chaîne complète de production de **bioSNG, obtenu par voie thermochimique** (biométhane carburant obtenu par gazéification suivie d'une étape de méthanation). Le projet, d'une durée de sept ans, a débuté en juin 2010 et rassemble 14 partenaires.

#### BioTfuel

Sélectionné dans le cadre du Fonds démonstrateurs « biocarburants de deuxième génération », ce projet, lancé en janvier 2010 et prévu pour une durée de sept ans, réunit six partenaires autour d'une chaîne complète de production de **kérosène et de gazole de synthèse BtL** à partir d'une large gamme de biomasse lignocellulosique (résidus agricoles et forestiers) et de ressources fossiles (résidus pétroliers).

#### Salinalgue

Financé par le FUI, labellisé par les pôles Trimatec, Mer PACA, Derbi et Capénergies, il a pour objectif de **structurer une activité pérenne de culture et de valorisation de microalgues**. Le projet vise la maîtrise de la culture et de la récolte d'une microalgue hautement valorisable à très grande échelle en milieu ouvert sur des salines inexploitées. En outre, il intègre l'activité bioraffinage pour fabriquer puis commercialiser des bioproduits (biodiesel, biogaz, molécules à haute valeur ajoutée : bêta-carotène, oméga 3, etc...), et des protéines pour l'alimentation aquacole. Un démonstrateur permettra de valider la faisabilité technico-économique préindustrielle de la chaîne de production.

Les voies de transformation de la biomasse, les intermédiaires et les produits obtenus dans le cadre de ces projets sont évoquées dans la figure 7 ci-dessous qui rappelle les principales filières de transformation de la biomasse en biocarburants.

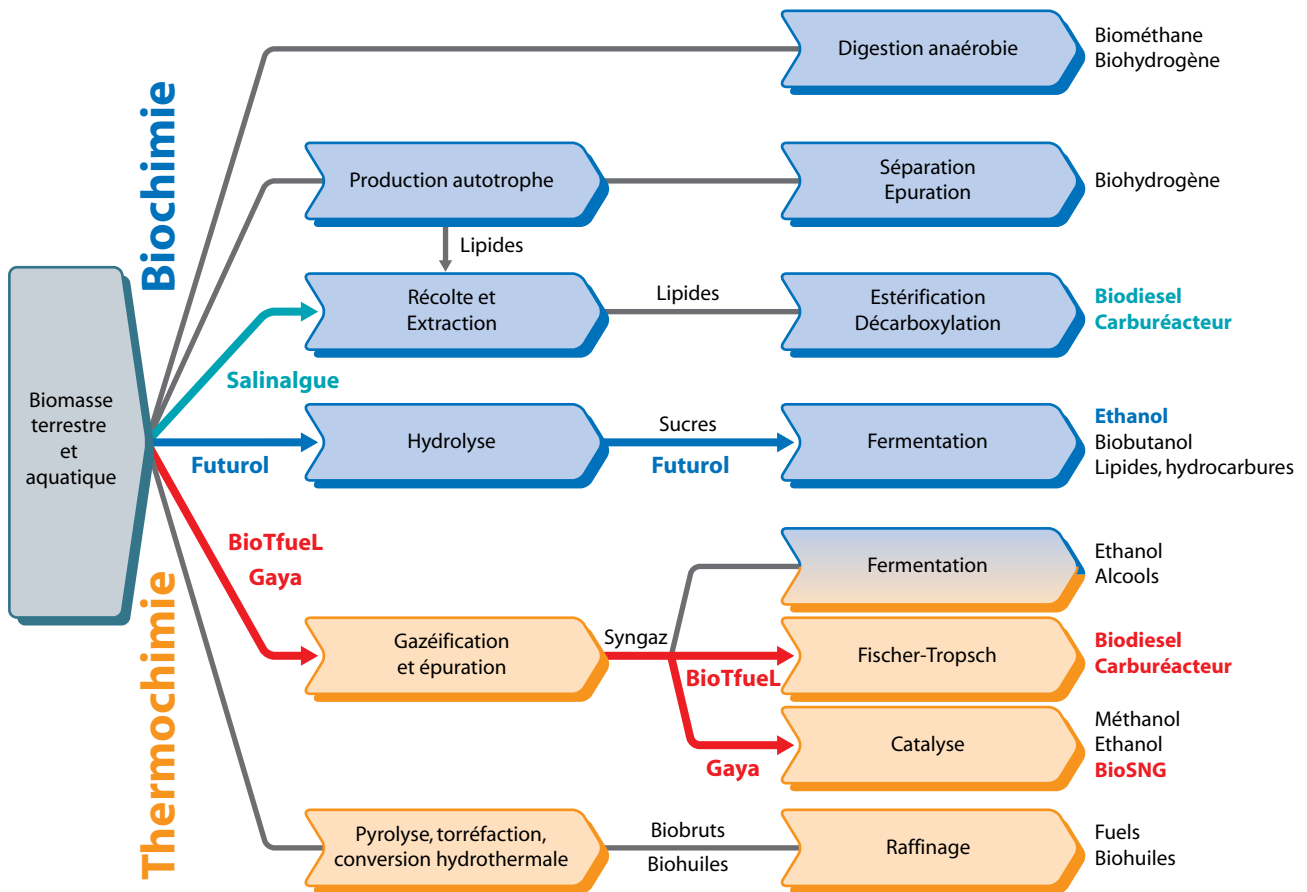


Figure 7 : Voies de production de biocarburants et projets français en cours



## Feuille de route biocarburants avancés

### Procédés thermochimiques

Le développement de ces voies de conversion (BtL, BioSNG) de la biomasse lignocellulosique passe par **l'augmentation**, d'une part, **des rendements de conversion en carbone**, d'autre part, **des rendements énergétiques**. Pour chaque verrou, les principales pistes de progrès sont recensées dans le tableau 9 ci-dessous.

Tableau 9 : Positionnement des verrous des voies thermochimiques en fonction de leur degré de maturité et actions à conduire

Verrous	RECHERCHE AMONT (programmes ANR Blanc et thématiques)	RECHERCHE INDUSTRIELLE (pilotes industriels, plates-formes, IEED <sup>14</sup> )	DEVELOPPEMENT PRE-CONCURRENTIEL (démonstrateurs Investissements d'avenir, FUI, financements européens)	DEPLOIEMENT COMMERCIAL (fiscalité, réglementation, etc...)
<b>A/ Approvisionnement</b>	Organisation des filières / Études technico-économiques / Volet sociétal / Droit du foncier / Technologies de collecte / changement d'affectation des sols			
<b>P/ Prétraitements</b>	en fonction des retours des démonstrateurs			
<b>S/ Surlignification</b>	thématique commune surlignification / souslignification			
<b>G/ Purification des gaz</b>	Solutions robustes à adapter en fonction des problèmes rencontrés sur les opérations de démonstration			
<b>C/ Catalyseurs</b>	A mener de manière ciblée (sur cahier des charges)		Emergence possible d'un acteur national	
<b>V/ Valorisation</b>		Développement industriel : validation en pilote et démonstrateurs puis changement d'échelle		Marché du méthanol + alcools supérieurs
<b>Hyb/ Procédés hybrides</b>	Potentiel intéressant mais assez amont Microbiologie des C1 + technologies de fermentation du gaz de synthèse à développer (ex procédé Coskata, annexe 2)			
<b>Rdt/ Amélioration Rendements</b>			Intensification ; ajout H <sub>2</sub> ; allothermie	
<b>Cop/ Cotraitement</b>		Co-processing		

14 - Instituts d'excellence énergies décarbonées : plates-formes interdisciplinaires industrie/recherche publique



Principales recommandations :

- les verrous P/**Prétraitements**, G/**Purification des gaz** et V/**Valorisation** (codes couleur jaune) sont présents dans les quatre visions et sont à traiter de façon préférentielle. Ils sont pris en compte dans les projets Gaya et BioTfuel. Néanmoins, des **recherches complémentaires** s'avèreront probablement nécessaires en fonction des difficultés qui seront rencontrées sur ces démonstrateurs ;
- la **catalyse**, domaine d'excellence en France, permet d'envisager l'**émergence d'un champion industriel français**. Il faut néanmoins renforcer les compétences pour augmenter les rendements en biocarburants ;
- il faudra prêter une attention soutenue aux **procédés hybrides**, en développement par exemple aux Etats-Unis. Ils offrent des possibilités d'orienter la transformation du gaz de synthèse, non seulement en éthanol, mais aussi en alcools supérieurs, voire en autres molécules carburant par microbiologie des C1. Il faudra étudier les possibilités offertes par l'hybridation sur des phases amont aux procédés de transformation.

## Feuille de route biocarburants avancés

### Procédés biochimiques

Ils font de plus en plus appel au potentiel des **biotechnologies vertes et blanches**. Les goulots d'étranglement sont les mêmes pour l'éthanol, le butanol ou les alcools supérieurs, comme pour l'obtention des isoprénoides et autres hydrocarbures.

Pour chaque verrou, les principales pistes de progrès sont recensées dans le tableau 10 ci-dessous :

Tableau 10 : Positionnement des verrous des voies biochimiques en fonction de leur degré de maturité et actions à conduire

Verrous	RECHERCHE AMONT (programmes ANR Blanc et thématiques)	RECHERCHE INDUSTRIELLE (pilotes industriels, plates- formes, IEED)	DEVELOPPEMENT PRE-CONCURRENTIEL (démonstrateurs Investissements d'avenir, FUI, financements européens)	DEPLOIEMENT COMMERCIAL (fiscalité, réglementation, etc...)
CH4/ Biométhane	Coproductions ; H <sub>2</sub> , acides organiques	Évaluations		Technologie déjà mature ; aides au déploiement
P/ Prétraitements	Celluloses plus facilement accessibles aux enzymes ; celluloses papetières		Adaptations à différentes biomasses	
Bi/ Micro-organismes bifonctionnels	Hydrolytiques et fermentaires	développement Etats-Unis (ex. procédé Mascoma <sup>15</sup> )		
Ez/ Coût enzymes	Diversité biologique ; recherche de ruptures		Commercial mais cher : Objectif : 0,5 €/litre d'éthanol	
C5/ Fermentation des pentoses	Exploiter la biodiversité, construire des souches	Évaluations ; productivités, rendements, sensibilité aux inhibitions		
V/ Valorisation	Valorisation non énergétique de la lignine	Coproduits ; levures ; alimentation animale ; valorisation du CO <sub>2</sub>		
OH/ Alcools supérieurs	Hexanol, octanol, nouveaux micro-organismes	Propanol, isopropanol, butanol		
BB/ Biotechnologies blanches	Molécules réduites, lipides microbiens	Procédés de fermentation	extrapolation	
C1/ Microbiologie C1	Exploiter la biodiversité ; nouveaux produits		En développement aux Etats-Unis (procédé Coskata évoqué en annexe 2)	
H2/ Biohydrogène	Hydrogénases non oxygène sensibles			Loin de l'industrialisation
BV/ Biotechnologies vertes	Enzymes inductibles ; stratégies génétiques	Cultures dédiées (impact changement affectation des sols)		Acceptabilité, législation OGM
S/ Souslignification				
I/ Intensification	Biocatalyseurs	Nouvelles structures de réacteurs, fermentations extractives	Traitement des biobruts par la pétrochimie	

Principales recommandations :

- les verrous P/**Prétraitements**, C5/**Fermentation des pentoses** et V/**Valorisation** (codes couleur jaune) sont présents dans les quatre visions. Ils sont déjà étudiés par le démonstrateur Futurol. Comme pour les voies thermochimiques, des **recherches complémentaires** pourront s'avérer nécessaires en fonction des retours de Futurol ;
- sans être à proprement parler un prétraitement, les **pâtes à papier** peuvent constituer un **très bon substrat** en vue de leur fermentation en alcools et fournir ainsi une diversification à l'industrie papetière. Les **liqueurs noires de papeterie**, riches en lignine, peuvent faire l'objet de plusieurs valorisations en tant qu'apport d'énergie dans le procédé ou comme base de molécules biosourcées à usage énergétique ou non. Cette seconde valorisation correspond à un axe à développer ;
- la **réduction du coût des enzymes** est un **enjeu majeur**. Les deux premiers producteurs d'enzymes (Danisco/Genencor et Novozymes) sont européens. Quelques **PME françaises** constituent un atout de développement industriel, leur action pourrait être amplifiée ;
- le développement de nouvelles molécules carburants fait appel aux **biotechnologies** avec de nouvelles voies métaboliques. Pour ces innovations de rupture, le déploiement industriel peut suivre de près la recherche fondamentale si l'on sait faire le changement d'échelle ;
- la **formation initiale et continue**, alliant sciences du vivant et sciences de l'ingénieur, est un facteur clé. Il s'agit de concevoir l'usine cellulaire (ingénierie biocatalytique) et de la mettre en œuvre (génie des bioprocédés). Il faut également veiller à former et entretenir des équipes, mobilisables et pluridisciplinaires, car l'innovation se greffe sur des technologies conventionnelles à partir desquelles on peut espérer déboucher sur des technologies de rupture ;
- pour les verrous BV, Bi, Ez, C5, C1, les **études d'impacts ou d'acceptabilité** sont à conduire dès les stades de recherche amont et à actualiser au fur et à mesure des développements afin de faciliter le déploiement.

## Procédés de culture et de transformation des algues

L'algoculture n'a pas la même maturité que l'agriculture ou la sylviculture. Elle présente cependant un **potentiel de productivité élevé** qu'il s'agisse de cultures en bassins ouverts ou plus encore de photobioréacteurs tubulaires fermés (systèmes hétérotrophes mis en œuvre dans des cuves fermées sans pénétration de lumière). Toutefois, pour conquérir le marché de l'énergie, il faudra **considérablement diminuer le coût des procédés** en étudiant différents aspects.

Pour chaque verrou, les principales pistes de progrès des voies algales sont recensées dans le tableau 11 ci-dessous.



Tableau 11 : Positionnement des verrous des procédés de production de lipides en fonction de leur degré de maturité et actions à conduire

Verrous	RECHERCHE AMONT (programmes ANR Blanc et thématiques)	RECHERCHE INDUSTRIELLE (pilotes industriels, plates- formes, IEED)	DEVELOPPEMENT PRE-CONCURRENTIEL (démonstrateurs Investissements d'avenir, FUI, financements européens)	DEPLOIEMENT COMMERCIAL (fiscalité, réglementation, etc...)
Eval/ Evaluations	Modélisations, aide à la décision	Rendements énergétiques, cultures en continu ACV, verrous économiques et sociétaux, travail procédural et normatif pour acceptabilité des filières		
M/ Verrous métaboliques	Exploiter la biodiversité ; biologie moléculaire			Acceptabilité, législation OGM
SA/ Sélection amplification « amont »	Criblage haut débit ; bases de données	écophysiologie, préparations milieux de cultures, amplifications, inoculations,... (ex. plateforme Heliobiotec <sup>16</sup> )		
RE/ Récolte extraction « aval »	Micro-ondes; CO <sub>2</sub> supercritique; biosolvants	Centrifugation, flottation, filtration, osmose, (ex projet NASA 'Omega' <sup>17</sup> )		
V/ Valorisation et coproduits		Oméga-3, protéines, caroténoïdes, glucides...	Biomasse résiduelle comme engrais	
Syn/ Synergies procédés	Etude d'impact sur la croissance des microalgues	Production d'énergie et dépollution des effluents	Traitement eaux usées, remédiations CO <sub>2</sub> et NO <sub>x</sub> , recyclages eau et nutriments...	
Ph/ Photo bioréacteurs	Nouveaux concepts (matériaux)	Photonique et transferts couplés	Réacteurs ouverts, fermés, flottants (ex projet NASA 'Omega' <sup>16</sup> )	
G/ Ecosystèmes aquatiques	Ecologie microbienne ; dynamique des écosystèmes	Gestion des contaminations disséminations		Etudes d'impact ; introduction de nouvelles espèces

16 - [www.heliobiotec.cea.fr/fr/menu-pages/Heliobiotec-Presentation.html](http://www.heliobiotec.cea.fr/fr/menu-pages/Heliobiotec-Presentation.html)

17 - [www.nasa.gov/centers/ames/research/OMEGA/index.html](http://www.nasa.gov/centers/ames/research/OMEGA/index.html)

Principales recommandations :

- la recherche dans le domaine de l'algoculture est encore très amont. La biodiversité des micro-organismes est très riche et très loin d'avoir été exploitée. Il importe de maintenir l'effort de **recherche en écophysologie** pour explorer et analyser toutes les formes de la biodiversité afin de sélectionner les meilleures souches. Des **travaux en génétique** sont aussi importants ;
- les applications énergétiques souffrent, pour le moment, de bilans énergétiques médiocres et dans certains cas négatifs, suivant les modes de culture et d'extraction des lipides. Une **expérimentation à une échelle représentative est nécessaire** pour acquérir des données fiables sur les cultures et obtenir des échantillons en quantité suffisante pour tester les procédés d'extraction ;
- les **synergies avec d'autres procédés** (traitement des eaux usées, captage et stockage du CO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub>, production d'O<sub>2</sub>...) doivent être recherchées et validées pour assurer la **viabilité économique**. Les microalgues trouvent leurs premières applications dans le traitement des eaux usées et pour la production de produits à haute valeur ajoutée. Les avancées dans ces domaines bénéficieront à la production de biocarburants ;
- des voies sensiblement différentes, comme l'**hétérotrophie** sans apport de lumière, devraient également être explorées ;
- la recherche publique française a consacré d'importants moyens humains et financiers au développement des **photobioréacteurs fermés** au cours des trois dernières décennies. Les technologies développées sont parmi les plus performantes du moment. Elles présentent un fort potentiel de diminution du coût de revient (en augmentant la taille des installations), à valider ;
- pour les verrous M, SA, G, les **études d'impacts ou d'acceptabilité** sont à conduire dès les stades de la recherche amont et à actualiser au fur et à mesure des développements afin de faciliter le déploiement.

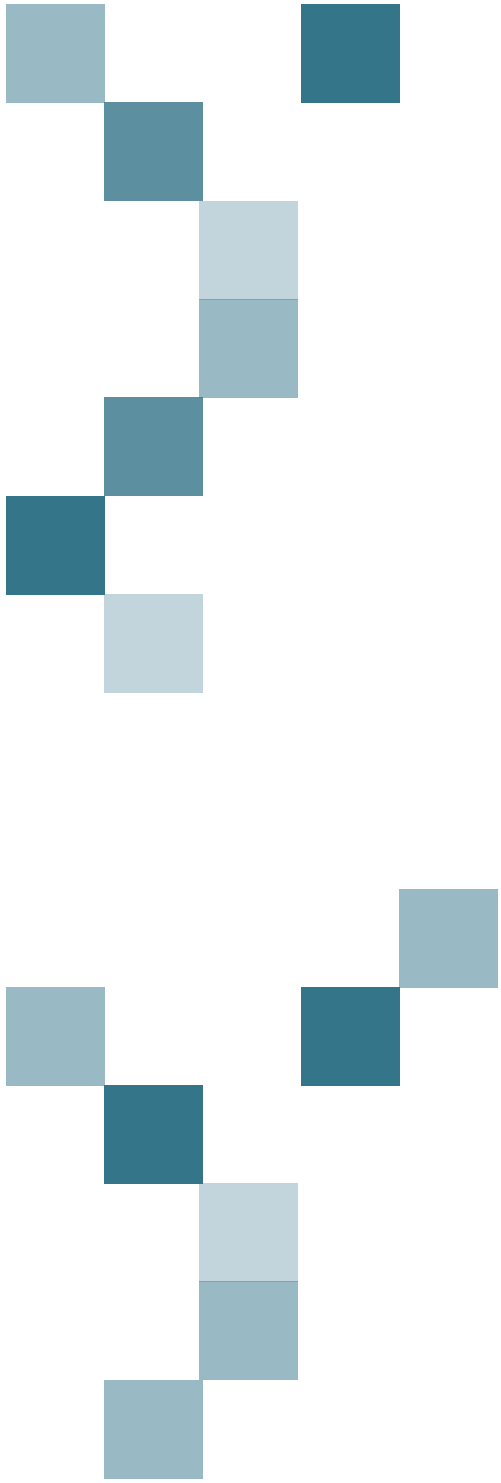
## Thèmes transverses

---

Un certain nombre de préoccupations sont communes ou transverses aux voies thermochimiques, biochimiques et algales :

- le développement de toutes les formes de **biomasse mobilisables à des fins énergétiques, l'amélioration de leur disponibilité et la réduction des coûts de mise à disposition**. Cela passe principalement par :
  - > l'exploitation des résidus de productions agricoles et sylvicoles, des déchets organiques,
  - > le développement des cultures dédiées à vocation énergétique,
  - > l'exploitation rationnelle des forêts,
  - > les cultures aquatiques de macroalgues et microalgues ;
- les **recherches agronomiques** pour moduler la teneur en cellulose du végétal afin d'atteindre une meilleure adéquation de la ressource à ses utilisations dans les différentes voies ;
- les **procédés de prétraitement** revêtent une importance particulière pour optimiser le mode de transformation en fonction de la nature, de tout ou partie, des différents types de biomasse ;
- les **évaluations économiques, sociétales et environnementales** pour s'assurer de la faisabilité et de la viabilité des solutions envisagées, en prenant en compte notamment la gestion des écosystèmes et le maintien de la biodiversité ;
- le recours, de plus en plus fréquent, aux **biotechnologies blanches** ne sera possible que s'il est compris et accepté socialement. Une première étape pourrait être de mettre en débat l'utilisation des OGM à des fins de recherche ou de production en milieux confinés, par opposition à leur utilisation dans les milieux naturels ;
- enfin, à travers l'acquisition de données fiables et représentatives sur des opérations de démonstration préconcurrentielle, il faudra veiller tout particulièrement aux enjeux importants de **propriété industrielle** qui sont disputés dès à présent au niveau mondial. Il faudra assurer un positionnement « propriétaire » aux intérêts français, à la fois sur certaines briques technologiques et sur les filières intégrées.

# Feuille de route biocarburants avancés





## > 6. Annexe 1

### Panorama des recherches menées en France financées par l'ANR et l'ADEME (liste non exhaustive)

Verrou	Programme	Acronyme du projet	Sujet
RESSOURCE			
<b>Evaluation gisement disponible</b>	PNRB	Regix	Référentiel unifié, méthodes et expérimentations en vue d'une meilleure évaluation du gisement potentiel en ressources lignocellulosiques agricoles et forestières pour la bioénergie en France
		Ecobiom	Approche socio-économique et environnementale de l'offre de biomasse lignocellulosique
	BIO-E	Emerge	Evaluations compatibles de volumes, biomasses et minéralomasses en forêt pour une gestion comptable et durable du bois énergie
		Foresee	Caractérisation de la ressource forestière pour les bioénergies
<b>Mobilisation gisement</b>	PNRB	Mobipe	Tests des méthodes, des équipements et des organisations innovantes de récolte de la biomasse forestière en zone de pente
		Omicage	Développement des technologies de mesures, des systèmes d'information et des outils de production pour une approche holistique des chaînes d'approvisionnement à grande échelle en biomasse ligneuse
<b>Production de cultures dédiées</b>	BIO-E	Sylvabiom	Nouveaux concepts de cultures ligneuses durables pour la production de biomasse à des fins énergétiques
		Amazon	Adéquation multiressource à la gazéification (en particulier pour les voies BtL et SNG).

## Feuille de route biocarburants avancés

Verrou	Programme	Acronyme du projet	Sujet	
VOIE THERMOCHIMIQUE : production de carburants BtL / BioSNG				
<b>Prétraitement</b>	PNRB	Precond	Préconditionnement de la biomasse par pyrolyse rapide pour une application biocarburants ou biocombustibles	
		Pyroplasm	Pyrolyse de la biomasse à haute température assistée par plasma non thermique	
		Torbigap	De la torréfaction à l'injection de solide dans un gazéifieur sous pression	
		Ecohdoc	Désoxygénation d'huiles issues de la pyrolyse de la biomasse lignocellulosique : économie d'hydrogène et limitation de la désactivation du catalyseur	
<b>Gazéification</b>	Agrice	Thermobio	Production de biocarburants par transformation thermochimique de la biomasse d'origine agricole	
		Gaspar	Gazéification de la biomasse pour la synthèse et la production de carburants renouvelables	
	PNRB	Cine-HT	Etude des cinétiques réactionnelles des produits de la pyrolyse-gazéification de la biomasse par voie haute température. Application au dimensionnement d'un réacteur à flux entraîné	
		Inorganiques	Comportement des inorganiques dans un réacteur haute température à flux entraîné (autothermique et allothermique) et dimensionnement d'une paroi haute température	
		Galacy	Définition des règles de design et évaluation des potentialités de la gazéification allothermique de lignocellulose appliquée à la production de biocarburant de synthèse	
		Super-Bio	Evaluation et optimisation des potentialités du procédé de gazéification de la biomasse dans l'eau supercritique pour la production du bio-syngaz et de l'hydrogène	
	BIO-E	Slugas	Impact des inorganiques dans la gazéification de déchets organiques (boues d'épuration)	
	Thèses ADEME			Production de gaz de synthèse par gazéification de la biomasse et de déchets organiques dans un réacteur à flux entraîné : impact des inorganiques dans la gazéification de déchets, conception des parois et modèle de fonctionnement du réacteur
				Pyrolyse catalytique du bois pour la production de gaz de synthèse
				Etude technologique, expérimentale et numérique de la conversion thermochimique de la biomasse : développement d'un procédé de carbonisation et de gazéification en suspension
				Contribution à l'industrialisation d'un procédé de gazéification de biomasse et étude exploratoire des filières de production de biocarburants
				Le cyclone : un réacteur multifonctionnel. Applications à la pyrogazéification et à la pyroliquéfaction de la biomasse
				Analyse des processus primaires de dégradation thermochimique de la biomasse

Verrou	Programme	Acronyme du projet	Sujet
VOIE THERMOCHIMIQUE : production de carburants BtL / BioSNG (suite)			
<b>Purification du gaz de synthèse</b>	PNRB	Anapur	Analyses et traitements de composés traces dans un gaz de synthèse issu de procédés de pyrolyse/gazéification de la biomasse pour la production catalytique de biocarburants
		Epurgaz	Epuration à chaud des gaz ex-gazéification de la biomasse
		Thermocapt	Développement d'un piège thermophorétique pour la capture d'aérosols liquides et solides pour l'épuration poussée des gaz issus d'une gazéification de la biomasse
	Thèses ADEME		Production de gaz de synthèse par interactions à haute température du gaz, des goudrons et du résidu carboné issus de la pyrolyse de biomasses
			Craquage thermique des vapeurs de pyrolyse-gazéification de la biomasse en réacteur parfaitement auto-agité par jets gazeux
BIO-E	Turboplasma	Destruction de goudrons assistée par plasma thermique	
<b>Recyclage/ valorisation des coproduits</b>	BIO-E	Reco2	Recyclage et valorisation du CO <sub>2</sub> dans un procédé de vapogazéification de biomasse en lit fluidisé
<b>Production de SNG</b>	BIO-E	Vegaz	Production de gaz naturel vert à partir d'un gaz de synthèse issu de gazéification de biomasses
<b>Liquéfaction directe - substitut au gazole</b>	PNRB	Lignocarb	Procédé de fabrication d'agrocaburants à partir de biomasse lignocellulosique biologiquement déstructurée
	Thèses ADEME		Effets inhibiteurs des composés oxygénés issus des liquéfiats de biomasse sur les réactions d'hydrodésulfuration du dibenzothiophène et du 4,6-diméthyl-dibenzothiophène
			Influence des composés oxygénés issus de la biomasse lignocellulosique et de leurs produits d'hydrodéoxygénation sur les cinétiques des réactions d'hydrotraitement de gazoles

## Feuille de route biocarburants avancés

Verrou	Programme	Acronyme du projet	Sujet
VOIE BIOCHIMIQUE production de bioéthanol			
<b>Prétraitement</b>	Agrice		Traitement énergétique de la biomasse lignocellulosique en vue de la production d'un sucre fermentescible, le lévoglucosane, précurseur du glucose
	PNRB	Specabbe	Combinaisons de prétraitements physico-chimiques et enzymatiques (hémicellulases et ligninases) de la paille et des autres substrats hémilignocellulosiques en vue de la production de bioéthanol
	BIO-E	Hemili	Étude et réduction des interactions hémicellulases-lignine pour le développement de procédés de prétraitement et de fractionnement enzymatiques performants de la lignocellulose
<b>Hydrolyse enzymatique</b>	Agrice		Valorisation en éthanol à usage de carburant de la fraction cellulosique des pailles de céréales
			Développement d'outils enzymatiques et de méthodologies d'hydrolyse pour la conversion de coproduits céréaliers en bioéthanol-carburant
			Surexpression et assemblage moléculaire d'enzymes fongiques complémentaires en vue de la production d'éthanol à partir de matériaux lignocellulosiques.
			Analyse protéomique et exploration à haut débit des ressources fongiques pour le modelage du génome de <i>Trichoderma reesei</i> en vue de la saccharification de paille de blé en sucres fermentescibles puis en éthanol
	PNRB	Hypab	Amélioration de l'hydrolyse enzymatique de la paille de blé par optimisation du mélange cellulolytique et des conditions de sa mise en œuvre
		E-Tricel	Exploration de la biodiversité enzymatique pour la complémentation du secrétome de <i>Trichoderma reesei</i> afin d'améliorer l'hydrolyse des lignocelluloses
			Production du biocarburant éthanol par utilisation des savoir-faire et infrastructures de l'industrie papetière
	BIP	Prepilpat	Étude de la faisabilité d'un pilote d'hydrolyse de pâtes à papier industrielles en sucres fermentescibles et de leur fermentation alcoolique
	Thèses ADEME		Modélisation cinétique de l'hydrolyse enzymatique de substrats lignocellulosiques. Influence de la structure et morphologie de substrats celluloses
			Étude du transfert et du mélange dans les fermenteurs aérobies. Application à des milieux à rhéologie complexe

Verrou	Programme	Acronyme du projet	Sujet
VOIE BIOCHIMIQUE production de bioéthanol (Suite)			
<b>Fermentation</b>	Agrice		Fermentation de pentoses en éthanol par une souche recombinante de <i>Zymomonas mobilis</i>
			Production d'éthanol à partir de résidus cellulosiques en utilisant la bactérie <i>Zymomonas mobilis</i>
			Nouveaux développements pour la production d'éthanol à partir de résidus cellulosiques en utilisant la bactérie <i>Zymomonas mobilis</i>
	PNRB	Fasst	Fermentation alcoolique d'hydrolysats lignocellulosiques et obtention de souches adaptées aux stress technologiques
		EthOH	Fermentation des hydrolysats de paille de blé pour la production de bioéthanol. Echelle pilote de laboratoire et démonstration de faisabilité sur pilote industriel et intégration procédés industriels.
	Thèses ADEME		Minimisation des coproduits de fermentation éthanolique : intégration du génie métabolique et microbiologique pour l'optimisation des rendements fermentaires chez <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .
		Etude des possibilités de valorisation des pentoses par fermentation alcoolique d'hydrolysat de paille de blé	
<b>Procédé SSF</b>	BIO-E	Actife	Adaptation des cellulases de <i>Trichoderma reesei</i> aux contraintes de la fermentation éthanolique

## Feuille de route biocarburants avancés

Verrou	Programme	Acronyme du projet	Sujet
--------	-----------	--------------------	-------

VOIE BIOCHIMIQUE : production de butanol

	BIP	Butadev	Développement d'un procédé industriel optimum de production de n-butanol à partir de multiples matières premières d'origine renouvelable
	Thèse ADEME		Production de butanol et d'acide butyrique à partir de cellulose par <i>Clostridium acetobutylicum</i> (ATCC824)
	BIO-E	Biobutafuel	Bioconversion d'hydrolysat de lignocellulose en butanol, biocarburant de nouvelle génération de haute efficacité, à haut titre et rendement

Verrou	Programme	Acronyme du projet	Sujet
--------	-----------	--------------------	-------

Production de lipides pour production de biodiesel/substitut au kérosène

<b>Conversion et stockage de l'énergie</b>	PNRB	Shamash	Production d'un biocarburant lipidique par des microalgues
		Lipicaero	Production microbienne de lipides spécifiques à usage biocarburant pour l'aéronautique : approche intégrée de la physiologie au procédé
	BIO-E	Algomics	Etudes globales du stockage et de la conversion de l'énergie chez les microalgues



Verrou	Programme	Acronyme du projet	Sujet
Production d'hydrogène			
<b>Par voie microbiologique fermentaire</b>	PNRB	Aceto-H2	Bioconversion en hydrogène des sucres dérivés de la cellulose et de l'hémicellulose à forts rendement et pureté
	BIO-E	Ingecoh	Ingénierie écologique d'écosystèmes microbiens producteurs de biohydrogène par voie fermentaire
		Anabio-H2	Valorisation des coproduits agricoles et industriels via la production d'hydrogène utilisant des souches microbiennes anaérobies mésophiles
		Hycofol_BV	Production d'hydrogène par couplage de procédés de fermentation à l'obscurité et à la lumière appliqué à la biomasse végétale
	Thèse ADEME		Etude des relations structure-fonctions de la glyceraldéhyde 3-phosphate ferrédoxine oxydoréductase et ingénierie métabolique de Clostridium acetobutylicum pour la production de biohydrogène
<b>Par voie microbiologique photosynthétique</b>	PNRB	Divhydro	Diversité des hydrogénases et de leur réactivité à l'oxygène.
		Biosolis	Développement de photobioréacteurs solaires intensifiés en vue de la production à grande échelle de bioénergies par micro-organismes photosynthétiques
		Hyliox	Ingénierie enzymatique de l'hydrogénase pour une production d'hydrogène photosynthétique
	BIO-E	Algo-H2	Optimisations génétiques, métaboliques et procédé de la photobioproduction d'hydrogène par la microalgue verte Chlamydomonas reinhardtii
<b>Par vaporeformage du bioéthanol, pour les PAC</b>	Agrice	Biostar	Développement d'un reformeur d'éthanol à membrane interne
			Etude de l'utilisation directe de l'éthanol comme carburant alternatif des piles à combustible
			L'éthanol comme carburant alternatif des piles à combustible
	PNRB	Biostar-2	Optimisation et qualification d'un reformeur à membrane compact fonctionnant au bioéthanol - production d'H <sub>2</sub>
	Thèses ADEME		Préparation d'hydrogène à partir de biocarburants. Etude de catalyseurs adaptés au vaporeformage du bioéthanol brut
		Production d'hydrogène par reformage de l'éthanol en vue d'alimenter une pile à combustible	
<b>Par électrolyse microbienne (PACM)</b>	BIO-E	Défi H12	Production de biohydrogène par électrolyse microbienne
		Biopac	Biocatalyseur d'oxydation de l'hydrogène pour les piles à combustible
Verrou	Programme	Acronyme du projet	Sujet

Evaluation des filières (environnementale, socio-technico-économique)

	PNRB	Anabio	Analyse environnementale et socio-technico-économique des filières de production d'énergie ex-biomasse
		Biomap	Analyse environnementale, socio-technico-économique et évaluation des risques des filières bioénergies : applications pratiques à différentes problématiques

> 7. Annexe 2

**Exemples de projets internationaux de production de biocarburants avancés par voie biochimique**

Nom / lieu du projet	Période	Objectif de la démonstration	Taille de la démonstration	Points remarquables
Pâte algale				
<b>Seambiotic Israël (Partenariat NASA)</b>	2003-2010	Voie autotrophe en bassins ouverts alimentés en eau de mer  Remédiation du CO <sub>2</sub> produit par la centrale électrique au charbon d'Ashkelon  Les piscines d'algues sont remplies d'eau de mer permettant de refroidir les turbines de l'usine. La variété d'algue utilisée existe dans la Méditerranée, mais en petite quantité, le CO <sub>2</sub> produit par l'usine lui permet de se développer dans les piscines à une concentration un million de fois plus élevée. La technologie de Seambiotic réduit de manière considérable le coût de production des microalgues et réduit les émissions industrielles de CO <sub>2</sub> . La production est de 1 litre de carburant pour 5 kg d'algues.	En cours = 5ha  La société passe de son étude pilote en centrale à des projets de culture industrielle d'algues à grande échelle.	Seambiotic USA a signé un accord avec le centre Glenn de la NASA pour optimiser la production de microalgues en tant que matière première de biocarburants pour l'aviation.  Seambiotic s'investit également dans la production de « food additives omega3 », de nourriture pour les poissons, de biodiesel et de bioéthanol issus des microalgues.
<b>Solix Colorado (Partenariat Valero Energy Corp.)</b>	2006-2010	Photo-bioréacteurs  Production d'algues en photo-bioréacteurs (sacs de plastique souple) immergés dans des bassins d'eau	3 000 gallons/acre/an (28 000 litres/ha/an) sur 0,8 ha	Fournisseur de système de production

Nom / lieu du projet	Période	Objectif de la démonstration	Taille de la démonstration	Points remarquables
----------------------	---------	------------------------------	----------------------------	---------------------

Huile algale pour biofuels et autres produits (protéines, sucres, combustibles solides)

<b>ENI Sicile Gela Refinery</b>	2000	Production de biocarburant  Opération de petits pilotes utilisant à la fois des bassins ouverts et des photobioréacteurs confinés	1 ha	En préparation : un démonstrateur de 2 000 m <sup>2</sup> de bassins ouverts et 150 m <sup>2</sup> de photobioréacteurs
<b>Petroalgae (XL Tech Group) Floride</b>	2006-2010	Voie autotrophe en bassins ouverts (eaux saumâtres) Remédiation du CO <sub>2</sub>	Site actuel = 7,2 ha En construction= 20 ha	Commercialisation d'huile algale et valorisation des coproduits
<b>Cellana (JV Shell-HR Biopetroleum) Etats-Unis</b>		Voie autotrophe (algues marines locales non modifiées) photobioréacteurs pour inoculation, puis bassins ouverts Production de biodiesel algal	Site actuel = 2,5 ha Production visée : 3 millions de gallons/an. (750 acre/315 ha)	Le pilote utilisera 10 % des émissions de CO <sub>2</sub> de la centrale électrique de Maalaea à Hawaï
<b>Solazyme Etats-Unis (Partenariat Chevron)</b>	2003-2010	Voie hétérotrophe et OGM  Production d'huile algale à partir d'un mélange d'algues et de sucres non alimentaires dans des équipements standard de fermentation (digesteurs).	>20 000 gallons/an en 2010 Site commercial en 2013 Test carburant avec Mercedes	Valorisation des coproduits protéinés en alimentation humaine et animale, nutraceutiques, cosmétiques et bioproduits (surfactants, lubrifiants, polymères)

## Feuille de route biocarburants avancés

Nom / lieu du projet	Période	Objectif de la démonstration	Taille de la démonstration	Points remarquables
Biodiesel - Carburacteur				
<b>General Ato Etats-Unis</b> <b>Etats-Unis</b> <b>(partenariat</b> <b>Inventure Chemicals)</b>		Voie autotrophe en bassins ouverts  Produire du carburacteur à moins de 2 \$/gallon	Financé par le Darpa (Defense Advanced Research Projects Agency)	Juin 2010 : 2e appel d'offre du Darpa pour produire 8 millions de gallons de carburacteur à partir d'algues
<b>Inventure Chemicals</b> <b>Etats-Unis</b>		Extraction/conversion, séparation hydrophobique, séchage flash et hydrolyse		Ne travaille pas sur la production d'algues, mais sur les étapes en aval
<b>Sapphire Energy</b> <b>Etats-Unis</b>		Production de diesel et de carburacteur par hydrogénation catalytique des lipides extraits d'algues modifiées génétiquement et cultivées en bassins ouverts	Capital risque de 100 millions de \$	Procédé d'hydrogénation fourni par Dynamic Fuels
		Assainissement + Biobrut		
<b>Aquaflow</b> <b>Nouvelle-Zélande</b> <b>(Partenariat UOP)</b>	2009	Utiliser les algues sauvages naturellement présentes dans les bassins de traitement des eaux usées, urbaines et agricoles, pour recycler les déchets et produire une pâte algale qui, après conversion hydrothermale (Solray), peut être valorisée en biobrut (l'objet n'est pas ici l'extraction de lipides).	Lagunes de 60 ha  Autres sites en cours  Test carburant avec Rover	Production 8T/ha/an (90 g/m <sup>3</sup> )  Teneur en lipides 4 à 10 %  Pas de nutriments  Consommation énergétique réduite de 5,5 à 18,5 MJ/kg
<b>Christchurch</b> <b>Nouvelle-Zélande</b> <b>(NIWA)</b>	2010-2015	Déterminer les rendements énergétiques et les coûts de production, de récolte et de conversion des microalgues issues d'eaux usées en biobrut sur une échelle de production encore jamais expérimentée.  Conversion hydrothermale (Solray)	Bassins sur 5 ha.  Plus grand projet au monde de production d'algues à partir de bassins d'eaux usées (2 000 m <sup>3</sup> /jour) avec apport de CO <sub>2</sub> .	Les premiers bassins anaérobies couverts fournissent les 500 m <sup>3</sup> /h de l'installation de traitement du biogaz en CO <sub>2</sub> .

Nom / lieu du projet	Période	Objectif de la démonstration	Taille de la démonstration	Points remarquables
Biotechnologies				
<b>Synthetic Genomics Californie (Partenariat Exxon Mobil)</b>		OGM + Production intracellulaire. Société créée par Craig Center (séquençage du génome humain) de biologie synthétique – y compris design de bactéries ou formes de vies minimales pour une bioproduction  Au départ orientée alcools lourds	Très forte capitalisation investissement méthodologique  Capital risque de 300 millions de \$ !	
<b>Algenol Etats-Unis</b>	A partir de 2010	OGM + production intracellulaire d'éthanol par cyanobactéries puis séparation éthanol/eau		Algenol construirait dès 2010 un démonstrateur de production d'éthanol par fermentation des sucres contenus dans les algues sélectionnées par Algenol et cultivées en photoréacteurs extensifs à partir d'eau de mer
<b>Gevo Etats-Unis</b>	2008	Bio butanol. Pr Liao (Caltech) et Stéphanopoulos (MIT) semblent coopérer avec DuPont de Nemours sur le butanol		TOTAL est entré dans le capital de Gévo en avril 2009
<b>AMYRIS Etats-Unis (Partenariat BP)</b>	A partir de 2010	Produire des carburants type diesel et carburéacteur à partir de sucre. Un démonstrateur en construction est financé par le DOE (Department Of Energy) pour fabriquer du diesel à partir de sorgho par fermentation par une souche obtenue par biologie synthétique. Ces carburants ne sont pas produits à partir de plantes non alimentaires, la voie de synthèse semble néanmoins prometteuse	Production de terpènes par E coli recombinant isoprènes (caoutchouc) monoterpènes et diterpènes (carburéacteurs et biodiesels)  Site de production pilote : Brésil en cours	D'autres applications possibles des lipides obtenus ; ont annoncé la production de lipides à partir de pentoses
<b>LS9</b>		Diesel et carburéacteur à partir de sucre . Fermentation de sucres par une souche d'E coli modifiée qui produit et sécrète des lipides et alcools gras avec un objectif final de produire des hydrocarbures	Fondé par Chris Church et Jay Kiesling	Partenariats avec : • Chevron pour les applications biofuel • P&G pour la chimie verte et Shell

## Feuille de route biocarburants avancés

Nom / lieu du projet	Période	Objectif de la démonstration	Taille de la démonstration	Points remarquables
Macroalgues				
<b>E.I. DuPont de Nemours &amp; Co + Bio Architecture Lab + Butamax Advanced Biofuels (JV BP/ Dupont) (Etats-Unis)</b>	A partir de 2010	Aquaculture off-shore de macroalgues brunes (Macrocystis pyrifera).  Transformation microbienne de la biomasse algale en isobutanol carburant		Projet à 18 M\$, dont 9 M\$ du DOE  Pas de compétition cultures vivrières et terres arables  Pas d'apport d'eau, ni fertilisants ni phyto
<b>Bio Architecture Lab Chile (Chili)</b>	A partir de 2010	Aquaculture off-shore de macroalgues brunes (Macrocystis pyrifera).  Transformation microbienne de la biomasse algale en bioéthanol	100 ha	Projet de démo à 5 M\$  Objectif : remplacement 5 % carburants de transport au Chili (10 000 ha mis en aquaculture)  Pas de compétition /terres arables. Pas d'apport d'eau, ni fertilisants, ni phyto
<b>Apollo and Poseidon Initiative - 2025 (Japon)</b>	A partir de 2008	Aquaculture off-shore de macroalgues brunes.  Transformation microbienne de la biomasse algale en bioéthanol carburant  Biorémédiation CO <sub>2</sub>  Biosorption et récupération uranium eau de mer		Pas de compétition  /terres arables. Pas d'apport d'eau, ni fertilisants ni phyto.  Objectif 2025 : 20 millions de gallons de bioéthanol + 1 950 tonnes d'uranium par an, à partir de 65 MT d'algues



Nom / lieu du projet	Période	Objectif de la démonstration	Taille de la démonstration	Points remarquables
Ethanol lignocellulosique				
<b>Nile</b> <b>Projet coordonné par l'IFP, réunit des partenaires industriels, universités et centres de recherches de 12 pays, membres de l'Union européenne.</b>	2006-2010	L'objectif est de mettre au point de nouvelles technologies compétitives de production d'éthanol carburant à partir de biomasse cellulosique (résidus de bois, pailles de céréales). Il s'agit notamment d'améliorer les étapes de transformation biologique de la cellulose en éthanol (hydrolyse et fermentation) et d'en accroître le rendement.	Un pilote à l'échelle semi-industrielle a été conçu par la société Sekab-Etechnologie, à Örnsköldsvik (Suède), qui étudie la faisabilité de la filière (coûts et impacts environnementaux).	Réduction du coût de l'hydrolyse enzymatique et amélioration de l'efficacité des enzymes produites par des champignons filamenteux. Sélection des levures pour la fermentation des pentoses.
<b>Inbicon-Dong Energy Danemark</b>	2009	Conversion de la paille  Démonstrateur à Kalundborg  Signature du premier contrat commercial en mars 2010 avec le Japonais Mitsui	4 300 t/an EtOH	Coproduits : molasses C5 et biocombustibles solides
<b>Abengoa Espagne</b>		Investissements en alcool lignocellulosique des générations 1,5 et 2.	Pilote actuel : 70 T/j	Abengoa a annoncé en janvier 2010, s'être associé à Mid-Kansas Electric Co. LLC pour développer un éthanol lignocellulosique et alimenter en énergie une usine à Stevens County (Kansas) pour produire 15 milliards de gallons par an d'éthanol et 75 mégawatts par an.
<b>Poet Etats-Unis</b>	2008-2012	Pilote en fonctionnement à Scotland SD (Etats-Unis) depuis 2008  Démonstration en construction à Emmetsburg, Iowa (Etats-Unis)	25 millions gallons/an	
<b>Biogasol Danemark (Partenariat Pacific Ethanol)</b>	2010-2012  à partir de 2008	Validation du procédé Biogasol 2 démonstrateurs de production d'éthanol lignocellulosique en construction : • « BornBioFuel » sur l'île de Bornholm (Danemark) • Avec Pacific Ethanol à Boardman (Oregon, Etats-Unis)	2,7 millions de gallons à Boardman	Les pentoses sont fermentés en éthanol par une souche microbienne thermophile. Les résidus sont transformés en combustibles et biogaz

## Feuille de route biocarburants avancés

Nom / lieu du projet	Période	Objectif de la démonstration	Taille de la démonstration	Points remarquables
Procédé hybride - EtOH				
<b>Coskata Etats-Unis (Partenariat GM)</b>	2010-2012	<p>A suivre en fonction d'une conversion des gaz de synthèse par biotechnologies blanches</p> <p>Procédé combinant la thermochimie pour produire du gaz de synthèse puis sa fermentation en éthanol et quelques alcools plus lourds</p> <p>Annonce de la construction d'une usine à Melbourne en Australie</p>	<p>Annoncent 400 litres de biocarburant par tonne de déchets</p> <p>Un investissement industriel en Floride 200 millions litres/an</p>	Matières premières : déchets ménagers, déchets de la construction et démolition
<b>Ineos UK</b>	2010-2011	Procédé combinant la thermochimie pour produire du gaz de synthèse puis sa fermentation en éthanol	8 millions de gallons + 2 MW électriques (d'ici 2011)	<p>Matières premières : déchets de bois, déchets de démolition, déchets organiques</p> <p>L'excédent d'énergie du procédé est valorisé en électricité</p>
Nom / lieu du projet	Période	Objectif de la démonstration	Taille de la démonstration	Points remarquables

### Biogaz

<b>Svenk Biogas Suède</b>	1997	L'unité de production de biogaz de Svenk Biogas AB à Linköping (Suède) peut traiter 100 000 tonnes de déchets (essentiellement d'abattoirs) pour obtenir 4,7 millions de m <sup>3</sup> de biométhane (97 % de CH <sub>4</sub> ). Le gaz produit est compressé à 250 bars et est utilisé dans les bus des villes (l'ensemble de la flotte utilise du biogaz), des véhicules particuliers (12 stations) et le premier train roulant au biogaz au monde.	Contrat vient d'être signé avec un producteur chinois de biogaz qui permet à l'unité de production d'augmenter de 25 % la production de méthane.	Système automatisé AMPTS (Automatic Methane Potential Test System) permet mesures et calculs pour les conditions de fermentation pour dégrader 95 % du substrat.
-------------------------------	------	--	--	--

## > 8. Annexe 3

### **Critères de durabilité des biocarburants (directive EnR)**

La **directive européenne 2009/28/CE** du 23 avril 2009 fixe pour chaque Etat membre l'objectif contraignant d'atteindre **10 % d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergie du secteur des transports en 2020**. Les **biocarburants** devraient contribuer pour une grande part à atteindre cet objectif. Toutefois, pour tenir compte des débats concernant leur développement, la Commission européenne a assorti ces objectifs de **deux conditions importantes** :

- la production de biocarburants doit respecter des **critères de durabilité**,
- la production de **biocarburants de deuxième génération** doit être **opérationnelle en 2020**.

Les **critères de durabilité** sont de deux sortes :

#### **1. Obligations**

- > réduction d'au moins 35 % des émissions de GES en 2010 (2013 pour les unités en service au 1<sup>er</sup> janvier 2008), puis 50 % en 2017 (60 % pour les installations fonctionnant à partir de 2017),
- > pas de production de biocarburants à partir de matières premières provenant de terres de grande valeur en termes de biodiversité, ou présentant un important stock de carbone ou encore qui sont des tourbières.

Ces deux critères visent à limiter au maximum les changements d'usage des sols, le déstockage de carbone lié au développement des biocarburants, et à atténuer très fortement leurs effets. La directive prévoit formellement de renforcer le premier critère d'ici à 2020. Les scénarios de progression des objectifs d'incorporation évoqués dans cette feuille de route vont de fait contribuer à générer des contraintes pour atteindre le second critère. L'obligation de respect de ces deux critères va créer progressivement des verrous à relever :

- sur un **plan technologique et scientifique** : évolution des procédés industriels de production, nouvelles voies de conversion de la biomasse,
- du point de vue des **pratiques culturelles** : évolution des caractéristiques des plantes et des autres ressources à mobiliser.

Ces verrous rejoignent ceux évoqués dans cette feuille de route.

Un **outil** a été mis au point grâce au soutien de l'Europe dans le cadre du **projet Bioscore** du sixième PCRD (Programme-cadre de recherche et développement) afin d'évaluer les **effets des politiques européennes en termes de biodiversité**. Il a été notamment utilisé pour calculer les impacts sur la biodiversité d'une politique de développement des biocarburants de deuxième génération à partir de biomasse lignocellulosique. Les résultats montrent que pour les scénarios étudiés, 28 % des espèces sauvages seraient affectées négativement (diminution des populations et des aires de peuplement, moins de richesse au niveau des espèces) et que 10 % seraient impactées positivement. La pression environnementale la plus importante est le **changement d'affectation des sols**. Ceci représente un verrou important à adresser à l'horizon 2020, aussi bien en termes de pratiques culturelles que de transformation de la biomasse en biocarburant ou sa valorisation la plus large possible.

#### **2. Fourniture d'informations**

- > mise en place de mesures de protection des sols, de l'air, de l'eau, restauration des terres dégradées, maîtrise de la consommation d'eau,
- > respect des conventions internationales (droit du travail, prévention des risques biotechnologiques, protection des espèces menacées).

Par ailleurs, la **Commission** souhaite que le développement des biocarburants pour contribuer à ces objectifs ne conduise pas à une concurrence avec les ressources à usage alimentaire. C'est la raison pour laquelle elle **incite à développer la production des biocarburants de deuxième génération**, notamment ceux à partir de **déchets** qui compteront double dans le bilan national. Dans la même optique, elle cherchera à s'assurer que la production des biocarburants n'induisse **pas d'impact important sur le prix des denrées alimentaires**, en particulier pour les personnes vivant dans les pays en développement.

## > 9. Annexe 4

### Evaluation des impacts « Prélèvements de la ressource biomasse » liés à la mise en œuvre des engagements du Grenelle de l'environnement sur le développement de la biomasse énergie

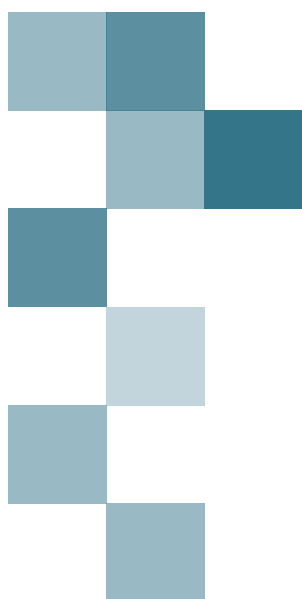
La **biomasse disponible** au niveau français de manière additionnelle **pour l'énergie** (chaleur, électricité et biocarburant) **et pour la chimie** est évaluée **entre 15,7 et 20 Mtep/an**.

Elle comprend :

- les produits forestiers (plaquettes forestières, produits connexes des industries du bois et produits bois en fin de vie),
- les déchets organiques (huiles, graisses, déchets ménagers, déchets agricoles et des industries agroalimentaires, boues de stations d'épuration) et farines animales,
- les résidus agricoles (pailles),
- les cultures énergétiques et les sons (enveloppes des céréales).

Le **gisement additionnel** disponible se répartit de la manière suivante :

- produits forestiers,
- déchets organiques et farines animales,
- résidus agricoles.



## Produits forestiers

La biomasse forestière française est estimée à 20 millions de m<sup>3</sup> [12 millions de m<sup>3</sup> de bois d'industrie et de bois énergie dont 95 % se trouve en forêt, et 7 millions de m<sup>3</sup> de menus bois (cimes et petites branches)]. Aux conditions techniques et économiques actuelles du marché, **4 Mtep**, soit 16 millions de tonnes de **biomasse forestière**, et **2 Mtep de biomasse issue de l'entretien des vignes, vergers, arbres en milieu urbain et des souches** pourraient potentiellement contribuer annuellement à la production d'énergie (via la production de plaquettes forestières et bocagères). Si le prix du bois issu des forêts est multiplié par 2, ce gisement de **biomasse forestière** passerait à **8 Mtep**.<sup>18</sup>

D'après l'enquête du service des études et des statistiques industrielles (Sessi) du ministère de l'économie, de l'industrie et de l'emploi<sup>19</sup> et l'enquête annuelle de branche de 2006<sup>20</sup>, le gisement potentiel de produits connexes des industries du bois pour l'énergie serait compris entre 15 000 tep et 45 000 tep. On estime par ailleurs que 125 000 tep de produits connexes des industries du bois sont enfouies ou brûlées (issues de gisements dispersés)<sup>21</sup>. Au total, **environ 0,15 Mtep supplémentaires de produits connexes des industries du bois pourraient répondre aux besoins du Grenelle**.

**D'autre part, environ 0,1 Mtep/an de produits bois en fin de vie** ne font pas l'objet d'une valorisation matière ou énergétique et pourraient potentiellement répondre aux nouveaux besoins<sup>22</sup>.

Au total, le **gisement des produits forestiers atteindrait entre 6,2 et 10,2 Mtep**.

18 - Etude ADEME IFN Solagro FCBA sur la disponibilité de la biomasse forestière, populicole et bocagère à l'horizon 2020, 2009.

19 - Enquête Sessi sur la production de déchets non dangereux, 2006.

20 - Enquêtes annuelles de branches, 2006

21 - Etude ADEME-Arthur&Andersen, Chaufferies-bois : état des lieux et perspectives dans les industries de 1re et 2e transformation du bois, rapport de la phase d'analyse stratégique, juin 2001.

22 - Enquête Sessi sur la production de déchets non dangereux, 2006

## Déchets organiques et farines animales

D'après le syndicat des industries françaises de coproduits, les **huiles** (huiles alimentaires usagées, sous-produits du raffinage des huiles) et **graisses** (graisses animales, déchets gras) représenteraient un gisement mobilisable compris entre **0,3 et 0,6 Mtep/an**.

Les **déchets** biomasse des **ménages** (ordures ménagères et déchets des artisans et commerçants), non valorisés aujourd'hui, représenteraient un gisement potentiel de **1,7 Mtep/an**<sup>23</sup>.

Le gisement total de **déchets agricoles mobilisables** (fumiers, lisiers) est estimé à 4.9 Mtep<sup>24</sup>. Ces effluents d'élevage sont en majorité épandus en tant qu'amendements ou fertilisants sur les parcelles de culture. On estime à 50 % du gisement total le gisement disponible pour l'énergie, **soit 2,5 Mtep**<sup>25</sup>. La production de **déchets organiques par les industries agroalimentaires** (IAA) en France est estimée à 48 Mtonnes brutes correspondant à environ 9 Mtonnes de matière organique. 92 % de ces déchets sont valorisés, à 85% dans l'alimentation animale. En considérant un potentiel méthanogène moyen de 262 ktep/Mt de matière organique, le gisement disponible et mobilisable pour l'énergie serait de **0,2 Mtep**.

Les boues issues du traitement des effluents urbains et industriels, représenteraient un gisement de **0,45 Mtep** mobilisable pour une valorisation énergétique (méthanisation)<sup>26</sup>.

En ce qui concerne le **gisement de farines animales**, on distingue trois catégories de sous-produits animaux :

- catégorie 1 : toute partie du corps d'un animal suspecté ou effectivement infecté par une encéphalopathie spongiforme transmissible ;
- catégorie 2 : regroupe principalement les cadavres ou les parties de cadavres d'animaux morts autrement que par abattage et n'appartenant pas à la catégorie 1 ainsi que le lisier et le contenu de l'appareil digestif ;
- catégorie 3 : sous-produits animaux issus des filières d'alimentation humaine, déchets de restauration, etc..., non destinés à l'alimentation humaine pour des raisons sanitaires ou commerciales.

Les farines animales issues des catégories 1 et 2 représentent un gisement de 130 000 tonnes (valeur de 2008, SIFCO)<sup>27</sup>. En 2008, l'intégralité des farines a été incinérée, essentiellement dans les cimenteries.

Les farines animales issues de la catégorie 3 sont valorisées en alimentation animale pour les deux tiers et en engrais pour le tiers restant.

Le PCI (pouvoir calorifique inférieur) moyen des farines animales s'élève à 0,42 tep/tonne (source SIFCO).

Le potentiel énergétique du gisement total de **farines animales** s'élève donc à **55 000 tep**.

Au total le **gisement des déchets organiques** mobilisables pour une **valorisation énergétique** atteindrait entre **5,2 et 5,5 Mtep**.



23 - Etude Ministère de l'Economie, de l'Industrie et de l'Emploi, Les filières énergétiques à partir de biomasse, 2010

24 - Etude biogaz, état des lieux et potentiel du biométhane carburant, ADEME GDF IFP, 2009.

25 - Etude Ministère de l'Economie, de l'Industrie et de l'Emploi, Les filières énergétiques à partir de biomasse, 2010.

26 - Etude biogaz, état des lieux et potentiel du biométhane carburant, ADEME GDF IFP, 2009.

27 - Etude prospective sur la valorisation des sous-produits animaux, MAAP, juin 2010.

## Feuille de route biocarburants avancés

### Résidus agricoles

Les résidus agricoles sont constitués des parties végétales laissées au sol après la récolte. On distingue les pailles de céréales, les pailles d'oléagineux et les cannes de maïs.

Les gisements totaux disponibles une fois pris en compte les pertes lors de la récolte s'élevaient à<sup>28</sup> :

- 33,2 Mtms (millions de tonnes de matière sèche) pour les pailles de céréales,
- 2,68 Mtms pour les pailles d'oléagineux,
- 5,81 Mtms pour les cannes de maïs.

Pour les **pailles de céréales**, le taux de retour au sol<sup>29</sup> s'élève à 67% (en tms<sup>30</sup>), ainsi la quantité de pailles exportables des parcelles cultivées s'élève à environ 11 Mtms. On estime à 60% la part de paille exportée à destination de l'élevage<sup>31</sup>. Ainsi, le **gisement** potentiellement exportable **pour une valorisation énergétique s'élève à 4,4 Mtms**.

Concernant les **pailles d'oléagineux**, l'opération de fauchage des pailles de colza ou des cannes de tournesol entraîne d'importantes pertes (50%). Etant équivalentes en quantité au taux de retour au sol nécessaire, il n'est pas comptabilisé de retour au sol complémentaire pour le colza et le tournesol. Ceci n'étant pas vrai pour le lin, il est considéré un retour au sol des pailles de 50%<sup>32</sup>. Sur ces bases, le **gisement de pailles d'oléagineux potentiellement exportable et valorisable en énergie s'élève alors à environ 2,64 Mtms**.

Pour les **cannes de maïs**, le taux de retour au sol minimum s'élève à 50%<sup>33</sup>, ainsi la **quantité de pailles exportables et valorisables en énergie s'élève à environ 2,9 Mtms**.

Ainsi le **gisement global de pailles valorisable en énergie s'élève à 9,9 Mtms, soit 4,27 Mtep** (hypothèse : PCI de 0,43 tep/tms<sup>34</sup>)

### Bilans

En conclusion, **le gisement additionnel potentiel de biomasse est évalué entre 15,7 et 20 Mtep/an** comme détaillé dans le tableau 1.

Tableau 1 : Bilan de l'offre de biomasse

OFFRE	(Mtep/an)	
<b>Produits forestiers</b>	<b>6,2</b>	<b>10,2</b>
Forêt	4	8
Vignes, vergers, alignements urbains	2	2
Produits connexes industrie du bois	0,15	0,15
Bois en fin de vie	0,1	0,1
<b>Résidus agricoles dont paille</b>	<b>4,3</b>	<b>4,3</b>
<b>Déchets organiques et farines animales</b>	<b>5,2</b>	<b>5,5</b>
Déchets graisseux	0,3	0,6
Déchets biomasse des ménages	1,7	1,7
Déchets agricoles	2,5	2,5
Déchets organiques IAA	0,2	0,2
Boues de traitement urbains/industriels	0,45	0,45
Farines animales	0,05	0,05
<b>Total</b>	<b>15,7</b>	<b>20</b>

28 - Données PAC issues de l'Observatoire Biomasse, FranceAgriMer, MAAPRAT

29 - Le terme «retour au sol» correspond, en agronomie, à la part des pailles laissées sur place pour assurer au sol des apports en matière organique.

30 - ADEME, Etude AGRICE, 1998

31 - Mémoire AgroParisTech, A. Departe

32 - Observatoire Biomasse, FranceAgriMer, MAAPRAT

33 - ADEME, Etude AGRICE « Les cultures lignocellulosiques et herbacées pour la production de biomasse à usage non alimentaire » 2009

34 - Les biocarburants, Etat des lieux, perspectives et enjeux de développement, Daniel Ballerini, IFP Publications, 2006



L'offre en bois énergie doit être comparée à la demande en bois prévue par le comité opérationnel énergies renouvelables du Grenelle de l'environnement.

Tableau 2 : Bilan de la demande en bois pour un usage chaleur et électricité

DEMANDE en 2020 (Mtep/an)		
<b>Chaleur renouvelable biomasse</b>		
	Utile	besoin entrée chaudière
	3,85	4,8
<b>Electricité renouvelable biomasse</b>		
	Utile	besoin entrée chaudière
	2,4	6,8
<b>Total</b>	<b>6,25</b>	<b>11,6</b>

Le gisement « déchets organiques et farines animales » compris entre 5,2 et 5,5 Mtep est totalement mobilisé pour répondre aux objectifs du Grenelle de l'environnement. Les 85 % des besoins en biomasse restant pour répondre aux objectifs du Grenelle de l'environnement (soit entre 6,1 et 6,4Mtep) pour une valorisation chaleur et électricité seront couverts par le gisement « produits forestiers » soit entre 5,2 et 5,4 Mtep et 15% par le gisement « résidus agricoles » soit entre 0,9 et 1 Mtep.

**Ainsi le solde du gisement biomasse disponible pour un usage biocarburant et chimie du végétal, bioproduits, biomatériau s'élève entre 4,1 Mtep et 8,4 Mtep.**

Sur la base de la répartition entre usages des ressources biomasse et en supposant que ce solde est entièrement dédié à une valorisation biocarburant, on en déduit que le gisement disponible pour les biocarburants de seconde génération serait réparti de la façon suivante :

- 0,8 Mtep à 5 Mtep de produits forestiers soit entre 1,8 et 11,4 Mtms/an (PCI de 0,44 tep/tMS),
- 3,3 Mtep à 3,4 Mtep de ressources agricoles soit entre 7,7 et 7,9 Mtms/an (PCI de 0,43tep/tms).

A partir de ce solde de biomasse disponible de **9,5 et 19,3 Mt ms/an**, la **production de biocarburant de seconde génération s'élèverait donc**, suivant une hypothèse de rendement matière de l'installation de 15% (cf. tableau 2 pour une production uniquement de biodiesel par voie BTL), **entre 1,47 Mtep/an et 3 Mtep/an.**

Suivant une **hypothèse ambitieuse de rendement matière** de l'installation de biocarburant de deuxième génération **de 30 %** (cf tableau 5 pour une production uniquement de biodiesel par voie BTL), la production de biocarburant s'élèverait **entre 2,9 Mtep et 5,9 Mtep par an.**



## Feuille de route biocarburants avancés

### **Cultures énergétiques**

---

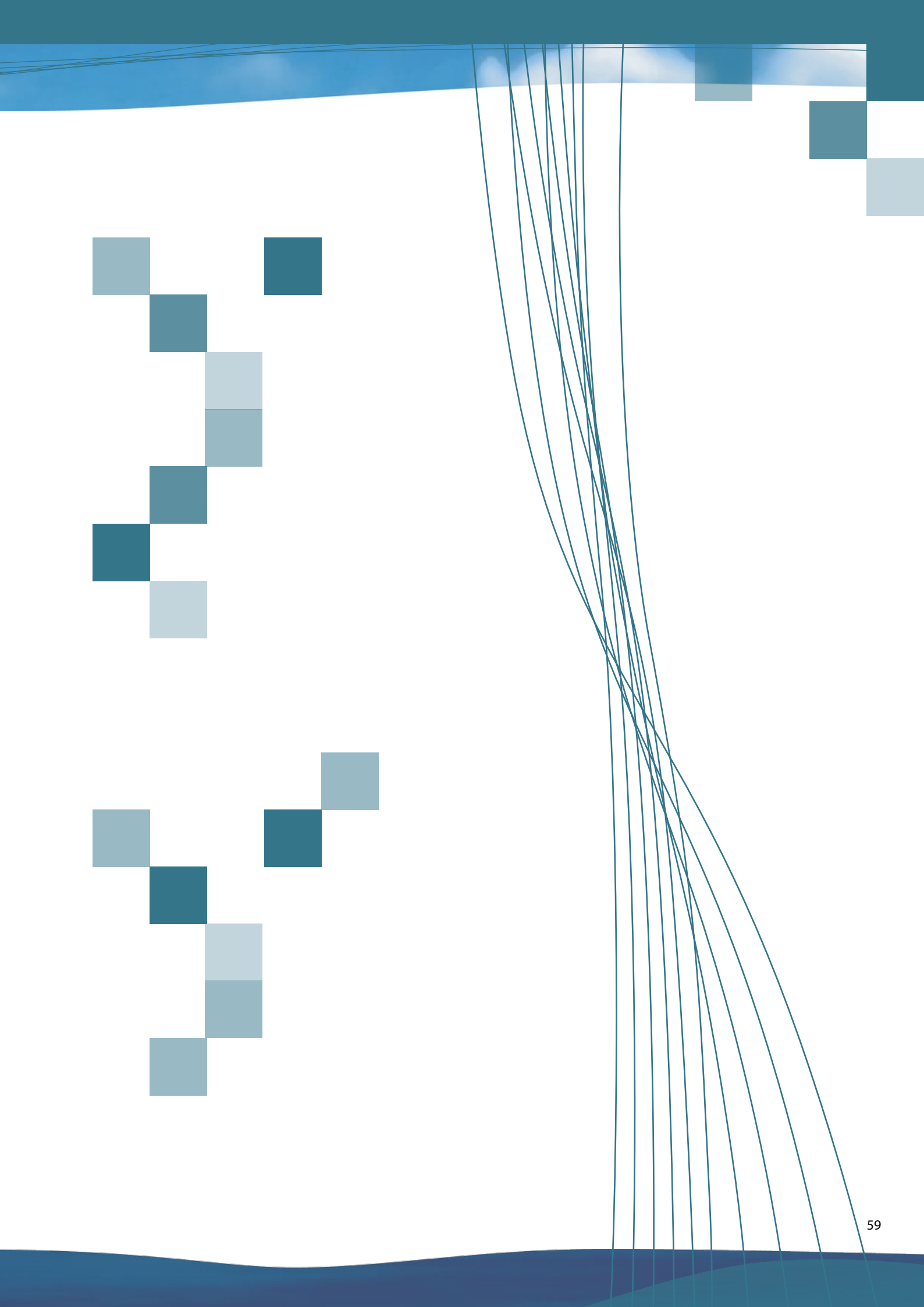
Les cultures énergétiques peuvent constituer un gisement potentiel supplémentaire permettant de répondre à la demande en biocarburant, mais il faudra tenir compte des usages concurrents des sols (effets directs et indirects) pour bien mesurer le bénéfice.

D'après le récent programme Ecobiom du programme national de recherche sur les bioénergies, le **gisement plausible de production lignocellulosique** (taillis à courte rotation, triticales) serait entre **1 et 5 Mtep/an** suivant le prix du bois.

En considérant un rendement moyen de 10 tms/ha/an et un PCI de 0,43 tep/tms, ce gisement représenterait de **230 000 ha à 1,2 Mha** soit une proportion de **1 à 7 % des terres arables** dont la surface s'élève à 18,3 Mha en France (source : INSEE).

En prenant en compte ce gisement potentiel supplémentaire, la **production de biocarburant de deuxième génération** à partir de ce solde de biomasse disponible s'élèverait, suivant une **hypothèse de rendement matière de 15 %** (cf. tableau 2 de la feuille de route, pour une production uniquement de biodiesel par voie BTL), entre **1,8 Mtep et 4,8 Mtep par an**.

Suivant une **hypothèse ambitieuse de rendement matière** de l'installation de biocarburant de deuxième génération de 30 % (cf tableau 5 pour une production uniquement de biodiesel par voie BTL), la production de biocarburant s'élèverait **entre 3,6 Mtep et 9,5 Mtep par an**.



## L'ADEME en bref

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la triple tutelle du ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

