



HAL
open science

Les usages non-alimentaires de la biomasse végétale à l'horizon 2050. Rapport de la prospective

Lisa Gauvrit, Olivier Mora

► To cite this version:

Lisa Gauvrit, Olivier Mora. Les usages non-alimentaires de la biomasse végétale à l'horizon 2050. Rapport de la prospective. [Rapport de recherche] INRA. 2010, 91 p. hal-03277974

HAL Id: hal-03277974

<https://hal.inrae.fr/hal-03277974>

Submitted on 5 Jul 2021

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

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



Atelier de Réflexion Prospective VegA : *Quels végétaux et systèmes de production durables pour satisfaire les besoins en bioénergie, synthons et biomatériaux ?*

Les usages non-alimentaires de la biomasse végétale à l'horizon 2050

Lisa Gauvrit, Olivier Mora
INRA – Délégation à l'Expertise, à la Prospective et aux Etudes (Depe)

Introduction

Depuis quelques années, une attention grandissante est portée à la biomasse végétale pour des usages non alimentaires. Dans le secteur de l'énergie, son utilisation est envisagée comme une voie possible de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de diminution de la dépendance aux énergies fossiles. Elle apparaît également comme une source de carbone renouvelable dans les domaines de la chimie et des matériaux. Plus généralement, le développement de nouvelles filières de valorisation de la biomasse est considéré comme une opportunité pour stimuler les économies agricoles et rurales.

Ce regain d'intérêt a été accompagné par la mise en œuvre de politiques publiques ambitieuses dans de nombreux pays. Ainsi, durant les années 2000, la production de bioéthanol et de biodiésel a progressé de façon considérable dans le monde. Mais dans le même temps, de vives controverses sur ces nouveaux usages et leurs conséquences ont émergé. Leur rôle dans la crise alimentaire des années 2007-2008, leur contribution à la lutte contre le changement climatique et plus largement le bilan environnemental, économique et social de leur développement à large échelle, sont aujourd'hui largement débattus dans les cénacles scientifiques et font l'objet de nombreuses expertises internationales.

Le rapport qui suit présente les résultats d'une étude prospective conduite dans le cadre de l'*Atelier de Réflexion Prospective VegA* (ARP VegA). L'objectif général de cet atelier est de réaliser un état de l'art sur les végétaux et les systèmes de production durables pour satisfaire les besoins futurs en bioénergie, biomolécules et biomatériaux, et d'identifier les verrous scientifiques et les questions de recherche qui y sont associés. L'étude prospective ici présentée a quant à elle, pour vocation de compléter les travaux scientifiques de l'ARP VegA par une réflexion transversale, afin de mettre en perspective les pistes de recherche définies par les experts vis-à-vis des enjeux énergétiques, alimentaires et environnementaux de long terme. Coordonnée par une équipe projet au sein de la Délégation à l'Expertise scientifique collective, à la Prospective et aux Etudes de l'INRA, l'étude a consisté en la construction de scénarios sur *les futurs usages non alimentaires de la biomasse végétale* à l'horizon 2050 et à l'échelle mondiale. Un groupe de travail spécifique, constitué d'experts d'horizons disciplinaires et institutionnels divers, s'est réuni pour mener cette réflexion.

Après avoir décrit le cadre d'analyse et la démarche adoptée, ce rapport fait état des principales tendances qui ont rétrospectivement marqué l'évolution des usages de la biomasse non alimentaire dans le monde ces dernières années, et répertorie les controverses scientifiques et sociétales qui concernent ces domaines d'activité. Les enjeux énergétiques et alimentaires de long terme, auxquels le devenir des usages de la biomasse est étroitement lié, sont ensuite décrits en s'appuyant sur des exercices de prospectives précédemment réalisés. Quatre *scénarios d'usages non alimentaires de la biomasse végétale à l'horizon 2050 et à l'échelle mondiale*, construits par le groupe de travail, sont ensuite présentés. Enfin, les implications des scénarios en termes d'occupation des sols sont explorées, de façon succincte et simplifiée, et en se référant à des ordres de grandeur issus d'exercices de prospective de référence sur l'alimentation et l'énergie. Ce travail propose, à grand trait, quelques éclairages sur les tensions possibles entre les différents usages de la biomasse végétale et explore les implications sociales et environnementales et les conditions de viabilité des usages non alimentaires futurs de la biomasse végétale.

Etude prospective sur les usages non alimentaires de la biomasse végétale - Scénarios d'évolution à 2050

Groupe de travail :

Marc Barbier, Directeur de recherche à l'unité « Science en Société », l'INRA

Michel Benoît-Cattin, Chercheur en Economie à l'UMR Marchés, Organisations, Institutions et Stratégies d'Acteur (MOISA), CIRAD

Paul Colonna, Délégué scientifique Développement Durable de l'INRA et coordinateur de l'ARP VegA

Catherine Esnouf, Directrice scientifique adjointe « Nutrition Humaine et Sécurité des Aliments » de l'INRA

Agnès Kammoun, Coordinatrice de l'ARP VegA, INRA

Valérie Mazza, Directrice Prospective & Innovation de Limagrain

Antoine Messéan, Directeur de l'Unité Impacts Ecologiques des Innovations en Production Végétale, INRA

Sandrine Paillard, Directrice adjoint de la Délégation à l'Expertise scientifique collective, à la Prospective et aux Etudes (DEPE), INRA

Equipe projet :

Olivier Mora, DEPE, INRA

Lisa Gauvrit, DEPE, INRA

SOMMAIRE

Partie 1 - Cadre d'analyse et méthode de l'étude prospective	6
1.1. Démarche générale et cadre d'analyse	6
1.2. Eléments de méthode	7
1.3. L'illustration des scénarios par des ordres de grandeur : une confrontation des résultats de prospectives sur l'énergie et l'alimentation	8
Partie 2 - Les usages non alimentaires de la biomasse végétale dans le monde : tendances, débats et enjeux	10
2.1. Eléments d'état des lieux sur les produits issus de la biomasse et leurs usages actuels	10
2.1.1. Des produits en phase avec les enjeux globaux et les demandes sociétales	10
2.1.2. Les usages énergétiques de la biomasse	11
2.1.3. Les usages dans le secteur de la chimie : des filières en émergence	17
2.2. Controverses sur les bioproduits	19
2.2.1. La réduction des émissions des gaz à effet de serre	20
2.2.2. Le bilan énergétique des biocarburants	22
2.2.3. La compétition avec les produits alimentaires	23
2.2.4. Les tensions sur les ressources naturelles et la biodiversité	24
2.2.5. Les effets des filières biocarburants sur le développement agricole et rural et la question foncière	25
2.2.6. Les biocarburants de deuxième génération : de nouvelles controverses ?	27
2.2.7. L'impact des controverses sur les orientations des politiques publiques	27
2.3. Energie et alimentation à 2050 : quelle place pour la biomasse non alimentaire ?	30
2.3.1. L'enjeu énergétique	30
2.3.2. L'enjeu alimentaire	35
Partie 3 - Les quatre scénarios d'évolution possible des usages non alimentaires de la biomasse végétale à l'horizon 2050	38
3.1. Les hypothèses par composante	38
3.2. Récit des scénarios d'évolution des usages non alimentaires de la biomasse à 2050	40
Scénario 1 - Fuite en avant sur l'énergie et l'environnement, des usages de la biomasse limités	40
Scénario 2 - La biomasse dans la « néo-modernisation verte »	42
Scénario 3 - Course à la biomasse, dans un contexte de crise énergétique	45
Scénario 4 : Des territoires métropolitains et ruraux qui mobilisent la biomasse pour une diversité d'usages	47
Partie 4 - Implication des scénarios sur l'occupation du sol	50
4.1. Objectif et démarche	50
4.2. Principe, hypothèses et résultat des simulations	50
4.2.1. Les hypothèses sur la demande en biomasse dans les scénarios pour la production d'électricité, les biocarburants et les biomolécules	51
4.2.2. Traduction en surface requise pour la production de biomasse par scénario	52
4.3. Interprétations	54
4.3.1. Enseignements généraux	54
4.3.2. Comparaison avec les scénarios d'occupation des sols de la prospective Agrimonde	54
4.3.3. Vers une diversification des sources de biomasse ?	56
4.4. Quelques enseignements plus spécifiques des scénarios	58
4.4.1. La biomasse, une solution pertinente quel que soit le paysage énergétique ?	58
4.4.2. Concilier accroissement des usages de la biomasse, réduction des gaz à effet de serre et durabilité environnementale : un défi pour l'innovation	59
4.4.3. Biomasse, filières agricoles et systèmes alimentaires : l'enjeu majeur de la gouvernance	60
Conclusion générale	62
Bibliographie	65
ANNEXE 1 - Liste des personnes auditionnées	71
ANNEXE 2 - Les Hypothèses par composante	72
Composante 1 : Ressources énergétiques et en carbone en 2050	73
Composante 2 : Attentes des citoyens et des consommateurs vis-à-vis des bioproduits	76
Composante 3 : Filières bioproduits et innovations	79
Composante 4 : Gouvernance mondiale et politiques publiques	83
Composante 5 : Croissance et développement	87
ANNEXE 3 - Hypothèses de rendements cultureux et rendements de conversion	90

Table des illustrations

Figure 1 - Synthèse de la démarche	9
Figure 3 - Evolution de la production annuelle mondiale de biocarburants 1975-2005.....	12
Figure 4 : Coûts de production de biodiesels et bioéthanol au Brésil,.....	14
Figure 5 : Le cycle global du carbone	20
Figure 6 : Bilan carbone associé aux changements d'usage des sols dans les scénarios du MIT -	22
Figure 7 - Energie primaire mondiale par source, 1970-2006.....	31
Figure 9 : Utilisation de la biomasse pour les transports, l'électricité et la chaleur,	51
Figure 10 : Utilisations de la biomasse dans les scénarios <i>VegA</i> pour trois usages : production d'électricité et chaleur (hors usages 'traditionnels'), de biocarburants et de biomolécules (en millions de tep)	52
Encadré 1 - Biodiesel et marché des huiles végétales dans l'Union Européenne	13
Encadré 2 - Quelques repères sur les rendements énergétiques du bois-énergie.....	16
Encadré 3 - Les granulés de bois dans l'UE : un marché de produits ligneux en expansion.....	17
Encadré 4 - L'essor des polymères biodégradables	18
Encadré 5 : Biocarburants, controverses et politiques publiques de l'Union Européenne	28
Encadré 6 - Les scénarios de l'Energy Technology Perspective (ETP) 2008	33
Encadré 7 - Un aperçu des deux scénarios de la prospective <i>Agrimonde</i>	35
Encadré 8 - La biomasse dans les scénarios ETP	51
Encadré 9 : Evolution de l'occupation des sols dans le scénario <i>Agrimonde 1</i>	55
Encadré 10 - Rappel des résultats des simulations par scénario.....	58
Tableau 1 - Variables et composantes du système décrivant les usages non alimentaires de la biomasse végétale	8
Tableau 2 - Illustrations quantitatives : indicateurs et scénarios de référence	9
Tableau 3 - Variété des résultats de bilan énergétique des biocarburants de 1 ^{ère} génération	23
Tableau 4 : Répartition de la demande mondiale d'énergie primaire par type de source, 2005.....	31
Tableau 5 : Consommation d'énergie primaire par habitant dans le monde, en tep par habitant	31
Tableau 6 - Grille de découpage du système en composantes et variables	38
Tableau 7 : Synthèse des microscénarios et scénarios VegA.....	39
Tableau 8 : Hypothèses de calcul des surfaces dédiées par usage	53
Tableau 9 : Surfaces dédiées à la biomasse non alimentaire (biocarburants, électricité et chaleur, biomolécules) dans les scénarios VegA	53

Partie 1 - Cadre d'analyse et méthode de l'étude prospective

1.1. Démarche générale et cadre d'analyse

L'étude prospective sur les futurs usages non alimentaires de la biomasse végétale se fonde la méthode classique d'élaboration des scénarios. Pour mener cette réflexion, un groupe de travail *ad hoc* s'est constitué en parallèle des ateliers de l'ARP *VegA*. Ce groupe est composé de sept experts dans les domaines de l'alimentation, de l'agronomie et des technologies du végétal, de la sociologie et l'économie de l'innovation. Le groupe de travail s'est réuni cinq demi-journées, entre avril et octobre 2009. Ses analyses se sont appuyées sur les travaux réalisés par l'équipe projet de la DEPE. La composition de ce groupe est pluridisciplinaire et multi-institutionnel pour prendre en compte l'étendue du périmètre de l'étude et la diversité des points de vue nécessaires pour appréhender les enjeux associés aux nouveaux usages de la biomasse (chercheurs et acteurs des filières). Des auditions auprès d'experts extérieurs ont également été réalisées pour compléter les analyses du groupe¹.

La réflexion a débuté par l'identification des tendances et des facteurs déterminants dans l'évolution des usages non alimentaires de la biomasse. Cette étape s'est appuyée sur une étude bibliographique², des entretiens ainsi que des échanges avec les experts de l'ARP à l'occasion des séminaires. De plus, comme la question du développement de nouveaux usages de la biomasse a été et demeure traversée par d'intenses controverses scientifiques et sociétales, l'analyse des controverses a nourri la réflexion prospective : en mettant en lumière les différentes dimensions du problème, les incertitudes, les tensions, les bifurcations possibles et les diverses parties prenantes sur le sujet, elle a participé à la construction du cadre d'analyse et à la formulation de certaines hypothèses d'évolution.

Le thème de la biomasse se situe au croisement de problématiques multiples. Envisager les futurs possibles des usages non alimentaires conduit nécessairement à s'interroger à la fois sur le devenir des systèmes énergétiques, sur celui de l'alimentation mondiale, sur les interactions entre ces deux domaines du point de vue de la production de biomasse alimentaire et non alimentaire, ainsi que sur les effets de ces évolutions sur l'environnement et le changement climatique. L'enjeu est donc de prendre en compte ces multiples dimensions en confrontant des visions sectorielles qui ont souvent tendance à s'ignorer. À cet effet, ont été mobilisés des exercices de prospective de référence existants sur l'agriculture et l'alimentation (évolution des régimes alimentaires, des surfaces cultivées, des modes de production agricole, conséquences sur l'environnement, etc.), sur les systèmes énergétiques du futur (consommation énergétique, bouquets énergétiques, innovations technologiques, etc.) et sur l'environnement (dont le changement climatique), à l'échelle mondiale. Le rapprochement des résultats de ces exercices et le croisement de leurs hypothèses a mis en relief des points de convergence et de tensions (autour de l'occupation des sols, notamment) et a permis de réfléchir aux modalités de leur imbrication ou de leur opposition dans les scénarios d'usages futurs de la biomasse.

Les usages futurs de la biomasse sont intrinsèquement liés aux filières de production qui vont se structurer et aux demandes des consommateurs et des industriels. Ainsi, la prospective a également porté sur les types de filières biomasse qui pourraient se constituer à l'avenir. En effet, au-delà d'une approche purement comptable, consistant à confronter un potentiel de production de la biomasse non alimentaire (par ailleurs sujet à de fortes controverses) et des besoins futurs en énergie ou en molécules, les scénarios envisagent une diversité de configurations socio-économiques et de modalités d'innovation intégrant les préoccupations des acteurs publics et privés, dans leur diversité. Par ailleurs, les scénarios éclairent les

¹ Voir en annexe 1 la liste des experts qui ont été spécifiquement auditionnés.

² Le corpus bibliographique est composé d'articles scientifiques, de littérature grise et d'articles de presse.

conditions d'émergence de ces configurations, du point de vue de la recherche et de l'intervention publique en particulier, et précisent des éléments sur la trajectoire permettant d'y arriver.

A partir de ce cadre d'analyse, quatre scénarios d'évolution possible des usages non alimentaires de la biomasse ont été construits. Le recours à la méthode des scénarios a permis de faire le lien entre toutes les dimensions du sujet, de les intégrer dans une vision prospective cohérente et d'identifier des voies d'évolution originales et contrastées.

1.2. Eléments de méthode

Le champ de l'étude

La notion de *bioproduit* employée dans l'étude est celle définie dans le cadre de l'ARP VegA : les bioproduits sont les « *produits énergétiques et industriels issus du végétal hors des domaines de l'alimentaire et de la santé, dont les applications principales portent sur l'énergie, la chimie organique et les biomatériaux* ». La réflexion prospective s'est intéressée plus particulièrement à deux axes : la production d'énergie et la production de molécules pour la chimie. La production de biomatériaux n'a pas été traitée en tant que telle, de façon à limiter les filières et secteurs inclus dans le périmètre de l'étude. Le terme spécifique de *biocarburant* employé dans le reste du document désigne les carburants constitués de dérivés industriels tels que les gaz, alcools, éthers, huiles et esters, obtenus après transformation de produits d'origine végétale ou animale et destinés à alimenter un moteur thermique. Les biocarburants comprennent notamment les agrocarburants, issus de ressources d'origine agricole (céréales, oléagineux, cultures énergétiques de type miscanthus ou switchgrass, résidus de culture etc.), les carburants produits à partir de ressources forestières, d'algues, de déchets ou de toute autre ressource organique végétale ou animale.

L'horizon temporel choisi pour les scénarios est 2050. Cet horizon éloigné permet d'envisager de réelles ruptures, notamment sur le plan énergétique, mais aussi sur les plans démographiques et alimentaires. L'échelle spatiale retenue est l'échelle mondiale, de façon à intégrer les enjeux climatiques, alimentaires et énergétiques globaux à la réflexion. Cependant, le point de vue adopté est nettement centré sur les pays du Nord, notamment en ce qui concerne les attentes sociétales, les pratiques de consommation, les usages énergétiques, etc. Le temps imparti à l'étude ne nous a pas permis de traiter plus spécifiquement des enjeux pour les pays en développement (accès à l'énergie, raréfaction des ressources en biomasse, filières charbon de bois, etc.).

La méthode des scénarios

L'étude a mis en œuvre la méthode des scénarios dite d'analyse morphologique, dont les principales étapes sont :

- i. la décomposition du système étudié en variables et composantes : cette première phase consiste à identifier pour l'objet considéré – ici les usages de la biomasse – les variables clés, elles-mêmes regroupées en dimensions, ici nommées « composantes » (cf. tableau ci-dessous) ;
- ii. la formulation d'hypothèses d'évolution par variable, s'appuyant sur une analyse des tendances passées et des signaux faibles, puis la construction de scénarios partiels, ou *microscénarios*, obtenus en croisant les hypothèses par variable ;
- iii. la combinaison des microscénarios pour la formulation de scénarios d'ensemble contrastés, cohérents et plausibles.

Description analytique du système

Pour les besoins de l'étude, un système *concernant les usages non alimentaires de la biomasse végétale* a été structuré en 5 composantes (Tableau 1) :

Tableau 1 - Variables et composantes du système décrivant les usages non alimentaires de la biomasse végétale

Composante 1 - Ressources énergétiques et en carbone

Production de carbone et d'énergie fossile, innovations dans l'usage de l'énergie par secteur, politiques énergétiques

Composante 2 - Attentes sociétales des citoyens et des consommateurs

Régimes de consommation, d'habiter, de participation des citoyens aux orientations sociotechniques, régimes d'innovation

Composante 3 - Filières bioproduits et innovations technologiques

Filières biocarburants, bois-énergie, chimie du végétal, articulations entre ces filières, structuration spatiale

Composante 4 - Gouvernance et politiques publiques

Politiques et gouvernance mondiale sur le changement climatique, politiques énergétiques, régulation des marchés agricoles, politiques des marchés des bioproduits, politiques nationale et territoriale d'appui aux filières bioproduits, politiques de R&D sur les bioproduits

Composante 5 - Développement et croissance socioéconomique

Croissance économique, démographie, modes de vie et de consommation, consommation et régimes alimentaires, pression sur les ressources et l'environnement

Les scénarios de référence

Pour certaines variables ou composantes, des hypothèses issues d'exercices de prospective mondiale ont été mobilisées.

- i. Les hypothèses sur le cadre socioéconomique général et les dimensions environnementales se sont notamment appuyées sur les scénarios du Millennium Ecosystem Assessment MEA, (2005), du GIEC (Special Report on Emissions Scenarios 2000, 2007) et du scénario Agrimonde 1 de la prospective Agrimonde (2009).
- ii. Les analyses du World Energy Outlook (WEO 2007, 2008) de l'Agence International de l'énergie ont également été mobilisées, et l'exercice Energy Technology Perspective 2008 ou ETP (AIE, 2008) a plus particulièrement fourni un cadre de réflexion sur les systèmes énergétiques et les innovations technologiques dans ce domaine. Des hypothèses du World Energy Technology Outlook de la Commission européenne (WETO-H2) ont également été mobilisées.
- iii. Enfin, la prospective Agrimonde a très largement inspiré les réflexions sur l'alimentation et sur l'évolution de l'occupation des sols (INRA-Cirad, 2009).

1.3. L'illustration des scénarios par des ordres de grandeur : une confrontation des résultats de prospectives sur l'énergie et l'alimentation

Les scénarios *VegA* construits par le groupe de travail sont avant tout qualitatifs et **en aucun cas ne prétendent donner des estimations quantifiées de nature prédictive** sur le développement des usages de la biomasse.

Cependant, en s'appuyant sur les liens existant, par construction, entre les scénarios *VegA* et des scénarios de référence quantifiés (cf. ci-dessus), des ordres de grandeurs sur la démographie, la consommation alimentaire et énergétique, et les émissions de gaz à effet de serre liées au secteur énergétique ont été empruntés à ces différents exercices, de manière à illustrer les scénarios et donner la mesure de certaines transformations possibles.

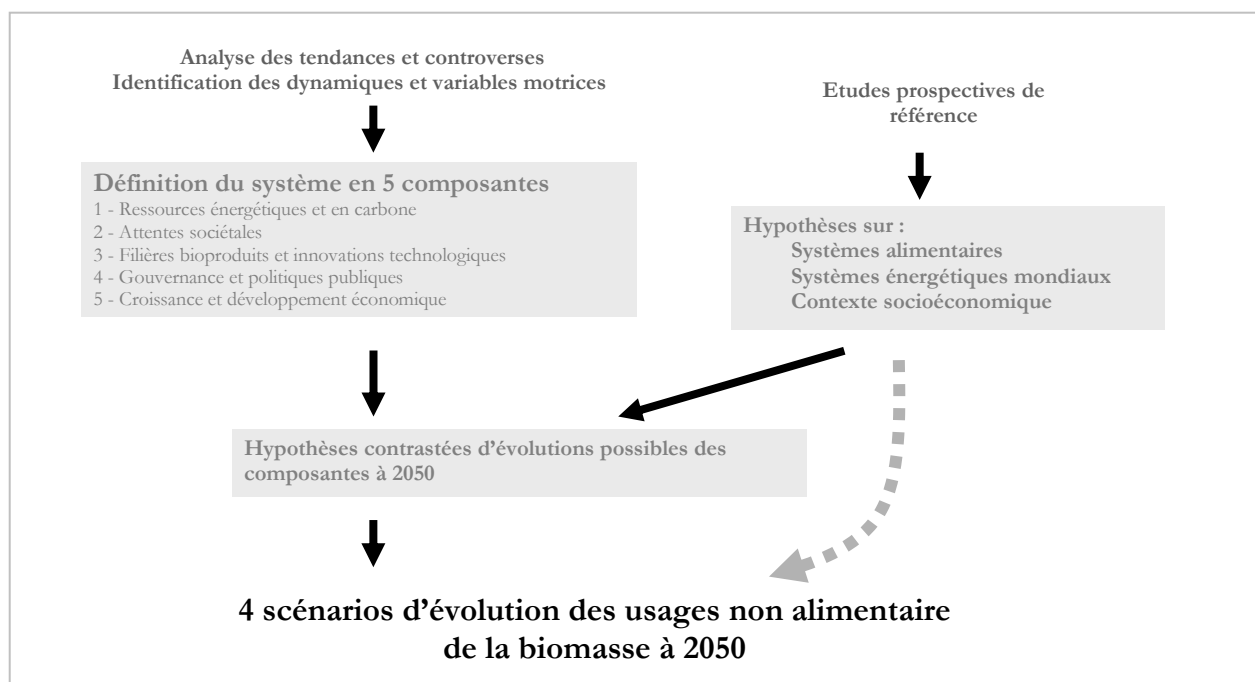
Tableau 2 - Illustrations quantitatives : indicateurs et scénarios de référence

Variable	Indicateur	Scénarios ou projections de référence
Démographie	Population mondiale	Projections médianes de l'ONU à 2050 (ONU, 2006, <i>World Population prospects: the 2006 revision</i>)
Consommation alimentaire	Consommation journalière individuelle, (en kilocalories par jour et par personne)	Scénarios Agrimonde (Agricultures et alimentations du monde en 2050 : Scénarios et défis pour un développement durable, 2009)
Consommation énergétique et mix énergétique	Energie primaire par type de source (en millions de tep ³)	Scénarios ETP, Agence Internationale de l'Energie, 2008.
Emissions de Gaz à effets de serre du secteur énergétique	Tonnes d'équivalent CO ₂ par an	Scénarios ETP, Agence Internationale de l'Energie, 2008

Ces chiffres ne sont donc pas issus de travaux de modélisation spécifiques aux scénarios *VegA*, mais « empruntés » à différents scénarios issus de prospectives de référence qui ne portent pas sur le même objet. **Les valeurs mentionnées doivent donc, étant donnée cette construction, être interprétées et manipulées avec prudence.**

Dans un deuxième temps, le groupe de travail s'est proposé, sur la base des quatre scénarios construits, d'analyser la cohérence entre les ordres de grandeur retenus sur la consommation de bioénergie et de biomolécules et ceux relatifs à l'évolution de la consommation alimentaire. Il s'agit de repérer, à grand trait, les éventuelles tensions générées par ces nouveaux usages de la biomasse sur l'occupation des sols, et de réfléchir sur l'opportunité (ou non) et les moyens d'atteindre les niveaux de consommation projetés dans une variété de configurations socio-économiques, politiques et de régimes d'innovation. La méthodologie de cet exercice est plus précisément décrite dans la partie 4.

Figure 1 - Synthèse de la démarche



³ tep = tonne d'équivalent pétrole

2. Les usages non alimentaires de la biomasse végétale dans le monde : tendances, débats et enjeux

2.1. Eléments d'état des lieux sur les produits issus de la biomasse et leurs usages actuels

2.1.1. Des produits en phase avec les enjeux globaux et les demandes sociétales

Un contexte porteur pour les bioproduits

Les usages non alimentaires actuels de la biomasse sont multiples. Ils concernent la production d'énergie et les matériaux – pour lesquels le bois est la source de biomasse dominante – ainsi que, dans une moindre mesure, les secteurs de la chimie et de la pharmacie. Un certain nombre d'évolutions ont contribué ces dernières années à renouveler l'intérêt porté à la biomasse pour des utilisations non alimentaires. Ce regain d'intérêt est généralement attribué à trois facteurs principaux.

Il s'agit en premier lieu de l'enjeu énergétique, qui s'est manifesté durant les années 2000 par l'évolution à la hausse et par la grande volatilité des prix du pétrole, et qui, malgré un relatif affaissement des prix lié à la crise économique, laisse entrevoir les tensions à venir sur les marchés des ressources fossiles. De façon plus générale s'est affirmé le caractère urgent de la mise en œuvre de voies de substitution des ressources en pétrole, qui s'épuisent rapidement (cf. Partie 2 chap. 3). C'est ensuite la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre qui a été motrice, avec la perspective de remplacer, notamment dans les transports, une part des énergies fossiles, principales sources anthropiques de gaz à effets de serre, par des sources d'énergie non émettrices. Enfin, l'intérêt pour les bioproduits s'est inscrit dans un contexte général de montée des préoccupations vis-à-vis du modèle industriel basé sur la carbochimie et la pétrochimie : gestion des déchets industriels (stockage et traitement), risques environnementaux et sanitaires. Le développement des produits éco-compatibles a mis l'accent sur la recherche de nouvelles propriétés que peuvent présenter les produits issus du végétal : la recyclabilité, la biodégradabilité, la moindre toxicité, etc.⁴

Globalement, la perspective d'étendre les usages de la biomasse a fait écho aux représentations d'une société 'post-carbone' et d'un développement durable, dans lesquelles la biomasse apparaît comme l'un des vecteurs de la transition écologique et comme l'un des moteurs possibles de la 'croissance verte'.

Le rôle clé des politiques publiques

Les politiques publiques sont un facteur déterminant de l'essor actuel des bioproduits, qu'elles consistent en des politiques incitatives spécifiques ou en des dispositions réglementaires jouant de façon plus indirecte, par le biais de normes, de la fiscalité ou de dispositifs de certification.

Déployées par un nombre croissant de pays, ces politiques affichent pour la plupart des objectifs en lien avec les préoccupations stratégiques et environnementales évoquées précédemment. Autre facteur décisif, la volonté de soutenir l'émergence de nouveaux débouchés agricoles et de nouvelles filières

⁴ Sans pour autant déduire que toutes les biomolécules ont nécessairement ces propriétés, ni que tous les usages de la biomasse ont des effets positifs sur l'environnement. L'origine végétale des bioproduits est souvent assimilée aux propriétés environnementales des produits intermédiaires et finaux, alors que la matière végétale est le plus souvent utilisée pour fabriquer les mêmes molécules que celles issues de la pétrochimie.

agroindustrielles, qui dans le cas des biocarburants a été un moteur déterminant. Cela fut particulièrement le cas dans les pays nord-américains et de l'Union Européenne, où les principales décisions relatives aux biocarburants ont été prises durant une période de remise en cause des soutiens publics au secteur agricole, en lien avec les exigences de l'OMC (notamment les restitutions sur le sucre), et où la baisse des prix agricoles avait atteint un niveau critique pour le secteur (Bureau 2009, Gorter and Just 2009, OCDE 2008).

Nous nous attacherons dans la suite de ce chapitre à décrire plus en détail quelques tendances d'évolution pour les usages qui intéressent l'étude : la production de chaleur et d'électricité, le secteur des transports puis celui de la chimie.

2.1.2. Les usages énergétiques de la biomasse

La biomasse fournit d'ores et déjà 10% de l'énergie primaire mondiale

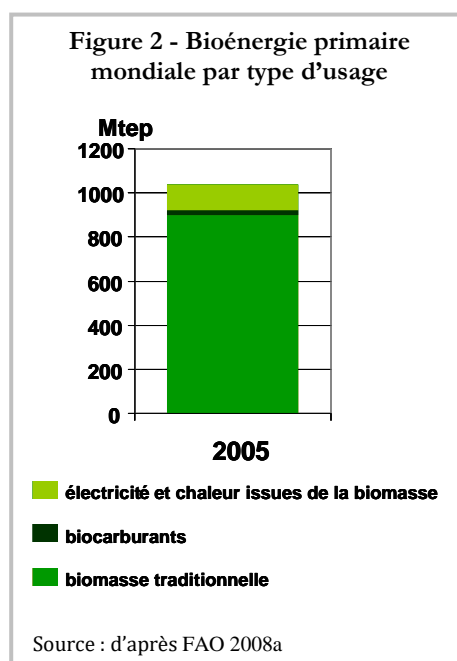
La biomasse constitue de loin la première source d'énergie renouvelable dans le monde. Elle répond à environ 10% de la demande mondiale d'énergie (OCDE/AIE 2008). Son utilisation s'effectue principalement dans un cadre domestique selon un usage dit « traditionnel » pour la cuisson ou le chauffage (par simple combustion de bois, de déjections animales, de charbon de bois ou de produits connexes et résidus divers). De façon plus minoritaire, la biomasse est utilisée pour les chauffages collectif/tertiaire et les industries (de première transformation du bois ou la papeterie, et pour la production d'électricité dans des centrales thermiques).

La situation est cependant extrêmement contrastée selon les régions du monde. Dans certains pays en développement, la biomasse atteint plus de 90% de la consommation primaire d'énergie (FAO 2008a), et les PeD représentent près de 90% de la consommation mondiale de combustibles ligneux. Le bois y reste la principale source d'énergie, dans les zones rurales mais aussi pour les urbains qui ont recours au charbon de bois. Elle présente en revanche une contribution limitée dans les pays industrialisés. En Europe par exemple, le bois-énergie fournissait 3% environ de l'énergie primaire en 2004.

Quant à la bioénergie destinée au secteur des transports, elle représentait environ 2% de la bioénergie totale en 2005, et couvrait 1% de la demande mondiale en énergie pour les transports, soit 0,2 à 0,3% de la demande totale en énergie. La situation évolue cependant très rapidement dans ce secteur.

L'essor rapide des biocarburants d'origine agricole (biocarburants) dans le secteur des transports

L'usage dans les transports est loin d'être le principal emploi énergétique de la biomasse, mais c'est celui dont l'évolution a été la plus marquante ces dernières années. Bien que l'utilisation des biocarburants liquides ait été techniquement connue de longue date, et qu'à certaines périodes leur usage ait même été développé de façon assez large, les biocarburants n'ont connu d'essor significatif dans le monde qu'à partir des années 70, avec le lancement de programmes de développement de filières éthanol carburant aux Etats-Unis et au Brésil, en réponse aux chocs pétroliers de 1973 et 1978. La relative stabilisation des cours mondiaux du pétrole a ralenti cette expansion dans les années 1980 et 1990, jusqu'aux années 2000 où s'est réaffirmé avec vigueur l'intérêt pour ce type d'usages.



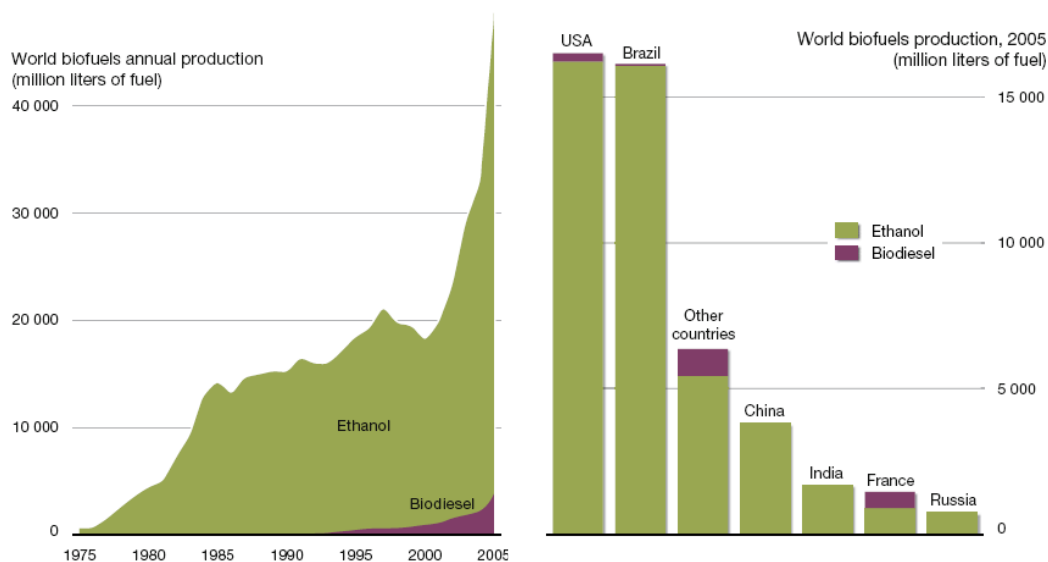
Une production d'biocarburants en rapide augmentation

La production de bioéthanol a triplé entre 2000 et 2007, pour atteindre 62 milliards de litres (36,12 Mtep). Celle de biodiesel a été multipliée par dix sur la même période et atteignait environ 10 milliards de litres en 2007 (Fischer, 2009).

La production mondiale de bioéthanol en 2007 a mobilisé 277 millions de tonnes (Mt) de sucre et 72,5 Mt de grains (maïs et blé surtout), ce qui représente approximativement 4,5% de la production mondiale de grain (3% si l'on tient compte des coproduits à destination de l'alimentation animale). A titre de comparaison, les volumes de céréales échangés sur les marchés internationaux s'élevaient en 2007 à 230 Mt. Le Brésil et les Etats-Unis dominent très largement le marché du bioéthanol, pesant respectivement pour près de 40% et 50% de la production mondiale en 2007.

Côté biodiesel, ce sont 7,8 tonnes d'huiles végétales qui ont été mobilisées en 2007, soit environ 10% de la production mondiale d'huile végétale, principalement issue de colza, de soja et de palme. L'Union Européenne est de loin le premier producteur et consommateur de biodiesel dans le monde : elle utilise près de 40% de l'huile végétale destinée au biodiesel dans le monde (Fischer, 2009).

Figure 3 - Evolution de la production annuelle mondiale de biocarburants 1975-2005 et répartition géographique en 2005



Source : UNEP, 2009.

Cet essor rapide des biocarburants s'explique en grande partie par le fait qu'ils puissent être incorporés aux carburants conventionnels sans remettre radicalement en cause les filières et les technologies actuelles en matière de transport, de la production à la distribution et l'usage des carburants dans les véhicules. S'agissant de l'éthanol aux Etats-Unis, un contexte réglementaire favorable dans les années 80 et 90 et l'existence de réseaux de compétences déjà établis ont permis un développement rapide de l'appareil industriel (Carolan, 2010). En France, la mise en place de la filière biodiesel s'est fondée sur une structuration très forte des acteurs de l'agriculture et de l'agro-industrie autour de ce nouveau débouché, sur l'implication d'un nombre réduit d'opérateurs (agroindustriels et pétroliers) et sur la mise en œuvre précoce de mesures d'accompagnement public, aussi bien au niveau de l'offre que de la demande (cultures industrielles sur jachères primées, mesures fiscales, exonération de TIPP etc., dès le début des années 90) (Bernard, 2008).

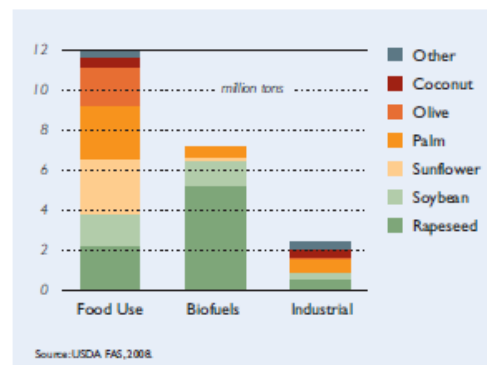
Encadré 1 - Biodiesel et marché des huiles végétales dans l'Union Européenne

L'Union Européenne est le premier producteur et consommateur de biodiesel dans le monde. En 2007, 5,7 millions de tonnes y ont été produites, dont la moitié en Allemagne et environ 15% en France. L'offre en oléagineux consacrée au biodiesel est composée principalement de colza et tournesol domestiques, et de soja importé. Entre 2004 et 2009, **la demande en huile pour des usages non alimentaires a doublé** dans l'UE. Environ 95% de la hausse de la demande actuelle est due au biodiesel, alors que la demande pour l'alimentation est stable, et 20% de la consommation d'oléagineux dans l'UE sont destinés au secteur des transports. Ce développement très rapide des usages industriels de l'huile végétale a eu un effet très fort sur la structure du marché européen d'oléagineux, des huiles végétales et de leurs coproduits.

Les importations de colza en UE ont explosé en 3 ans pour atteindre environ 10% de l'offre totale, et **l'UE est passée du statut d'exportateur net à importateur net d'huile de colza en 2005**. L'augmentation de l'utilisation d'huile de colza domestique pour les biodiesels a créé un déficit dans l'offre alimentaire d'huile, d'où des importations croissantes qui atteignent un tiers de la demande totale en huiles de l'UE, compensée notamment par l'importation d'huile de palme d'Indonésie et de Malaisie. L'UE est à présent le 2^{ème} importateur mondial d'huiles végétales, après la Chine. Autre conséquence, une baisse du prix du tourteau de colza s'est produite relativement à celui du tourteau de soja importé, due aux coproduits protéinés des filières biocarburants. Les conséquences à moyen terme pour le secteur de l'élevage sont cependant incertaines. Si elles encouragent la disponibilité de coproduits protéiques à bas coût, les augmentations des prix des céréales et de ceux des terres joueront négativement pour les éleveurs.

Sources : Fischer, 2009. Jacquet et al., 2007.

Utilisations d'huiles végétales en 2007-2008 dans l'UE-27



Source : Fischer, 2009 - d'après USDA

Une production pour l'heure concentrée, mais des investissements qui se multiplient partout dans le monde

Actuellement donc, l'Union Européenne, le Brésil et les Etats-Unis dominent le paysage mondial des biocarburants. Cependant un nombre croissant de pays affiche des objectifs ambitieux et étend rapidement les capacités de production. C'est de plus en plus le cas notamment de pays émergents et en développement comme l'Inde, la Chine, la Malaisie et l'Indonésie et de certains pays africains (le Sénégal par exemple). Les flux d'échanges de biomasse et d'biocarburants ont jusqu'à présent été faibles (OCDE 2008), 90% des productions étant consommées au niveau national. Dans les années à venir, les échanges internationaux de biocarburants et de matières premières pourraient augmenter substantiellement, pour satisfaire l'accroissement de la demande mondiale. L'évolution des politiques publiques – notamment les objectifs d'incorporation des Etats-Unis et de l'Europe – aura une forte incidence sur la future configuration de la production et de la consommation dans le monde.

Des politiques publiques volontaristes...

L'implication publique a été particulièrement sensible dans le développement des biocarburants. Des aides substantielles à la mise en place des filières ont été accordées, s'intégrant généralement dans des politiques énergétiques et environnementales ambitieuses en faveur des énergies renouvelables, et prenant des formes diverses : objectifs d'incorporation, crédits fiscaux, prix garantis, réduction des taxes sur les carburants, programmes de R&D, cofinancements d'usines pilotes, subventions aux investissements, aides directes agricoles, tarifs douaniers spécifiques, etc.

L'estimation du soutien total⁵ pour les biocarburants dans les économies des Etats-Unis et de l'Union Européenne, respectivement de 6,33 et 4,7 milliards de dollars pour l'année 2006, donne la mesure de l'implication publique dans le développement de ces nouvelles filières (FAO 2008a). Une part très importante de ces subventions est variable (93%), c'est-à-dire dépendantes du niveau de production. Cela

⁵ L'Estimation du soutien total (EST) est un indicateur de la valeur monétaire annuelle de tous les transferts bruts des contribuables et des consommateurs découlant des mesures publiques de soutien, déduction faite des recettes budgétaires associées, et indépendamment de leurs objectifs et de l'impact sur la production, les revenus, ou la consommation (OCDE, 2008).

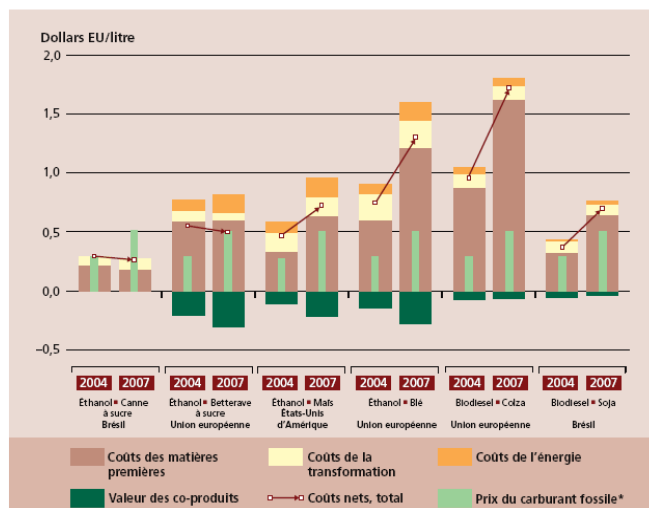
est dû notamment à la mise en place de crédits d'impôts et de crédits fiscaux par unité de biocarburant produit⁶. L'effort de R&D a été également important, et notamment les aides aux investissements ; le rapport 'Biofuels – at what cost?' de 2007 a estimé que la part publique dans les investissements industriels atteignait communément 15 à 40% des investissements totaux dans les pays OCDE, et pouvait s'élever dans certains cas jusqu'à 60% (International Institute for Sustainable Development, 2007).

...dont dépend la viabilité des filières

Actuellement, les coûts de production du bioéthanol ou du biodiesel sont dans la plupart des pays trop élevés pour que les biocarburants puissent concurrencer commercialement les combustibles fossiles sans un soutien actif des pouvoirs publics, à l'exception des filières brésiliennes fondées sur l'éthanol de canne (OCDE-FAO 2008). La rentabilité économique et la compétitivité des biocarburants sont conditionnées en grande partie par les prix des énergies fossiles et des matières premières agricoles. La part des matières premières dans le coût de production des biocarburants est très majoritaire⁷ (près de 80% pour le biodiesel européen ; cf. figure 4) ; l'évolution des politiques et des prix agricoles pèse donc particulièrement dans l'évolution de leur rentabilité et de leur compétitivité (Bamière, Bureau et al. 2007). Celles-ci varient au gré des fluctuations des prix du pétrole et des prix agricoles, particulièrement volatiles, mais aussi des débouchés possibles pour les coproduits et de leur prix (drèches, tourteaux etc.). Ainsi, les prix élevés atteints par le maïs, le blé et les huiles végétales en 2007-2008 et le reflux du prix du pétrole survenu en 2008 ont mis à mal la viabilité de certaines filières, en dépit d'aides publiques substantielles⁸.

L'évolution du rapport de prix entre matières premières fossiles et matières premières agricoles est extrêmement difficile à prévoir. A moyen terme, on peut se demander si ce n'est pas la volatilité des cours respectifs du pétrole et des matières agricoles qui sera un élément décisif du devenir de ces filières. A long terme, la montée en puissance des usages du charbon en substitution du pétrole est un élément à intégrer à l'équation (cf. Partie 2. 3).

Figure 4 : Coûts de production de biodiesels et bioéthanol au Brésil, aux Etats-Unis et en Union Européenne, 2004 et 2007



*Prix net de l'essence ou du diesel sur les marchés nationaux.

Source: OCDE-FAO, 2008.

Source : FAO 2008a (d'après OCDE-FAO, 2008).

⁶ En France par exemple, des agréments d'unités de production ont été mis en place, donnant droit à une défiscalisation partielle de TIPP (Taxe intérieure sur les produits pétroliers) lors de la mise à la consommation des biocarburants (de 25 €/hl pour les EMHV incorporés dans le gazole et 33 €/hl pour l'éthanol et pour l'ETBE incorporés dans les essences). Autre exemple, aux Etats-Unis le Volumetric Ethanol Excise Tax Credit (VEETC) est un crédit d'impôt sur la taxe d'accise frappant l'éthanol, de 51 cents par gallon d'éthanol au bénéfice des détaillants et des mélangeurs. (OCDE, 2008)

⁷ L'importance de la part des matières première dans les coûts de production est l'une des spécificités des filières bioproduits de façon plus générale : elles comptent pour 50 à 70% pour l'industrie de la fermentation, 40 à 60% pour l'amidonnerie, 30 à 50% pour le papier (source : rapport du Haut Conseil de la Coopération Agricole, Section économie, 2009. La Chimie du Végétal, une priorité pour la France).

⁸ Voir notamment l'article dans le journal Le Monde, 19 mars 2009, *Le marché des biocarburants souffre de la crise*.

De nouvelles filières biocarburant en germe, de nouvelles matières premières envisagées

Dans la lignée du bioéthanol et du biodiesel de première génération (esters méthyliques d'huiles végétales, éthanol et ETBE), d'autres types de biocarburants sont envisagés, mobilisant une plus grande diversité de ressources ou permettant d'améliorer la qualité des produits (esters méthyliques d'huiles animales, butanol, esters éthyliques, diésel issu de l'hydrogénation des huiles végétales, etc.). Un intérêt grandissant est porté aux biocarburants dits de « deuxième génération », issus de matières premières lignocellulosiques (bioéthanol par la voie biochimique, biodiesel par la voie thermochimique principalement). Ces nouvelles technologies portent des promesses d'augmentation substantielle des volumes végétaux utilisables (la lignocellulose est abondante dans tous les végétaux et donc disponible dans tout milieu où la végétation peut s'implanter). De plus, en augmentant la productivité énergétique à l'hectare, elles permettraient de limiter la compétition pour les ressources et le foncier avec les usages alimentaires (sans pour autant la lever s'ils sont issus de cultures dédiées). Les biocarburants de deuxième génération offrent également la perspective d'une diversification des sources de biomasse : déchets lignocellulosiques agricoles et de sylviculture (avec une limitation des taux de prélèvement), fraction organique des déchets urbains, déchets des industries agroalimentaires etc.

Si les technologies de transformation progressent, la faisabilité de ces filières n'est pas assurée. Notamment, d'importants verrous d'ordres logistique et économique demeurent. Pour l'heure, ces biocarburants lignocellulosiques ne sont pas compétitifs (AIE/OCDE, 2008). Les projets de R&D se multiplient dans le monde (Etats-Unis, Canada, Brésil, Europe), des marges de progrès techniques et économiques sont recherchées (OCDE, 2008 ; Prieur et His, 2007 ; voir aussi le livrable de la tâche 8 de l'ARP VegA). La période 2015-2020 est communément avancée pour un développement commercial de ces biocarburants.

A un stade plus expérimental, le recours à la biomasse algale est également une voie explorée pour la production de biocarburants. L'investissement mondial dans la recherche sur la biomasse marine dépasse aujourd'hui le milliard de dollars. Des productions fondées sur des cultures d'algues oléagineuses, des cultures de macroalgues côtières ou offshore, ou encore des bioréacteurs couplés à de la cogénération sont parmi les solutions évoquées. Plus fondamentales encore, des recherches sur la production d'hydrogène à partir de microalgues, par voie microbienne ou biomimétique, sont également en cours. La faisabilité de la production de ces biocarburants à grande échelle est encore à démontrer.

Une diversité d'acteurs investit le secteur

Aujourd'hui, la production de bioéthanol et de biodiesel est surtout le fait de grands acteurs du secteur agroindustriel. Mais des opérateurs économiques plus divers s'impliquent de façon croissante. Entreprises du secteur de l'industrie du bois, compagnies pétrolières, acteurs du secteur de l'énergie et de l'environnement, entreprises de biotechnologie, start-up, banques et sociétés de capital risques, constructeurs automobiles et aériens deviennent partie prenante des projets de R&D sur les biocarburants. De nouveaux partenariats entre acteurs de secteurs très différents (par exemple entre pétroliers et agroindustriels) voient le jour, visant à mutualiser les compétences techniques et la maîtrise des marchés et des filières, de l'approvisionnement à la distribution. La définition des sentiers d'innovation qui seront pris à l'avenir dépend étroitement du type d'acteurs qui y seront impliqués, de leurs intérêts stratégiques et de leurs marges de manœuvre possibles au sein des filières. Par exemple, certaines voies de transformation intéressent particulièrement les acteurs pétroliers, car elles permettraient d'intégrer les flux d'origine végétale plus en amont dans les raffineries et de réaliser des économies d'échelles à un stade plus précoce de la synthèse des biocarburants (His, 2007). Pour les acteurs qui n'ont pas de lien avec la production agricole ou forestière, l'enjeu est de garantir l'approvisionnement. Aussi l'intégration croissante de la production agricole ou forestière aux filières énergétiques est-elle une éventualité à considérer dans le devenir des filières biocarburants (et aussi de façon plus générale pour les filières bioproduits).

La biomasse pour la production de chaleur et d'électricité : des usages qui se développent

Au Nord, les usages collectifs et industriels se développent

Ces dernières années, la bioénergie, et notamment la dendroénergie⁹, a retenu l'attention comme énergie potentiellement respectueuse de l'environnement pouvant remplacer ou compléter d'autres sources pour la production d'électricité et de chaleur. À ce jour, l'essor de ce type d'usage a particulièrement concerné les pays très boisés et dotés d'industries de transformation du bois bien établies (ex : pays scandinaves, Canada).

Les procédés connus se sont perfectionnés et de nouvelles technologies émergent, qui améliorent les performances énergétiques et la faisabilité économique de ces usages, aussi bien dans les applications industrielles que pour la production d'électricité et de chaleur à l'échelle collective et individuelle : systèmes pour la production combinée de chaleur et d'électricité (cogénération de petite et grande échelles), co-combustion de biomasse et charbon ou gaz dans les centrales thermiques, systèmes de gazéification, méthanisation, chaufferies à bois collectives à hauts rendements, foyers améliorés et fourneaux modernes, etc. Un enjeu technologique déterminant, outre celui lié au rendement énergétique de ces procédés, réside dans la maîtrise des pollutions aériennes qu'ils génèrent.

Certains pays voient se développer les réseaux locaux basés sur des chaufferies à bois, utilisant par exemple des plaquettes forestières d'origine locale. Les collectivités territoriales, souvent motrices dans ce type de projets, y voient une opportunité de valoriser les filières locales, de créer de l'emploi, et de s'approvisionner avec une source d'énergie renouvelable et assez bon marché. Il n'est pas rare que les collectivités territoriales mettent en œuvre des programmes spécifiques, voire contractualisent avec des producteurs de biomasse locaux. L'usage de biomasse dans les réseaux de chaleur métropolitains existe également, faisant intervenir des filières d'approvisionnement plus longues, voire internationales.

Une utilisation croissante de bois-énergie dans les pays en développement

Environ 40% des extractions mondiales de bois consistent en bois de feu (1,2 milliard de m³ en 2005), mais là encore les proportions varient fortement d'une région du monde à l'autre. En Afrique 88% des extractions consistent en bois de feu, alors qu'en Amérique du Nord et centrale elles se chiffrent à 13% seulement (FAO, 2009a). Dans les pays en développement, principaux utilisateurs de bois-énergie, la tendance à l'augmentation de la consommation de combustibles ligneux se poursuit, malgré une baisse de la consommation par habitant. Cette baisse s'explique d'une part par la hausse du niveau de vie d'une partie de la population, par l'urbanisation et le recours accru à d'autres sources d'énergie de substitution, mais aussi par le recul des disponibilités en bois. Mais cette baisse ne compense toutefois pas l'augmentation globale de la consommation due à l'accroissement démographique (FAO, 2008b).

Ces tendances contribuent aux dynamiques de déboisement et de déforestation dans de nombreuses régions du monde. En plus d'une gestion adaptée des espaces forestiers exploités, l'amélioration de l'efficacité énergétique des filières est un enjeu très prégnant. En particulier, l'accroissement de l'usage de charbon de bois dans les villes est extrêmement consommateur de ressource en biomasse, car il présente de très faibles rendements énergétiques. De même, les foyers de combustion domestiques sont pour la plupart ouverts et ont de très faibles rendements.

Encadré 2 - Quelques repères sur les rendements énergétiques du bois-énergie

Les feux à ciel ouvert ne convertissent qu'environ 5% de l'énergie potentielle du bois. Avec les fourneaux à bois traditionnels ce rendement monte à environ 36%, alors qu'avec les systèmes fonctionnant au charbon, cela oscille entre 44 et 80%, suivant le modèle du fourneau et les méthodes de production du charbon de bois. Les fourneaux modernes à granulés de bois à usage familial ont un rendement de conversion de l'ordre de 80% environ. Les systèmes de production combinés de chaleur et d'électricité assurent un rendement de conversion allant jusqu'à 80%
Source : FAO, 2008b.

⁹ Énergie tirée des combustibles ligneux, du charbon de bois, des résidus forestiers, de la liqueur noire (déchet de l'industrie papetière) ainsi que toute autre énergie dérivée des arbres.

De nouveaux échanges de produits ligneux sur les marchés internationaux ?

Ces usages énergétiques de la biomasse font eux aussi l'objet de politiques publiques incitatives. Dans l'Union Européenne par exemple, les filières bois-énergie et la production de chaleur et d'électricité à partir de biomasse sont encouragées dans beaucoup d'Etats membres, avec des dispositifs nationaux (crédits d'impôts, tarifs d'achats préférentiels, etc.) ou territoriaux, sur la base de critères de performance en matière énergétique et environnementale. Les politiques de développement rural comprennent également des mesures de soutien au développement des énergies renouvelables, dont la biomasse.

La satisfaction des nouveaux besoins en biomasse, particulièrement stimulés par ces politiques publiques, a encouragé l'émergence de nouveaux marchés et de nouveaux échanges internationaux de produits forestiers (cf. Encadré 3 présentant l'exemple des granulés de bois, ou *pellets*). Si la tendance à l'expansion du commerce international des produits et coproduits forestiers pour des usages énergétiques se confirme, la question de la certification forestière et son application pour la production durable de biomasse se pose avec une grande acuité, en particulier s'ils concernent des échanges Nord-sud : à ce jour, les pays d'Europe occidentale ont certifié 53 % de leur superficie forestière totale, l'Amérique du Nord 38 %, l'Océanie 5 %, et l'Afrique, l'Asie et l'Amérique latine 1 % chacune (UNECE-FAO, 2009).

Encadré 3 - Les granulés de bois dans l'UE : un marché de produits ligneux en expansion

Les équipements industriels de cogénération à partir de granulés de bois se multiplient dans l'Union Européenne, en grande partie grâce aux mesures fiscales attractives au niveau européen. Malgré un essor important de la production communautaire (+140% entre 2004 et 2008), la demande croissante en granulés de bois n'est plus satisfaite par la production locale et les importations européennes s'accroissent très rapidement, en provenance des USA surtout, mais aussi de l'Australie, de la Nouvelle-Zélande, d'Argentine, du Vietnam, du Canada et de l'Afrique du Sud.

Le granulé est en train de devenir une nouvelle matière première au plan mondial, coté à la Bourse de l'énergie d'Amsterdam ; l'Europe demeure le premier producteur, consommateur et importateur mondial. Du fait de ces évolutions, le granulé, initialement issu de coproduits et déchets de l'industrie du bois, devient progressivement un débouché spécifique pour des bois à croissance rapide issus de forêts et de plantations industrielles. L'intérêt écologique de ces filières, qui a initialement motivé les incitations mises en place par les pays européens, s'en trouve questionné car il dépend étroitement des conditions de gestion des espaces forestiers exploités, et entre autres, des bilans énergétiques sur l'ensemble du cycle de vie.

Sources : UNECE-FAO 2009 ; « Main basse sur les granulés de bois ». Russell Gold, The Wall Street Journal, 23.07.2009.

2.1.3. Les usages dans le secteur de la chimie : des filières en émergence

Les usages non énergétiques du pétrole représentaient en 2006 16,5% de la consommation finale annuelle de pétrole. Cette part n'a cessé d'augmenter depuis 30 ans, et les volumes mobilisés ont presque doublé entre 1973 et 2006¹⁰.

De nouvelles applications pour les matières végétales sont envisagées et commencent à se développer dans les domaines de la chimie de base (lubrifiants, alcools, etc.), de la chimie de spécialité (tensioactifs, monomères etc.), de la chimie fine (acides aminés, principes actifs), ainsi que dans celui des matériaux (biopolymères, fibres). La compétitivité vis-à-vis des matières premières fossiles reste un enjeu majeur pour leur développement. Toutefois, les biomolécules et biomatériaux peuvent présenter des spécificités – notamment des propriétés fonctionnelles ou environnementales (telles que la biodégradabilité, la moindre toxicité) – qui, en lien avec l'évolution du contexte réglementaire et des attentes sociétales, pourraient favoriser leur développement sur certains segments (Feuilloley et al. 2009). Pour l'heure, une grande incertitude caractérise encore ces filières naissantes. La nature des produits et des couples produits-marchés est encore largement à définir, et une diversité de configurations d'acteurs et de logiques de développement est envisageable.

¹⁰ D'après le Key World Energy Statistics de 2008 de l'Agence Internationale de l'Énergie, les usages non énergétiques du pétrole représentaient environ 250 Mtep en 1973 (soit 11,5% de la consommation totale) et environ 570 Mtep en 2006 (16,5%).

Pour prendre l'exemple de la France, diverses formes de valorisation de la biomasse agricole ont pris forme à la fin des années 1990 dans le secteur de la chimie, impliquant des acteurs et des réseaux différents. D'après Garnier et Nieddu (2009), ont été développés d'une part des bioproduits à haute valeur ajoutée, destinés à être directement consommés (médicaments), à entrer comme inputs (ex : enzymes) ou à constituer des polymères-clés dans l'industrie chimique. Ces filières sont plutôt le fait des grands groupes industriels. D'autre part, des bioproduits sont issus de microprojets (souvent sur des segments très spécifiques) pour lesquels les unités industrielles intègrent l'ensemble du cycle de production et fonctionnent en « filière courte ». Enfin, certaines filières visent à substituer de grosses quantités de molécules issues de la pétrochimie par des biomolécules, et qui dans le cas français engagent particulièrement les acteurs de la production agricole (coopératives notamment).

Encadré 4 - L'essor des polymères biodégradables

La production mondiale des polymères biodégradables n'a cessé de croître depuis les années 1990, passant de l'échelle pilote à l'échelle industrielle. Le principal domaine d'application concerné est celui des emballages. Les polymères biodégradables ne représentaient en 2002 que 0,5% de l'ensemble du marché des polymères à l'échelle mondiale, mais les capacités de production mondiale évoluent rapidement. Elles sont passées de 500 tonnes en 1990 à plus de 250 000 tonnes en 2002, réparties entre les polymères biodégradables issus de ressources renouvelables végétales ou microbiennes (221 000 tonnes soit 87% des polymères biodégradables) et ceux d'origine pétrochimiques (33 000 tonnes). Les grands fabricants, comme BASF et CARGILL, prévoient une extension de leur capacité de production. Si la croissance se poursuit au rythme actuel, la capacité globale de production des polymères biodégradables pourrait atteindre environ 1 million de tonnes à l'horizon 2015.

Source : ADEME, 2006. Matériaux polymères biodégradables et applications, note de synthèse.

Des mesures réglementaires peuvent influencer les filières bioproduits, par le biais de normes ou de dispositifs de certification. Dans l'Union Européenne par exemple, le respect de nouvelles normes comme les Directives sur les COV¹¹ ou le Règlement REACH¹², incitent de nombreux secteurs à rechercher ou anticiper des solutions de remplacement pour des produits d'origine pétrochimique. Plus généralement, un grand nombre de réglementations sont de nature à influencer, de façon positive ou non, sur les filières bioproduits : les mesures encourageant et encadrant l'éco-conception (ex : Directive européenne EuP 62-2005 déjà existante sur les biomatériaux), les normes de biodégradabilité, les réglementations thermiques, diverses réglementations sur la santé (qualité de l'air, secteur cosmétique, etc.), les réglementations sur l'emballage ou encore sur les détergents, parmi bien d'autres.

Les dispositifs de certification sont également importants, notamment ceux relatifs à la certification environnementale (ex : Ecolabel, étiquetage énergétique de l'Union Européenne). Dans un contexte marqué par une demande croissante d'information de nature environnementale et sanitaire sur les produits de la part des consommateurs, la qualification des bioproduits peut constituer un levier important. Les méthodes d'évaluation (ex : ACV) et les critères de durabilité à mettre en œuvre à grande échelle se trouvent ainsi questionnées, en termes de lisibilité, de transparence et de fiabilité.

¹¹ Directive 1999/13/CE du Conseil, du 11 mars 1999, relative à la réduction des émissions de composés organiques volatils.

¹² REACH est le nouveau Règlement européen sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des substances chimiques. Il est entré en vigueur le 1er juin 2007.

2.2. Controverses sur les bioproduits

Les controverses et les débats publics sur les bioproduits se sont concentrées sur les biocarburants et n'ont que peu, ou pas, porté directement sur les bioproduits pour la chimie et les matériaux. Ces débats sont aujourd'hui en train de transformer ces filières en réorientant constamment la nature des produits et les modalités de leur fabrication. Ces controverses se sont ouvertes sur de multiples fronts au fur et à mesure que se mettait en place la production des biocarburants de première génération. Pour les comprendre, il faut revenir sur les motifs à l'origine du développement des biocarburants et sur les effets attendus.

Le développement des bioproduits en général est lui-même une réponse à des controverses qui se sont ouvertes sur d'autres domaines tels que l'énergie, la chimie industrielle, ou le secteur agricole, comme on a pu le voir précédemment. Pour les biocarburants, la situation est similaire. Trois justifications au développement des biocarburants qui reposent sur autant de controverses sont systématiquement mentionnées dans les rapports officiels et la littérature scientifique : la diminution des émissions de gaz à effet de serre (GES), la diminution de la dépendance aux énergies fossiles et les effets positifs attendus sur le développement rural et sur les activités agricoles. De manière plus détaillée, dans une étude de 2008 concernant les controverses sur les biocarburants dans la globalisation, Arthur P. J. Mol identifie cinq justifications au développement des filières biocarburants de première génération. Leur développement apparaît dans un débat sur l'épuisement des énergies fossiles et la recherche de nouvelles sources d'énergie en substitution. Il s'inscrit dans une controverse sur les émissions de gaz à effet de serre dues à l'utilisation des énergies fossiles dans les transports et plus largement dans un débat sur le changement climatique. Le développement des biocarburants apparaît comme une solution au plan national pour construire un secteur énergétique moins dépendant des énergies fossiles afin de diminuer la dépendance des pays importateurs de carburants fossiles aux pays et aux régions productrices de pétrole. De plus, les biocarburants, qui ont l'avantage de pouvoir s'insérer facilement dans les infrastructures existantes pour le carbone fossile, sont des sources d'énergie de substitution qui permettent de pallier les hausses cycliques des prix du pétrole. Enfin, dans le cadre des débats sur le devenir du secteur agricole face à la crise dans les pays de l'OCDE (surproduction, faible prix des produits de récolte, faibles revenus pour les agriculteurs), les biocarburants apparaissent comme un nouveau marché pour des produits issus de l'agriculture.

Pour les raisons précédemment citées, les gouvernements ont soutenu le développement de la production d'biocarburants par une grande diversité de politiques publiques. Cependant, avec la production et la mise en marché des biocarburants de première génération, de multiples controverses ont émergé. Elles concernent leur contribution effective à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, leurs effets sur les ressources naturelles et la biodiversité, les conséquences des filières biocarburants sur les prix agricoles et sur l'accès à l'alimentation humaine, ainsi que leur contribution au développement rural. Comme on le voit, la plupart des controverses ont porté sur les « promesses technologiques » (Brown et al., 2003) qui avaient abouti au développement des biocarburants. En revanche, certaines controverses comme celle sur l'alimentation sont apparues comme des conséquences inattendues de la mise en production des biocarburants et sont alors devenues des enjeux publics. Initialement portées par les acteurs de la société civile, ces controverses ont pris de l'ampleur et ont progressivement engagé les institutions internationales (FAO, 2008a ; FAO 2009c), la communauté scientifique (débats sur le bilan carbone des biocarburants, sur l'efficacité énergétique, sur l'impact des biocarburants sur la crise alimentaire de 2008) et les politiques publiques (révisions des objectifs des politiques européennes sur les biocarburants et les énergies renouvelables). Ces controverses orientent aujourd'hui significativement la définition des politiques nationales sur les biocarburants dans un certain nombre de pays. A ce titre elles sont des indicateurs, dans le cadre d'une réflexion prospective, de points clés des évolutions à venir sur la production et l'usage des biocarburants. Nous revenons dans les paragraphes suivants sur les points saillants des controverses, dont les dynamiques peuvent être à l'origine de bifurcations dans les trajectoires futures d'usage et de production des biocarburants, et à terme reconfigurer ces filières.

2.2.1. La réduction des émissions des gaz à effet de serre

La réduction des émissions de GES a été l'un des moteurs des politiques publiques en faveur du développement des biocarburants en substitution des énergies fossiles dans les transports, ces derniers étant responsables de 13% des émissions totales de gaz à effet de serre.

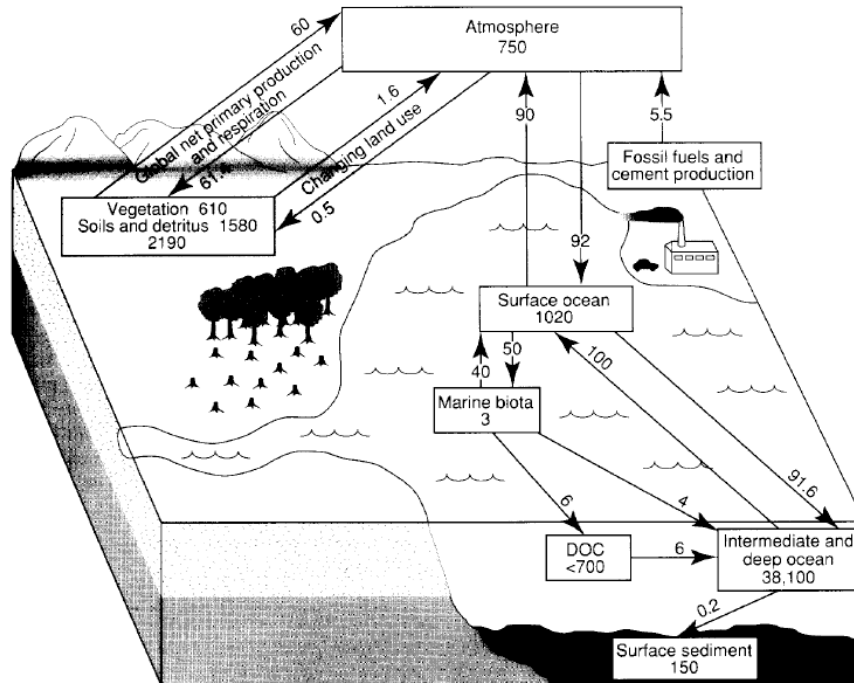
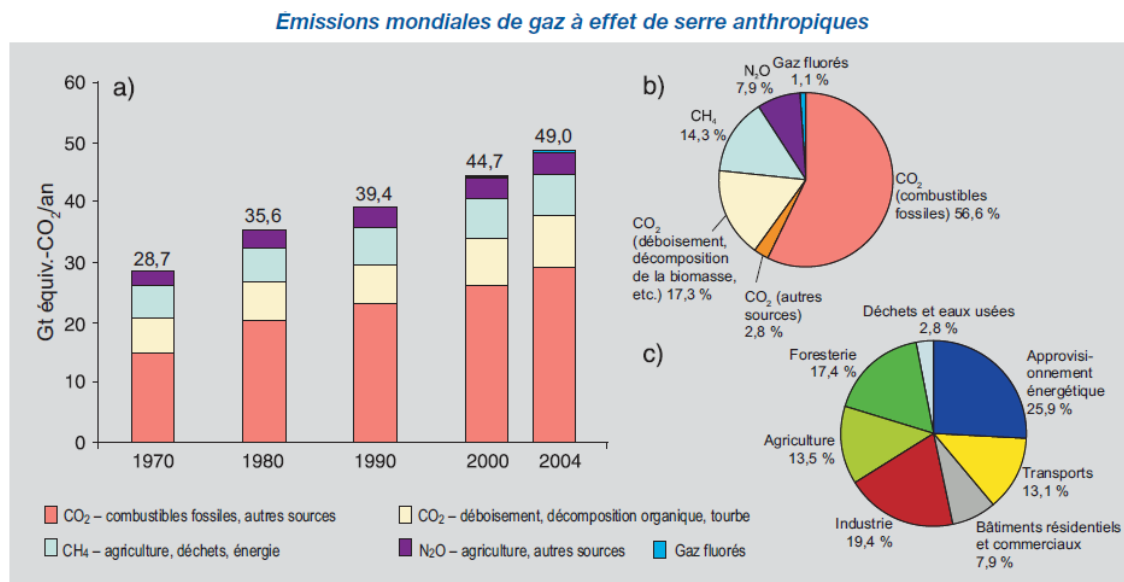


Figure 5 : Le cycle global du carbone (Schimel, 1995). Flux exprimés en GtC/an, et taille des compartiments en GtC.



a) Émissions annuelles de GES anthropiques dans le monde, 1970-2004. b) Parts respectives des différents GES anthropiques dans les émissions totales de 2004, en équivalent-CO₂. c) Contribution des différents secteurs aux émissions totales de GES anthropiques en 2004, en équivalent CO₂. Source : GIEC, 2008.

Avec l'arrivée en production des biocarburants de première génération, les effets attendus en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre des biocarburants ont été débattus. L'analyse du cycle de vie est la méthode utilisée pour calculer les bilans des gaz à effet de serre. Ce bilan résulte de la comparaison entre toutes les émissions de gaz à effet de serre tout au long des étapes de production et

d'utilisation d'un biocarburant et le total des gaz à effet de serre émis lors de la production et de l'utilisation de la quantité équivalente d'énergie du combustible fossile (FAO, 2008a). Les nombreuses études d'analyse du cycle de vie des biocarburants ont présenté des résultats variables en fonction du type de biomasse mobilisée, des méthodes de culture, des technologies de conversion, et des méthodes de calcul. Dans un premier temps, les débats ont concerné les méthodes d'évaluation des biocarburants (Dorin et Gitz, 2006). Ainsi, sur la base d'une revue d'études existantes, Benoist et al. (2008) font état de résultats d'évaluations variant de 1 à 5 en termes de bilan énergétique et de bilan d'émission de gaz à effet de serre. Globalement, la plupart des filières biocarburants de première génération apparaissent, dans ces études, avec des bilans positifs en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre, à l'exception des filières maïs et blé éthanol pour lesquelles certaines études faisaient apparaître des bilans légèrement négatifs.

Cependant, le débat sur les effets des filières biocarburants sur les émissions de gaz à effet de serre a pris une nouvelle ampleur récemment, avec l'intégration aux bilans carbone d'éléments tels que les changements d'usage des sols ou les effets des intrants agricoles, qui ont considérablement modifié les résultats des analyses. Jusque-là, les analyses de cycles de vie des biocarburants n'incluaient pas les émissions de gaz à effet de serre potentiellement causées par les changements d'usage des sols. Mais depuis 2008, des études ont montré que les changements d'usages des sols, consécutifs à la mobilisation de terres pour des cultures énergétiques, peuvent entraîner des émissions massives de gaz à effet de serre et modifier radicalement les bilans des biocarburants (Searchinger et al., 2008).

Par exemple, la conversion d'une prairie en terre cultivée pour une culture énergétique peut libérer, sous certaines conditions climatiques et pédologiques, 300 tonnes de CO₂ par hectare, et celle d'une forêt, de 600 à 1000 tonnes de CO₂ par hectare (Fargione et al., 2008 ; The Royal Society, 2008). Des estimations montrent que la conversion de terres pour produire des biocarburants peut conduire à une libération de CO₂ de 17 à 420 fois supérieure à la réduction annuelle de GES apportée par les biocarburants (Fargione et al., 2008).

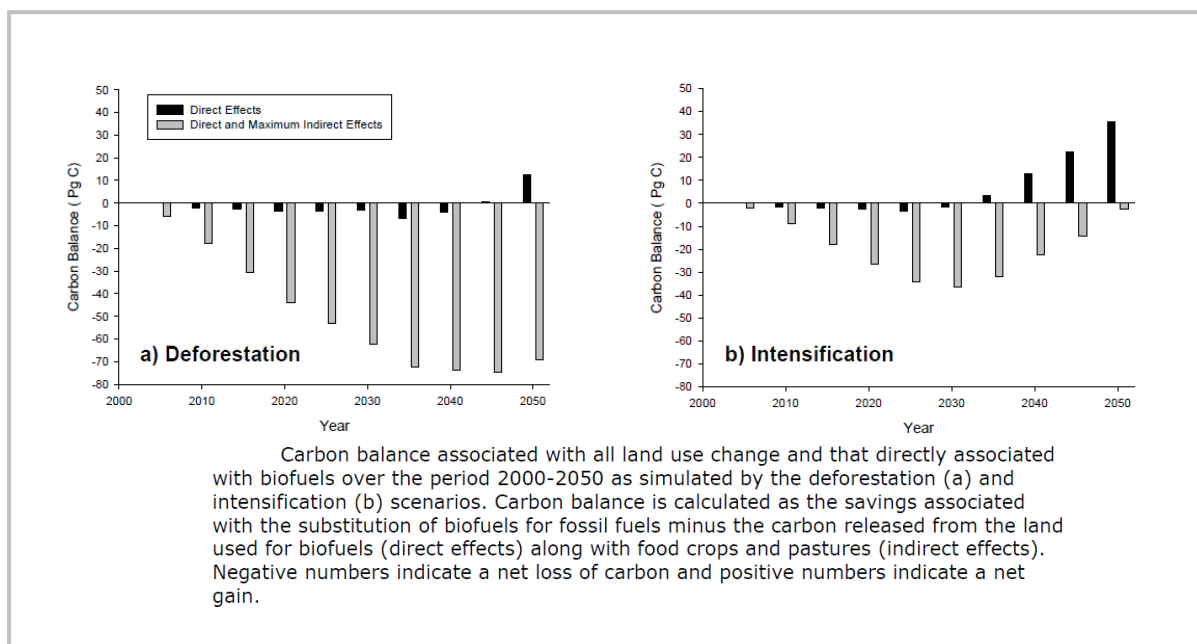
Des exercices de modélisations récents ont également estimé l'effet indirect du développement des cultures énergétiques sur l'allocation des sols (Indirect Land Use Change, ILUC). Il s'agit d'estimer les effets indirects des cultures énergétiques sur les émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, lorsque les sols qui étaient précédemment utilisés pour une production agricole sont dédiés à une culture énergétique, la production agricole originale peut se déplacer vers des terres non cultivées qui sont converties¹³. Ainsi, des simulations sur les changements directs et indirects d'usage des sols consécutifs au développement de cultures énergétiques montrent que la dette carbone¹⁴ ainsi contractée pourrait ne se résorber qu'après plusieurs décennies (Mellilo et al., 2009)¹⁵.

¹³ Par exemple, aux Etats-Unis, la production de maïs destiné à la fabrication de l'éthanol a remplacé les cultures de soja qui par le jeu du marché se sont déplacées au Brésil, convertissant des pâtures en terres arables, pâtures qui se sont reconstituées ailleurs aux dépens de la forêt amazonienne, le tout entraînant une émission importante dans l'atmosphère du carbone stocké dans les sols et les arbres (Rajagopal et al., 2010)

¹⁴ La bilan carbone est donné par le montant des émissions de carbone évitées grâce à la substitution de carburants fossiles par des biocarburants moins le carbone réémis par les sols utilisés pour les biocarburants (effets directs) et par les cultures alimentaires et les pâtures (effets indirects).

¹⁵ A noter, qu'à l'inverse, installer ces cultures à la place de savanes dégradées peut améliorer le stockage de carbone dans les sols.

Figure 6 : Bilan carbone associé aux changements d'usage des sols dans les scénarios du MIT -



Source : Melillo et al., 2009.

Enfin, d'autres éléments liés à l'intensification des cultures viennent compléter les bilans de gaz à effet de serre des biocarburants mais leur prise en compte reste complexe. En effet, les engrais qui sont mobilisés pour produire les cultures énergétiques sont responsables de l'émission de protoxyde d'azote (N_2O), un gaz qui a un effet potentiel de l'ordre de 296 fois supérieur au CO_2 (Crutzen et al., 2008). La prise en compte de ce facteur semble pouvoir avoir une contribution extrêmement négative sur les bilans carbone (Melillo et al, 2009b), mais les méthodes d'estimation ne sont pas, sur ce plan, encore stabilisées.

2.2.2. Le bilan énergétique des biocarburants

Les objectifs de réduction de la dépendance aux énergies fossiles et de leur substitution par des énergies renouvelables sont, nous l'avons vu, des moteurs essentiels du développement des biocarburants. Leur contribution nette à la fourniture d'énergie dépend à la fois de leur teneur en énergie et de l'énergie qui est mobilisée tout au long du processus de production et de distribution des biocarburants de façon directe (tracteurs, camions, usines etc.) et indirecte (engrais, pesticides, électricité etc.). Selon les cultures, les systèmes de production, les technologies de transformation et les filières concernés, les bilans énergétiques peuvent être très variables. L'exemple de l'éthanol de canne à sucre est de ce point de vue emblématique : la combustion de la bagasse (résidu fibreux de la canne à sucre) pour générer la chaleur nécessaire à l'étape de distillation améliore sensiblement le bilan des filières, par rapport aux procédés fondés sur l'utilisation d'énergie fossile exclusivement.

De la même manière que pour les émissions de gaz à effet de serre, ces bilans énergétiques ont fait l'objet de controverses scientifiques portant sur les méthodes d'évaluation (notamment les modalités de prise en compte des coproduits et la définition des périmètres d'analyse) (Dorin et Gitz, 2006). Ainsi, par exemple, l'économie d'énergie réalisée par rapport au gazole d'un biocarburant issu de colza varie selon les auteurs de +26% à +70% (Ibid.). Certaines filières biocarburants pourraient même avoir, selon certains auteurs, des bilans énergétiques négatifs (ex : biodiesel de soja, tournesol, bioéthanol de maïs).

Tableau 3 - Variété des résultats de bilan énergétique des biocarburants de 1^{ère} génération, d'après une revue de la littérature (Dorin et Gitz, 2006)

Type de biocarburant	Type de biomasse	Bilan énergétique*	Economie d'énergie**
Biodiesel	Colza	de 0.33 à 0.82	de +26% à +70%
	Tournesol	de 0.32 à 2.18	de -90% à +71%
	Soja	de 0.52 à 1.27	de -8% à +52%
	Palmier (une seule source analysée)	0.11	+90%
Bioéthanol	Maïs	de 0.5 à 1.65	de -43% à +54%
	Blé	de 0.43 à 1.26	de -10% à +60%
	Betterave	de 0.49 à 0.96	de +17% à +57%
	Canne à sucre	de 0.12 à 0.89	de +23% à +90%

* Ratio Energie dépensée / énergie fournie, du champ à la roue

** Economie d'énergie par rapport à un ratio de 1,15 pour l'essence et de 1,09 pour le gazole

Selon l'ADEME, les biocarburants consommés en France affichent des bilans positifs par rapport aux carburants fossiles avec une réduction de 18 à 85 % de la consommation d'énergie non renouvelable du puits à la roue (ADEME, 2010).

Sur ce thème, aujourd'hui le débat se déplace vers la comparaison des bilans énergétiques entre filières biocarburants, autres types d'usage de la biomasse (chaleur, électricité) et autres filières d'énergies renouvelables (éolien, solaire, etc.) que s'articulent les discussions¹⁶. Le bilan énergétique est un critère de comparaison fondamental entre ces différentes filières et technologies ; d'autres paramètres sont cependant à prendre en compte, tels que, par exemple, les matières premières (métaux notamment) et l'usage de l'eau.

2.2.3. La compétition avec les produits alimentaires

Biocarburants et marchés agricoles

La flambée des prix agricoles de 2006 à 2008 et la crise alimentaire qu'elle a générée dans de nombreux pays en développement a mis en lumière les interactions possibles entre biocarburants et systèmes alimentaires. Les prix des produits agricoles de base ont augmenté brusquement et sensiblement, avant de s'affaïsser à nouveau, sans pour autant revenir aux niveaux moyens antérieurs. Cette hausse a concerné la quasi-totalité des grands produits alimentaires, alimentation des animaux comprise. Ainsi, les prix des huiles végétales ont en moyenne augmenté de plus de 97 % entre 2002 et 2008, suivis par les céréales (87 %), les produits laitiers (58 %) et le riz (46 %). Les causes de cette flambée sont assurément de natures multiples ; est communément avancée la concordance d'une baisse de la production des pays exportateurs (liée à des sécheresses dans les grandes régions céréalières notamment), d'un niveau des stocks mondiaux très bas, d'une demande alimentaire accrue des pays émergents¹⁷, de l'augmentation du prix du pétrole ainsi qu'une dépréciation continue du dollar, du resserrement des liens entre marchés agricoles et marchés financiers¹⁸. Un consensus existe également sur le fait que l'essor très rapide des biocarburants fait partie de ces facteurs. Bien que son poids dans le phénomène soit encore en débat, les analystes s'accordent de plus en plus pour dire qu'il a eu une responsabilité de premier ordre (Forslund et Guyomard, à paraître ; FAO, 2009a).

Quoiqu'il en soit, ces événements, et les nombreuses analyses économiques qui les ont suivis¹⁹, ont montré que les volumes de matières agricoles qui seront demandés à moyen terme pour les biocarburants (au regard des politiques publiques menées dans un grand nombre de pays) auront un impact significatif sur les prix agricoles et sur leur instabilité.

¹⁶ Voir par exemple l'article de Campbell J. E., Lobell D. B., Field C. B., 2009. Greater Transportation Energy and GHG Offsets from Bioelectricity Than Ethanol. *Science*, Vol. 324, no. 5930, pp. 1055 – 1057.

¹⁷ Ce point est davantage controversé, d'après Lucien Bourgeois (2009).

¹⁸ Du fait de l'intervention de fonds d'investissement non commerciaux, à caractère spéculatif, qui opèrent sur les marchés à terme agricoles.

¹⁹ Voir notamment les travaux de modélisation Dronne et al. (2007) de l'INRA, de Mark W. Rosegrant de l'IFPRI (2008) et ceux de l'OCDE et de la FAO (OCDE-FAO, 2008).

Les implications de cette hausse des prix agricoles font l'objet d'appréciations divergentes. Pour certains, elle constitue l'occasion d'enrayer la baisse tendancielle des prix agricoles, responsable de la baisse des revenus agricoles et de la faiblesse des investissements réalisés dans l'agriculture, qui elle-même menace les capacités futures à répondre à l'accroissement de la demande alimentaire en bloquant le développement agricole, dans les pays en développement notamment. Pour d'autres, si elle ne s'accompagne pas de mesures de régulations et de politiques adaptées, cette hausse compromet de façon durable la sécurité alimentaire dans de nombreuses régions du monde et risque de toucher fortement les populations pauvres et consommatrices nettes de produits agricoles, alors qu'il y a dès aujourd'hui 1 milliard de personnes sous-alimentées dans le monde. Les préoccupations concernent également les productions animales, et les effets de la hausse des prix des céréales sur le prix des aliments du bétail, non totalement compensée par la baisse du prix des tourteaux et drèches (coproduits des biocarburants) (OCDE, 2008).

Outre la hausse des prix, l'interconnexion croissante entre marchés agricoles et marchés de l'énergie, introduite par les nouveaux usages énergétiques des produits agricoles de base, risque dans un contexte de dérégulation des marchés agricoles d'accentuer fortement la volatilité des prix agricoles (Von Braun, 2007, Koning et Mol 2009, Meyer et Thompson, 2009), et d'avoir des effets délétères sur la sécurité alimentaire, les revenus des producteurs et les dynamiques de développement agricole.

Concurrences d'usages sur les surfaces

Le développement des biocarburants de première génération soulève également la question des concurrences d'usage des surfaces agricoles entre productions alimentaires et non alimentaires. Dans un contexte de fortes interrogations sur la capacité à moyen et long termes de l'agriculture mondiale à répondre à l'accroissement de la demande alimentaire (cf. partie 3) et sur les modalités pour y parvenir, cette concurrence accrue sur les sols cultivables inquiète. Une étude a montré que si l'on convertissait avec les technologies actuelles tout le blé, riz, maïs, sorgho, canne à sucre, manioc et betterave à sucre cultivés aujourd'hui dans le monde en bioéthanol, 57% de la demande mondiale en pétrole serait couverte (FAO, 2008a, d'après Rajagopal et al., 2007). Cet ordre de grandeur donne la mesure des transformations que pourraient induire l'expansion du marché des biocarburants. De plus les objectifs ambitieux des politiques de l'Union Européenne en matière de développement des biocarburants sont confrontés à cette question. Jacquet et al. (2007) ont ainsi estimé les surfaces nécessaires à la satisfaction de l'objectif d'incorporation initialement fixés à 5,75% pour 2010, à environ 13 millions d'hectares, soit un peu moins de 20% des superficies arables actuelles de l'UE-25 (si la production était entièrement domestique). Le rapport de l'Agence européenne de l'environnement de 2006 estime que les surfaces disponibles pour la production de biocarburants en Europe sans créer de dommage environnementaux ne peuvent répondre, avec les techniques actuellement disponibles, aux objectifs de 10% d'incorporation fixés pour 2020. L'expansion des surfaces pour la production de biodiésel se heurte par ailleurs dans certains pays à des limites agronomiques (cas de la culture de colza en France, par exemple).

Mais la croissance de la demande mondiale en biocarburants peut aussi se reporter massivement sur les pays en développement, qui présentent a priori des avantages comparatifs pour ces productions (conditions pédoclimatiques, foncier et main d'œuvre bon marché, etc.), en particulier l'Amérique Latine et l'Afrique où les réserves de terres cultivables sont les plus importantes. Et le risque existe que les pays en développement les plus pauvres deviennent fournisseurs de biomasse plutôt que des régions qui exportent des biocarburants. Cela laisserait aux seuls investisseurs étrangers une grande part de la valeur ajoutée et l'essentiel des bénéfices économiques de cette activité. Ce risque est renforcé par le fait que les Etats et les entreprises africains ont rarement la capacité technologique, les connaissances et la capacité de développer les infrastructures nécessaires pour fabriquer à large échelle des biocarburants et les exporter (Mol, 2008).

2.2.4. Les tensions sur les ressources naturelles et la biodiversité

La satisfaction des besoins alimentaires nécessitera, à l'horizon 2050, davantage de productions agricoles, du fait de l'augmentation de la population et de l'évolution des modes de vie (cf. partie 3-2). Même en considérant un accroissement de la productivité agricole, il est peu probable que la demande additionnelle de terre induite par la production de bioproduits puisse être satisfaite sans conquérir de nouvelles terres. La localisation de ces surfaces et le devenir des milieux naturels les plus fragiles et les plus précieux du

point de vue de la biodiversité et des services écosystémiques sont donc, à cet égard, des enjeux centraux. (Bindraban et al., 2009)²⁰.

« *L'activité humaine peut avoir sur la biodiversité deux effets antagonistes : détruire la biodiversité existante par un bouleversement d'un écosystème sensible ; favoriser le développement de la biodiversité par la création d'espaces différents et de zones d'interface*²¹ ». L'expansion des productions destinées aux biocarburants est susceptible d'accélérer la déforestation dans certains pays ; si le phénomène touche des forêts riches en espèces et en habitats – les forêts tropicales humides par exemple, et primaires notamment - il provoquera une destruction conséquente de la biodiversité. L'érosion de la biodiversité cultivée (systèmes de monoculture, plantations monoclonales) et l'introduction d'espèces invasives sont d'autres effets possibles. Dans des régions actuellement très spécialisées, l'introduction de nouvelles espèces cultivées, en diversifiant les rotations, peuvent au contraire favoriser la biodiversité cultivée.

Par ailleurs, les pressions sur les ressources naturelles (eau, sol) risquent à l'avenir de s'accroître, à travers notamment une plus forte intensification de l'agriculture. Ainsi, alors que l'eau fait l'objet de prélèvements croissants et que de nombreuses régions du monde connaissent des problèmes d'approvisionnement, la demande future alimentaire va augmenter considérablement et les concurrences s'accroîtront entre les usages agricoles²², domestiques et industriels de l'eau, auxquelles vont s'ajouter les incidences attendues du changement climatique. Dans les régions où les ressources en eau sont limitées, ou manquent déjà, la mise en place de cultures irriguées surnuméraires pour les productions non alimentaires est susceptible d'accroître les problèmes (IIASA, 2009 ; De Fraiture et al., 2008). La qualité des ressources en eau est également concernée, si les productions de biomasse entraînent un emploi accru d'intrants chimiques (Lorne et Bonnet, 2009), et si les pollutions liées aux procédés de transformation ne sont pas maîtrisées (par exemple, effluents riches en matière organique).

Enfin, un développement conséquent de nouvelles productions peut participer, selon les systèmes mis en place et les zones concernées, à l'accélération de la dégradation des sols, phénomène devenu massif à l'échelle mondiale²³. A cet égard, la perspective d'utiliser des plantes pérennes, notamment pour des bioproduits d'origine lignocellulosique, pourrait au contraire favoriser la protection des sols. Par ailleurs, le recours aux résidus de culture, de plus en plus envisagé, nécessite une grande maîtrise des prélèvements pour maintenir un taux de matière organique suffisant et préserver la structure et la fertilité des sols.

2.2.5. Les effets des filières biocarburants sur le développement agricole et rural et la question foncière

L'un des objectifs affichés de l'appui public au développement des filières bioproduits réside, au Nord comme au Sud, dans ses effets potentiellement positifs sur les économies agricoles et le développement rural.

Les biocarburants représentent pour un certain nombre d'analystes une opportunité pour attirer les investissements dans le secteur agricole, développer la production dans des régions agricoles « sous-utilisées »²⁴, pour favoriser la mise en place de filières (intrants, semences, commercialisation), d'infrastructures et les transferts techniques, pour créer de l'emploi agricole, rural et industriel, et permettre aux pays en développement de stimuler leurs économies en intégrant de nouveaux marchés d'exportation, en limitant les importations de matières premières fossiles et en créant de nouvelles sources de recettes publiques. Dans le cadre d'un développement territorialisé de ces nouvelles filières et usages, la réduction de la pauvreté et un meilleur accès à l'énergie pourraient vraisemblablement advenir²⁵. Les analyses

²⁰ Cette question sera abordée plus avant dans la partie 4 de l'étude.

²¹ Source : livrable de la tâche 11 de l'ARP VegA

²² Selon une étude les prélèvements agricoles vont s'accroître substantiellement d'ici 2050 de l'ordre de 15-20%, et les surfaces irriguées augmenter de 30% (Fischer et al., 2009).

²³ Déforestation, pratiques agricoles inadaptées, irrigation non maîtrisée et surpâturage sont les principaux responsables de la dégradation des sols. On estime ainsi par exemple que 950 000 km² sont d'ores et déjà menacés en Afrique subsaharienne, et que 20% des terres agricoles asiatiques ont été dégradées dans les dernières décennies (UNEP 2008).

²⁴ Cette notion de terres « sous-utilisées » est ambiguë à bien des égards. En effet, la diversité des usages de l'espace rural, qu'ils soient extensifs ou non, productifs ou non, n'est souvent pas identifiée ni reconnue, notamment dans les pays où les droits foncier ne sont pas formalisés légalement, comme c'est le cas dans un grand nombre de pays africains par exemple (Jamart et Merlet, 2009, Barthelon et al., 2010).

²⁵ Voir par exemple l'analyse de Marie-Hélène Dabat, Elodie Hanff et Joël Blin aux 3èmes journées de recherches en sciences sociales INRA SFER CIRAD, Montpellier, décembre 2009, « Les biocarburants, une opportunité pour réduire la pauvreté au Burkina Faso ? ».

sur les effets de ces dynamiques sur la sécurité alimentaire et le développement rural divergent cependant. L'attention est attirée sur le fait que les effets redistributifs et d'entraînement de ces nouvelles filières ne vont pas de soi, et dépendent étroitement de la nature des systèmes de production développés (nombre et nature des emplois créés, salaires, etc.), de la répartition de la valeur ajoutée entre opérateurs dans les filières et dans les différents pays, des modes de contractualisation entre acteurs, de l'insertion territoriale de ces filières et, plus trivialement, du respect des droits des travailleurs, entre autres facteurs.

Ces préoccupations s'affirment d'autant plus que la tendance actuelle est au développement des biocarburants dans le cadre de systèmes de production à grande échelle, industrialisés, pilotés par de grandes entreprises agroindustrielles (et/ou issues d'autres secteurs) et souvent intégrés verticalement. Ces structures ont de très hauts niveaux de productivité du travail et sont potentiellement peu pourvoyeuses d'emplois, en comparaison de structures d'exploitation de type familial ou PME, et la valeur ajoutée est maîtrisée par les macro-opérateurs sur l'ensemble de la chaîne. Par ailleurs, les conditions de travail et sociales des travailleurs dans les palmeraies et les plantations de canne à sucre sont, dans un certain nombre de pays, extrêmement précaires.

Le développement des biocarburants commence à s'inscrire dans un mouvement plus général d'internationalisation des investissements et de financiarisation du secteur agricole. La hausse des prix agricoles a suscité l'intérêt de nouveaux types d'investisseurs (acteurs industriels issus de secteurs divers, acteurs financiers comme les banques et les fonds d'investissement) qui, dans un contexte de crise économique, entrevoient de nouvelles perspectives de croissance dans ce secteur, du fait des tensions potentielles sur les marchés agricoles et d'un maintien de prix relativement élevés (Barthelon et al., 2010). Par ailleurs, suite à la flambée des prix, un certain nombre d'Etats – notamment dans les pays importateurs structurels ou occasionnels de matières premières agricoles – tentent de s'affranchir des aléas des marchés internationaux pour assurer leurs approvisionnements agricoles. Ils mettent en place des stratégies de sécurisation en investissant dans des structures de production à l'étranger, et interviennent de façon directe ou indirecte, par l'intermédiaire de fonds souverains ou de macroacteurs privés. Motivés en premier lieu par les enjeux de sécurité alimentaire, ils se positionnent également sur les nouveaux marchés de la bioénergie, dans une logique d'indépendance vis-à-vis du pétrole et/ou une stratégie de positionnement des entreprises nationales sur de nouveaux marchés porteurs.

Cette nouvelle donne occasionne la multiplication des transactions foncières internationales de grande à très grande ampleur (de concessions de quelques centaines à plusieurs centaines de milliers d'hectares), dans les pays du Sud, mais aussi dans les pays d'Europe de l'Est et de la Mer Noire. La production de biocarburants motive une part importante de ces investissements agricoles étrangers à grande échelle.

Ces évolutions suscitent à la fois d'importants espoirs pour relancer l'économie agricole et rurale des pays concernés, mais également de vives préoccupations. La disponibilité foncière pour les petits producteurs et les éleveurs pastoraux pourrait être affectée lourdement, et ce d'autant plus que, d'une part, les droits fonciers traditionnels sont informels, et que, d'autre part, la diversité des usages qui sont faits d'espaces en apparence peu utilisés sont rarement pris en compte dans les négociations entre Etats hôtes et acquéreurs. Sans régulation, cela met aussi possiblement en concurrence petits agriculteurs et firmes, et production alimentaire et non alimentaire pour l'accès aux terres les plus favorables. Associé aux possibles effets de déstabilisation des marchés domestiques, avec l'entrée d'opérateurs nettement plus productifs que les exploitants locaux, ce phénomène pourrait vraisemblablement nourrir les dynamiques d'exode rural et de dévitalisation des campagnes s'il n'est pas maîtrisé, accroissant la vulnérabilité alimentaire des populations (Ibid. ; Jamart et Merlet, 2009). L'accaparement de ressources naturelles (de l'eau notamment) et l'altération des écosystèmes suscitent également des craintes vis-à-vis de ces investissements, qu'ils soient guidés par des logiques de souveraineté énergétique, financières ou économiques de plus ou moins courts termes et potentiellement très déconnectées des dynamiques territoriales.

Tous ces débats attirent ainsi l'attention sur l'imbrication étroite existant entre usages non alimentaires de la biomasse, systèmes alimentaires, écosystèmes et dynamiques des territoires ruraux, et mettent l'accent sur le caractère complexe et non univoque de ces relations.

2.2.6. Les biocarburants de deuxième génération : de nouvelles controverses ?

Par rapport aux controverses qui se sont développées sur les biocarburants de 1^{ère} génération, les biocarburants de 2^e génération, basés sur la transformation de la biomasse lignocellulosique, sont porteurs de nouvelles promesses en tant que source viable d'énergie renouvelable. Le fait de ne pas mobiliser des cultures agricoles mais des cultures exclusivement énergétiques (ex. switchgrass), sylvicoles, algales ou des déchets agricoles ou municipaux comme source de biomasse, semble fortement limiter les effets de compétition avec les cultures alimentaires. De plus, des systèmes de transformation de la plante entière, de mobilisation des résidus agricoles ou de culture s'accommodant de terres peu productives et marginales ou s'intégrant dans des systèmes à bas niveau d'intrants et sans irrigation (Blaschek, 2010) sont envisagés pour diminuer les effets de compétition.

Cependant, il s'agit de souligner ici quelques controverses qui ont émergé sur les biocarburants de 2^{ème} génération et qui recoupent les controverses précédemment évoquées. Concernant la mobilisation des résidus agricoles ou forestiers, outre la question du maintien de la fertilité des sols déjà citée, des controverses existent d'ores et déjà sur la faisabilité technico-économique de telles filières où la collecte de la biomasse, spatialement très dispersée, est coûteuse. Par ailleurs, il est probable que, pour des questions de compétitivité, la production de biomasse (ex. switchgrass, miscanthus, taillis à très courte rotation) pour les biocarburants de 2^e génération se fera sur des terres arables de bonne qualité (donc très productives) et dans le cadre de systèmes irrigués et intensifs en intrants, avec, dans ces conditions, des conséquences similaires à celles des biocarburants de 1^{ère} génération en termes de pression sur les ressources en eau et de compétition avec l'alimentation.

2.2.7. L'impact des controverses sur les orientations des politiques publiques

Des politiques publiques de plus en plus controversées et soumises à révision

L'ensemble des interrogations présentées ci-dessus ont incité les responsables politiques à revenir sur les politiques publiques en faveur des biocarburants – notamment en examinant le caractère écologique et durable attribué a priori aux bioproduits – et à développer des outils d'évaluation permettant de prendre en compte les conséquences sociales et environnementales de leur production.

Etant donné le rôle structurant des politiques publiques dans le développement récent des bioproduits, leur bien-fondé a été remis en question par ces débats. Leur rapport coût-efficacité a fait l'objet d'évaluations sévères ces dernières années, de même que leur comparaison avec des mesures portant de façon plus directe sur l'efficacité énergétique ou les économies d'énergie par exemple. C'est également la multiplicité des effets collatéraux non anticipés qui cristallise la critique, notamment les impacts hors des frontières des pays concernés par les politiques.

A titre d'exemple, une évaluation économique de ces politiques publiée par l'OCDE en 2008 estime la réduction de la quantité de carburants fossiles due aux politiques actuelles de l'UE, des Etats-Unis et du Canada de 1 à 3%, alors que la contribution publique est de l'ordre de 1 à 7 dollars par litre de carburant fossile économisé. Les politiques de ces trois mêmes entités auraient diminué de moins de 1% le total des émissions de GES dans le secteur des transports (sur la base de bilans GES ne prenant pas en compte tous les aspects indirects évoqués ci-dessus) avec un coût de 960 et 1700 dollars la tonne de CO₂ économisée (OCDE, 2008). Ce dernier point peut être nuancé par le fait que la création de nouveaux marchés, notamment dans le domaine de l'énergie renouvelable, passe généralement par des politiques volontaristes qui assurent une rentabilité initiale à des processus de production innovants et non compétitifs.

Les controverses scientifiques et sociétales sur les biocarburants, autour notamment de leurs effets sur l'alimentation et les écosystèmes, ont eu une influence forte sur l'orientation de l'action publique. Certains pays revoient leurs objectifs d'incorporation des biocarburants dans les carburants fossiles à la baisse ; la recherche de modes alternatifs de mobilisation et d'utilisation de la biomasse est favorisée pour les transports, mais aussi d'autres secteurs.

Enfin, il est question de conditionner davantage les soutiens publics à ces filières par des critères de durabilité. A cet égard, les méthodes d'évaluation pour la définition de ces critères seront centrales, de même que la mise en place de systèmes de certification encadrant les échanges internationaux. Certains

auteurs proposent un système de certification qui bannirait les biocarburants qui n'ont qu'un bénéfice environnemental limité (Rajagopal, 2010) ; l'analyse se baserait sur les cycles de vie des biocarburants, et les gouvernements n'attribueraient de subvention qu'aux biocarburants qui sont certifiés et répondent aux standards de production souhaités. Cependant, comme ces standards seraient différents d'un pays à l'autre, ce système nécessiterait une coordination globale. De plus, la question se pose de la compatibilité de ces systèmes de certification environnementale (et éventuellement sociale) avec les règles du commerce international à l'OMC. D'autres questions se posent quant à la possibilité de prendre en compte des critères sociaux et de développement sur la base des méthodes d'évaluation existantes.

D'autres enjeux qui nécessitent des régulations internationales émergent dans les débats sur les politiques publiques. En effet, l'interrelation entre marchés énergétiques et agricoles est de plus en plus étroite, du fait notamment du développement des biocarburants. Aussi, la stabilisation des prix des produits alimentaires ne peut être réalisée sans la stabilisation des prix de l'énergie. A ce titre, il apparaît que les institutions globales existantes ne sont pas adaptées pour stabiliser les interactions entre les marchés alimentaires et les marchés de l'énergie, et donc ne vont pas permettre de sécuriser l'approvisionnement alimentaire. Pour cela, certains auteurs (Koning et al., 2009) proposent de créer des taxes fluctuantes sur les produits non alimentaires issus de la biomasse, qui se mettraient en place lorsque les prix des produits alimentaires atteindraient un seuil, ou bien de mettre en place des systèmes de quotas sur les exportations et les importations.

Encadré 5 : Biocarburants, controverses et politiques publiques de l'Union Européenne

Trois principales étapes ont marqué la mise en place de la législation de l'UE en matière de biocarburants. La première impulsion fut donnée dans le cadre de la Politique agricole commune, avec la possibilité pour les agriculteurs de produire des cultures énergétiques sur les terres en jachère. Concomitamment, dans certains Etats membres (dont la France), des mesures en faveur de l'incorporation de biocarburants dans les carburants conventionnels furent adoptées.

Deuxième phase, la mise en place d'une politique communautaire ambitieuse à partir de 2003, avec l'adoption de trois directives :

- La première est la Directive 2003/30/CE visant à promouvoir le marché des biocarburants : «objectif de référence» indicatif (non contraignant donc) de 2% pour la consommation de biocarburants (sur la base de la teneur en énergie) d'ici 2005 et 5,75% d'ici le 31 décembre 2010. Cela oblige les États Membres à fixer des objectifs nationaux tout en laissant libres du choix de la stratégie à suivre pour atteindre ces résultats.
- La deuxième est la Directive 2003/96/CE, qui prévoit l'application de stimulants fiscaux en faveur des biocarburants
- La troisième directive qui sous-tend la législation communautaire sur les biocarburants est la Directive 2003/17/CE, qui augmente la limite d'incorporation d'éthanol à 10%.

La prise en compte dans les politiques publiques des controverses apparues entre temps commence en décembre 2008, par l'adoption de la Directive Energies Renouvelables, dans le Paquet Energie Climat européen. Les négociations menées en 2007 prévoyaient initialement un taux d'incorporation de biocarburants contraignant de 10% à l'horizon 2020. Les controverses sur les biocarburants survenues depuis ont conduit le parlement européen à reconsidérer le rôle des biocarburants dans la politique énergétique. Ainsi, l'objectif de 10% concerne dans le texte final tous les carburants alternatifs renouvelables (y compris électricité et hydrogène), et inclut des critères de durabilité sur les émissions de gaz à effet de serre (minimum de 35% de CO₂ économisés en 2010, 45% en 2013 et 50% en 2017), les terres éligibles ou non à ce type de production et les standards sociaux auxquels la production de biocarburants doit répondre. A ce jour, les effets indirects sur l'occupation des sols ne sont pas intégrés à ce dispositif.

Sources : Bureau et al. 2009, FAO 2008a, ILASA 2009.

Conclusion à la partie 2.2

Le développement des bioproduits est imbriqué dans de multiples dynamiques de controverses : l'émergence des bioproduits répond à des débats extérieurs au domaine, qui concernent les effets des énergies fossiles sur le climat, et les conséquences environnementales et sanitaires des produits chimiques issus de la chimie du carbone fossile, notamment. Par la suite, la mise en œuvre de la production de biocarburants de 1^{ère} génération s'est accompagnée de nombreux débats sur les émissions positives de GES, l'augmentation des prix des produits alimentaires, les menaces sur la forêt et la biodiversité, la compétition sur les ressources en eau, et les effets sur le développement rural des filières biocarburants. Et aujourd'hui, les biocarburants de 2^e et 3^e générations sembleraient pouvoir, sous certaines conditions, répondre à ces enjeux.

Au vu de ce constat, on peut supposer que la dynamique à venir des controverses scientifiques et des débats publics aura un rôle majeur dans le développement futur de ces filières. Par exemple, un critère va-t-il prédominer sur un autre dans le débat sur le développement de la filière (par exemple, la dépendance énergétique) ? Ou bien, l'engagement public sur les filières biocarburants va-t-il se maintenir compte tenu des effets non désirés sur l'environnement et les communautés rurales ? Si non, comment va-t-il se modifier ? Le devenir des controverses dépend d'une diversité de formes de l'expertise et implique un grand nombre d'acteurs publics et privés : agences internationales, Etats, industriels, producteurs de biomasse, acteurs concernés par les conséquences d'une filière bioproduit, consommateurs, citoyens... Ce sont aussi les rôles à venir de ces acteurs qui seront déterminants.

Ainsi, pour la réflexion prospective, les différentes controverses actuelles sur les bioproduits sont autant de signaux faibles qui permettent d'anticiper une diversité de trajectoires d'évolution possible pour les bioproduits. Cependant, un aspect de l'évolution à venir de ces filières est à souligner, la question de la durabilité. En effet, la durabilité apparaît, sous certaines conditions, comme un *objectif normatif* qui encadrerait et définirait le développement à venir de la production et des usages de biocarburants (Bindraban et al., 2009), et plus largement des bioproduits. Cependant, la durabilité des filières bioproduits reste à construire ; elle s'accompagne concrètement de nombreux défis sur le plan industriel, et assigne des objectifs ambitieux à l'innovation car elle suppose une coordination importante entre les acteurs de la filière pour atteindre des objectifs de durabilité (Garnier & Nieddu, 2009). De plus, le développement de ces filières est à envisager par rapport à un horizon global de durabilité, largement intersectoriel ; ainsi le développement de la biomasse pour l'énergie est à resituer dans le cadre du développement d'un ensemble d'énergies renouvelables telles que le solaire, l'éolien, la géothermie et l'hydroélectricité, et à comparer avec ces autres sources d'énergie.

2.3. Energie et alimentation à 2050 : quelle place pour la biomasse non alimentaire ?

Les controverses sur les bioproduits ont fait surgir de nouvelles questions mais ont également conduit à l'émergence d'un consensus : la nécessité de prendre en compte la multiplicité des implications de leur développement à large échelle et de resituer le devenir de la biomasse vis-à-vis d'enjeux de long terme.

Dans cette section sont envisagés les enjeux de long terme relatifs d'une part au devenir des systèmes énergétiques mondiaux et à la prise en compte du changement climatique, et d'autre part ceux associés au devenir des systèmes alimentaires face à l'accroissement de la demande alimentaire. Ce tour d'horizon prospectif permet de repérer les grandes tendances et les incertitudes à prendre en compte pour réfléchir aux scénarios d'évolution des usages non alimentaires de la biomasse.

2.3.1. L'enjeu énergétique

La situation énergétique mondiale actuelle : des énergies fossiles dominantes dans tous les secteurs, d'importantes disparités entre régions du monde

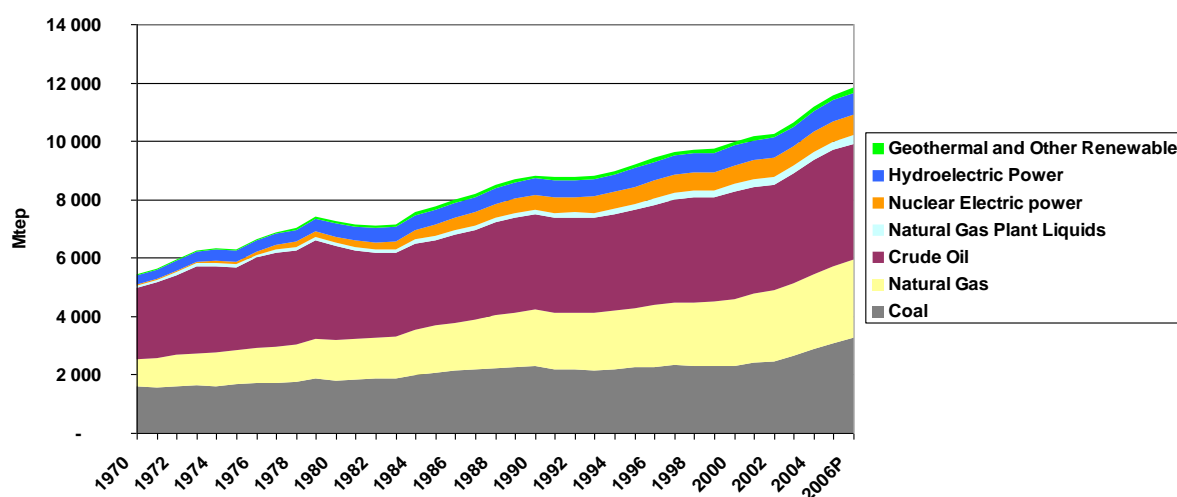
La demande mondiale totale d'énergie primaire atteint aujourd'hui autour de 12 000 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) par an (OCDE-AIE, 2008). La consommation énergétique s'est considérablement accrue au cours des dernières décennies, à la fois globalement et en termes de consommation individuelle (cf. tableau 3). Au début des années 2000, cette demande a connu une nette accélération, directement liée à la vigueur de la croissance économique mondiale. Le poids relatif des différentes régions du monde évolue ; la demande des pays émergents asiatiques s'accroît rapidement, du fait de leur croissance démographique et économique soutenue et de leur orientation, pour l'heure, vers des modèles de croissance intensifs en énergie. L'accroissement de la demande énergétique mondiale s'est vraisemblablement interrompu en 2009, pour la première fois depuis le début des années 80, du fait de la crise économique et financière, sans pour autant remettre en question cette tendance à moyen terme.

Toutefois, la situation reste très différenciée entre pays et régions du monde. Les mix énergétiques sont sensiblement différents, et l'accès à l'énergie extrêmement contrasté. D'après la Banque Mondiale, plus de 1,6 milliard de personnes n'ont toujours pas accès à l'électricité. Dans certains pays en développement, la biomasse dite « traditionnelle » représente 90% de l'énergie primaire (cf. Partie 2 chapitre 2). A titre d'illustration de ces disparités, Dabat et al. notent qu'« *un consommateur burkinabé dispose de 500 fois moins d'énergie qu'un nord-Américain et [que] la totalité de la consommation de son pays n'égale pas celle d'une petite bourgade américaine de 20.000 habitants* ».

Les combustibles fossiles sont de loin la principale source d'énergie primaire dans le monde, le pétrole, le charbon et le gaz fournissant ensemble 80% du total (cf. tableau 4). La demande mondiale en pétrole correspond aujourd'hui à 85 millions de barils par jour, et représente à elle seule 35% de la consommation en énergie primaire totale.

Le secteur des transports est particulièrement dépendant du pétrole, puisque l'énergie qu'il utilise provient à 94% des produits pétroliers. Le pétrole y est donc tout particulièrement difficile à remplacer. Les transports représentent 26% de la demande totale d'énergie primaire dans le monde et plus de 60% de la demande de pétrole. Le secteur de la production d'électricité dépend lui aussi très fortement des énergies fossiles : 68% de l'électricité mondiale est d'origine fossile, dont 40% issue de centrales à charbon (AIE, 2009).

Figure 7 - Energie primaire mondiale par source, 1970-2006



Source: auteurs, d'après les données de l'U.S. Energy Information Administration, 2009. Annual Energy Review (AER) 2008

Tableau 4 : Répartition de la demande mondiale d'énergie primaire par type de source, 2005

Source	Part de la demande
Pétrole	35%
Charbon	25%
Gaz	21%
Biomasse et déchets	10%
Energie nucléaire	6%
Hydroélectricité	2%
Autres combustibles renouvelables	1%

Source : FAO 2008a, d'après AIE 2007

Tableau 5 : Consommation d'énergie primaire par habitant dans le monde, en tep par habitant

	1973	1990	2005
Amérique du Nord	6,77	6,30	6,42
Amérique latine	0,90	0,96	1,11
Europe	3,12	3,68	3,38
Afrique	0,55	0,63	0,68
Moyen-Orient	0,93	1,79	2,69
Extrême-Orient	0,54	0,75	1,06
Océanie	3,97	4,92	5,65
Monde	1,57	1,66	1,78

Source : Insee, d'après AIE

Un secteur énergétique fortement émetteur de GES

D'après les travaux du GIEC, l'objectif de stabilisation de la concentration de CO₂ atmosphérique à 450 ppm, nécessaire pour limiter l'augmentation de la température moyenne du globe en deçà de 4°C, implique une division par deux des émissions de CO₂ en moyenne à l'échelle mondiale d'ici 2050, avec une division par quatre pour les pays industrialisés déjà fortement émetteurs²⁶.

Les combustibles fossiles sont responsables de plus de 55% des émissions de GES anthropiques dans le monde. Le secteur énergétique (toutes énergies confondues) pèse pour 60% des émissions anthropiques, le secteur des transports à lui seul y contribue à hauteur de 15% (IPCC 2007). Ce dernier secteur est particulièrement problématique pour la lutte contre le changement climatique. En effet, sur le long terme, ce sont les transports qui ont tiré considérablement la demande en pétrole, et leur poids dans cette demande augmente très fortement au cours du temps, et pour l'heure les marges de manœuvre pour les

²⁶ En France, l'expression de « facteur 4 » est employée pour baptiser la déclinaison à l'échelle nationale de l'objectif de division par quatre des émissions de gaz à effet de serre. Cet objectif « facteur 4 » a été successivement inscrit dans la stratégie nationale de développement durable, en juin 2003, dans le « Plan climat » de juillet 2004, dans la « Loi de programme fixant les orientations de sa politique énergétique » en juillet 2005, avec confirmation en 2007 dans le Grenelle de l'environnement. Le « facteur 4 » était initialement employé par les membres du Club de Rome pour désigner plus largement la multiplication par 4 de l'efficacité des modes de production nécessaire à la préservation des ressources et de l'énergie.

réduire sont étroites. Dans l'UE par exemple, entre 1990 et 2004, les émissions de CO₂ ont diminué dans la plupart des secteurs, alors qu'elles ont augmenté de plus de 25% dans le transport (Fischer, 2009).

Et demain ? Le modèle énergétique dans l'impasse

Un possible doublement de la demande énergétique à 2050

Les analystes s'accordent sur le fait que la croissance de la consommation d'énergie va augmenter considérablement, sous l'effet non seulement de l'accroissement démographique²⁷ mais aussi de la croissance économique des pays émergents. Parmi les diverses projections qui envisagent l'évolution de la demande énergétique mondiale, nous proposons de nous appuyer en particulier sur les scénarios développés par l'AIE dans l'Energy Technology Perspective de 2008. (AIE 2008, cf. encadré 6, scénario *Baseline*).

Le scénario tendanciel (*Baseline*), qui prolonge les tendances actuelles en termes de mix énergétique et de rythme d'accroissement de la demande, envisage un doublement de la demande mondiale d'ici 2050. Faute de solutions alternatives permettant une substitution rapide et massive, les énergies fossiles constitueraient en 2050 plus de 80% du mix énergétique. Avec de telles hypothèses, la planète s'engage dans un scénario où les émissions du secteur énergétique pourraient atteindre plus de 60 Gtonnes de CO₂ par an (AIE 2008).

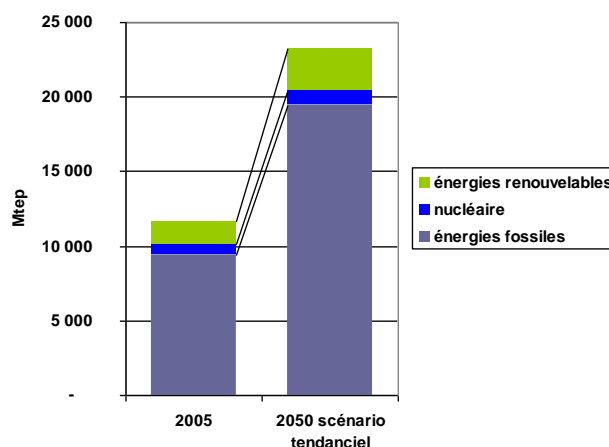
De fortes incertitudes sur l'offre en pétrole et des enjeux stratégiques très prégnants

Les chiffres sur la production future de pétrole et l'estimation des réserves ultimes dans le monde sont sujets à des controverses majeures. Ces estimations, d'une portée politique et géostratégique certaine, sont largement débattues dans les publications institutionnelles (Laherrère, 2006). Une grande incertitude perdure autour du pic (ou du plafond) de production de pétrole, qui se situerait selon les analyses entre 2015 et 2040²⁸.

Une baisse de la production de pétrole avant la moitié de ce siècle est donc considérée comme très probable, mais à plus court terme, le risque de tension est surtout lié à l'investissement pour la prospection, l'extraction et les capacités de raffinage (AIE WEO 2008), et aux capacités de mobilisation des ressources pétrolières non conventionnelles. A court et moyen termes, l'évolution future des prix du pétrole est très incertaine, car dépendante d'un grand nombre de facteurs (croissance, notamment des PeD, coût d'exploitation des nouveaux gisements, contexte géopolitique, part des transports dans la demande (produits raffinés légers), normes environnementales, politiques énergétiques, etc.). Mais les tensions au niveau de l'offre vont assurément accentuer très fortement la volatilité des prix du pétrole.

Un autre élément central est la concentration croissante de la production dans les pays de l'OPEP. Le pic de production de pétrole conventionnel dans les pays non OPEP sera vraisemblablement atteint dans

Figure 8 - Energie primaire par type de source en 2005 et dans le scénario tendanciel (Baseline) de l'ETP 2008



Source : auteurs, d'après ETP 2008 de l'AIE

²⁷ La projection médiane de l'ONU prévoit une population mondiale avoisinant 9 milliards d'individus en 2050.

²⁸ Selon les points de vue les plus pessimistes, en un peu plus d'un siècle, la moitié des réserves de pétrole conventionnel découvertes (soit 1000 milliards de barils) auraient déjà été consommées. La seconde moitié sera consommée beaucoup plus vite que la première, du fait d'une demande énergétique mondiale bien plus forte (selon l'ASPO, Association for the Study of Peak Oil). Selon les plus optimistes, une partie de ce qui n'était pas récupérable ou exploitable hier, l'est aujourd'hui, et le sera encore davantage demain avec l'évolution des technologies. Ainsi, par exemple d'après l'USGS (United States Geological Survey), plus de 2 000 milliards de barils (valeur moyenne) restent encore à produire. Par ailleurs, le recours à des ressources en pétrole non conventionnel est estimé par l'AIE à 7.000 milliards de barils (sous forme d'huile lourde, de sables asphaltiques et de schistes bitumineux), mais avec des technologies actuelles aux coûts énergétiques, économiques et environnementaux très hauts. D'après l'IFP, Quel avenir pour le pétrole ?, <http://www.ifp.fr>.

moins de cinq ans. L'enjeu géostratégique de conquête d'une indépendance énergétique vis-à-vis de cette ressource se réaffirme donc avec vigueur.

Quelle place pour le charbon et les gaz non conventionnels ?

Le charbon pourrait vraisemblablement retrouver une place centrale dans les systèmes énergétiques à venir. La consommation mondiale de cette ressource, qui était perçue jusque dans les années 80 comme désuète et vouée à disparaître, a en valeur absolue évolué très rapidement à la hausse au cours des deux dernières décennies. L'essor de la consommation asiatique y a particulièrement participé ; en Chine par exemple, la production d'électricité repose à 80% sur le charbon (Martin-Amouroux, 2009).

Dans le scénario tendanciel de l'AIE, ce sont presque 40% de l'énergie primaire qui proviennent du charbon en 2050. Avec le déploiement des technologies de *coal-to-liquid*, une substitution massive du pétrole dans le domaine des transports est envisageable. Les réserves de charbon sont encore conséquentes, et ses coûts d'exploitation devraient rester assez durablement compétitifs par rapport aux autres hydrocarbures (Ibid).

Par ailleurs, stimulée par la hausse récente des prix de l'énergie et par les progrès technologiques, l'exploitation de nouveaux types de ressources en gaz se développe. Le marché mondial du gaz s'en trouve transformé, notamment sous l'influence de l'exploitation des gisements de schiste bitumineux en Amérique du Nord. La possible abondance des gisements (dont l'exploitation est, au demeurant, extrêmement polluante et relativement coûteuse) de cette ressource en gaz d'une part, et le recours au charbon d'autre part, pourraient contribuer à maintenir une offre en ressources fossiles importante dans les prochaines décennies.

Encadré 6 - Les scénarios de l'Energy Technology Perspective (ETP) 2008

L'ETP explore les voies possibles d'évolution du système énergétique mondial, et plus particulièrement les solutions technologiques²⁹, qui pourraient concourir à la réalisation de divers scénarios globaux à l'horizon 2050 et répondre aux défis qui se posent actuellement au secteur énergétique (défis environnementaux et enjeux liés aux ressources).

Le premier scénario, intitulé **Baseline** est un **scénario de référence** de type « *business as usual* » et répond à la question : « que se passerait-il en l'absence de changements radicaux et de nouvelles politiques énergétiques ? ». Dans ce scénario, la consommation énergétique primaire est multipliée par deux en 2050 par rapport à 2005, les énergies fossiles représentent plus de 80% de l'énergie primaire mondiale, les énergies renouvelables progressent peu.

Les deux autres types de scénarios sont des scénarios normatifs, construits sur la base d'objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Les **scénarios ACTMAP** explorent les conditions d'une **stabilisation des émissions de GES** du secteur énergétique **au niveau de 2005** sur la base des technologies actuelles ou aujourd'hui en développement et d'innovations incrémentales. Ils font également référence à des transformations dans les systèmes de transport, à l'organisation des infrastructures et des formes urbaines, au recours à de nouvelles combinaisons modales, ainsi qu'à une amélioration du parc résidentiel existant et neuf. Dans ces scénarios, l'énergie primaire augmente de 45% environ par rapport à 2005, la part des énergies fossiles diminue (65% environ) et les énergies renouvelables fournissent près d'un quart de l'énergie primaire en 2050.

Les **scénarios BLUE MAP** étudient les modalités d'une **réduction par deux des émissions de GES** du secteur énergétique d'ici à 2050, basée sur la mise en place très rapide de politiques énergétiques et climatiques très ambitieuses, sous-tendues par des investissements en R&D très importants. L'accroissement de l'efficacité énergétique, le développement de nouvelles technologies, une décarbonisation très poussée de la production d'électricité et le recours massif à des carburants alternatifs ainsi qu'une forte implication des pays en développement et émergents en constituent les principales conditions. L'énergie primaire s'accroît dans ce scénario de 35% dans ce scénario environ, mais les énergies fossiles n'en représentent plus que la moitié, les énergies renouvelables plus du tiers, et la part du nucléaire double par rapport à 2005.

Source : AIE, 2008

²⁹ Les modèles utilisés dans l'ETP décrivent le système énergétique mondial au travers des technologies nécessaires à la production, la conversion, la distribution et l'utilisation finale de l'énergie.

Des scénarios alternatifs, construits autour d'objectifs de réduction des gaz à effet de serre

Ainsi, l'enjeu énergétique est double : maîtriser la demande d'une part, et d'autre part substituer aux énergies fossiles des énergies renouvelables, moins émettrices de GES et moins polluantes. Un grand nombre d'exercices prospectifs se penchent sur les conditions de ce changement de trajectoire énergétique, et convergent sur un certain nombre de facteurs moteurs.

Les économies d'énergie passent par l'amélioration de l'efficacité énergétique, au niveau des usages finaux (usages industriels mais aussi résidentiels, avec l'amélioration des performances thermiques dans l'habitat et la construction de bâtiments passifs par exemple, ainsi que dans le transport avec par exemple des véhicules plus légers), et au niveau de la distribution de l'énergie, dans les réseaux électriques en particulier. L'augmentation de l'efficacité énergétique joue dans les scénarios ETP 2008 un rôle central dans la baisse de la demande énergétique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Dans les prospectives sur l'énergie, cette efficacité repose souvent sur des améliorations de nature technologique. Mais elle peut aussi s'appuyer sur des changements plus profonds dans l'organisation des systèmes énergétiques, en lien avec des transformations dans l'aménagement des territoires et plus largement des systèmes productifs, tels qu'une transformation des infrastructures de transports, une amélioration de l'organisation spatiale des zones urbaines ou une décentralisation de la production d'une partie de l'énergie, par exemple. Des trajectoires différenciées en fonction des territoires pourraient ainsi intervenir, impliquant notamment les collectivités locales. L'orientation des modèles de développement (évolution des modes de consommer et d'habiter, du secteur industriel, etc., et l'intensité énergétique qui y est associée), pèseront également fortement, notamment dans les pays en développement. (Fondri, 2008). L'évolution des pratiques de consommation sont également déterminantes pour économiser l'énergie, en lien avec l'évolution des modes de vie et des pratiques de mobilité (intermodalité³⁰ par exemple).

La substitution des énergies fossiles représente un autre défi. Dans le secteur des transports, cela implique des innovations de rupture, avec l'adoption de nouveaux vecteurs énergétiques, comme l'hydrogène ou l'électricité, et l'adaptation de l'ensemble des filières concernées. La « décarbonisation » de la production de chaleur et d'électricité va de pair, dans les solutions envisagées jusqu'à présent, avec un accroissement sensible du nucléaire et des énergies renouvelables. Un changement de paradigme est envisagé dans le scénario non mimétique³¹ de l'étude prospective de la Fondri. Y est envisagé le passage « *du paradigme des énergies-stock (fossiles) – abondantes et mobilisées dans une organisation très concentrée et un mode de production centralisé – vers celui des énergies de flux (principalement renouvelables) – instantanément limitées mais mobilisées dans une organisation beaucoup plus déconcentrée et un mode de production largement distribué* ».

Enfin, pour limiter les GES, le recours aux technologies de capture et stockage de carbone est de plus en plus mis en avant, bien que faisant l'objet de controverses.

De telles transformations sont conditionnées par des politiques extrêmement volontaristes et cohérentes, du niveau local au niveau global. Si la nécessité de ces transformations est aujourd'hui largement admise, la question de leur mise en œuvre concrète est devenue un enjeu de nature politique et géopolitique, et les modalités de mise en œuvre sont discutées. Le besoin de mobiliser une variété de mesures, au-delà du seul signal « prix carbone », est de plus en plus mis en avant, avec le déploiement de politiques en faveur d'un changement plus profond des trajectoires de développement, moins intensives en énergie (Hourcade, Crassous, 2008). La question du coût de la transition est également centrale dans les négociations actuelles ; une coopération internationale associant enjeux environnementaux et problématiques de développement apparaît à cet égard incontournable pour recueillir l'adhésion des pays émergents et accompagner les pays en développement dans cette transition (Hourcade, 2008).

Il convient de ne pas perdre de vue l'asymétrie des enjeux entre les pays industrialisés et les pays en développement. Pour ces derniers, il s'agit avant tout de fournir aux populations et aux secteurs d'activité un accès à l'énergie, tout en levant la contrainte du coût des importations en énergie fossile qui pèse sur les

³⁰ L'intermodalité désigne le fait de combiner plusieurs modes de transport au cours d'un même déplacement, comme par exemple l'usage d'une voiture puis d'un tramway et de la marche à pied pour atteindre un centre ville en provenance de la périphérie.

³¹ Ce scénario est qualifié de *non-mimétique* parce qu'il n'est pas, à la différence du scénario mimétique, fondé sur l'hypothèse d'une homogénéisation progressive des trajectoires de développement sur le modèle de ceux qui ont été suivis par les pays industrialisés : étalement urbain, recours généralisé au transport automobile, systèmes électriques centralisés, etc. (Fondri, 2008)

économies et le développement. De plus, ces pays n'ont pas les capacités d'investissement ni les savoirs technologiques leur permettant de mettre en œuvre ces mutations. Enfin, il s'agit également d'assurer une mobilisation de la biomasse végétale, première source d'énergie primaire dans de nombreux pays, dans des conditions durables, notamment en luttant contre la désertification et la déforestation.

2.3.2. L'enjeu alimentaire

La crise alimentaire survenue en 2006-2008 a contribué à (re)mettre en lumière un fait pourtant de plus en plus prégnant : une part conséquente de la population mondiale ne peut s'alimenter suffisamment et une part encore plus grande est très vulnérable aux aléas des marchés des produits agricoles de base. Évalué autour de 900 millions en 2008 par la FAO (FAO, 2009b), le nombre de personnes sous-alimentées ne cesse d'augmenter ; il s'agit de plus en grande partie de populations agricoles pauvres. Mais cette situation alimentaire actuelle n'est pas, de façon globale et structurelle, liée à un déficit de production ; elle est principalement attribuée aux conditions d'accès aux produits de base et à la solvabilité des populations pauvres, ainsi qu'à l'impossibilité pour un grand nombre d'exploitants agricoles qui sont consommateurs nets de denrées de pouvoir accroître leur production.

La tendance mondiale est à l'augmentation de la consommation alimentaire individuelle : les disponibilités alimentaires journalières moyennes sont passées de 2500 kcal/personne/jour dans les années 1960 à près de 3000 kcal en 2000 (Paillard et al., 2010). Toutefois, au-delà de la grande diversité des régimes et des pratiques alimentaires, les disparités en termes de disponibilités alimentaires entre pays et régions du monde sont très grandes et traduisent de fortes inégalités sur le plan nutritionnel : elles avoisinent 4000 kcal/personne/jour dans les pays de l'OCDE, mais elles n'atteignent pas 2500 kcal/personne/jour en Afrique subsaharienne (Ibid.). L'apport moyen en protéines d'origine animale peut varier d'un facteur 10 d'une région à l'autre.

Il est de plus en plus admis que les tendances en matière de consommation et de production agricole risquent à l'avenir de se heurter à des limites (santé, environnement, inégalités croissantes, etc.), que seules des ruptures dans les comportements et les modes de produire pourraient lever, d'autant plus dans le contexte d'augmentation importante de la population mondiale, de changement climatique et de renchérissement des ressources fossiles (Ibid.). Des mises en garde sont également formulées quant à l'effet des dégradations environnementales sur la production agricole mondiale à venir. Les effets combinés de la dégradation et de l'artificialisation des sols, de la surexploitation des ressources en eau, ou encore du changement climatique pourraient grever de façon significative la disponibilité des terres cultivables et limiter les rendements³².

Nous prendrons ici l'exemple de la prospective Agrimonde (Paillard et al., 2010) : l'approche quantitative qui y est développée donne des ordres de grandeur relatifs à la consommation, à la production alimentaire et à l'occupation des sols à l'horizon 2050.

Encadré 7 - Un aperçu des deux scénarios de la prospective *Agrimonde*

Agrimonde, initiative conjointe de l'INRA et du Cirad lancée en 2006, est une réflexion prospective sur les enjeux alimentaires et agricoles de la planète. Ces enjeux peuvent être résumés en une phrase : comment nourrir 9 milliards d'individus à l'horizon 2050 tout en préservant les écosystèmes desquels d'autres produits et services sont également attendus (préservation des sols, des eaux, de la biodiversité, stockage de carbone, régulation des inondations, production de bioénergie, etc.) ?

- La prospective Agrimonde associe, dans le cadre d'un processus interactif et itératif, des analyses quantitatives et qualitatives. Les analyses quantitatives reposent sur un outil, Agribiom, qui permet d'évaluer, pour un pays, un groupe de pays et le monde, les productions de biomasses alimentaires et leurs usages, alimentaires et non alimentaires, à travers des bilans exprimés en kilocalories, entre les ressources et les usages de biomasses alimentaires. Les analyses qualitatives reposent sur un dispositif composé d'une équipe projet, d'un groupe de travail, et d'un comité d'experts consulté pour avis et conseils. Basés sur les mêmes hypothèses de croissance démographique dans chaque zone et de migrations entre zones, deux scénarios ont été élaborés dans ce cadre :

³² D'après une étude du PNUE, la disponibilité en terres pourrait ainsi être réduite de 8 à 20% d'ici 2050 (PNUE 2008).

ils se différencient essentiellement par les trajectoires d'évolution des systèmes agricoles et alimentaires régionaux d'aujourd'hui à 2050. Le premier scénario, intitulé *Agrimonde GO*, inspiré d'un scénario du Millennium Ecosystem Assessment, est un scénario de type tendanciel, qui considère un « rattrapage économique » des pays en développement dans un contexte de libéralisation poussée, et une généralisation des modes de consommation « à l'occidentale » dans le monde entier. Il en découle un accroissement très fort de la consommation alimentaire globale sous l'effet de la croissance démographique, économique, ainsi que d'une forte augmentation de la consommation de viandes et de poissons. Les modalités de l'intensification agricole « classique » sont mobilisées (irrigation, intrants, sélection génétique) pour accroître la production en étendant modérément les surfaces agricoles cultivées, avec une augmentation très importante des rendements. Ce scénario a de lourdes conséquences sur les écosystèmes, du fait de l'intensification et de l'industrialisation des modes de produire, et d'une gestion réactive des problèmes environnementaux.

- Le second scénario, *Agrimonde 1*, est un scénario de type normatif, qui étudie une modalité de mise en place d'un système alimentaire durable et interroge la possibilité pour chaque grande région de couvrir au maximum ses propres besoins alimentaires. Une rupture dans les pratiques alimentaires est envisagée : les préoccupations nutritionnelles au Nord (et une diminution des pertes tout au long des filières) et l'amélioration de la situation au Sud (sans pour autant reproduire les modèles des pays du Nord) aboutit à une convergence et une stabilisation de la consommation alimentaire à 3000 kcal/hab/jour. Les modes de production sont diversifiés et mettent en œuvre les principes d'une intensification écologique³³, permettant de limiter les impacts environnementaux des pratiques agricoles³⁴. Des modes de régulation des marchés internationaux sont mis en place, autorisant un accroissement des échanges tout en permettant aux pays particulièrement dépendants des importations de sécuriser leurs approvisionnements, et aux agricultures les moins productives de conserver ou développer un marché local.

Disponibilités alimentaires dans les deux scénarios Agrimonde :

	2000	Scénario AGO	Scénario AG1
Disponibilité alimentaire journalière par habitant (moyenne mondiale)	2960 kcal	3600 kcal	3000 kcal
Utilisations totales en calories végétales (monde)	29 341 Gcal	53 551 Gcal	37 650 Gcal
2000-2050	-	+85%	+30%

Changements d'occupation des sols dans les scénarios Agrimonde :

<i>en millions d'ha</i>	2000	AGO	AG1
Total surfaces cultivées + pâtures	4 855	5 440	4 949
Evolution des surfaces cultivées 2000-2050		+20%	+39%
Evolution des pâtures 2000-2050		+2%	-15%

Sources : Paillard et al., 2010. Chaumet et Ronzon, 2009

Les ordres de grandeur issus de l'exercice Agrimonde montrent que les disponibilités alimentaires devront augmenter substantiellement, et que cette augmentation de la production se fera dans le cadre de changements d'affectation des sols importants. Au-delà de l'approche en termes de potentiel de production et de limitation des ressources, ces deux scénarios interrogent plus largement les modèles de développement agricole et mettent en exergue l'importance des conditions politiques, des modes de régulation et de gouvernance mondiale pour répondre aux besoins alimentaires de façon durable.

Nous pouvons retenir plusieurs points déterminants de la prospective Agrimonde. Tout d'abord, pour une population équivalente de 9 milliard d'habitants en 2050, l'augmentation nécessaire des disponibilités alimentaires (30% ou 85% selon le scénario) sera très différente en fonction de l'évolution des styles de vie

³³ L'intensification écologique consiste à augmenter les rendements cultureux en utilisant les fonctionnalités écologiques et biologiques des écosystèmes. Au-delà de la dimension technique, l'intensification écologique s'appuie ici également sur des choix d'organisation spatiale (imbrication d'une diversité de systèmes de production végétale et animale) et sociale (valorisation de la multifonctionnalité par ex.). Source : Chaumet, Ronzon, 2009.

³⁴ L'augmentation des rendements considérée dans Agrimonde 1 est moins ambitieuse que dans Agrimonde GO : un taux d'accroissement annuel mondial de 0,14 dans AG1 contre 0,73 à 1,81 dans AGO selon les régions. Dans AG1, les effets du changement climatique ont été pris en compte par les experts, pour estimer à la fois l'évolution des rendements et celle des surfaces cultivables.

et des régimes alimentaires. Ensuite, il s'agit de penser l'équilibre entre l'augmentation du rendement et l'augmentation de surface, et donc le type d'intensification agricole à mettre en œuvre, qui va conditionner le niveau de pression sur les ressources naturelles. Dans le cas d'un changement dans les régimes alimentaires globaux, avec une réduction de la consommation carnée dans les pays développés, l'augmentation de surface pourra s'effectuer en diminuant les pâtures, sans déforestation, et avec une intensification modérée s'appuyant sur le fonctionnement des écosystèmes. En revanche, si l'on suit les tendances actuelles en matière d'alimentation, les pâtures et les surfaces cultivées augmenteront, provoquant une déforestation importante, et une intensification forte des systèmes de production sera nécessaire. Le premier scénario n'est pas exempt de conséquences environnementales, notamment du fait de la conversion des prairies en surfaces arables qui entraînerait des émissions importantes de CO₂. Cependant, ces émissions pourraient être encore plus importantes dans le second scénario, du fait de la déforestation et de l'usage accru d'engrais chimiques ; surtout, ce second type d'intensification induirait des pressions accrues sur les ressources naturelles (eau et sol) et une dégradation de la biodiversité.

Comme on le voit, la réponse de l'agriculture à la demande alimentaire dans le cadre de modes de production agricole durables ne va pas de soi à l'horizon 2050. L'utilisation de la biomasse pour l'énergie ou pour la chimie va se surajouter aux usages des sols pour l'alimentation. L'objet des scénarios qui sont présentés dans la partie suivante est de réfléchir aux modes d'articulation entre les défis énergétiques et les défis alimentaires à 2050, et aux tensions et potentialités que font surgir les nouveaux usages de la biomasse. Dans un second temps, à partir du scénario Agrimonde 1, qui explore les évolutions de l'agriculture à l'horizon 2050 sous contrainte de durabilité, les surfaces disponibles pour la culture de biomasse non alimentaire seront comparées aux volumes de biomasse mobilisés pour l'énergie et la chimie dans les prospective existantes.

3. Quatre scénarios d'évolution possible des usages non alimentaires de la biomasse végétale à l'horizon 2050

3.1. Les hypothèses par composante

Le cadre d'analyse

De l'examen des tendances, des controverses et des enjeux de long terme dans lesquels s'insèrent les usages non alimentaires de la biomasse, a découlé la définition d'un cadre d'analyse pour la construction de scénarios contrastés. Le système « biomasse non alimentaire » a été structuré en 5 composantes (cf. tableau 6).

Tableau 6 - Grille de découpage du système en composantes et variables

<p>Composante 1 - Ressources énergétiques et en carbone Production de carbone et d'énergie fossile, innovations dans l'usage de l'énergie par secteur, politiques énergétiques</p>
<p>Composante 2 - Attentes sociétales des citoyens et des consommateurs Régimes de consommation, d'habiter, de participation des citoyens aux orientations sociotechniques, relations société-innovation</p>
<p>Composante 3 - Filières bioproduits et innovations technologiques Filières biocarburants, bois-énergie, chimie du végétal, articulations entre ces filières, structuration spatiale</p>
<p>Composante 4 - Gouvernance et politiques publiques Politiques et gouvernance mondiale sur le changement climatique, régulation des marchés agricoles, politiques des marchés des bioproduits, politiques nationales et territoriales d'appui aux filières bioproduits, politiques de R&D sur les bioproduits</p>
<p>Composante 5 - Croissance et développement économique Evolution de la croissance économique, évolution démographique, modes de vie, évolution de la consommation alimentaire et régimes alimentaires, pression sur les ressources et l'environnement</p>

- La première dimension étudiée a concerné l'évolution du paysage énergétique mondial dans lequel pourraient s'insérer les nouveaux usages de la biomasse, en partant du postulat que les transformations des systèmes énergétiques conditionneront de façon déterminante la place future de la bioénergie et des biomolécules. Plus précisément, trois points ont fait l'objet d'hypothèses : (1) le devenir de la production mondiale de carbone fossile, (2) les innovations possibles sur les sources, les vecteurs et les usages énergétiques, et enfin (3) l'évolution des orientations politiques publiques de l'énergie.
- Un deuxième axe analyse les attentes des citoyens et des consommateurs vis-à-vis des bioproduits, et la façon dont ils pourraient orienter le développement des bioproduits (1) par leur participation, ou non, à la construction des marchés, notamment à travers la mise en place de labels et de certifications environnementales, (2) en orientant les débats publics, par leur implication dans les controverses sur les conséquences des bioproduits mais aussi, de manière réflexive, en redéfinissant leurs finalités, (3) en déterminant dans les territoires le développement des filières bioproduits, à la fois de façon normative, lorsque, par exemple, ces filières s'insèrent dans des projets concertés de développement territorial, et réactive lorsque, par exemple, des conflits d'usages émergent autour de la productions.
- La troisième composante explore plusieurs trajectoires possibles d'évolution des filières biomasse, avec des dynamiques possiblement différenciées selon les usages concernés, pour l'énergie et la chimie. L'émergence de voies technologiques nouvelles est envisagée, ainsi que des configurations différentes des filières selon les acteurs impliqués dans leur développement. Enfin, sont évoqués à

grands traits les caractéristiques possibles de ces filières en termes de structuration spatiale et de mode d'insertion dans les marchés.

- Les politiques publiques ont été structurantes dans l'évolution récente des usages de la biomasse, avec en premier lieu les politiques directement adressées aux filières biocarburants, sous-tendues par des objectifs nationaux environnementaux, énergétiques, industriels ou de développement rural. Mais ce sont également des orientations politiques plus générales des Etats qui peuvent infléchir les devenir des usages de la biomasse non alimentaire (l'évolution des cadres réglementaires sur l'environnement et la santé par exemple). L'objet de la composante 4 est d'explorer les diverses évolutions possibles de ces politiques publiques, en prenant en compte leur insertion dans des dynamiques plus globales, impliquant une gouvernance à l'échelle internationale. Politiques spécifiques aux bioproduits, politiques de structuration des marchés et politiques de recherche et innovation font notamment l'objet d'hypothèses contrastées.
- Enfin, le cinquième axe concerne les évolutions générales du contexte économique et géopolitique mondial, qui peuvent influencer de manière significative les stratégies et les marges de manœuvre des acteurs publics et privés concernés par les filières bioproduits. Les transformations dans les modes de vie et de consommation, en particulier énergétique et alimentaire, sont également abordés, ainsi que l'état des écosystèmes et le niveau de pression exercé sur les ressources naturelles par les activités humaines.

L'annexe 2 restitue en détail les hypothèses formulées pour ces différentes variables et composantes. Pour chacune des variables de ces cinq composantes, différentes hypothèses d'évolution à l'horizon 2050 ont été formulées. La combinaison de ces hypothèses par variable donne lieu à des scénarios d'évolution par composante, appelés microscénarios. C'est la combinaison, *in fine*, de ces microscénarios qui est à la base des quatre scénarios d'évolution des usages non alimentaires de la biomasse végétale à l'horizon 2050.

Le tableau suivant résume les microscénarios et leur combinaison par scénario.

Tableau 7 : Synthèse des microscénarios et scénarios VegA

Composantes	Hypothèses d'évolution à 2050			
1 - Croissance et développement économique	Mondialisation libérale et généralisation du mode de consommation « occidental »	Mondialisation des technologies « vertes »	Régionalisation de crise	Mondialisation des territoires connectés
2 - Ressources énergétiques et en carbone	Un système énergétique qui reste basé sur le carbone fossile, des innovations incrémentales	Rupture dans le modèle énergétique - de fortes innovations sectorielles	Priorité à la sécurité énergétique : consommer moins, sécuriser l'approvisionnement	Diversité de sources d'énergie et essor des énergies renouvelables - adaptabilité des systèmes énergétiques
3 - Attentes des citoyens et des consommateurs	Des attentes sociétales principalement déléguées au marché et différenciées	Une préoccupation civique pour les enjeux environnementaux, et une gestion technocratique à expertise multiple	Un engagement faible des citoyens et une délégation de la gestion de l'innovation à l'Etat	Un engagement participatif des individus, sur la base d'une diversité de réseaux, notamment territoriaux
4 - Filières bioproduits et innovations technologiques	La biomasse comme matière première complémentaire des ressources fossiles	Des innovations de rupture dans l'usage de la biomasse pour la chimie et l'électricité	Substitution partielle du carbone fossile - Des trajectoires différenciées selon l'accès à la biomasse dans les grandes régions du monde	Valorisation de la biomasse du territoire et usages localisés et diversifiés (énergie, chimie)
5 - Gouvernance et politiques publiques	Laisser-faire, peu de régulations internationales et privatisation poussée de la connaissance	Accords internationaux sur changement climatique et politiques publiques motrices dans les mutations sectorielles. Système DPI équilibré	Sécurité énergétique des Etats, échanges internationaux et standards environnementaux a minima. Accords bilatéraux sur la PI.	Des politiques territoriales tournées vers une gestion durable, soutenues par des accords internationaux et des politiques nationales. Innovation ouverte.
	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4

3.2. Récit des scénarios d'évolution des usages non alimentaires de la biomasse à 2050

Scénario 1 - Fuite en avant *sur l'énergie et l'environnement, des usages de la biomasse limités*

En 2050, les usages de la biomasse pour l'énergie et la chimie connaissent un développement limité. Dans un contexte de poursuite des trajectoires énergétiques fondées sur l'énergie fossile (charbon) et en l'absence de politiques publiques, le développement des filières biomasse a été contraint par la faible innovation et la concurrence avec les produits issus du carbone fossile. De surcroît, l'augmentation de la demande alimentaire mondiale, consécutive d'une adoption large de modes de consommation occidentaux, a produit des tensions sur l'offre en produits agricoles. Dans le domaine du transport, les biocarburants compétitifs se développent et sont incorporés aux carburants classiques en fonction des prix des énergies fossiles. Là où la biomasse est facilement mobilisable, à bas coûts, elle est employée en co-combustion dans les centrales thermiques. De plus, s'appuyant sur une différenciation des attentes des consommateurs, les marchés de niche se sont développés pour les biomolécules sur la base de labels environnementaux et sanitaires.

Mondialisation économique, inégalités et tensions sur les ressources naturelles et l'alimentation

En 2050, le monde se caractérise par une libéralisation économique poussée des marchés, avec un développement du commerce international et une croissance mondiale élevée tirée par les pays émergents (Chine, Inde, Brésil). Pour l'énergie, l'alimentation et l'environnement, la tendance dans ce scénario est au laisser-faire, sans rupture technologique et institutionnelle face à ces enjeux. Les politiques publiques des Etats et les régulations internationales sont limitées, y compris dans le secteur agricole et en ce qui concerne le changement climatique et l'environnement. Associée à une croissance économique mondiale forte, l'élévation des revenus d'une partie de la population dans les pays en développement s'est traduite par une diffusion du mode de vie occidental, mais aussi par un accroissement des inégalités sociales. Dans le domaine de l'alimentation, les changements de pratiques alimentaires (notamment dans les pays émergents, avec un accroissement de la consommation de viandes et de produits laitiers) ont conduit à une augmentation de la demande alimentaire globale. Elle s'est traduite par une demande accrue de foncier pour l'agriculture et l'élevage, une intensification des systèmes de production et une hausse des prix des biens alimentaires et de leur volatilité. En l'absence de régulation, cette situation provoque des crises alimentaires récurrentes dans les pays du Sud.

Un système énergétique mondial qui reste fondé sur les énergies fossiles et marqué par un retour en force du charbon

Conformément à l'évolution des modes de vie et au développement économique, la demande énergétique mondiale a explosé (multipliée par deux en 40 ans) bien que certains pays en voie de développement connaissent toujours une forte précarité énergétique. En l'absence d'innovations radicales dans les usages et les technologies, les trajectoires technologiques restent fondées sur les ressources fossiles, y compris dans le secteur des transports, grâce à une utilisation étendue du charbon (technologies « coal-to-liquid »), et à des investissements massifs sur la prospection gazière et pétrolière. Ainsi, jusqu'en 2050, le prix des énergies fossiles n'a augmenté que graduellement. En l'absence de politiques énergétiques publiques, l'évolution des systèmes énergétiques a été déléguée aux acteurs des marchés de l'énergie. Des actions sur l'efficacité énergétique ont légèrement contenu l'explosion de la demande. Les énergies alternatives aux énergies fossiles ne se sont que modestement développées. Face à une pénurie annoncée des ressources, le monde est peu préparé à une transition majeure.

Une biomasse énergétique en complément des matières fossiles

La biomasse est mobilisée en fonction de sa compétitivité sur les marchés.

Dans le domaine des transports, la biomasse est mobilisée de façon limitée, selon son coût et en complémentarité avec les matières fossiles. En effet, dans un contexte de libéralisation économique accrue, les Etats du Nord comme du Sud ont peu à peu abandonné les politiques publiques de soutien aux filières biocarburants, jugées à l'époque chères, distorsives, et peu efficaces par rapport à leurs objectifs environnementaux et sociaux. De ce fait, les biocarburants ne sont restés présents que dans les pays et pour les filières où ils sont compétitifs, et ce d'autant que les prix agricoles sont élevés et volatils. Ces productions sont développées dans le cadre d'alliances entre grands groupes agroindustriels, valorisant leur savoir-faire logistique et leur maîtrise des filières agroindustrielles, industriels pétroliers, soucieux entre autres de s'investir plus en amont pour consolider leurs approvisionnements, et investisseurs issus du secteur financier (banques, fond d'investissement, etc.) s'inscrivant dans un mouvement de financiarisation du secteur de la production agricole. Il en résulte des filières biocarburants intégrées verticalement, basées

sur de grands complexes industriels de production de biomasse, parfois liés à de petits exploitants familiaux (contrats), et en relation avec des bioraffineries. Les filières basées sur la canne à sucre et l'huile de palme dominent durablement les marchés mondiaux de bioproduits. L'innovation a été principalement incrémentale, et, en l'absence de soutien public, les biocarburants lignocellulosiques ont émergé très tardivement et de façon marginale.

La biomasse est également utilisée pour la production de chaleur et d'électricité à l'échelle industrielle, en co-combustion dans les centrales thermiques, ou en cogénération dans les usines. Les producteurs d'énergie et les industriels y ont recours lorsqu'ils ont accès à une biomasse bon marché, sur les marchés domestiques ou internationaux. Par ailleurs, l'usage « traditionnel » de la biomasse est resté très présent dans les zones rurales du Sud, avec des impacts sur l'environnement de plus en plus sévères et un accès à l'énergie très fragilisé pour une part croissante de la population.

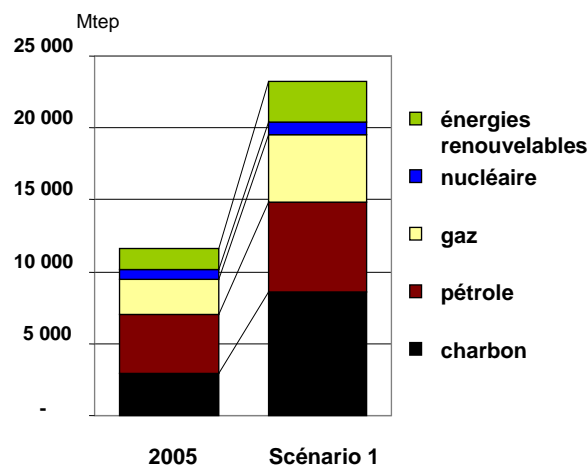
Des usages de la biomasse pour la chimie se sont développés sur certains segments de marché. Dans un contexte plutôt dominé par une consommation de masse et low-cost, une certaine segmentation perdure, répondant à des demandes différenciées des consommateurs. Ainsi les populations ayant un niveau élevé de revenus font valoir des exigences de durabilité des produits. Bien qu'ayant un poids secondaire sur les marchés, ces consommateurs sont moteurs de l'émergence de bioproduits, valorisés pour leurs propriétés environnementales et sanitaires (biodégradabilité, recyclabilité, moindre toxicité, etc.) ; une multitude de labels privés ont vu le jour, aux référentiels disparates et portés notamment par les grands distributeurs.

La production mondiale de biomasse non alimentaire est concentrée géographiquement, dans de grands pays producteurs qui ont développé une économie de rente sur ce type de filière, valorisant des conditions agro-climatiques et économiques favorables (coût de la main d'œuvre, du foncier). Des bioraffineries transforment la biomasse et livrent une variété de bioproduits. Elles se situent soit sur des sites industriels installés près des bassins de production agricoles ou forestiers, soit à proximité des sites portuaires,

Scénario 1 :

- **Population mondiale :** de 6 milliards en 2005 à 9 milliards en 2050
- **Demande alimentaire mondiale :** de 3 000 kcal/habitant/jour en 2005 à 3 600 kcal/habitant/jour en 2050 (de 3 000 à 4 100 selon régions)
- **Demande énergétique :** de 11 700 Mtep/an en 2005 à 23 000 Mtep/ an en 2050, soit +100%
- **Emissions de CO2 du secteur énergétique :** de 27 Gt en 2005 à 62 Gt en 2050

Energie Primaire mondiale par source en 2005 et dans le scénario 1 à 2050



industriels ou des nœuds logistiques dans les pays importateurs. Elles s'approvisionnent sur les marchés internationaux en biomasse pré-transformée et répondant à des standards minimaux de commercialisation.

Recherche et innovation : une technoscience orientée par les marchés

La R&D est surtout portée par de grands groupes privés. La recherche s'est fortement orientée vers le développement d'innovations à caractère industriel ou marchand, et est de plus en plus soumise à une logique de 'retour sur investissement', dans un contexte d'intense compétition internationale et d'accélération de la propriété intellectuelle. L'expertise de macro-acteurs tels que de grandes firmes, des agences internationales, de grandes ONG internationales et des Etats domine les débats, et les citoyens ont relativement peu de prises sur les orientations sociotechniques. Dans le secteur de la valorisation de la biomasse, ce contexte d'innovation, associé à l'absence de soutiens publics spécifiques, a été peu favorable à l'implication de nouveaux acteurs, et a entraîné des effets de lock-in sur les trajectoires technologiques, et n'a permis l'émergence d'innovations de rupture.

Scénario 2 - La biomasse dans la « néo-modernisation verte »

En 2050, les usages non alimentaires de la biomasse s'inscrivent dans un mouvement de modernisation écologique des secteurs d'activités qui vise une sortie des énergies fossiles et une limitation des émissions de GES, dans le cadre d'un développement durable. Des politiques environnementales volontaristes et le repositionnement des grands acteurs industriels ont favorisé l'émergence d'une chimie du végétal qui en 2050 s'est substituée à une part importante de la pétrochimie classique. L'usage de la biomasse pour l'électricité et la chaleur s'est développé, associé à une transition globale du système énergétique. En revanche, la biomasse est peu mobilisée dans les transports, la logique dominante étant la substitution totale des vecteurs carbonés dans les transports (principalement par l'hydrogène).

Une mondialisation des technologies « vertes »

En 2050, une reconfiguration profonde des secteurs de production s'est opérée, par le biais de politiques industrielles et de systèmes de normalisation exigeants. Les Etats ont en effet mis en œuvre des politiques publiques nationales et internationales ambitieuses en faveur d'une économie faible en carbone, avec des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, et une gestion proactive des enjeux environnementaux. L'innovation et le développement de technologies nouvelles et propres sont devenus moteurs d'une croissance économique mondiale soutenue. L'engagement civique des citoyens, qui délèguent le traitement des enjeux du développement durable aux Etats, se traduit dans les modes de consommation. Un découplage croissant entre développement économique et consommation de matières premières, de ressources naturelles et d'énergie s'est mis en place, lié entre autres au développement d'une économie de fonctionnalité³⁵. La demande alimentaire mondiale s'est accrue modérément du fait d'un rééquilibrage des systèmes alimentaires.

³⁵ L'économie de fonctionnalité est la substitution à la vente d'un produit celle d'un service (usage, maintenance). Ce basculement encouragerait les industries à privilégier les produits pérennes, modulables et la dématérialisation des activités économiques, de même qu'une gestion optimisée des cycles de vie des produits.

Vers un système énergétique à faible émission de CO₂

Le secteur de l'énergie a fait l'objet de politiques particulièrement ambitieuses, en faveur d'une sortie des énergies fossiles. La hausse de la demande énergétique, liée à la croissance économique et à l'évolution démographique, a été limitée grâce à des mesures fortes sur l'efficacité énergétique et grâce à l'évolution progressive des usages. Des objectifs contraignants de substitution au carbone fossile et de réduction des émissions de CO₂ ont été fixés. Les énergies fossiles représentent encore en 2050 près de la moitié des ressources énergétiques (contre 80% au début du siècle), mais l'appui à l'innovation et au développement de nouvelles filières a accéléré la substitution par des énergies alternatives, notamment le nucléaire et les énergies renouvelables. Dans les transports individuels, l'hydrogène s'est imposé comme vecteur énergétique dominant, adapté à tous types de déplacements ; sous l'effet de politiques publiques volontaristes et d'efforts de R&D, d'importantes avancées technologiques ont permis cette évolution. En 2050, la transition est relativement avancée : l'hydrogène représente 20 à 25% des usages énergétiques dans les transports, et la plupart des nouveaux véhicules construits fonctionnent à l'hydrogène. Ces évolutions ont étroitement associé les constructeurs automobiles, ainsi que tous les acteurs de la production et de la distribution de l'énergie, qui se sont repositionnés. En 2050, les vecteurs carbonés sont encore présents, notamment dans les secteurs où les technologies à hydrogène n'ont pas encore été mises au point (aériens, fret maritime et terrestre). L'électricité reste présente dans les transports collectifs urbains et sur rail.

La biomasse, source renouvelable d'énergie et de matières premières...

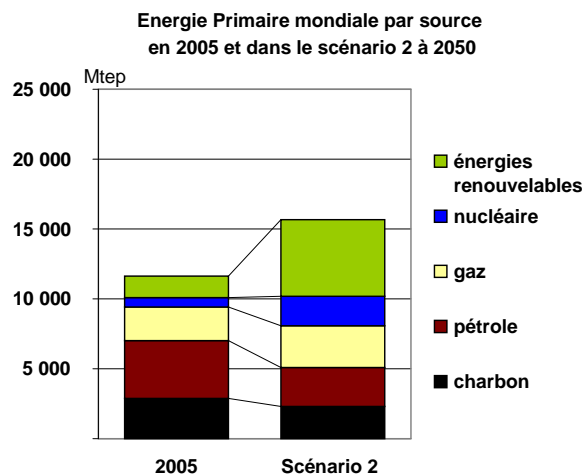
Dans ce contexte, la biomasse est apparue comme une source renouvelable d'énergie et de matière carbonée particulièrement intéressante, car capable, dans des conditions de production et de valorisation bien définies, de répondre aux objectifs environnementaux (réduction des émissions de CO₂, et de l'impact des produits sur l'environnement).

La biomasse est assez peu mobilisée dans le domaine des transports : la logique dominante étant la substitution totale des vecteurs carbonés dans les transports (hydrogène, électricité), les efforts de R&D et les investissements se sont concentrés sur d'autres innovations et filières.

Dans le secteur de la chimie, les fortes exigences réglementaires sur l'impact environnemental et sanitaire des produits ont favorisé l'émergence d'une chimie du végétal qui valorise les propriétés des matières issues du végétal : recyclabilité, biodégradabilité, faible toxicité, etc. De ce fait, la chimie du carbone renouvelable se substitue en 2050 à une part importante de la pétrochimie classique. Des bioraffineries, qui sont le résultat d'alliances entre agroindustriels et industriels de la chimie, sont installées sur les sites traditionnels de la chimie lourde. Les filières de l'industrie chimique sont profondément réorganisées autour de cette nouvelle matière première, notamment les filières aval qui doivent s'adapter aux caractéristiques différentes des produits issus de la biomasse (moindre stabilité, variabilité des produits).

Scénario 2

- **Population mondiale** : de 6 milliards en 2005 à 9 milliards en 2050
- **Demande alimentaire mondiale** : 3 000 kcal/habitant/jour en 2050, comme en 2005 mais avec rééquilibrage des régimes alimentaires.
- **Demande énergétique mondiale** : de 11 700 Mtep/an en 2005 à 15 500 Mtep/ an en 2050, soit +30%
- **Emissions de GES** du secteur énergétique : réduction par deux par rapport à 2005



Stimulé par des politiques publiques incitatives, l'usage énergétique de la biomasse s'est surtout développé pour la production d'électricité et de chaleur, dans le cadre de systèmes à haute efficacité énergétique (innovations dans les systèmes de cogénération, production de biogaz et de bioélectricité reliée aux réseaux de distribution), associés à une amélioration des performances énergétiques des bâtiments et, dans le secteur industriel, de l'application des principes de l'écologie industrielle.

Les pays du Sud, pour lesquels l'usage « traditionnel » de la biomasse est un enjeu énergétique central, ont mis l'accent sur l'amélioration et la diffusion de foyers individuels et d'infrastructures collectives performants, voire ont mis en œuvre sa substitution par d'autres sources et vecteurs énergétiques, dans les grandes agglomérations notamment. Un axe fort d'innovation a concerné les modes de gestion des prélèvements de la biomasse pour lutter contre la déforestation. La coopération économique internationale entre les pays du Nord et du Sud a conditionné ces évolutions.

... mais soumise à des critères stricts de durabilité environnementale et sociale

La production, la transformation, et le commerce des bioproduits sont soumis à des normes strictes (de type ISO) sur les émissions de GES, les bilans énergétiques, et les impacts sur les ressources naturelles. Un système de certification international, basé sur des ACV et avec des standards élevés de durabilité, a vu le jour et structure le commerce international des bioproduits. Les règles du commerce international autorisent à présent les restrictions commerciales fondées sur des critères de durabilité environnementale et sociale.

Par ailleurs, une régulation des marchés agricoles s'est mise en place, pour éviter les tensions entre alimentation et autres usages, limiter les effets du développement du commerce international des bioproduits sur l'environnement (forêts, biodiversité, ressources naturelles) et favoriser le développement agricole et rural. Les transactions foncières internationales sont contrôlées, le droit international ayant été renforcé en la matière.

Des « Etats modernisateurs », en étroite coopération avec les grands acteurs industriels

Toutes ces évolutions, qui vont dans le sens d'une modernisation écologique impulsée par les Etats, ont été réalisées en étroite collaboration avec des acteurs économiques majeurs. L'effort d'innovation s'est concentré sur la mise au point d'une trajectoire technologique dominante par secteur d'activité. Des accords internationaux se sont multipliés, mettant notamment en œuvre une forte coopération Nord-Sud, ainsi que des partenariats pour faciliter les transferts des technologies et le développement d'une économie « verte ». Par ailleurs, le système de droit de propriété intellectuelle s'est rééquilibré en faveur d'une science plus ouverte, et des accords multilatéraux ont été conclus, visant à promouvoir le recours aux licences en particulier dans le domaine de la chimie du carbone renouvelable où des innovations radicales ont été mises en œuvre, à éviter les trop larges exclusivités et à limiter les coûts d'innovation. Dans les filières de valorisation de la biomasse, l'innovation est essentiellement portée par des macroacteurs, grands groupes de l'énergie, de la chimie, de l'agro-industrie et industries forestières et papetières, qui cofinancent des start-up et développent des filiales dans ces nouveaux secteurs. Ces macroacteurs conquièrent massivement les nouveaux marchés que constituent les pays en développement. Cependant, ils se heurtent aux limites de la transposition de modèles industriels conçus au Nord (investissements lourds, haute technologie) qui s'avèrent parfois peu adaptés aux problématiques des pays concernés.

Scénario 3 – Course à la biomasse, dans un contexte de crise énergétique

Dans un contexte de fortes tensions géopolitiques autour de l'énergie, les Etats ont développé des politiques de sécurisation de leur approvisionnement énergétique. En 2050, la biomasse est massivement mobilisée pour réduire la dépendance aux énergies fossiles, à la fois dans le domaine des transports et dans la production de chaleur et d'électricité. Les pays structurent des filières adaptées à la nature des ressources en biomasse dont ils disposent, mais aussi à celles qu'ils peuvent importer. Les échanges internationaux de biomasse se développent fortement, dans des cadres bilatéraux surtout, et l'ampleur des pressions exercées sur les ressources menace très sévèrement la sécurité alimentaire et les écosystèmes.

Un monde fragmenté et en crise...

En 2050, le repli national domine dans un monde fragmenté, hétérogène, qui a été marqué durant la première moitié du siècle par une série de crises économiques et géopolitiques. Les Etats, avant tout préoccupés du maintien de leur sécurité et de l'accès aux ressources, coopèrent peu entre eux si ce n'est dans le cadre de relations bilatérales. En particulier, aucun accord international multilatéral ni sur les grands enjeux globaux ni sur le commerce international n'a vu le jour. Dans un contexte de crise économique, le développement agricole et rural a peu bénéficié d'investissements. Les fortes inégalités, l'exode rural et la fragilité des systèmes alimentaires dans un grand nombre de pays se traduisent par d'importants problèmes d'accès à l'alimentation pour les populations pauvres, aussi bien urbaines que rurales.

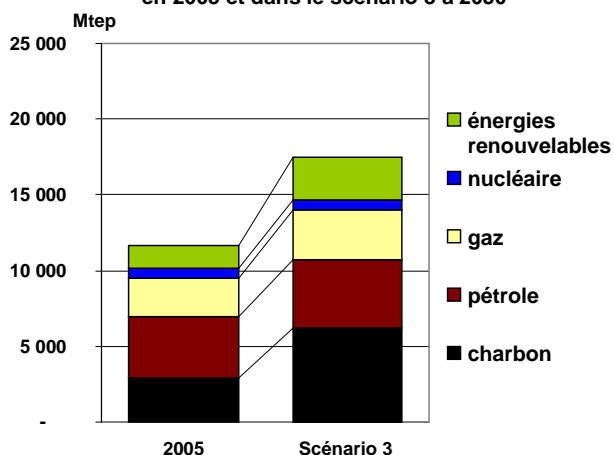
... où la sécurité des approvisionnements énergétiques est devenue prioritaire

Les fortes fluctuations du prix du pétrole, et le contexte géopolitique tendu autour des ressources pétrolières ont conduit les Etats à rechercher la sécurité énergétique, en diversifiant les sources, en sécurisant leurs approvisionnements et en limitant la consommation. La priorité est donnée à l'exploitation des ressources énergétiques nationales et à l'économie d'énergie dans tous les secteurs. Mais les énergies fossiles restent dominantes dans les mix énergétiques (plus de 80% de l'énergie primaire). Les crises économiques et géopolitiques ont limité les capacités d'innovation et d'investissement pour développer des technologies et des filières nouvelles, malgré un prix de l'énergie devenu très élevé. Le charbon, plus abondant et plus distribué géographiquement, devient particulièrement central (près d'un tiers de l'énergie primaire), avec le développement des technologies « coal to liquid ». Restant très dépendants des énergies fossiles, particulièrement dans le domaine des transports, les Etats s'assurent la stabilité

Scénario 3

- **Population mondiale** : de 6 milliards en 2005 à 9 milliards en 2050
- **Demande alimentaire mondiale** : 3 000 kcal/habitant/jour en moyenne mondiale en 2050 : comme en 2000, sans rééquilibrage Nord-Sud.
- **Demande énergétique** : de 11 700 Mtep/an en 2005 à 17 500 Mtep/ an en 2050, soit + 50%
- **Emissions de GES du secteur énergétique** : autour de 60 GT/an

Energie Primaire mondiale par source en 2005 et dans le scénario 3 à 2050



des approvisionnements dans le cadre d'accords bilatéraux, qui structurent les stratégies énergétiques.

La biomasse, une ressource mobilisée dans des filières industrielles variées, pour limiter la dépendance au pétrole

La biomasse constitue une ressource en carbone importante qui permet de limiter la dépendance aux produits fossiles et de sécuriser les approvisionnements énergétiques. Elle est utilisée sous la forme de biocarburants dans les transports mais aussi pour la production de chaleur et d'électricité (co-combustion dans les centrales thermiques à charbon ou à gaz). Les Etats valorisent la biomasse disponible sur leurs territoires ou en importent, soit pour compléter leur propre production, soit s'ils en ont les moyens, pour ne pas mettre en péril leur souveraineté alimentaire.

Différentes filières de biocarburants et différents types de bioraffineries se sont développés selon les régions du monde : les filières et les procédés s'adaptent à la biomasse disponible (agricole, forestière, algale ; oléagineuse, lignocellulosique, etc.), ce qui se traduit, en termes de technologies mobilisées, par une grande hétérogénéité entre pays. Le développement de ces filières a été fortement appuyé par les Etats (objectifs contraignants d'incorporation de bioproduits, aides directes aux filières, exonération de taxes), en lien avec les producteurs et premiers transformateurs de biomasse (agro-industrie, foresterie et industriels du bois) et les acteurs de l'énergie qui se repositionnent sur ces filières.

Les usages de la biomasse dans la chimie se sont relativement peu développés. Dans un contexte de marché dominé par le low-cost, les bioproduits n'ont pas de place spécifique, si ce n'est sur des segments très particuliers (produits pharmaceutiques par exemple). Il s'agit surtout de valoriser les sous-produits de la bioénergie, et de les intégrer dans les filières chimiques classiques.

Une course à la biomasse qui menace la sécurité alimentaire, l'environnement et le développement rural

En l'absence de réelle alternative aux énergies fossiles, la course à la ressource énergétique s'est, entre autres, manifestée par une course à la production de biomasse. Elle est exploitée dans de nombreuses régions du monde, souvent au détriment de l'environnement, et dans certains cas extrêmes de façon minière. De grandes structures industrielles produisent la biomasse et alimentent la consommation domestique et les échanges internationaux. Certaines régions structurellement déficitaires en produits agricoles, alimentaires et/ou non alimentaires ont recours à l'importation ; d'autres ont au contraire développé une économie de rente, notamment dans les pays où les réserves foncières étaient importantes. En 40 ans, une profonde recomposition de la géographie des productions agricoles alimentaires et non alimentaires s'est opérée au niveau mondial.

Des logiques contractuelles entre opérateurs privés ou entre Etats se mettent en place et les marchés internationaux de bioproduits sont dominés par des macroacteurs privés. Dans le cadre d'échanges bilatéraux entre Etats, les échanges Nord-Sud sont particulièrement intenses, tout comme les transactions foncières à grande échelle. Ces transactions organisent la cession de terres à de grandes compagnies sur la base de droits fonciers à plus ou moins long terme, et le plus souvent sans contrôle des impacts environnementaux ni prise en compte des droits des populations locales. Dans ces pays, les tensions avec la production alimentaire sont de plus en plus fortes.

Des innovations au service de filières industrielles de masse, sous l'égide des Etats et des grandes compagnies

Dans le domaine de la recherche et de l'innovation, ce sont les Etats qui sont moteurs : ils financent la recherche et le développement de nouvelles technologies afin de mettre en place de nouvelles filières industrielles de masse. Pour cela, ils ont développé des coopérations étroites avec de grandes entreprises privées : les laboratoires publics et privés interviennent en amont dans la recherche fondamentale, tandis que les applications technologiques sont développées directement par de grandes entreprises.

Scénario 4 - Des territoires métropolitains et ruraux qui mobilisent la biomasse pour une diversité d'usages

En 2050, la biomasse est utilisée localement pour une diversité d'usages non alimentaires. Dans un contexte de poursuite de la mondialisation et de renforcement des dynamiques territoriales, ces usages s'inscrivent dans une logique de développement durable portée par les métropoles et les territoires ruraux. Ces derniers ont entrepris d'accroître l'adaptabilité et la robustesse des systèmes énergétiques et alimentaires locaux, et sont des acteurs moteurs de la mise en œuvre d'un développement économique peu intense en énergie et en ressources naturelles. Selon les régions, la biomasse est tantôt mobilisée dans les transports, dans la production d'électricité, de gaz, de chaleur ou encore comme source de biomolécules. Et ce en fonction de la qualité de la ressource mobilisable, dans le cadre d'une gestion durable, et en s'appuyant sur les compétences des acteurs du territoire. Les filières se sont mises en place en jouant des complémentarités avec les autres filières et autres usages de la biomasse, tout en répondant à des objectifs de développement territorial.

Une mondialisation des territoires connectés

En 2050, la mondialisation est portée par de grands ensembles régionaux composés de métropoles, de villes moyennes et de territoires ruraux. Dans divers secteurs de l'économie, une certaine relocalisation s'est opérée en même temps que la circulation mondiale des informations, des individus et des savoirs s'est accélérée. Une diversité de formes institutionnelles et de systèmes de gouvernance s'est constituée à différentes échelles (aires métropolitaines, régions de type Länder etc.) en associant acteurs privés et publics, afin de maîtriser le développement et l'aménagement du territoire. Cette gouvernance vise à renforcer l'adaptabilité et la robustesse des systèmes énergétiques et alimentaires, afin qu'ils répondent aux enjeux environnementaux, d'emploi et de cadre de vie. Au niveau international, une forte coopération pour la lutte contre le changement climatique et la préservation des écosystèmes globaux s'est mise en place, avec une action concentrée sur les territoires et différenciée selon les enjeux locaux.

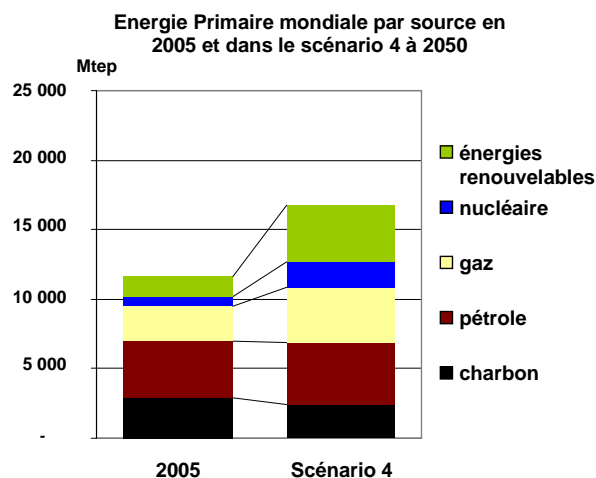
De plus, les préoccupations de la société vis-à-vis du développement durable se sont traduites par un engagement multiple des individus en tant qu'acteurs du territoire, et usagers de bioproduits. En cohérence avec les valeurs de protection de l'environnement, les modes de consommation des individus ont évolué vers davantage de sobriété. Les pratiques alimentaires au Nord sont globalement moins consommatrices, tandis que les régimes alimentaires se sont améliorés dans le Sud, grâce à un accroissement des revenus liés au développement rural.

Des systèmes énergétiques territorialisés, diversifiés, et orientés vers l'efficacité énergétique

Les systèmes énergétiques ont connu une profonde réorganisation : un développement décentralisé de la production s'est réalisé répondant aux usages de l'énergie sur le

Scénario 4

- **Population mondiale** : de 6 milliards en 2005 à 9 milliards en 2050
- **Demande alimentaire mondiale** : 3 000 kcal/habitant/jour en 2050 : comme en 2005 mais avec rééquilibrage des régimes alimentaires.
- **Demande énergétique** : de 11 700 Mtep/an en 2005 à 17 000 Mtep/ an en 2050, soit +45%
- **Emissions de GES du secteur énergétique** : 27 GT/an, stabilisé au niveau de 2005



territoire. Les collectivités territoriales ont mis en place des politiques visant à améliorer l'autonomie énergétique qui privilégient le développement des énergies renouvelables et l'amélioration de l'efficacité énergétique. Si en 2050 une part importante de la production est encore concentrée, et si les énergies fossiles restent très présentes dans le système énergétique mondial, une diversité de solutions a vu le jour dans les territoires, solutions techniques mais aussi d'ordre organisationnel. Dans le domaine des transports en particulier, la réorganisation spatiale des infrastructures, des échanges et des déplacements et l'aménagement du territoire ont eu une grande part dans la diminution des besoins en énergie. De nouvelles combinaisons modales ont été mises en œuvre et divers vecteurs énergétiques sont mobilisés en fonction des usages : l'énergie électrique s'est imposée dans les villes, moins polluante pour l'air, tandis que les transports individuels de longue distance continuent d'utiliser les carburants fossiles et les biocarburants, de même que les secteurs aériens et maritimes.

Une contribution forte de la biomasse au développement énergétique et économique des territoires

Dans ce contexte, diverses filières mobilisant la biomasse sont valorisées car elles participent à la robustesse des systèmes en termes d'approvisionnement (énergétique, en carbone renouvelable, en matériaux). Le caractère distribué de cette ressource permet à un grand nombre de territoires de la mobiliser pour divers usages. Ceux-ci varient en fonction de la quantité et la qualité des ressources accessibles (produits et sous-produits agricoles et forestiers, déchets urbains, industriels ; selon les situations locales), des capacités d'investissement, des compétences et des technologies qui ont pu être développées dans les territoires, et dans les limites d'une gestion durable et génératrice d'emplois à l'échelle des territoires. Une grande diversité de ressources en biomasse est produite ou récupérée.

Les usages de la biomasse pour l'électricité et la chaleur ont connu le développement le plus important, fondés sur de nouvelles technologies de chaufferies à bois à haute efficacité énergétique, de gazéification, de cogénération, ou encore de méthanisation, avec d'une part une valorisation de la chaleur sur des sites industriels ou des réseaux urbains et d'autre part des innovations permettant d'injecter facilement du biogaz ou de la bioélectricité dans les réseaux courants de gaz ou d'électricité. Ces filières se mettent en place dans des configurations variées, en faisant intervenir divers types de partenariats en fonction des opportunités locales de production et d'usage, ou se font, dans le cas des grandes métropoles notamment, via un pilotage plus global par les macroacteurs de l'énergie et/ou de l'environnement.

Dans le domaine des transports, les biocarburants peuvent compléter ou remplacer, en fonction des ressources locales, les carburants fossiles pour les transports de moyenne et longue distances (par exemple, des régions ont une flotte de véhicules roulant à l'éthanol pour leur service de bus régional). Les constructeurs de véhicules se sont adaptés et ont mis au point des moteurs robustes pouvant fonctionner avec une diversité de mélanges de carburants. Des chaînes d'approvisionnement locales se développent. D'autre part, des filières « chimie verte » se sont mises en place sur certains segments, sans passer par la production d'intermédiaires chimiques standards. De petites unités, fondées sur un lien fort entre producteurs de biomasse et entreprises, développent des produits spécifiques (bioplastiques par exemple).

Les technologies développées dans ce scénario correspondent surtout à des systèmes de transformation de pointe, « légers » en tonnage et en investissement mais efficaces énergétiquement. Quant aux producteurs de biomasse, il n'est pas rare qu'ils associent cette activité à la production de services environnementaux, qui assure en partie la rentabilité de l'activité.

Une variété de trajectoires d'innovation, en expérimentation collective

L'innovation a été à la fois technologique (transformation de la biomasse, motorisation, nouveaux mélanges de carburants, etc.), logistique (circuits de distribution) et organisationnelle : gestion des ressources en biomasse, organisation des bassins d'approvisionnement, maîtrise de la cohérence et de la durabilité des nouvelles filières, intégration territoriale dans les stratégies d'aménagement et de développement économique. En particulier, une hybridation entre les filières bioproduits et les filières agroalimentaires et forestières s'est faite au niveau des systèmes de culture (mise en place de cultures en dérobée, exploitations de terres marginales et bandes enherbées) et de l'organisation industrielle (valorisation des déchets des IAA, etc.).

Ces évolutions ont impliqué une multiplicité d'acteurs publics et privés : collectivités territoriales, usagers (associations de résidents, de consommateurs, etc.), petites et grandes entreprises, qui collaborent autour d'intérêts multiples (par exemple : valoriser une ressource, vendre un service, développer un nouvel usage, etc.). Des processus *d'expérimentation collective* (Rip et al., 2010), qui intègrent les savoirs profanes des usagers dans la construction des bioproduits, ont été au cœur des innovations, prenant forme dans des réseaux divers et plus ou moins ouverts. Les Etats sont intervenus en appui, en stimulant la circulation des connaissances et des savoir-faire, les échanges d'expériences et les transferts de compétences et de technologie à l'échelle nationale et internationale.

Un rééquilibrage entre savoirs publics et privés a été favorable à ces évolutions, accompagné d'un développement de nouveaux systèmes de gestion de la propriété intellectuelle (systèmes de gestion collective, plates-formes communes de brevets et licences par exemple). Une grande diversité de pratiques s'est mise en place, selon les particularités sectorielles ; notamment les nouveaux modes d'innovation en réseau s'en sont trouvés facilités, et cette situation a consolidé les PME et les créateurs d'entreprises innovantes. La recherche publique a développé de nouveaux modes d'intervention, complémentaires des activités scientifiques en « laboratoire », et adaptés à ces nouvelles trajectoires d'innovation.

4. Implication des scénarios sur l'occupation du sol

4.1. Objectif et démarche

Les quatre scénarios qualitatifs *VegA* mettent en exergue le fait que les interactions entre usages alimentaires et non alimentaires de la biomasse dépendront avant tout des trajectoires sociotechniques, des dynamiques économiques et des demandes sociétales dans lesquels s'inscrira l'essor des nouveaux usages, et des logiques sectorielles (agriculture, énergie) dans lesquels ils seront intégrés – développement agricole notamment. L'ampleur et le rythme de l'essor de la production n'en demeurent pas moins des facteurs décisifs : ils détermineront dans une large mesure l'ampleur des transformations induites sur l'occupation des sols et l'usage du foncier, le niveau de pression qui s'exercera sur les écosystèmes et les ressources naturelles, ainsi que les conséquences sur les marchés, les économies locales et les territoires.

Ainsi, pour prendre la mesure des transformations associées à ces évolutions, il s'agit d'illustrer les scénarios par des ordres de grandeur. Mais quantifier l'utilisation future de la biomasse n'est pas un exercice aisé. Il existe de nombreuses études et travaux scientifiques qui estiment la quantité de biomasse potentiellement mobilisable pour des usages non alimentaires, à l'échelle mondiale ou régionale. Les résultats obtenus sont extrêmement divers, en fonction des méthodologies employées, des paramètres intégrés à la réflexion et du type de potentiel caractérisé³⁶. Cette variabilité est notamment due aux hypothèses faites sur deux paramètres très incertains : la disponibilité future en terres d'une part (qui dépend entre autres des hypothèses faites sur les autres usages de la biomasse, et notamment des rendements agricoles considérés pour la production alimentaire), et les rendements de la biomasse énergétique d'autre part. Le potentiel mobilisable peut ainsi varier d'un facteur 50 d'une étude à l'autre (Hoogwijk et al, 2003 ; Forslund et Guyomard, 2009 ; OCDE-AIE 2010).

Parallèlement, dans les exercices de prospective sur l'énergie, la biomasse apparaît de plus en plus comme une source d'énergie vouée à se développer. L'énergie primaire issue de la biomasse est dans certaines études multipliée par 3 à 4 par rapport aux usages actuels au niveau mondial. Les « nouveaux usages », impliquant de nouvelles technologies (cogénération, co-combustion, BTL, etc.) prennent généralement le pas sur les usages dits « traditionnels » (combustion simple, charbon de bois). Fait marquant, la biomasse se développe systématiquement et même plus abondamment dans les scénarios les plus « verts », ou du moins les plus vertueux du point de vue des émissions de gaz à effet de serre – c'est le cas par exemple dans les scénarios ETP (AIE 2008), ou dans ceux du WETO H2 (CE 2006). La plausibilité d'une telle hypothèse n'est pas sans poser question, comme le soulignent les controverses sur la biomasse.

Le groupe de travail s'est proposé d'explorer cette dimension en confrontant des estimations quantifiées élaborées pour la demande alimentaire et énergétique à 2050. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur deux prospectives de référence, qui ont été présentées précédemment (cf. Partie 2-3) : la prospective INRA-Cirad Agrimonde et l'ETP 2008 de l'AIE. L'objectif de cet exercice n'est pas à proprement parler de répondre à la question « *Quelle quantité de biomasse peut-on espérer allouer à des usages non alimentaires ?* », mais de s'appuyer sur des ordres de grandeur pour envisager les conséquences d'un développement des nouveaux usages de la biomasse dans chaque scénario et ensuite de revenir sur la cohérence, la plausibilité des scénarios élaborés, pour souligner les tensions consécutives à leur réalisation.

4.2. Principe, hypothèses et résultat des simulations

La démarche consiste à :

- (1) considérer les **ordres de grandeurs de la demande en bioénergie et biomolécules** rencontrées en prospective énergétique, et à formuler à partir de ces ordres de grandeur des hypothèses sur la demande dans les quatre scénarios *VegA* ;

³⁶ Le potentiel théorique considère la quantité totale de biomasse produite, quel que soit l'actuel usage qui est fait des terres. Le potentiel technique évalue la quantité de biomasse qui peut être récoltée effectivement sur des terres disponibles et exploitables. Le potentiel économique prend en compte la compétitivité de la biomasse qu'il est techniquement possible de produire.

- (2) traduire cette demande en **surface requise pour la production de biomasse** par scénario ;
- (3) confronter ces surfaces avec les projections sur l'occupation des sols rencontrées dans les exercices prospectifs sur l'alimentation.

4.2.1. Les hypothèses sur la demande en biomasse dans les scénarios pour la production d'électricité, les biocarburants et les biomolécules

Pour formuler des hypothèses sur les besoins en biomasse dans les scénarios *VegA*, le groupe de travail s'est donc appuyé sur les trois scénarios énergétiques mondiaux de la prospective ETP 2008 de l'AIE, dont les grandes lignes ont été décrits plus haut (cf. partie 2-3).

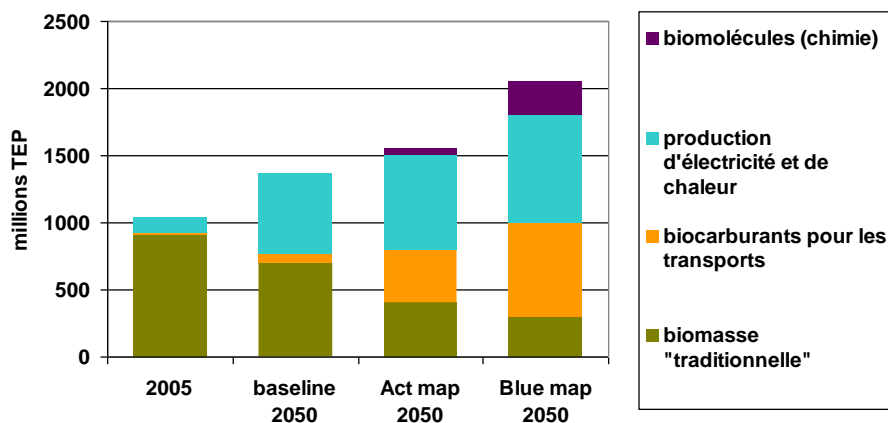
Encadré 8 - La biomasse dans les scénarios ETP

Les projections de l'ETP sur les mix énergétiques et technologiques sont réalisées selon trois hypothèses d'évolution des émissions de gaz à effet de serre : un scénario de type *business as usual*, un scénario de stabilisation des émissions à 2050, intitulé *Act Map*, et un scénario de division par deux des émissions, dénommé *Blue Map*. La biomasse figure dans ces trois scénarios parmi les sources possibles d'énergie, et des projections sur les utilisations de la biomasse ont été réalisées et ventilées par type d'usage³⁷.

L'utilisation de biomasse dans les transports varie d'un scénario à l'autre entre 70 et 600 Mtep environ (20 Mtep en 2005), l'utilisation pour la production de biomolécules entre 0 et 250 Mtep environ, et celle pour les nouveaux modes de production d'électricité et chaleur (hors usages « traditionnels ») de l'ordre de 500 à 800 Mtep selon les scénarios (120 Mtep en 2005)³⁸. Fait marquant, ce dernier usage connaît un essor particulièrement marqué, et ce dans les trois scénarios. Enfin, l'usage dit « traditionnel » de la biomasse (environ 900 Mtep en 2005) régresse dans les trois scénarios : il baisse d'un quart environ dans le scénario Baseline, il est divisé par deux dans le scénario Act Map et par trois dans le scénario Blue Map.

Figure 9 : Utilisation de la biomasse pour les transports, l'électricité et la chaleur, la chimie et les usages 'traditionnels' en 2050, d'après les Scénarios ETP 2008

(source : auteurs, d'après AIE, 2008)



En appliquant les ordres de grandeurs relevés dans l'ETP 2008 aux hypothèses retenues dans les scénarios *VegA*, les besoins en biomasse dans les scénarios ont été définis en rapprochant les scénarios élaborés des scénarios de l'ETP : grossièrement, la quantification du scénario 1 s'inspire du scénario Baseline (*business as usual*) de l'ETP, celle du scénario 2 du scénario Blue Map de l'ETP (sauf pour les biocarburants, qui se développent peu dans le scénario 2 *VegA*). Le scénario 4 s'appuie sur les projections du scénario Act Map de l'ETP ; le scénario 3 est quant à lui un croisement entre Act Map et Baseline.

³⁷ Il convient de souligner que dans l'ETP 2008, l'usage de biomasse se développe particulièrement dans les scénarios les plus exigeants en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'AIE a donc implicitement considéré que les nouvelles filières biomasse présentent un bilan GES positif. Aussi, les débats en cours sur le bilan GES de la production de biomasse n'ont donc pas été intégrés à la réflexion, et en particulier les émissions liées aux changements directs et indirects d'affectation des sols. Nous ne retiendrons donc ici que les ordres de grandeur d'utilisation de la biomasse, et prendrons en considération les bilans GES dans la suite du raisonnement.

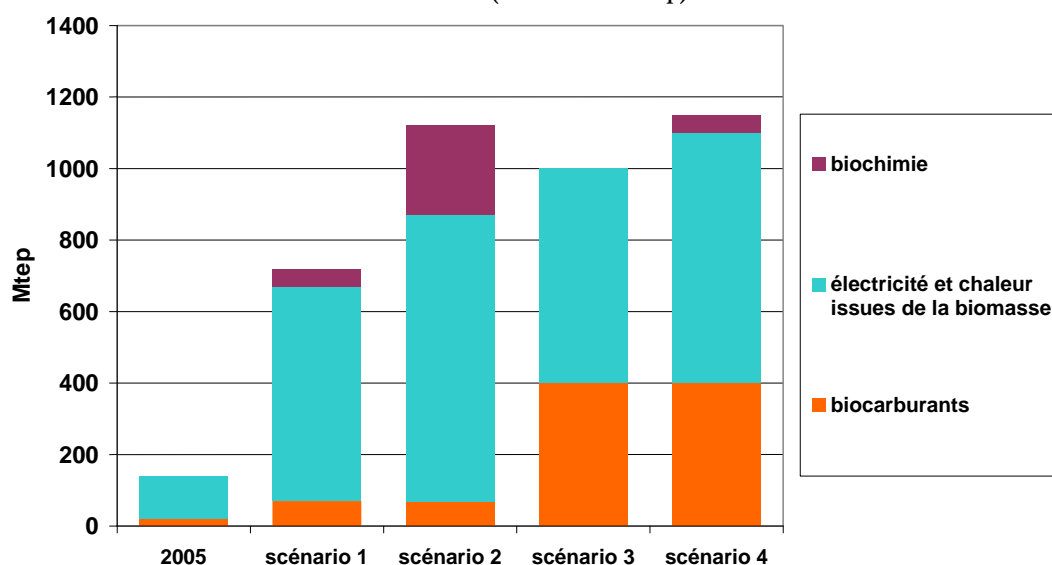
³⁸ Les projections d'utilisation de la biomasse de l'ETP 2008 ont été observées pour 3 postes : « power generation », « transportation biofuels » et « biofeedstocks ».

Quelques points marquants se dégagent de cette construction :

- les **nouveaux usages pour la production d'électricité et de chaleur** se développent dans tous les scénarios (fidèlement aux projections de l'ETP 2008). C'est tout particulièrement le cas dans le scénario 2, qui s'inspire du scénario Blue Map de l'ETP 2008 ;
- les **usages dans le secteur des transports** restent limités dans le scénario 1 (qui a été rapproché du scénario *business as usual* ou Baseline de l'ETP 2008). En revanche, ils se développent de façon importante dans les scénarios 3 et 4 (qui pour cet usage s'inspirent du scénario Act Map de l'ETP 2008) ;
- enfin, l'hypothèse la plus importante sur **l'usage de biomasse dans la chimie** concerne le scénario 2 (hypothèse d'une innovation de rupture dans ce secteur).

Pour les trois usages étudiés (qui ne comprennent pas les usages dits « traditionnels »), les hypothèses d'utilisation de la biomasse pour les quatre scénarios à l'horizon 2050 sont les suivantes :

Figure 10 : Utilisations de la biomasse dans les scénarios *VegA* pour trois usages : production d'électricité et chaleur (hors usages 'traditionnels'), de biocarburants et de biomolécules (en millions de tep)



4.2.2. Traduction en surface requise pour la production de biomasse par scénario

(i) Méthode

Les quantités de biomasse par scénario ont été traduites en surfaces à mobiliser, sur la base d'hypothèses de rendements énergétiques moyens par unité de surface (en tep/ha). **Seuls les usages dans les transports, pour la synthèse de biomolécules et les nouveaux modes de production d'électricité et de chaleur sont pris en compte** dans ces calculs. Les usages « traditionnels » de la biomasse n'ont pas fait l'objet de simulation.

Rappelons-le, l'objet n'est pas ici de réaliser des simulations de nature prédictive sur les futures surfaces dédiées à la biomasse, mais de raisonner de façon très globale et d'obtenir des **ordres de grandeur génériques « témoins »** afin d'examiner la plausibilité des scénarios élaborés. De ce fait, des hypothèses très schématiques sur le type de biomasse mobilisée et le type de transformation ont été faites pour réaliser les calculs :

- pour les biocarburants, nous considérons que la biomasse est issue de cultures dédiées et de résidus agricoles pour les scénarios 2, 3 et 4. Selon les scénarios ces biocarburants sont de première et/ou seconde génération ;

- pour la production d'électricité et de chaleur, l'hypothèse est faite que la totalité de la biomasse est issue de la culture de taillis à courte rotation ;
- Pour la production de biomolécules, un rendement de biocarburant de seconde génération a été retenu.

Tableau 8 : Hypothèses de calcul des surfaces dédiées par usage

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Biocarburants	1 ^{ère} génération Cultures dédiées 0,4 à 2 tep/ha	2 ^{ème} génération, Cultures dédiées 1,5 tep/ha + 20% résidus agricoles (0,5 tep/ha)	1 ^{ère} et 2 ^{ème} génération Cultures dédiées + 20% résidus	1 ^{ère} et 2 ^{ème} génération Cultures dédiées + 20% résidus
Bioélectricité (et chaleur)	1,8 à 3 tep/ha {hyp. 100% TCR – 10tMS/ha - rendement de 40 à 70% (électricité, cogénération)}			
Chimie, biomolécules	1,5 tep/ha			

La quantité d'énergie utilisée pour chaque usage (ou équivalent énergie pour les biomolécules) est convertie en appliquant rétroactivement : 1/ un rendement énergétique moyen de transformation de la biomasse (tep par tonne de matière sèche) et 2/ un **rendement culturel moyen mondial** par unité de surface (tonne de matière sèche par hectare). En annexe 3 figurent le détail des rendements utilisés et les sources bibliographiques dont ils sont extraits.

Enfin, élément important, les **technologies et les rendements considérés sont ceux en vigueur actuellement (productivité constante)** de façon à prendre la mesure des marges de progression à l'horizon 2050 vis-à-vis des technologies et des systèmes de production actuels.

(ii) Résultats des simulations : surfaces théoriques correspondant à la demande en biomasse

Le tableau suivant présente les résultats de la traduction des demandes en biomasse en surfaces dédiées à la production de biomasse par scénario :

Tableau 9 : Surfaces dédiées à la biomasse non alimentaire (biocarburants, électricité et chaleur, biomolécules) dans les scénarios.

Usage	Biocarburants			Bioélectricité-chaleur		Biomolécules		Total		
	Mtep	Surfaces dédiées Mha	Surfaces collecte résidus	Mtep	Surfaces Mha	Mtep	Surfaces Mha	Mtep	Surfaces Mha	Surfaces collecte résidus
Scénario 1	70	35 à 175	-	600	200 à 335	50	35	720	270 à 545	-
Scénario 2	70	40	35	800	270 à 440	250	165	1120	475 à 645	35
Scénario 3	400	190 à 500	200	600	200 à 335	-	-	1000	390 à 835	200
Scénario 4	400	190 à 500	200	700	230 à 390	50	35	1150	455 à 925	200

Pour répondre à la demande en biomasse pour les trois usages étudiés, telle qu'elle a été définie en s'inspirant des scénarios de l'ETP 2008, les surfaces qu'il faudrait théoriquement mobiliser s'échelonnent entre 270 et 925 millions d'ha. A titre de comparaison, les surfaces mondiales cultivées (toutes cultures confondues) en 2005 s'élevaient à 1,5 milliards d'hectares.

4.3. Interprétations

4.3.1. Enseignements généraux

Ces résultats appellent une première remarque sur **l'ampleur des surfaces** ainsi calculées, qui est considérable. Ces simulations n'ont assurément **aucune portée prédictive**, les limites de la méthode employée sont manifestes et les hypothèses sous-jacentes très simplifiées (surfaces cultivées dédiées, rendements moyens mondiaux, productivité constante). Ces résultats ont cependant l'intérêt de **donner la mesure des transformations que peuvent induire de tels niveaux de demande en biomasse** pour ces trois nouveaux usages.

De plus, il convient de souligner que ces calculs de surfaces ne prennent pas en compte les usages qui pèsent actuellement le plus dans la consommation énergétique de biomasse, à savoir les usages « traditionnels ». Utilisée sous cette forme, la biomasse est, rappelons-le, la première source d'énergie dans de nombreuses régions du monde, si ce n'est la seule. La tendance est à l'augmentation des quantités de biomasse utilisées pour ces usages traditionnels, et il est fort probable que cette tendance se prolonge (FAO, 2008b), à moins que leur efficacité énergétique ne s'améliore sensiblement ou que les biocombustibles soient progressivement remplacés par d'autres sources d'énergie, comme le postule l'AIE dans l'ETP 2008.

Autre fait marquant, les fourchettes de surfaces obtenues sont très larges. Ce fait est lié à la méthode de calcul. En effet, d'une part, les différentes ressources considérées ont des rendements surfaciques et de conversion très différents, et d'autre part le type de biomasse produite n'a pas été différencié en fonction de sa localisation ; les rendements par unité de surface employés n'ont donc pas été « optimisés » de ce point de vue. Mais cela met tout de même l'accent sur le fait que **certains systèmes de production de biomasse non alimentaire** (ceux obtenus à partir de grains notamment) **sont particulièrement consommateurs d'espace**, et peuvent de ce fait avoir des conséquences massives sur l'occupation des sols dans le cas d'un développement à grande échelle des filières concernées.

Un constat émerge également des simulations relatives au scénario 2 : le développement à large échelle de l'usage de bioproduits dans le domaine de la chimie pourrait mobiliser des quantités de biomasse et des surfaces considérables (165 millions d'hectares dans les simulations faites pour le scénario 2).

Les résultats relatifs aux **surfaces de collecte de résidus agricoles** posent également question. Dans les scénarios 3 et 4 par exemple, pour produire 1/5^{ème} de la biomasse utilisée dans les transports, soit 7 à 8% de la demande totale en bioénergie, la collecte concerne des superficies de l'ordre de 200 millions d'hectares d'après les simulations. Cela signifie que les résidus sont collectés sur l'équivalent d'un dixième des surfaces cultivées dans le monde, ce qui suggère un déploiement logistique considérable et la mise en place de filières nouvelles, plus ou moins longues, dont la rentabilité économique et l'efficacité énergétique ne sont pas assurées. Dans ce contexte, l'enjeu de maîtrise des exportations de la matière organique des sols est de plus en plus prégnant au vu des surfaces arables concernées. Enfin, les résidus agricoles font d'ores et déjà l'objet d'usages variés, qu'ils soient à destination de l'élevage, d'usages énergétiques ou domestiques divers (dans les pays en développement) ; une concurrence accrue entre les usages doit donc être envisagée.

4.3.2. Comparaison avec les scénarios d'occupation des sols de la prospective Agrimonde

La prospective *Agrimonde* présente deux situations contrastées de consommation alimentaire et de type de systèmes de production agricole à 2050, ainsi que les dynamiques d'occupation des sols associées (cf. Partie 2-3-2). Nous nous intéressons ici à l'évolution de l'occupation des sols du scénario *Agrimonde 1*, qui a été construite sur la base de données sur les potentiels cultivables (données FAO et IIASA³⁹) et à dire d'experts (cf. Encadré 10).

³⁹ Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st century (IIASA-FAO).

Encadré 9 : Evolution de l'occupation des sols dans le scénario *Agrimonde 1*

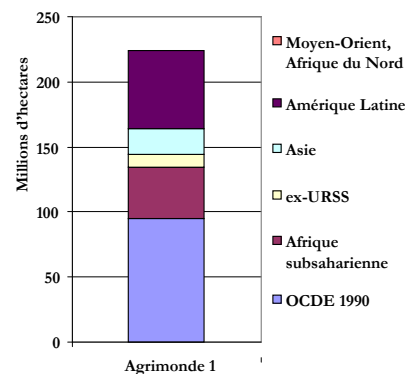
<i>en millions d'hectares</i>	2000	2050 scénario Agrimonde 1	variation 2000-2050
surfaces cultivées	1 529	2 104	+575
surface en pâture	3 326	2 845	-494
surfaces en forêts	3 905	3 879	-47
« autres »	3 873	3 873	0

Parmi l'ensemble des terres potentiellement cultivables (qui correspondrait à un peu moins de 3 milliards d'hectares, si l'on exclut les terres cultivables sous forêts et que l'on prend en compte les terres à faible potentiel, d'après Roudart et Even, 2010), 1529 millions d'hectares sont aujourd'hui cultivées. Les experts de la prospective Agrimonde ont considéré que 575 millions d'hectares supplémentaires pourraient être mises en culture d'ici 2050, en prenant en compte les facteurs physiques de disponibilité et de qualité des sols et en les croisant avec des critères de durabilité. En particulier, la préservation d'espaces forestiers, pourvoyeurs de services écosystémiques, a été un critère important dans ces estimations, et les hypothèses sur l'augmentation des rendements sont assez modérées par rapport à des scénarios plus « intensifs »⁴⁰.

La plus grande part de ces terres arables supplémentaires est dédiée à l'augmentation des surfaces cultivées pour l'alimentation (355 millions d'ha), et **220 millions ha environ sont dégagés pour la production de biomasse agricole non alimentaire à l'horizon 2050.**

- Les pays OCDE libèrent ainsi dans ce scénario près de 20% de leur surface cultivée pour des usages non alimentaires en 2050.
- L'Afrique subsaharienne et l'Amérique latine y consacrent respectivement 5 et 10%, car l'essentiel des accroissements de surfaces cultivées y est dévolu à l'alimentation.
- En Asie, après satisfaction de la demande alimentaire, peu de surfaces sont disponibles pour développer les cultures non alimentaires.
- Au Moyen Orient du fait de la faible disponibilité de terres, aucune surface n'est dédiée aux usages non alimentaires.

Répartition des surfaces cultivées pour la biomasse non alimentaire dans le scénario Agrimonde 1



Source : Inra-Cirad, 2009

Les surfaces calculées dans nos simulations (à productivité constante, contrairement aux estimations réalisées dans l'exercice Agrimonde 1) varient de 270 à 925 millions d'hectares : elles excèdent largement les surfaces dégagées pour cet usage dans le scénario Agrimonde 1 (cf. encadré 9). Quant à leur localisation, rien n'indique qu'elle sera de même nature dans les scénarios *VegA*, car elle dépend des conditions économiques, politiques et sociales dans lesquelles les filières s'y développeront (cf. infra).

Si donc, comme les résultats des simulations le laissent entendre, davantage de surfaces sont mises en culture pour la production de biomasse non alimentaire, cela pourrait se traduire :

- *par davantage de conversion des terres occupées par la forêt en terres cultivées ?*

Des réserves de terres cultivables importantes se trouvent en effet dans les zones actuellement forestières⁴¹. Le scénario Agrimonde 1 limite par construction le recours aux espaces forestiers, qui diminuent tout de même de 47 millions d'ha. De façon évidente, l'intérêt environnemental d'un recours à la bioénergie serait très significativement réduit s'il devait se faire au prix d'une déforestation massive, par rapport à d'autres sources de biomasse ou d'autres solutions énergétiques renouvelables, non seulement

⁴⁰ Rappel : l'augmentation des rendements considérée dans Agrimonde 1 est moins ambitieuse que dans Agrimonde GO : un taux d'accroissement annuel mondial de 0,14 dans AG1 contre 0,73 à 1,81 dans AGO selon les régions. Dans AG1, les effets du changement climatique ont été pris en compte par les experts, pour estimer à la fois l'évolution des rendements et celle des surfaces cultivables.

⁴¹ Aujourd'hui, 12% des surfaces forestières dans les pays développés et 30% des surfaces forestières dans les pays en développement pourraient être mise en culture selon le GAEZ. Un tiers des forêts mondiales pourraient théoriquement être mises en culture, avec des rendements extrêmement variables et probablement la conquête de milieux fragiles et de zones protégées (Roudart et Even, 2010).

du point de vue des émissions de GES liées à la déforestation mais aussi de la perte de biodiversité sauvage, de la dégradation potentielle des sols, et de la perte des autres services écosystémiques rendus par les forêts (vis-à-vis de l'eau notamment) (Mellilo 2009, PNUE 2009).

- *par davantage de conversion des terres pâturées⁴² ?*

L'espace dédié aux pâtures est déjà restreint dans le scénario Agrimonde 1, avec une diminution de 494 Mha par rapport à 2000. Une intensification des systèmes d'élevage pourrait libérer de l'espace, mais peut soulever d'autres enjeux de durabilité. Cet aspect doit être nuancé par le fait que, dans le cas des biocarburants, la production de coproduits à destination de l'élevage (drèches, tourteaux) peut être substantielle. Les services écologiques rendus par les systèmes pastoraux doivent également être pris en considération dans le bilan environnemental de ces changements d'affectation des sols pour la biomasse, de même que le carbone stocké dans les écosystèmes prairiaux qui pourrait être libéré dans l'atmosphère.

- *par l'usage des « autres terres émergées » ?*

Ces espaces, tels que classés dans la nomenclature Agrimonde, comprennent les zones marginales, les zones impropres à la culture, les espaces urbanisés, les fortes pentes, les zones dégradées ou à potentiel de rendement faible. Une partie de ces terres, bien que faiblement voire très faiblement productive, peut être mobilisée pour la production agricole, comme cela a déjà été le cas dans certaines régions du monde (en Asie en particulier). Elles constituent une réserve potentielle de terres importante, mais sous fortes contraintes climatiques, pédologiques ou topographiques. L'opportunité de mettre en culture ces espaces soulève plusieurs questions :

- l'accessibilité : les terres dites « marginales » le sont souvent parce que difficilement atteignables ou non reliées aux infrastructures, routières notamment ;
- le coût des infrastructures à mettre en place pour rendre ces terres productives : irrigation, terrassement, réseau de transport, etc. ;
- l'échelle des bassins d'approvisionnement, si les rendements sont très faibles ou si ces espaces sont dispersés.

Ces éléments conditionnent fortement, au moins à court terme, la rentabilité des investissements à déployer pour les exploiter, et le bilan énergétique global des filières à mettre en place s'il s'agit de produire des cultures énergétiques. La perspective peut être différente si l'on envisage un usage local de la biomasse produite dans ces espaces et une transformation à petite échelle, en particulier dans des régions densément peuplées (IAASTD, 2009).

En somme, cette approche simplifiée, de type « comptable », met l'accent sur le fait qu'avec les technologies et les modes de production des bioproduits actuels, il est impossible de répondre à de tels niveaux de demande en biomasse non alimentaire sans entraîner des changements massifs d'allocation des sols au niveau mondial, des tensions avec la production à vocation alimentaire (concurrence pour les surfaces, notamment les plus productives et les plus accessibles), des fortes pressions sur les écosystèmes et une libération massive de gaz à effet de serre, à techniques de production agricole inchangées.

4.3.3. Vers une diversification des sources de biomasse ?

Ces ordres de grandeur mettent l'accent sur la nécessité de développer, pour répondre aux nouveaux usages, des sources de biomasse qui limitent les concurrences spatiales. Les sources de biomasse aujourd'hui envisagées se diversifient, à mesure notamment que les perspectives technologiques de transformation s'élargissent.

Biomasse forestière

En premier lieu est entrevue une utilisation accrue de la biomasse d'origine forestière ; c'est aujourd'hui la première source de biomasse à vocation énergétique, et outre son utilisation par combustion, elle est d'ores et déjà utilisée dans certaines filières de production d'électricité et chaleur mobilisant de nouvelles technologies (cogénération, chaufferies à haute efficacité énergétique, sous la forme de granulés par exemple). Un peu moins de la moitié de la production mondiale de bois sert aujourd'hui à produire de l'énergie, le reste étant essentiellement destiné au bois d'œuvre et à la trituration. Dans les pays du Sud,

⁴² Cette question a été en particulier étudiée dans la tâche 10 de l'ARP *VegA*

l'usage énergétique prédomine largement tandis que dans la plupart des pays du Nord, il occupe au contraire une place modeste dans la production forestière (cf. partie 2). Comment un accroissement de la production forestière globale dédiée aux nouveaux usages peut-il se traduire : substitutions d'usage, transformations des peuplements et essences, intensification et expansion des surfaces en plantation, augmentation des surfaces forestières exploitées ? Sur quelles zones, en fonction de la compétition internationale, cet accroissement de la production pourrait-il se reporter ? Quels modes de productions privilégier pour favoriser les écosystèmes, la biodiversité et le stockage de carbone ? Quelles concurrences avec les autres usages productifs (production de bois de combustion, bois d'œuvre, cueillette alimentaire et médicinale, etc.) et non productifs des forêts ?

Rémanents, déchets, effluents

Les rémanents forestiers sont également de plus en plus cités comme une source possible de biomasse à transformer. Ils sont déjà utilisés par les populations rurales dans beaucoup de pays en développement, au même titre qu'une part des résidus agricoles. Le développement de leur collecte pour un usage à l'échelle industrielle pose les questions des coûts logistiques de collecte et des modalités de gestion de la matière organique des sols. La valorisation des déchets de l'industrie du bois (ceux qui ne sont pas déjà), une utilisation accrue des produits ligneux en fin de vie, des déchets organiques urbains, issus de l'industrie agro-alimentaire ou encore des effluents d'élevage sont également des pistes considérées. Les défis technologiques et logistiques associés à l'utilisation de telles sources sont considérables, mais les gisements potentiels très importants (Hoogwijk, 2004).

Biomasse algale

Enfin, un intérêt grandissant est porté à la biomasse issue de cultures de micro et macroalgues (en aquacultures côtières, en bassins ou en off-shore). Ces cultures présentent des potentiels de rendement par unité de surface intéressants et pourraient se développer dans des espaces moins concurrentiels avec les productions alimentaires. Les rendements actuellement obtenus sont prometteurs (avec des estimations de l'ordre de 27 tep/ha pour la biomasse algale pour la fabrication de biogaz, et de 36 tep/ha pour les microalgues⁴³). Mais pour l'heure, peu de projections sont faites quant aux potentialités de la biomasse algale. D'une part, des incertitudes pèsent sur la possibilité de développer des systèmes d'algoculture à grande échelle, d'autre part la maîtrise des conséquences environnementales liées aux systèmes d'algoculture posent question (gestion des effluents, caractère invasif des espèces cultivées, par exemple) de même que les conflits potentiels liés à l'usage des espaces littoraux.

⁴³ D'après Y. Chisti, 2007, *Biotechnology advances* 25:294-306, sur la base d'une productivité en huile de 30%.

4.4. Quelques enseignements plus spécifiques des scénarios

Si l'analyse des résultats en termes purement spatiaux est déjà porteuse d'enseignements, des éclairages spécifiques peuvent être réalisés lorsque ces estimations quantitatives sont envisagées dans le contexte social, économique et politique des scénarios.

Encadré 10 - Rappel des résultats des simulations par scénario :

Scénario	Bioénergie primaire (nouveaux usages uniquement*)	Surfaces théoriques correspondantes	
		Surfaces cultivées (Mha)	Surfaces collecte résidus (Mha)
Scénario 1 « Fuite en avant »	720 Mtep <3% de l'énergie primaire totale du scénario ~ 1/4 de l'énergie primaire renouvelable	270 à 545	-
Scénario 2 « Néo-modernisation verte »	1120 Mtep 5 à 10% de l'énergie primaire totale du scénario ~ 20% de l'énergie renouvelable	475 à 645	35
Scénario 3 « Course à la biomasse »	1000 Mtep ~ 5% de l'énergie primaire totale du scénario ~ 35% de l'énergie renouvelable	390 à 835	200
Scénario 4 « Usages diversifiés dans les territoires »	1150 Mtep 5 à 10 % de l'énergie primaire totale du scénario ~ 30 % de l'énergie renouvelable	455 à 925	200

*Rappel : seuls les « nouveaux » usages de la biomasse pour la production d'électricité et de chaleur, de biocarburants et de biomolécules sont pris en compte. La biomasse traditionnelle, qui est l'usage le plus important, n'a pas fait l'objet d'estimations en termes d'occupation du sol.

4.4.1. La biomasse, une solution pertinente quel que soit le paysage énergétique ?

Les systèmes énergétiques diffèrent sensiblement d'un scénario à l'autre, et la biomasse y occupe des places et des fonctions différentes.

Dans le scénario 1 ('Fuite en avant'), les nouveaux usages de la biomasse se développent dans un contexte d'explosion de la consommation énergétique (par la généralisation des modes de consommation occidentaux et des trajectoires de croissance économique à forte intensité énergétique). Aussi, des quantités importantes de biomasse sont mobilisées pour une contribution énergétique qui reste très limitée en proportion : cela se traduit par une surface mobilisée comprise entre 270 et 545 millions d'hectares pour fournir moins de 3% de l'énergie primaire totale. La pertinence du recours à la biomasse en l'absence de politique forte de maîtrise de la consommation s'en trouve fortement questionnée. Dans ce scénario également, le contexte politique et économique (prix de l'énergie, prix des matières premières, forte compétition internationale et libéralisation des marchés) a incité les opérateurs à s'appuyer sur les technologies énergétiques les plus mûres et compétitives à court terme ; les modes de production et de transformation de la biomasse n'ont pas particulièrement été sélectionnés selon leurs performances environnementales ni leur sobriété vis-à-vis des superficies mobilisées (biocarburants principalement agro-sourcés) et des ressources (en eau par exemple, à moins que leur rareté, et donc leur coût, ne l'imposent).

Le processus de libéralisation et de financiarisation de la production de biomasse non alimentaire (agricole ou autre) peut conduire, dans ce scénario, à un regain des investissements dans le secteur agricole (avec la mise en place d'infrastructures, de filières d'approvisionnement et de commercialisation, la mise en culture de terres auparavant peu valorisées, etc.) mais peut également encourager l'expression de logiques de

rentabilité et de retours sur investissement à court terme, déconnectées des réalités territoriales. Cette situation peut vraisemblablement s'accompagner de phénomènes de surexploitation ou de dégradation des ressources, et ce à très grande échelle. Ce phénomène pourrait être contrebalancé, dans une certaine mesure, par une structuration des marchés autour de démarches de labellisation ou de certification environnementale, que pourraient favoriser notamment les exigences des consommateurs du Nord.

Le scénario 3 ('Course à la biomasse') illustre quant à lui une situation énergétique sous tension, où l'urgence de la situation – qui découle, entre autres, d'un manque d'anticipation – conduit à des modes de production et de prélèvement de la biomasse dévastateurs d'un point de vue environnemental et social. Les surfaces théoriques calculées dans les simulations sont très importantes ; elles représentent l'équivalent de 25 à 50% des surfaces actuellement cultivées. Dans ce contexte, et en l'absence de cadre international multilatéral de régulation commerciale et environnementale, il n'est pas improbable que les régions à potentiel cultivable important (Afrique, Amérique Latine surtout) et à foncier bon marché, connaissent des déforestations massives ou une transformation rapide de leurs pâtures en terres arables.

4.4.2. Concilier accroissement des usages de la biomasse, réduction des gaz à effet de serre et durabilité environnementale : un défi pour l'innovation

Dans le scénario 2 ('néo-modernisation verte') et le scénario 4 ('diversité d'usages dans les territoires'), la biomasse s'insère, par construction, dans une perspective de durabilité et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les résultats des simulations sur l'occupation des sols questionnent avec acuité la faisabilité de concilier ces objectifs environnementaux exigeants avec des objectifs ambitieux de développement des usages de la biomasse. Deux formes de transition socio-écologique sont envisagées dans ces scénarios.

L'objectif de réduction des GES est particulièrement structurant du scénario 2, et passe par une amélioration de l'efficacité énergétique et par des reconfigurations sectorielles profondes. Or, mobiliser plusieurs centaines de millions d'ha pour produire de la biomasse non alimentaire (475 à 645 Mha dans les simulations) signifie des changements d'affectations des sols de grande ampleur. Selon leur localisation et les systèmes de production qui l'accompagnent, cette réallocation des sols peut provoquer un déstockage massif de carbone et être porteurs d'impacts très sévères sur la biodiversité (Melillo, 2009). Ce scénario met donc particulièrement en tension les capacités à déployer des innovations pour améliorer l'efficacité des filières biomasse (systèmes de production, efficacité de transformation de la ressource végétale) et pour développer le recours à des ressources en biomasse alternatives limitant l'emprise au sol et l'impact environnemental de ces nouveaux usages. Y apparaissent aussi très prégnantes les questions relatives aux modes d'évaluation des systèmes de production (agricoles et sylvicoles) et des filières sur l'ensemble du cycle de vie des bioproduits/bioénergies.

Dans le scénario 4, la biomasse est une option énergétique largement mobilisée, en tant que source d'énergie renouvelable et distribuée dans l'espace. Elle est même l'un des moteurs de la décentralisation des systèmes énergétiques. Les formes d'utilisation de la biomasse sont fonction des ressources et des contextes locaux, et l'hypothèse est faite que certains usages « traditionnels » ont en partie évolué vers des modes plus efficaces énergétiquement et permettant de valoriser des formes variées de biomasse. Par construction, une priorité du scénario 4 est l'insertion des systèmes énergétiques dans une perspective plus large de développement territorial et de consolidation de l'accès à l'énergie pour les habitants des territoires, qui reste un enjeu très fort dans les pays du Sud. Les ordres de grandeur considérés dans les simulations sur la biomasse mobilisée (455 à 925 Mha) semblent, avec les techniques actuelles, impossibles à atteindre dans le cadre de la durabilité qui définit ce scénario, soulevant notamment des problèmes aigus de concurrence avec les autres usages de la biomasse au sein des territoires. Ce constat appelle, comme dans le scénario 2, une réflexion sur les sources de biomasse pour limiter les concurrences spatiales (valorisation des déchets organiques urbains, industriels notamment, mobilisation des haies), sur la possibilité d'augmenter la productivité sans grever la durabilité des systèmes de production, ainsi que sur l'efficacité globale des filières. Plus particulièrement, le scénario 4 met en lumière la nécessité d'inventer des complémentarités entre systèmes énergétiques et systèmes alimentaires au niveau territorial, des articulations entre filières utilisatrices et productrices de biomasse, et des modalités de gestion maîtrisée des ressources naturelles, des flux de matière (écologie territoriale) et des usages de l'espace, ce en impliquant une diversité d'opérateurs aux intérêts et aux contraintes multiples.

Il apparaît très nettement que les innovations requises sont de nature technique (technologie, logistique etc.), mais aussi dans une large mesure de nature organisationnelle, institutionnelle, sociétale. Les modes de gouvernance, les modalités d'intervention publique, l'engagement des acteurs privés et des usagers de la ressource et les modes de gestion diffèrent fortement dans les deux formes de transition socio-écologique décrites dans les scénarios 2 et 4. Les modalités de construction de l'innovation elle-même entrent en jeu : rapprocher des acteurs issus de mondes scientifiques et sectoriels différents, associer une grande diversité de parties dans les processus (petites entreprises, grands groupes, recherche publique et privée, collectivités, associations), repenser la place des usagers ou des acteurs territoriaux dans l'innovation, développer une approche globale pour répondre aux défis environnementaux à l'échelle des filières (ex : éco-conception).

4.4.3. Biomasse, filières agricoles et systèmes alimentaires : l'enjeu majeur de la gouvernance

L'ampleur du phénomène qui est suggéré dans les simulations montre que le développement des nouveaux usages de la biomasse pourrait contribuer de façon significative à une transformation des équilibres agricoles et alimentaires mondiaux.

Dans le scénario 1, l'extension des modes de consommation et de filières alimentaires *à l'occidentale* entraîne l'explosion de la demande en biens agricoles de base, qui, indépendamment des usages non alimentaires, met sous tension la capacité de l'agriculture à répondre à cette demande. A cela s'ajoute la demande en matières premières agricoles pour les biocarburants, qui restent principalement agro-sourcés, et qui, à productivité constante, mobiliseraient une part conséquente des superficies cultivables. On est donc dans ce scénario dans la situation où une compétition directe s'exerce entre filières alimentaires et non alimentaires pour les produits agricoles de base, et où, dans un contexte de faible régulation des marchés agricoles, énergétiques et de leurs interactions, le risque d'accentuer la volatilité des prix agricoles existent (*cf. partie 2-2-3. Biocarburants et marchés agricoles*). Par ailleurs, la localisation de la production est essentiellement guidée dans ce scénario par les exigences de compétitivité et de rentabilité des opérateurs économiques, qui sont conduits à investir dans les pays où les conditions pédoclimatiques, les coûts de la main d'œuvre et d'accès au foncier sont les plus avantageux. Cela peut d'une part entraîner une compétition avec la production alimentaire pour les meilleures terres, et d'autre part faire advenir une situation paradoxale où, dans le cadre d'une production de commodités à destination des marchés énergétiques internationaux (sauf si la demande domestique est solvable), la rente foncière et la rente liée aux ressources naturelles sont captées dans les pays mêmes où l'accès à l'énergie est un facteur de précarité et un frein au développement, et où, de surcroît, l'accès à l'alimentation est problématique. Des dynamiques de concentration foncière et de développement de grands systèmes industriels, quelle que soit l'efficacité économique à laquelle elles sont associées, ne vont pas spontanément dans le sens d'objectifs de développement rural et d'amélioration de la sécurité alimentaire (*voir partie 2.2.5. Controverses sur les effets des filières bioproduits sur le développement rural*). La question de la sécurité alimentaire ne se limite pas, en effet, à celle de la productivité agricole et des surfaces mises en valeur, mais concerne avant tout l'accès des populations aux biens alimentaires, et donc à leurs opportunités de mener une activité rémunératrice et durable.

Le scénario 3 envisage quant à lui la concurrence entre usages alimentaires et non alimentaires dans une perspective d'interdépendance Nord-Sud, d'affirmation de stratégies nationales souverainistes vis-à-vis de l'énergie, et de division internationale du travail (production de biomasse / transformation et consommation de bioproduits). Dans une telle configuration, certains pays pourraient subir de fortes pressions foncières. Selon les rapports de force, qui s'expriment dans le cadre des relations bilatérales dans ce scénario, les capacités de maîtrise de ce phénomène et de ses retombées internes par les Etats et par les populations concernées sont loin d'être acquises.

Ces deux scénarios mettent particulièrement en avant le fait que les effets du développement de nouvelles filières biomasse en matière d'emplois, de droits des travailleurs, de revenus, et d'accès à l'énergie pour les populations rurales concernées sont fortement conditionnés par la nature des systèmes de production et des filières de biomasse développés et surtout par les configurations institutionnelles qui les encadrent : structuration du secteur agricole et organisation des acteurs, sécurité du droit foncier, politiques agricoles

des pays producteurs, modalités de contractualisation entre Etats, compagnies et acteurs locaux, et modes de régulation des marchés internationaux.

Les scénarios 2 et 4 illustrent, par construction, des situations plus vertueuses sur le plan de la gouvernance et des objectifs de durabilité affichés. Des régulations à l'échelle internationale associées à des modalités de gouvernance s'articulant avec les échelons locaux et nationaux, sont censées maintenir un équilibre entre filières et usages de la biomasse et orienter l'essor de la production vers les zones les plus adéquates du point de vue des ressources naturelles et des écosystèmes. Concrètement, ces modalités restent largement à définir.

Le scénario 2 opte pour des systèmes ayant une gouvernance centralisée ; il comporte le double risque d'une inadaptation des techniques élaborées aux contextes locaux et d'une fragilité des systèmes technologiques à des événements inattendus (en privilégiant une seule voie d'innovation), mais avec la promesse d'une efficacité industrielle accrue. Le scénario 4 présente des modes de gouvernance plus territorialisés, jouant d'une diversité de technologies et s'appuyant sur les acteurs locaux, mais avec possiblement une moindre efficacité énergétique ou un moindre impact à moyen terme sur la réduction des gaz à effet de serre.

L'implication de nouveaux acteurs issus des secteurs de l'énergie, de la gestion de l'environnement ou de la chimie n'en reste pas moins susceptible, dans ces deux scénarios « durables », de transformer en profondeur les filières agricoles et forestières concernées. Pour les exploitations agricoles et forestières, les modalités d'insertion dans les marchés et au sein des nouvelles filières peuvent prendre des formes contrastées. Penser et anticiper ces évolutions en prenant en compte l'ensemble de leurs fonctions et de leurs liens aux territoires reste un défi de taille.

Conclusion générale

Les attentes vis-à-vis des bioproduits se multiplient : production d'énergie renouvelable et faible en émission de gaz à effet de serre, réduction de la dépendance aux énergies fossiles, fourniture de carbone renouvelable pour le secteur de la chimie, redynamisation du secteur agricole et des économies rurales. Comme l'analyse des controverses scientifiques et sociétales sur les biocarburants le laisse entendre (cf. partie 2-2), la performance environnementale, économique et sociale des filières bioproduits reste un sujet de préoccupation et un champ d'innovation pour les décennies à venir. Les modes d'évaluation de ces nouveaux usages et des filières émergentes se perfectionnent, à mesure que la connaissance des processus qu'ils engagent progresse.

La nécessité, pour aborder la question du devenir des usages de la biomasse, de « voir loin et large »⁴⁴ s'est très nettement réaffirmée à l'issue de cette réflexion prospective : pour penser le futur des bioproduits et de la bioénergie et concevoir des trajectoires durables, il faut au préalable anticiper à long terme leurs modes d'insertion dans les systèmes énergétiques et alimentaires de demain, et ce aussi bien à une échelle territoriale que mondiale. A cet égard, les scénarios de devenir des usages non alimentaires de la biomasse à l'horizon 2050 présentent ici quatre trajectoires possibles. Toutes sont plausibles, certaines tendances sont plus probables que d'autres, et certaines évolutions plus propices à un développement durable que d'autres. Comme dans tout exercice de prospective, d'autres trajectoires auraient pu être envisagées ; il aurait également été pertinent de caractériser et différencier plus finement les trajectoires d'évolution selon les régions du monde. Les quatre visions contrastées présentées ici ont toutefois le mérite d'appréhender, ensemble, les principaux facteurs d'incertitude qui entourent aujourd'hui l'évolution des usages de la biomasse. Elles pointent notamment des problématiques qui font échos aux controverses actuelles :

- Quel modèle de marché pour les filières biomasse dans un contexte de libéralisation et de fortes demandes alimentaire et énergétique ?
- Quelle place de la biomasse dans un mouvement de modernisation écologique des secteurs d'activité, visant une sortie des ressources fossiles et à une limitation des émissions de GES ?
- Quelles implications possibles d'un développement de la biomasse dans un contexte international d'insécurité énergétique et de dynamique de substitution massive aux énergies fossiles ?
- Quelle place de la biomasse dans un mouvement de reterritorialisation des systèmes énergétiques et alimentaires, et d'innovation inter-sectorielle « intégrée » au niveau territorial (durabilité, efficacité, robustesse) ?

Les scénarios esquissent des réponses à ces quatre questions. Des trajectoires et des types d'innovation différents y sont associés. Le premier scénario est principalement fondé sur une innovation technologique de nature incrémentale et sur des innovations marchandes qui répondent à des demandes spécifiques des consommateurs ; le second repose sur une innovation centralisée et univoque qui s'appuie sur des technologies de rupture et répond à une demande globale de durabilité des citoyens ; le troisième privilégie une innovation centralisée orientée vers l'industrie et répondant à des enjeux géopolitiques ; dans le dernier scénario, l'innovation est plurielle et décentralisée et allie une dimension technologique et organisationnelle tout en s'appuyant sur une variété d'acteurs du territoire, dont notamment les usagers.

Les facteurs moteurs de l'innovation sont également distincts d'un scénario à l'autre. Dans le premier, l'innovation est principalement le fait des grandes entreprises agroindustrielles et du secteur de l'énergie, et est orientée vers la compétitivité des bioproduits sur les marchés ; dans d'autres scénarios, ce sont les États en association avec des macro-acteurs privés qui pilotent, motivés par des objectifs de développement durable, de modernisation et de croissance vertes dans un cas (sc.2), de sécurité énergétique dans l'autre (sc.3) ; dans le quatrième, l'innovation résulte davantage de coordinations d'acteurs privés et publics au plan territorial.

⁴⁴ Berger G., 1958. L'attitude prospective. *Prospective 1*, pp. 1-10.

Les innovations sont soit plutôt orientées par les usages finaux (sc.2), soit par les ressources en biomasse disponibles (sc.3), soit encore par une adéquation entre les deux et en accord avec d'autres usages du territoire (sc. 4). Les entreprises privées, les grands groupes industriels, les PME, les producteurs de biomasse (agriculteurs, forestiers, etc.), l'Etat, les collectivités territoriales, les usagers, les consommateurs et les citoyens sont impliqués à des échelles très différentes dans les dynamiques d'innovation. Finalement, les quatre scénarios procèdent de filières et de schémas de développement différents : inscrits dans des logiques d'incorporation ou de substitution totale, positionnés sur des segments de marché ou sur des marchés de masse, répondant à des demandes territorialisées ou à une demande internationale.

En esquissant à grands traits ces diverses dynamiques d'innovation, la réflexion prospective a mis particulièrement en avant le fait que le futur des usages de la biomasse ne peut être envisagé qu'à l'aune des orientations mises en œuvre par les politiques publiques, du positionnement des acteurs, du fonctionnement des marchés et des évolutions sociétales, pris conjointement. Un élément commun aux quatre scénarios apparaît nettement : tous reposent sur des interactions spécifiques, des synergies et des hybridations entre acteurs de mondes différents (sectoriels, scientifiques, institutionnels). Au travers de ces configurations, les scénarios interrogent tout particulièrement le positionnement de la recherche publique : son rôle dans la production et la circulation des connaissances, sa relation à la propriété intellectuelle ou encore ses interactions avec les autres acteurs de la recherche et de l'innovation.

L'illustration quantifiée très schématique des quatre scénarios *VegA*, sans prétendre avoir une portée prédictive, apporte un éclairage sur les enjeux et limites des scénarios. Si, avec les moyens actuels de production et de transformation, l'offre en biomasse devait répondre à une demande comprise entre 720 et 1150 Mtep pour les seuls « nouveaux » usages – c'est à dire pour les transports (biocarburants liquides), la production d'électricité et de chaleur (hors usages en combustion directe, dits traditionnels) et la production de biomolécules – les surfaces à mobiliser seraient comprises entre 275 et 925 millions d'hectares. Ces ordres de grandeur écartent la possibilité de répondre à des demandes massives en biomasse dans une perspective de développement durable en ne se basant que sur des cultures dédiées (qu'elles soient de 1^{ère} ou de 2^{ème} génération), et invitent à la prudence quant aux projections de long terme réalisées sur l'utilisation de la biomasse pour l'énergie et la chimie. L'inefficacité d'un recours massif à la biomasse en l'absence de politique de réduction de la consommation énergétique est apparue très nettement. Enfin, ces résultats appellent à considérer non seulement les tensions possibles avec les usages alimentaires, mais aussi avec les usages non alimentaires de la biomasse déjà existants.

Cette analyse quantifiée met également en évidence que la question de la concurrence entre filières alimentaires et non alimentaires dépasse la dimension purement spatiale du phénomène (l'enjeu n'est pas la limitation de l'espace : il reste d'importantes surfaces cultivables dans le monde, bien que très inégalement réparties géographiquement) : elle réside davantage dans la portée environnementale et sociale de la mobilisation de ces terres, et dans les contributions qu'elle peut apporter et les contraintes qu'elle peut faire peser sur les trajectoires de développement ; tout particulièrement sur les dynamiques agricoles dans les pays du Sud, qui sont absolument déterminantes pour répondre aux défis alimentaires mondiaux, à court et à long termes. En somme, ces réflexions invitent à revenir sur une simplification trop courante du débat sur la biomasse qui consiste à penser son devenir en termes de flux d'énergie, de carbone et en comptabilité de surfaces uniquement.

Naturellement, les modes de gouvernance et de régulation seront décisifs pour maîtriser les effets de ces nouveaux usages et encourager leur adéquation avec les objectifs de développement durable. Au niveau territorial se joueront les interactions entre activités de production et ressources naturelles (eau, sol, biodiversité), les relations territoriales entre villes et campagnes (complémentarité, dépendance, fracture territoriale), et l'adéquation entre les différents usages productifs et non productifs de l'espace (gestion ségréguée par différenciation et spécialisation des espaces, ou gestion spatiale de la coexistence). Suivant les cas de figure, les modèles économiques des filières biomasse et les politiques publiques en appui peuvent se construire à l'échelle nationale, internationale ou territoriale. Certains enjeux comme l'alimentation, la réduction des gaz à effet de serre, le foncier, la biodiversité appellent des régulations internationales : dans la plupart des scénarios, les politiques publiques nationales de soutien aux

bioproduits ont également des conséquences hors de leurs frontières, dans des pays tiers, producteurs de biomasse ou de bioproduits. Une coordination internationale – et notamment une coopération Nord-Sud – apparaît d'autant plus incontournable pour accompagner la globalisation des marchés des bioproduits ; en particulier, la mise en place d'outils et d'institutions de régulation des interactions entre marchés agricoles et énergétiques. Enfin, un enjeu majeur de la gouvernance semble être la mise en œuvre de formes de régulations territoriales qui accompagnent les politiques incitatives de développement des filières biomasse, et permettent d'anticiper leurs effets (sociaux, environnementaux, économiques). A cet égard, il n'est pas certain qu'une régulation des marchés de bioproduits (par des dispositifs de certification-standardisation) soit, seule, en mesure de traiter ces enjeux.

Bibliographie

- Académie des Technologies, 2010. *Les biocarburants*, Editions Le Manuscrit, 167p.
- ADEME, 2010. Analyses de Cycle de Vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France - Rapport final. Février 2010.
- AEE, 2006. How much bioenergy can Europe produce without harming the environment? Rapport AEE No 7/2006, 72 p.
- AIE 2007. *World Energy Outlook 2007. China and India Insights*.
- AIE, 2008. *Energy Technology Perspective, Scenarios and Strategies to 2050*. Paris: IEA, 650 p.
- AIE, 2009. Key world energy statistics 2009.
- Alcimed. 2007. Marché actuel des bioproduits industriels et biocarburants et évolution à échéance 2015-2030, ADEME.
- Bamière L., Bureau, J.C., Guindé, L., Guyomard, H., Jacquet, F., Tréguer, D., 2007. Prospects for EU biofuel production and trade. *Agricultural Trade Agreements Working Papers*, n°7221, 37 p.
- Barthelon S., Boche M., Mondet F., 2010. Transactions foncières internationales à grande échelle : Quelle évolution de la gouvernance, du droit international et des politiques publiques autour de ce phénomène à l'horizon 2050 ? INRA - AgroparisTech, 68p.
- Benoist A., Dron D., Rabl A., Zoughaib A., 2008. Analyse critique des études existantes sur la production et l'utilisation des carburants végétaux. Critique des analyses de cycle de vie et bilans énergétiques, et recommandations d'approfondissement. Rapport final 2^e partie, Edition Ecole des Mines de Paris, ARMINES, 154 p.
- Benoist A., Dron D., Rabl A., Zoughaib A., 2008. Méthodologie de l'Analyse de Cycle de Vie. Normes et méthodes courantes. Rapport final 1^{ère} partie, Edition Ecole des Mines de Paris, ARMINES, 58 p.
- Bernard, F., 2008. Analyse de la demande et des mesures de promotion françaises de biodiesel à l'horizon 2010. Thèse de Doctorat en économie de l'environnement et des ressources naturelles, Agro Paris Tech.
- Bindraban, P., E. Bulte and S. Conijn, 2009. Can Large-Scale Biofuels Production be Sustainable by 2020 ? *Agricultural Systems*, 101: 197-199.
- Blaschek H. P., Ezeji T. C., et N. D. Price. 2010. Present and Future Possibilities for the Deconstruction and Utilization of Lignocellulosic Biomass. In: Khanna M., Scheffran J. and Zilberman D., *Handbook of Bioenergy Economics and Policy*. New York, USA: Springer, pp. 39-51.
- Boltanski (Luc), Thévenot (Laurent), *De la justification. Les économies de la grandeur*, Paris, Gallimard, 1991.
- Bouba-Olga O., Boutry O., Rivaud A., 2009. Un approfondissement du modèle exit-voice par l'économie de la proximité. Dossier « Économie de la proximité », *Natures Sciences Sociétés*, n°17, pp. 381-390.
- Brown N., Rip A. et Van Lente H., 2003. Expectations in and about Science and Technology, background paper for the workshop "Expectations in Science & Technology", 13-14 June 2003, Utrecht.

- Bureau J.C., 2006. Une nécessaire évaluation globale des biocarburants. Dossier INRA SIA - chimie verte. http://www.inra.fr/presse/evaluation_des_biocarburants
- Bureau J.-C., Guyomard H., Jacquet F. ; Tréguer, 2010. European Biofuel Policy: How Far Will Public Support Go ? In: Khanna M., Scheffran J. and Zilberman D., *Handbook of Bioenergy Economics and Policy*. New York, USA: Springer. Vol 33, pp. 401-425.
- Cailleux M., Even M-A, 2009. Les biocarburants : opportunité ou menace pour les pays en voie de développement ? *Prospective et évaluation - Analyse*, n° 3, 4 p.
- Callon, M., Lascoumes, P., et Barthes, Y., 2001. *Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique*, Paris, Editions du Seuil.
- Cannell M.G.R., 2003. Carbon sequestration and biomass energy offset: theoretical, potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK. *Biomass and Bioenergy*, 44, 97-116.
- Carolan M. S., 2010. Ethanol's most recent breakthrough in the United States : A case of socio-technical transition. *Technology in Society*, 32: 65-71.
- Carpenter S. R., Pingali P. L., Bennett E. M., Zurek M. B. (éds), 2005. Ecosystems and Human Well-being: Scenarios, Volume 2, *The Millennium Ecosystem Assessment*, Washington DC, pp. 73-448.
- Chaumet J.M., Ronzon T., 2009. La prospective Agrimonde, premières réflexions pour alimenter durablement 9 milliards de personnes en 2050. *POUR*, n°202-203, décembre 2009.
- Chessel M.-C., Cochoy F., 2004, Autour de la consommation engagée : enjeux historiques et politiques. *Sciences de la Société*, n°62, mai 2004.
- Colonna P., 2006. *La chimie verte*. Tec et Doc, 532 p.
- Commission Européenne, 2007. World Energy Technology Outlook – WETO H2, Office for Official Publications of the European Communities, 161 p.
- Cotula, L., Vermeulen, S., Leonard, R. and Keeley, J., 2009. Land grab or development opportunity? Agricultural investment and international land deals in Africa. IIED/FAO/IFAD, London/Rome.
- Crutzen P. J., Mosier A. R., Smith K. A. et Winiwarter W., 2008. N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8: 389-395.
- Delpal F. et Hatchuel G., 2007. La consommation engagée s'affirme comme une tendance durable. *CREDOC Consommation et modes de vie* n° 201 - mars 2007, 4 p.
- Dewey John, 2003. *Le public et ses problèmes*, traduit et préfacé par Joëlle Zask, Publications de l'Université de Pau-Farrago/éditions Léo Scheer.
- Dorin et Gitz, 2008. Écobilans de biocarburants : une revue des controverses. *Natures Sciences Sociétés*, vol. 16, n 4, pp 337-347.
- Dronne Y., Forslund A., Gohin A., Guyomard H., Levert F., 2007. Impacts du développement des biocarburants aux États-Unis et dans l'UE sur les marchés internationaux de produits de grandes cultures. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, vol. 14, n°6, pp. 347-353.
- Dubuisson-Quellier S., 2009. *La consommation engagée*, Editions Presses de Sciences Po, 143 p.
- FAO, 2007. *Forests and energy in OECD countries*.
- FAO, 2008a. *Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. Les biocarburants : perspectives, risques et opportunités*. 156p.
- FAO, 2008b. *Les forêts et l'énergie. Questions principales*.

- FAO, 2009a. *Situation des forêts*.
- FAO, 2009b. *Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. Le point sur l'élevage*. 196 p.
- FAO, 2009c. *The State of Agricultural Commodities Markets 2009. High food prices and the food crisis - experiences and lessons learned*.
- Fargione, J., J. Hill, D. Tilman, S. Polasky and P. Hawthorne, 2008. Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, 319: 1235-1238.
- Feuilloley P., Bellon-Maurel V., Silvestre F. et Cecutti F. Biodégradabilité : un atout pour la préservation des milieux biotiques. In : Colonna P., 2006. *La chimie verte*. Tech et Doc, 156 p.
- Fischer G., Hizznyik E., Prieler S., Shah M., Van Velthuisen H., 2009. IIASA/OFID, 228 p.
- Fondri, 2008. *Étude « Scénarios sous Contrainte Carbone »*. Rapport Complet, Cired, Enerdata, Leppii, 92 p.
- Forslund A., Guyomart H., *à paraître*. Les utilisations non alimentaires de la biomasse et la concurrence pour l'utilisation des terres: belles promesses ou vraies craintes? Rapport RST de l'Académie des Sciences (en partenariat avec l'Académie d'Agriculture de France), Démographie, Climat et Alimentation Mondiale.
- Fraiture (de) C., Giordano, M. et Yongsong, L., 2007. *Biofuels and implications for agricultural water use: blue impacts of green energy*. Paper presented at the International Conference on Linkages between Energy and Water Management for Agriculture in Developing Countries, ICRISAT Campus, Hyderabad, Inde, 29-30 janvier 2007. Colombo, Institut international de gestion des ressources en eau.
- Geels F. W. et Schot J., 2007. Typology of sociotechnical transition pathways, *Research Policy*, 36 (3): 399-417.
- GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC, 103 p.
- Global Subsidies Initiative, International Institute for Sustainable Development, 2007. Biofuels – At what cost ? Government support for ethanol and biodiesel in selected OECD countries. A synthesis of reports addressing subsidies for biofuels in Australia, Canada, the European Union, Switzerland and the United States.
- Havlík P., Schneider U. A, Schmid E., Böttcher H., Fritz S., Skalský R., Aoki K., De Cara S., Kindermann G., Kraxner F., Leduc S., McCallum I., Mosnier A., Sauer T., Obersteiner M., *à paraître*. Global land-use implications of first and second generation biofuel targets, *Energy Policy*.
- Hirschman, A.O., 1986. *Vers une économie politique élargie*, Paris, Éditions de Minuit.
- His S., 2007. Panorama 2007 - Les nouvelles filières biocarburants. IFP, 6 p.
- Hoogwijk M., Faaij A., Van den Broek R., Berndes G., Gielen D. and Turkenburg W., 2003. Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy. *Biomass and Bioenergy*, 25 (2): 119-133.
- Hoogwijk M., 2004. On the global and regional potential of renewable energy sources, Université d'Utrecht.
- Hourcade J.C., Crassoux R., 2008. Low-carbon societies: a challenging transition for an attractive future. *Climate Policy*, 8 (6) 607-612.
- Hourcade, J.C. 2008. Enjeux géopolitiques du développement durable. *Etudes*, Tome 408, SER-SA, pp. 175-186.

- IAASTD (International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development), 2009. Global Report.
- IFPRI, 2008. Biofuels and grain prices : impact and policy responses.
- Fischer G., van Velthuisen H.T., Shah M., Nachtergaele F.O., 2002. Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century : Methodology and Results. IIASA.
- INRA-Cirad, 2009. Agrimonde, agricultures et alimentations du monde en 2050 : scénarios et défis pour un développement durable. *Rapport final de la prospective INRA-Cirad Agrimonde (février 2009)*.
- Institut de l'élevage, 2007. Les biocarburants et l'élevage, Atout ou menace pour les ruminants ? *Le dossier Economie de l'Elevage*, n°373, 44 p.
- 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.(eds.)], Geneva, Switzerland, 104 p.
- Jacquet F. et alii, 2007. Les enjeux du développement des biocarburants dans l'Union européenne. *INRA Sciences Sociales*, n°2-3, 6 p.
- Jinke van Dam et alii, 2008. Overview of recent developments in sustainable biomass certification. *Biomass and Bioenergy*, 32 (8) 749-780.
- Jose C. Escobar et al, 2008. Biofuels : environment, technology and food security. *Renewable and sustainable energy reviews*.
- Koh, L. P. and J. Ghazoul, 2008. Biofuels, biodiversity, and people: Understanding the conflicts and finding opportunities. *Biological Conservation*, n°141, pp. 2450-2460.
- Koning N. et Mol A.P.J, 2009. Wanted: institutions for balancing global food and energy markets. *Food Security*, 1 (3): 291-303.
- Laherrère J., 2006. La fin du pétrole bon marché. Pourquoi les informations sur les réserves sont si peu fiables et controversées. *Futuribles*, n°315, pp.15-47.
- Lallement R. (rap.), 2006. Quel système de propriété intellectuelle pour la France d'ici 2020 ?, rapport du groupe PIETA, Commissariat général du plan.
- Lascoumes P., Le Bourhis J-P., 1998. Le bien commun comme construit territorial. Identités d'action et procédures. *Politix*, vol.11, n°42, pp. 37-66.
- Lorne D. et Bonnet J.-F., 2009. Eau et biocarburants à l'horizon 2030. Impacts sur l'eau du développement des biocarburants en France à l'horizon 2030. *Les cahiers du CLIP*, 98 p.
- Marshall Didier et alii, 2008. Critères et indicateurs de production durable. *Biomass and bioenergy*, vol. 32, pp. 749-780.
- Martin-Amouroux Jean-Marie, 2009. Le grand retour du charbon. *Futuribles*, n°57, novembre 2009.
- Melillo J. M., Gurgel A. C., Kicklighter D. W., Reilly J. M., Cronin T. W., Felzer B. S., Paltsev S., Schlosser C. A., Sokolov A. P. et Wang X., 2009b. Unintended Environmental Consequences of a Global Biofuels Program. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Rapport n° 168.
- Melillo J. M., Reilly J. M., Kicklighter D. W., Gurgel A. C., Cronin T. W., Paltsev S., Felzer B. S., Wang X., Sokolov A. P. et Schlosser C. A., 2009a. Indirect Emissions from Biofuels: How Important? *Science*, 4 décembre 2009, pp. 1397-1399.

- Merlet M., 2010. Les grands enjeux de l'évolution du foncier agricole et forestier dans le monde. *Etudes foncières*, n°142.
- Merlet, M., Jamart, C., 2009. Pressions commerciales sur la terre dans le monde - Problématique et cadre conceptuel pour l'étude de l' ILC. AGTER.
- Meyer S. et Thompson W., 2009. Demand Behavior and Commodity Price Volatility Under Evolving Biofuel Markets and Policies. In : *Handbook of Bioenergy Economics and Policy*, 33, pp. 133-149.
- Mol, A.P.J., 2008. Biofuel controversies in a globalizing world. Environmental Policy group, Dies Natalis, 2008-03-07.
- Mora O. (coord.), 2009. *Les nouvelles ruralités à l'horizon 2030*, Editions Quae, 112 p.
- Nowotny H., Scott P. et Gibbons M., 2001. *Re-Thinking Science: Knowledge and the Public in an Age of Uncertainty*, Polity Press, 278 p.
- Nowotny H., Scott P., Gibbons M., 2003. 'Mode 2' Revisited: The New Production of Knowledge. *Minerva*, n°41, pp. 179-194.
- OCDE, 2008. *Biofuel Support Policies: An Economic Assessment*, OECD publishing, 150 p.
- OCDE/AIE, 2008. *World Energy Outlook 2008*.
- OCDE/AIE, 2008. *From first to second generation biofuels technologies*.
- OCDE/AIE, 2010. *Sustainable production of second-generation biofuels*.
- OCDE/FAO, 2008. *Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO: 2008-2017*, 83p.
- ONU, 2006. *World Population prospects: the 2006 revision*.
- Paillard S., Treyer S., Dorin B. (sous la dir. de), à paraître en 2010. *Agrimonde : Scénarios et défis pour nourrir le monde*, Editions Quae.
- Paillard S. (rap.), 2002. La France dans l'économie du savoir : pour une dynamique collective, rapport du Commissariat général au Plan.
- Pestre D., 2003. *Science, argent et politique : un essai d'interprétation*, INRA Edition, 201 p.
- Pestre D., 2006. *Introduction aux Sciences Studies*, Ed. La Découverte, Collection Repères, 128 p.
- PNUE, 2008. *Crise alimentaire et environnement, le rôle de l'environnement dans la prévention des crises alimentaires*. 101 p.
- Prieur A., His S., 2007. Panorama 2007 - Les biocarburants dans le monde. IFP, 6 p.
- Rajagopal D. et Zilberman D., 2007. Review of environmental, economic and policy aspects of biofuels. *World Bank Policy Research Working Paper*, n° 4341. Washington, Banque mondiale, 109 p.
- Rajagopal D., Hochman G. et Zilberman D., 2009. A simple frame-work for regulation of biofuels. In : *Handbook of bioenergy economics and policy*, pp. 219-231.
- Rajagopal et Zilberman, 2007. Review of Environmental, Economic and Policy Aspects of Biofuels. *World Bank Policy Research Working Paper*, n°4341.
- Rip A., Joly P.-B., Callon M. (à paraître). Reinventing Innovation. In : M. Arensten (eds), *Governance and innovation*, Ed. Edward Elgar.
- Rosegrant M.W., 2008. Biofuels and Grain Prices : Impacts and Policy Responses. IFPRI.
- Roudart L., Even M.A., 2010. Terres cultivables non cultivées : des disponibilités suffisantes pour la sécurité alimentaire durable de l'humanité. Analyse n°18, Centre d'Etudes et de Prospective du MAAP.

- Searchinger, T., R. Heimlich, R. A. Houghton, F. Dong, A. Elobeid, J. Fabiosa, S. Tokgoz, D. Hayes and T. H. Yu, 2008. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, 319: 1238-1240.
- Schimel D.S., 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology*, 1: 77-91.
- Sims R.E.H., Hastings A., Schlamadinger B., Taylor G., Smith P., 2006. Energy crops: current status and future prospects. *Global Change Biology*, 12: 2054-2076.
- Thamsiriroj T. and Murphy J.D., 2009. Is it better to import palm oil from Thailand to produce biodiesel in Ireland than to produce biodiesel from indigenous Irish rape seed? *Applied Energy*, 86 (5): 595-604.
- The Royal Society, 2008. Sustainable biofuels: prospects and challenges. Policy document 01/08, Londres.
- Torre, A., Caron, A., 2002. Conflits d'usage et de voisinage dans les espaces ruraux. *Sciences de la Société*, n°57, pp. 95-113.
- UNECE-FAO, 2009. Revue annuelle du marché des produits forestiers 2008-2009.
- Von Braun, J., Meinzen-Dick, R., 2009. "Land Grabbing" by Foreign Investors in Developing Countries: Risks and Opportunities. *IFPRI Policy Brief*, n°13.

ANNEXE 1 - Liste des personnes auditionnées

Eric Vidalenc, Service Observation, Economie et Evaluation de l'ADEME

Martino Nieddu et Estelle Garnier, chercheurs à l'UFR Sciences économiques et Gestion de l'Université de Reims

Jean-Paul Cadoret, responsable du laboratoire Physiologie et Biotechnologie des Algues du département Biotechnologies Marines de l'Ifremer

Elisabeth Le Net (Direction Economie, Energie, Prospective) et Anne Varet (Directrice Innovation Recherche) du FCBA (institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement)

Jean Jaujay, Gérard Mathieu et Claude Roy, Conseillers Généraux de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Espaces Ruraux

ANNEXE 2 : Les Hypothèses par composante

Composante 1 : Ressources énergétiques et en carbone en 2050

Les évolutions à venir du paysage énergétique mondial et les transformations possibles des systèmes sont des aspects déterminants des usages futurs de la biomasse qui vont conditionner la place de la bioénergie et des biomolécules. Trois axes ont été explorés pour formuler des microscénarios contrastés sur cette composante.

Le devenir de la production de carbone fossile

En premier lieu, différentes hypothèses portant sur l'état futur de la production de combustibles d'origine fossile ont été envisagées, étant donné leur rôle prépondérant dans les systèmes énergétiques mondiaux actuels (cf. Partie 2). Les fortes incertitudes concernant le pic – ou le plafond – de production de pétrole (peak-oil) et de gaz ont conduit à formuler deux hypothèses contrastées, prenant notamment en compte l'évolution des capacités de production et la mise en œuvre de voies technologiques pour substituer le pétrole par le charbon pour un certain nombre d'usages (pour les transports notamment).

(1) Une première hypothèse envisage des investissements massifs et des innovations dans les secteurs pétroliers et gaziers, qui **maintiennent un niveau d'offre en pétrole et en gaz** relativement conséquent jusque dans les années 2050, bien que décroissant à partir des années 2020-2025, mais surtout **un recours accru au charbon**. Les coûts de production du pétrole et du gaz augmentent graduellement sur la période ; le charbon, qui s'y substitue en partie, atteint en 2050 une place centrale dans la production de carbone fossile.

(2) Selon une seconde hypothèse, un **déclin plus précoce et plus marqué** de la production de pétrole intervient, suivi de celui du gaz. Malgré une augmentation de la production de charbon, des épisodes réguliers de carence de la production par rapport aux niveaux de consommation provoquent de fortes tensions sur les marchés de l'énergie, et de grandes fluctuations des prix du carbone fossile sur toute la période.

Innovations sur les sources, les vecteurs et les usages énergétiques

Un deuxième axe de réflexion a porté plus largement sur les transformations possibles relatives aux sources, aux vecteurs et aux usages énergétiques dans les transports, dans le secteur résidentiel-tertiaire et le secteur industriel. Trois hypothèses d'évolution ont été envisagées.

(1) Une **hypothèse au fil de l'eau** correspond à une situation où, en 2050, ni le type de sources mobilisées ni les modes de production et d'usage de l'énergie n'ont connu de changement radical. L'innovation est principalement de nature incrémentale. Elle concerne par exemple dans le domaine des transports, la taille et le poids des véhicules (véhicules urbains), la performance des carburants, la baisse des émissions de polluants (particules etc.), ou encore dans le secteur résidentiel l'amélioration de l'isolation thermique des logements neufs. Le carbone d'origine fossile reste la source majoritaire pour la production d'électricité et de chaleur, de même que pour les transports.

(2) Une seconde hypothèse explore **une transition radicale des systèmes énergétiques qui s'affranchissent des ressources fossiles et intègrent des finalités environnementales**. Cette transformation repose sur des innovations technologiques de rupture, qui portent à la fois sur les grands réseaux énergétiques et sur les usages de l'énergie. Dans la production d'électricité, les énergies fossiles sont peu à peu remplacées par l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables. Le secteur des transports se « décarbonise », avec l'émergence de véhicules à hydrogène et électriques. L'amélioration de l'efficacité énergétique au niveau de la production, de la distribution et des usages de l'énergie constitue un axe majeur d'innovation. Dans les domaines de l'habitat (reconfiguration énergétique des logements, bâtiments passifs,...) et de l'industrie (application des principes de l'écologie industrielle) notamment. Ces innovations permettent de réduire fortement la consommation énergétique. De profonds changements dans les pratiques, globalement plus économes, accompagnent ces transformations.

(3) Une autre voie de transition énergétique, qui est une variante de l'hypothèse précédente, a également été envisagée, sur le principe d'une **réorganisation profonde des infrastructures et des réseaux énergétiques, en lien avec des dynamiques d'aménagement des territoires et les évolutions des modes de vie**. Cette hypothèse considère une reconfiguration spatiale progressive de la fourniture, de la distribution et de la consommation de l'énergie à l'échelle des territoires métropolitains et ruraux, associée à une transformation des localisations, des échanges et des déplacements qui participerait à la maîtrise des besoins en énergie. Des solutions énergétiques décentralisées sont développées pour un certain nombre d'usages et de configurations territoriales, en fonction des ressources et des technologies mobilisables, des acteurs, et des usagers. Les infrastructures de dimension collective se développent (réseaux de chaleur par exemple). Ainsi dans les transports, un recours à de **nouvelles combinaisons modales et un développement des transports collectifs interviennent**, de même que **l'utilisation de vecteurs énergétiques différents selon les usages** : par exemple, un recours à l'énergie électrique pour le transport dans les villes (moins polluante pour l'air), et des transports de plus longue distance basés sur des vecteurs plus facilement stockables et transportables (combustible fossile et biocarburants).

Evolution des politiques énergétiques

Appréhender le devenir des systèmes énergétiques appelle une réflexion sur l'évolution des politiques publiques de l'énergie, particulièrement structurantes dans ce secteur. En fonction des objectifs prioritaires qui leur seront possiblement assignés et des modes d'intervention privilégiés, quatre évolutions possibles ont été esquissées.

(1) Une première hypothèse considère des **politiques énergétiques fortement orientées par la prise en compte du changement climatique**. Des mesures volontaristes en faveur d'une économie faible en carbone adoptées par les Etats se traduisent dans des objectifs ambitieux de réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'innovation et le développement de nouvelles filières énergétiques sont soutenus par des aides publiques directes et indirectes, pour faire émerger une offre énergétique de substitution au carbone fossile.

(2) La seconde hypothèse explorée est celle d'une évolution vers des **politiques publiques guidées principalement par un objectif de souveraineté énergétique**. L'impératif de sécurité énergétique et de stabilité des approvisionnements inciterait les Etats à limiter le plus possible leur dépendance vis-à-vis du pétrole ou du gaz, dont la production est particulièrement concentrée géographiquement.

(3) Dans un troisième cas de figure, ce sont des **préoccupations liées à la robustesse et à la durabilité des systèmes énergétiques face à des ruptures potentielles** des approvisionnements ou à des aléas environnementaux (climatiques notamment) qui structurent les politiques publiques. Selon cette hypothèse, une diversification des sources est recherchée, avec en particulier un développement des énergies renouvelables et propres (émissions de GES entre autres), et la mise en œuvre de solutions énergétiques à des échelles territoriales, avec un rapprochement d'une partie de la production énergétique de son usage final.

(4) Enfin, une **situation de laisser-faire** où les politiques énergétiques sont faibles et n'imposent pas d'orientations fortes en termes d'objectifs et de moyens a été envisagée. De fait il s'agit d'une situation où les politiques énergétiques sont déléguées aux acteurs du marché de l'énergie. L'action publique se limite à l'édiction de réglementations et de normes encadrant les secteurs des transports et des services dans le sens d'une amélioration des performances énergétiques, environnementales et sanitaires des systèmes énergétiques.

Synthèse des hypothèses de la composante 1 et microscénarios :

Le tableau suivant relate les différentes hypothèses envisagées par le groupe de travail pour les différentes variables portant sur les évolutions des systèmes énergétiques et les microscénarios qui ont été construits sur cette base.

Composante 1 : Ressources énergétiques et en carbone en 2050

<i>Variables</i>	<i>Hypothèses d'évolution à 2050</i>			
Production de carbone fossile	Plateau puis déclin progressif pétrole et gaz – substitution charbon	Déclin précoce, forts aléas production et prix		
Innovations sources, vecteurs et usages énergétiques	Pas de rupture – innovations incrémentales	haute efficacité énergétique et environnementale - transition post-carbone	haute efficacité énergétique et environnementale – reconfiguration profonde des systèmes	
Politiques énergétiques	Délégation aux acteurs du marché, réglementations environnementales et sanitaires	politiques de souveraineté énergétique	politiques énergétiques fortes, orientées par lutte contre le changement climatique	politiques énergétiques de durabilité et robustesse des systèmes
	↓	↓	↓	↓
Microscénarios	Un système énergétique marqué par le charbon. Des innovations incrémentales	Stratégies sécuritaires dans un contexte de crise énergétique	Rupture, vers un système énergétique faible en CO2- fortes innovations sectorielles	Diversité des sources d'énergie, orientée vers la robustesse et l'adaptabilité des systèmes énergétiques

Composante 2 : Attentes des citoyens et des consommateurs vis-à-vis des bioproduits

Les attentes des citoyens et des consommateurs vont orienter le développement des bioproduits :

- (1) par leur participation, ou non, à la construction des marchés, notamment à travers la mise en place de labels et de certifications environnementales,
- (2) en orientant les débats publics, par leur implication dans les controverses sur les conséquences des bioproduits mais aussi, de manière réflexive, en redéfinissant les finalités des bioproduits, et
- (3) en déterminant dans les territoires le développement des filières bioproduits, à la fois de façon normative, lorsque, par exemple, ces filières s'insèrent dans des projets concertés de développement territorial, et réactive lorsque, par exemple, des conflits d'usages émergent autour de la production.

Les questions examinées dans cette composante ont trait à l'engagement des consommateurs sur les marchés⁴⁵, au rapport des individus au territoire, et à l'implication de groupes d'individus « concernés » dans les innovations sociotechniques (Callon et al., 2001). Chacune des hypothèses retenues ici s'insère dans un cadre plus général où se définissent des manières de relier les consommateurs et les marchés de bioproduit, que l'on qualifiera de « régime »⁴⁶. Les attentes des citoyens et des consommateurs en matière de bioproduits ne sont pas exprimées de manière abstraite en présupposant un système d'offre et de demande où les citoyens et les consommateurs n'auraient qu'à se positionner et à exprimer leur choix. C'est parce que des cadres d'échange et des produits marchands se sont structurés que les valeurs et les opinions portés par les individus peuvent s'exprimer sur les marchés ; par exemple sur la question du développement durable. On envisagera ainsi une diversité de situations de co-construction, qui vont d'une situation où l'offre et la demande sont requalifiées à une situation où l'offre et la demande sont déqualifiées. Ainsi, par exemple, les produits low-cost correspondent à une co-construction d'un engagement faible des consommateurs sur les marchés, à la fois par des acteurs du marché qui se spécialisent dans la mise en marché des produits à bas prix, et par des consommateurs qui de leur côté accordent une faible importance aux valeurs écologiques de préservation.

Le premier axe de réflexion s'intéresse aux **relations des consommateurs aux marchés**. Il s'agit d'examiner la co-construction (Callon et al., 2001) des bioproduits par les consommateurs et des consommateurs par les bioproduits en partant du mode d'engagement des consommateurs sur les marchés (Chessel et Cochoy, 2004). Trois hypothèses d'évolution des attentes des consommateurs et des pratiques de consommation ont été formulées : un consumérisme actif, une consommation civique et une consommation low-cost dominante.

- (1) Dans une première hypothèse, on assiste à l'ascension d'un **consumérisme structurant et actif** (voire activiste) et au développement de l'action organisée de groupes de consommateurs, dans la lignée des réflexions actuelles sur la consommation engagée (Dubuisson-Quellier, 2009 ; Delpal, 2007). Les associations de consommateurs et les représentants d'usagers renforcent les exigences de durabilité sur les bioproduits et participent à la définition de labels, de normes, de réglementation ; ils coproduisent, ainsi, les bioproduits (certification environnementale, éco-conception) et sont moteurs de leur émergence.
- (2) Dans une deuxième hypothèse, **les consommateurs suivent et se conforment à des recommandations et à des réglementations publiques** par leurs actes de consommation ; ces recommandations, reflétant des objectifs de consommation durable, fonctionnent comme des prescriptions. Cette hypothèse reprend des éléments de réflexion du modèle de justification de la cité civique (Boltanski et Thévenot, 1991).
- (3) Dans un troisième cas, on fait l'hypothèse d'une absence de stimulation par l'offre du marché des bioproduits, qui se justifie par un **environnement de marché dominé par des exigences de low-cost**,

⁴⁵ Sur ces questions de consumérisme et d'engagement des consommateurs sur les marchés, voir notamment les travaux de Marie-Emmanuelle Chessel et Franck Cochoy (2004).

⁴⁶ L'ensemble des réflexions présentées ici a bénéficié d'échanges avec Marc Barbier, qui nous a notamment proposé cette formation en termes de « régimes » ainsi que les formulations qualifiant le mode d'expertise et sa relation avec l'innovation.

avec éventuellement à la marge, pour des *happy few*, une offre plus spécifiée sur des bioproduits. Des normes *a minima* sont appliquées sur les produits.

Le second axe envisage le **type de rapport qu'ont les individus au territoire**, en s'inspirant des modèles *Voice/Exit/Loyalty* développés par Albert O. Hirschman (1986), des réflexions de Pierre Lascoumes (1998) sur le bien commun comme construit territorial, ainsi que de la conception des problèmes publics développée par John Dewey.

(1) Dans une première hypothèse, le territoire est pour les individus le lieu d'une *proximité sociale* et de *formulation collective des problèmes publics*. Les individus ont une vision territorialisée de leurs relations, marquées par la proximité géographique et sociale, et des interactions entre les différentes activités ; localement, ils prennent part aux débats sur le devenir du territoire et s'organisent autour d'enjeux qui les concernent en *examinant les conséquences collectives des actions individuelles* (Dewey, 2003).

(2) Dans une seconde hypothèse, les individus accordent *peu d'importance aux relations sociales de proximité* et sont peu impliqués dans la vie du territoire (*Exit*). Ils appartiennent à des réseaux sociaux multiples qui, pour la plupart, sont extérieurs au territoire ; il y a une *dissociation entre la proximité sociale et la proximité géographique* (Bouba-Olga et al., 2009). Cependant, étant soucieux à titre individuel de leur cadre de vie, les opérations d'aménagements et le développement de nouvelles activités sont fréquemment à l'origine de conflits d'usages et de voisinages (*Voice*).

Un troisième axe de réflexion envisage le **type de relations que les individus entretiennent avec les différents acteurs de l'expertise scientifique et avec les innovations sociotechniques**. Les trois hypothèses formulées s'articulent autour d'une discussion du modèle de la démocratie technique (Callon et al., 2001 ; Pestre, 2006).

(1) Une première hypothèse d'évolution que nous avons qualifié de **régime participatif** considère de nouvelles modalités de participation des individus fondées sur une implication croissante de citoyens ou de groupes de citoyens, qui fabriquent une *expertise multiple et collective*. Au sein d'*agoras constituées*, les débats avec les différents acteurs de l'innovation conduisent à la *définition d'orientations sociotechniques* où les *conséquences* des innovations sont *explorées* et prises en compte.

(2) Dans une seconde hypothèse qualifiée de **régime bureaucratique à expertise captive**, les individus, peu impliqués, *délèguent* les décisions concernant les orientations sociotechniques au politique et à l'expertise scientifique qui est directement mobilisé par l'Etat.

(3) La troisième hypothèse, **régime technocratique à expertise contradictoire**, décrit une situation de *délégation des choix sociotechniques* par les individus, où une *expertise contradictoire* avec une multiplicité d'acteurs (experts et contre-expert d'agences, de grandes ONG, d'acteurs privés) à l'échelle nationale et internationale (« Adhocratie ») évalue les orientations sociotechniques.

Le quatrième axe de réflexion prospective décrit **les configurations d'acteur qui déterminent l'innovation**. Trois hypothèses ont été formulées.

(1) La première envisage une **hybridation forte entre recherche publique et privée** qui peut évoluer jusqu'à une « annexion » de certains thèmes de recherche par des entreprises privées.

(2) La seconde considère une **innovation centralisée**, *Top-down*, pilotée par l'Etat (recherche publique) qui définit l'objectif de l'innovation et le type de recherche à développer, selon des alliances avec les acteurs privés pour le développement des technologies [proche du modèle de recherche en *mode 1*⁴⁷ développé par Nowotny (2001)].

(3) la troisième hypothèse envisage un **régime d'expérimentation collective** qui reprend le modèle développé par A. Rip, P.-B. Joly et M. Callon (*à paraître*). Il s'agit d'un régime d'innovation *distribué* et *ouvert* intégrant de *multiples acteurs*. Cela se traduit par des innovations *induites par les usagers*, fondés sur des « communautés » *d'utilisateurs* qui échangent entre eux sur les résultats de leurs expérimentations (sur le

⁴⁷ « The old paradigm of scientific discovery (Mode 1) characterised by the hegemony of disciplinary science, with its strong sense of an internal hierarchy between the disciplines and driven by the autonomy of scientists and their host institutions, the universities, was being superseded – although not replaced – by a new paradigm of knowledge production (Mode 2) which was socially distributed, application-oriented, trans-disciplinary and subject to multiple accountabilities. » (Nowotny et al., 2003).

modèle des communautés en *Open source* développant des logiciels). Dans ce modèle d'innovation distribuée, des acteurs hétérogènes qui détiennent des connaissances complémentaires interagissent, s'organisent en réseaux ou en communautés « créatives » ; ils coopèrent de manière informelle et co-construisent la technologie et son usage (Rip et al.). Dans ces innovations, l'engagement des acteurs ne concerne pas tant « la société civile » dans son ensemble, mais l'engagement sélectif de groupes de personnes concernées ou affectées par un problème. Il s'agit de collaborations entre professionnels « établis », scientifiques et des groupes de personnes concernées, autour de problèmes particuliers et situés, qui peuvent ensuite éventuellement évoluer vers des problématiques d'intérêt général. Pour la science, ce type d'innovations implique de nouvelles manières de travailler avec les acteurs, et une organisation complémentaire de la science confinée de « laboratoire », fondée sur des démarches ouvertes d'expérimentation collective, plus lentes, où les objectifs et les objets techniques sont construits peu à peu à travers la convergence d'acteurs hétérogènes⁴⁸.

Synthèse des hypothèses et microscénarios :

Composante 2 : Attentes des citoyens et des consommateurs vis-à-vis des bioproduits

Variables	Hypothèses d'évolution à 2050			
Mode de consommation	Consommation Low-cost	Consomérisme actif	Consommation civique	
Régime d'habiter et territoire		Peu de relations de proximité, des réseaux sociaux éclatés et une attention au cadre de vie	Territoire lieu de la proximité sociale	
Relation de la société aux sciences et aux techniques	Régime bureaucratique à expertise captive	Régime technocratique à expertise contradictoire	Régime participatif	
Régime d'innovation	Hybridation forte recherche publique et privée	Top-down, piloté par l'Etat et alliance avec acteurs privés	Multiacteurs, expérimentation collective, participation des usagers	
Microscénarios	Des attentes sociétales principalement déléguées au marché et différenciées	Une gestion étatique de l'innovation dans une situation de crise et d'engagement faible des consommateurs et citoyens	Un engagement civique pour les enjeux environnementaux et une gestion technocratique à expertise multiple	Un engagement participatif des individus sur la base d'une diversité de réseaux, notamment territoriaux

⁴⁸ « Here, however, the experimentation does not derive from promoting a particular technological promise, but from goals constructed around matters of concerns and that may be achieved at the collective level. Such goals will often be further articulated in the course of the experimentation. (...) There are (...) examples, ranging from the involvement of patient associations in health research (Rabeharisoa & Callon 2004), participatory plant breeding research experiments and exchange of experiences in 'peasants' networks' in France (Bonneuil et al. 2006), and bottom-up innovations in low-input agriculture (Wiskerke & Van der Ploeg 2004). Electric vehicles are surrounded by promises (about their being an alternative to the dominant regime of internal combustion engines), but are an occasion for collective experimentation. Hoogma et al. (2002) have analysed social experiments with electric vehicles over the last few decades, and identified limitations, particularly missed opportunities for learning. » (Rip et al., à paraître)

Composante 3 : Filières bioproduits et innovations

Cette composante explore plusieurs trajectoires possibles d'évolution des filières biomasse, avec des dynamiques possiblement différenciées selon les usages concernés, pour l'énergie et la chimie. L'émergence de voies technologiques nouvelles est envisagée, ainsi que des configurations différentes des filières selon les acteurs impliqués dans leur développement. Enfin, sont évoqués à grands traits les caractéristiques possibles de ces filières en termes de structuration spatiale et de mode d'insertion dans les marchés.

La cartographie des acteurs impliqués – ou pouvant l'être à l'avenir – dans les filières bioproduits est aujourd'hui relativement peu développée. Des formes organisationnelles très variées peuvent être concernées tout au long du processus de production, transformation, distribution et usage des bioproduits (source : livrable de la tâche 12 de l'ARP *VegA*) :

- Production de la ressource : Exploitant individuel, coopératives / groupement de producteurs, TPME ou PME, propriétaire « institutionnel », collectivités, Etat, groupes internationaux
- Transformation : PMI, groupes industriels, entreprises à l'interface Recherche – Technologie
- Consommation : Industries, ménages consommateurs directs, distributeurs, collectivités
- Appui à la filière : Organismes publics ou privé de R&D, organismes publics de support, structures professionnelles
- Acteurs politiques : Lobbies, ONG, association de consommateurs

Source : Livrable de la tâche 12 de l'ARP *VegA*

Des hypothèses très générales ont été formulées pour caractériser les acteurs moteurs dans la mise en place des filières bioproduits.

Hypothèses d'évolution des filières biocarburants pour les transports

(1) Une première hypothèse explore une situation dans laquelle **les filières biocarburants de première génération continuent de représenter le modèle dominant** de production de bioproduits à destination des transports à l'horizon 2050. Cette situation adviendrait dans un contexte où l'innovation, déléguée aux acteurs privés, serait de nature principalement incrémentale et orientée vers la compétitivité. Considérées comme risquées économiquement (investissements lourds et coûts logistiques importants), les filières fondées sur d'autres générations de biocarburants n'émergent que tardivement, lorsque les prix des carburants classiques d'origine fossile augmentent sensiblement. Notamment, les biocarburants lignocellulosiques peuvent émerger dans les bassins où la ressource forestière est abondante et exploitable à bas coût pour ce type d'usage. Les grands groupes agroindustriels consolident leur position sur ces marchés, valorisant leur savoir-faire logistique et leur maîtrise des filières agroindustrielles, mais une diversité d'acteurs s'implique également : investisseurs issus du secteur financier (banques, fond d'investissement etc.) dans un mouvement plus général de financiarisation du secteur de la production et du foncier agricole, groupes pétroliers, soucieux de s'investir plus en amont pour consolider leurs approvisionnements. Il en résulte des filières biocarburants intégrées verticalement, reposant sur de grands complexes industriels de production de biomasse, produisant des bioproduits standardisés à destination des marchés nationaux et internationaux. Les filières basées sur la canne à sucre et l'huile de palme dominent durablement les marchés mondiaux de bioproduits ; la biomasse est produite dans les pays aux avantages comparatifs les plus marqués sur ces productions, et ayant développé les infrastructures idoines.

(2) Une seconde hypothèse envisage le **développement d'une diversité de filières biocarburants** (liquide ou gazeux) **dans le monde**, qui se développent **en fonction des sources de biomasse disponibles**. Deux variantes ont été explorées.

(i) Selon une première variante, **des trajectoires d'innovation dominantes se mettent en place par grandes régions du monde ou par pays**, avec des investissements de grande ampleur et des unités de transformation de taille importante, s'appuyant sur de grands bassins régionaux d'approvisionnements. Dans chaque situation, on développe des technologies, des procédés et des filières qui s'adaptent à un type

dominant de biomasse. Selon la filière, les acteurs impliqués varient en fonction des compétences et des savoir-faire nécessaires, ainsi que des alliances ou modes de contractualisation développées entre acteurs industriels et acteurs de la production de biomasse. Ainsi, les biocarburants lignocellulosiques apparaissent dans les grandes régions forestières, les biocarburants à base de cultures agricoles perdurent dans certains pays (Brésil, Indonésie par exemple), les biocarburants à base d'algues se développent dans les pays où l'espace littoral le permet ou dans les lieux où les infrastructures d'aquaculture terrestres, confinées ou de plein air, sont possibles.

(ii) Selon une deuxième variante, **la biomasse disponible est transformée à proximité, dans de petites unités décentralisées**, et pour des usages situés dans ce même territoire ou à proximité. Des chaînes d'approvisionnement locales se développent. La mise en place de ces petites unités de transformation s'appuie sur une forte innovation vers des technologies de transformation de pointe et « légères » (en tonnage et en investissement), efficaces énergétiquement. Des trajectoires multiples d'innovation émergent, portées par des acteurs très divers selon les situations territoriales (PME innovantes, groupements de producteurs de biomasse, collectivités, filiales de grands groupes du secteur énergétique etc.). Cette hypothèse va de pair avec une transformation importante du secteur automobile, qui doit s'adapter à une plus grande diversité de carburants et mettre au point des moteurs robustes.

Devenir des filières biomasse pour la production d'électricité et de chaleur

Diverses hypothèses, non exclusives, ont été considérées sur l'évolution des filières de production de chaleur et d'électricité à partir de biomasse, en fonction du type d'usage concerné.

Un premier axe concerne les **usages domestiques individuels**. (1) L'hypothèse tendancielle d'un accroissement des usages dans le cadre des systèmes actuels dits « traditionnels » de combustion de biomasse solide est envisageable (dans les pays du Sud comme du Nord), sur la base de filières plus ou moins structurées et formelles. (2) Une autre voie consiste en un développement de systèmes énergétiquement plus efficaces, s'appuyant d'une part sur une optimisation des foyers de combustion (efficacité énergétique et pollution aérienne) et d'autre part sur une gestion des circuits d'approvisionnement en biomasse (avec une amélioration de la première transformation quant il y a lieu, notamment pour le charbon de bois dans les pays en développement), pour limiter les pertes sur l'ensemble de la filière.

Un second axe concerne **les usages de la biomasse à l'échelle industrielle et collective**. (1) Une première hypothèse envisage leur développement dans un cadre plutôt décentralisé, fondé sur de nouvelles technologies de chaufferies à bois à haute efficacité énergétique, de gazéification, de cogénération, ou encore de méthanisation, avec d'une part une valorisation de la chaleur sur des sites industriels ou des réseaux urbains et d'autre part la possibilité d'injecter du biogaz ou de la bioélectricité dans les réseaux courants de gaz ou d'électricité. Ces filières peuvent se mettre en place dans des configurations variées, en faisant intervenir une diversité d'acteurs et des partenariats multiples en fonction d'opportunités locales de production et d'usage, ou se faire via un pilotage plus global par les macroacteurs de l'énergie et/ou de l'environnement. Il est envisageable que ce pilotage aille jusqu'à une certaine intégration verticale de la filière jusqu'à la production de biomasse par ces macroacteurs énergétiques, soucieux de maîtriser les approvisionnements et la chaîne de valeurs. (2) Une autre trajectoire a été envisagée, qui consiste à accroître la mobilisation de la biomasse comme matière première complémentaire des matières d'origine fossiles dans les centrales thermiques à charbon ou à gaz, dans une logique de substitution partielle et via des technologies de co-combustion.

Devenir des filières biomasse pour des usages en chimie

De nombreux usages de la biomasse dans le domaine de la chimie sont entrevus et commencent à se développer, par exemple dans les domaines de la chimie de base (lubrifiants, alcools,...), de la chimie de spécialité (tensioactifs, monomères,...) et des polymères (comme les bioplastiques). Diverses hypothèses contrastées quant au développement de nouvelles filières de fabrication de ces composants ont été explorées.

(1) L'hypothèse d'une production de biomolécules dans une **logique d'incorporation aux filières classiques** de la chimie est tout d'abord envisagée. Les biomolécules sont les mêmes les molécules de

synthèse issues de la chimie classique, et s'y substituent partiellement, comme matière première complémentaire. Les acteurs de la pétrochimie et des filières papetières sont particulièrement impliqués dans le développement de ces filières.

(2) Une autre voie de substitution partielle peut au contraire passer par des **filières spécifiques** pour un certain nombre de produits, valorisant plus directement les propriétés fonctionnelles des biomolécules. Dans ce cas, les filières ne convergent pas vers la fabrication d'intermédiaires standards, et mettent en relation directement producteur de biomasse, transformateur et usager industriel ou artisanal, sur des marchés segmentés.

(3) Selon une dernière hypothèse, plus en rupture, c'est l'ensemble de la chimie du carbone fossile qui est peu à peu remplacé par la chimie du carbone renouvelable végétal, progressivement mais massivement et dans une **logique à terme de substitution totale**. Cette trajectoire est fondée sur des innovations de rupture et une reconfiguration profonde des filières actuelles de la chimie. Selon les molécules d'intérêt, le craquage de la matière végétale est employé pour produire des intermédiaires chimiques standards sur le modèle de la pétrochimie, ou de nouvelles voies chimiques s'appuyant sur les propriétés spécifiques des molécules du végétal. En termes d'organisation des filières et de l'innovation, ces évolutions font appel à d'étroites collaborations entre acteurs d'horizons et de métiers différents. Il s'agit par exemple des acteurs de la production de biomasse, des industriels de la chimie et des entreprises agroindustrielles, qui mutualisent les compétences, connaissances et savoir-faire pour mettre en place de nouveaux procédés et modèles de filières adaptés à ce type de matière première.

L'articulation entre ces ensembles de filières par type d'usage (électricité-chaleur, transports, chimie) a également été prise en compte. Une hypothèse considérée est celle de la **convergence des filières au niveau des bioraffineries**, qui destineraient ses produits à une variété de filières aval, et notamment un couplage de la production de biocarburant et de biomolécules pour le secteur de la chimie. Cela suppose, en termes d'innovation, une coordination très forte entre acteurs des différentes filières. A l'inverse, **un découplage et un développement indépendant** des différents secteurs est envisageable.

Enfin, dernier point étudié, celui de la structuration spatiale des filières : (i) localisation des usines dans les grands **nœuds logistiques** (ports notamment), approvisionnement et distribution sur les marchés internationaux, (ii) ancrage régional des unités de transformation dans des bassins d'approvisionnement agricoles ou forestiers et (iii) unités de taille réduite et distribuées géographiquement sont les schémas qui ont été considérés dans les microscénarios.

Synthèse des hypothèses et microscénarios :

Composante 3 : Filières bioproduits et innovations

Filières	Hypothèses à 2050			
Biocarburants	Diversité de filières - trajectoires d'innovation dominantes par grandes régions du monde	Innovation incrémentale, pas de rupture par rapport aux filières actuelles	Diversité de filières – usage territorialisé et trajectoires d'innovation multiples	
Electricité et chaleur	Co-combustion centrale	Filières domestiques, tendanciel	Filières domestiques plus efficaces et plus propres	Développement des usages collectifs et industriels, systèmes plus décentralisés
Chimie	Biocrude – Incorporation aux filières chimie classique	Innovation rupture – vers une substitution totale		Substitution partielle – fonctionnalités biomolécules
Microscénarios	Substitution partielle du C fossile, basée sur des trajectoires industrielles dominantes mais différenciées selon l'accès à la biomasse	La biomasse comme matière première complémentaire des ressources fossiles en fonction du marché	Des innovations de rupture dans l'usage de la biomasse pour la chimie et l'électricité	Valorisation de la biomasse des territoires et usages localisés et diversifiés (énergie, chimie)

Composante 4 : Gouvernance mondiale et politiques publiques

Les politiques publiques ont été structurantes dans l'évolution récente des usages de la biomasse, avec en premier lieu les politiques directement adressées aux filières biocarburants, sous-tendues par des objectifs nationaux environnementaux, énergétiques, industriels ou de développement rural. Mais ce sont également des orientations politiques plus générales des Etats qui peuvent infléchir les devenir des usages de la biomasse non alimentaire (l'évolution des cadres réglementaires sur l'environnement et la santé par exemple). L'objet de cette composante est d'explorer les diverses évolutions possibles de ces politiques publiques, en prenant en compte leur insertion dans des dynamiques plus globales, impliquant une gouvernance à l'échelle internationale.

Les politiques publiques spécifiques aux bioproduits

Un premier aspect concerne les politiques publiques spécifiques aux bioproduits, qui pourraient être mises en place, prolongées ou supprimées par les Etats. Sans analyser en détail les outils et mesures qui pourraient être privilégiés, il s'agit de considérer une diversité d'orientations possibles.

Une première situation peut être envisagée, tendancielle à plusieurs égards, selon laquelle le développement des filières bioproduits fait l'objet de **politiques publiques nationales volontaristes**. Diverses motivations peuvent sous-tendre ces politiques, se traduisant par des modes d'intervention différents.

(1) Une première motivation possible fait écho à des **préoccupations d'ordre stratégique quant à la sécurité énergétique** nationale et à la dépendance vis-à-vis des matières premières fossiles. Une série de mesures incitatives pourrait dans ce cas être mobilisée à l'échelon national (ou supranational, comme dans le cas de l'Union Européenne), à l'instar des politiques actuelles sur les biocarburants de première génération (objectifs d'incorporation, mesures fiscales, prix garantis, aides aux investissements etc., OCDE, 2008 ; Bureau et al., 2010).

(2) On peut également imaginer un cas de figure où les **politiques sur les bioproduits sont intégrées à des orientations politiques plus générales et très volontaristes sur l'environnement et le changement climatique**. De fortes exigences réglementaires, sur le bilan environnemental (GES notamment) et sanitaire des produits et des filières, stimuleraient le déploiement de filières basées sur du carbone renouvelable, tout en leur imposant un certain nombre de critères de durabilité environnementale au travers de normes et de systèmes de certification.

(3) Autre hypothèse prise en compte, celle où les politiques publiques qui visent les filières bioproduits sont davantage **centrées sur des objectifs de développement territorial**, faisant intervenir entre autres les collectivités. Les filières bioproduits sont selon cette hypothèse encouragées et soutenues par des mesures diverses, dès lors qu'elles s'inscrivent dans le développement économique local et national, participent d'une robustesse et d'une durabilité des systèmes, rendent un certain nombre de services écologiques ou encore respectent le cadre de vie.

(4) Une dernière hypothèse a été prise en compte, plus en **rupture par rapport aux tendances actuelles** dans de nombreux pays : les **politiques publiques nationales** en vigueur au début du siècle sont **progressivement abandonnées**, suite notamment aux controverses et aux impacts liés au développement des biocarburants de premières générations. Une délégation du secteur aux acteurs des marchés s'opère, et l'action publique se positionne principalement dans la structuration et l'encadrement de ces marchés (réglementations, normes sanitaires, environnementales etc.).

Les politiques de structuration des marchés de bioproduits

Un deuxième axe de réflexion s'est intéressé aux politiques de structuration des marchés de bioproduits, et a notamment pris en compte la nature des règles qui structurent les échanges internationaux de bioproduits. Trois hypothèses ont été considérées.

(1) Selon la première, seuls des **standards de commercialisation** des bioproduits sont mis en place ; permettant d'avoir des caractéristiques stables et des produits identifiés, ils favorisent le développement d'un commerce international de bioproduits (avec entrée des bioproduits transformés dans les accords de l'OMC) ?

(2) Selon une deuxième hypothèse, parallèlement à la standardisation des bioproduits voit le jour une **multiplicité d'initiatives aux niveaux nationaux et international** (labels, codes de bonne pratique etc.) faisant intervenir des acteurs multiples (industriels, ONG, organisation internationales) ; sur la base d'un engagement volontaire des parties prenantes, ils qualifient les caractéristiques des bioproduits (recyclabilité, bilan énergétique, origine renouvelable etc.). Mais cette prolifération de démarches volontaires s'effectue sans harmonisation des critères de durabilité à large échelle.

(3) Un troisième cas considère l'éventualité que se mette en place **un système de certification international** (envisagé par Jinke et al, 2008), basé sur une normalisation de type ISO et s'appuyant sur des ACV et des critères contraignants de durabilité environnementale et sociale. La mise en place de ce système, qui structure les échanges internationaux à 2050, implique un haut niveau de coopération internationale, d'engagement des acteurs publics et privés, et la révision de certaines règles régissant les accords commerciaux internationaux (OMC).

Les politiques de recherche et développement

Un troisième axe de réflexion prospective décrit les politiques de recherche et d'innovation mises en œuvre par les Etats, et plus largement les régimes de production des savoirs dans lesquels elles pourraient s'inscrire.

(1) Une première hypothèse envisage des **politiques de recherche fortement orientées vers le développement d'innovations à caractère industriel ou marchand**, dans un contexte d'intense compétition internationale. Les laboratoires publics travaillent étroitement avec la R&D privée ; ils répondent à une logique de 'retour sur investissement' de la part des Etats, soucieux de conquérir un leadership économique. Le renforcement de la propriété intellectuelle dans le jeu concurrentiel, associé à un relatif « laisser-faire » vis-à-vis de la prolifération des brevets, aboutit en 2050 à **privatisation poussée des savoirs** (process, semences, gènes) et à des phénomènes d'exclusivité ayant encouragé des effets de *lock-in* dans les trajectoires d'innovation (Pestre, 2003).

(2) Une hypothèse où l'intervention publique se rapporte davantage à la figure de l'« Etat modernisateur » peut être formulée, avec des **politiques publiques de R&D très volontaristes, et un rôle central des Etats** qui pilotent l'innovation et le développement en lien avec les **grands acteurs sectoriels**. Selon le contexte économique et géopolitique mondial, la circulation des savoirs et des savoirs peut connaître des évolutions extrêmement différenciées : (i) d'une situation où les Etats se positionnent comme facilitateurs, promoteurs d'une science ouverte, en s'appuyant sur des **accords multilatéraux ambitieux sur le droit de propriété intellectuelle**, afin de faciliter les transferts technologiques, limiter les coûts d'accès à l'innovation et éviter les trop larges exclusivités ; (ii) à une situation de repli, de privatisation des savoirs très poussée, voire à un éclatement des systèmes de gestion de la propriété intellectuelle et une bilatéralisation des accords (Lallement, 2006).

(3) Enfin, une situation plus intermédiaire a été envisagée, dans laquelle les politiques de R&D s'inscrivent davantage dans des stratégies d'incitation. En parallèle des activités de recherche publique sur les bioproduits, ces **politiques accompagnent l'émergence de projets innovants et stimulent la circulation des connaissances** et des savoir-faire, les échanges d'expériences et les transferts de compétences et de technologie au sein de réseaux territoriaux, nationaux et internationaux. Ils accompagnent aussi **l'émergence de nouveaux systèmes de gestion de la PI** (systèmes de gestion collective, systèmes de licences publiques, plateformes de brevets (Rip, Joly et Callon, à paraître)), avec une grande diversité de pratiques selon les particularités sectorielles. Les modes d'innovation en réseau s'en

trouvent facilités. Pour stimuler les entreprises innovantes et protéger de la privatisation certaines ressources du vivant, une restriction du champ du brevetable se met en place pour certains secteurs spécifiques, dans le cadre d'accords internationaux.

Gouvernance mondiale et politiques publiques liées au changement climatique et à l'environnement

S'inspirant des scénarios globaux du GIEC (GIEC, 2007) et du MEA (Carpenter et al. 2005), deux hypothèses contrastées ont été envisagées sur la question du traitement des questions environnementales à l'échelle mondiale.

(1) La première considère que les négociations internationales sur les enjeux environnementaux globaux (changement climatique, biodiversité etc.) du début de siècle n'ont abouti que sur des **accords peu contraignants et a minima**, et que les Etats ont été peu enclins à mettre en œuvre des politiques nationales ambitieuses en la matière. Ce sont donc des politiques publiques de nature plutôt réactives qui sont mises en œuvre, visant l'adaptation et le traitement des problèmes une fois qu'ils se manifestent et deviennent aigus.

(2) Selon la seconde hypothèse au contraire la prise en compte des enjeux globaux liés au changement climatique et à l'environnement a motivé **l'émergence d'une gouvernance mondiale forte**. Des accords internationaux ambitieux en faveur de la réduction des GES et de la gestion des biens publics mondiaux ont vu le jour, relayés au niveau des Etats par des politiques publiques nationales fortes environnementales et sectorielles.

Gouvernance mondiale sur l'alimentation, régulations des marchés agricoles

Une dernière dimension, déterminante à examiner pour envisager le futur des usages non alimentaires de la biomasse, concerne les régulations des marchés agricoles et la prise en compte des enjeux alimentaires dans la gouvernance mondiale. Trois éventualités à 2050 ont été distinguées.

(1) Une hypothèse selon laquelle les processus de libéralisation des échanges se sont poursuivis au niveau international, avec en particulier un aboutissement des négociations sur **l'ouverture des marchés agricoles et des accords de libre-échange** dans le cadre de l'OMC.

(2) Une deuxième hypothèse envisage la mise en place d'une **régulation multilatérale des marchés agricoles**. Cette **forte gouvernance autour des enjeux alimentaires** a émergé autour d'un consensus sur la nécessité de maîtriser les fluctuations des prix agricoles, notamment de prévenir l'influence croissante des marchés énergétiques sur les marchés agricoles, et de permettre la mise en place de politiques agricoles nationales adaptées aux objectifs de sécurité alimentaire et de développement agricole, dans les pays du Sud en particulier. Plus largement, ces régulations ont aussi pris en considération les aspects fonciers et de gestion des ressources naturelles, sur la base d'un droit international affermi.

(3) Une dernière voie a été imaginée, selon laquelle le contexte économique et géopolitique induit les Etats à adopter des **politiques sécuritaires, notamment à l'égard de l'accès aux ressources et aux chaînes d'approvisionnement** (énergétiques et alimentaires notamment). Les échanges de biens agricoles ont alors lieu dans le cadre d'une bilatéralisation renforcée des relations internationales, et les rapports de force économiques et géostratégiques se cristallisent autour des enjeux alimentaires.

Synthèse des hypothèses et microscénarios :

Composante 4 : Gouvernance mondiale et politiques publiques

Variables	Sous-variables	Hypothèses à 2050			
Gouvernance mondiale et politiques publiques liées au changement climatique		Politiques proactives, accords internationaux ambitieux de réduction des GES et sur l'environnement		Politiques réactives, logiques d'adaptation, accords minimaux - initiatives régionales	
Gouvernance mondiale sur l'alimentation - régulations des marchés agricoles		Régulation multilatérale des marchés internationaux agricoles et fonciers, selon objectifs de sécurité alimentaire et de développement rural	Libéralisation accrue des marchés agricoles et internationalisation des marchés fonciers		Relations bilatérales entre Etats
Politiques de structuration des marchés bioproduits		Labels volontaires + normes internationales	Systèmes nationaux de certification + normes internationales	Multiplicité de labels privés. Codes bonnes pratiques internationaux	Standardisation a minima des bioproduits échangés au niveau international
Politiques spécifiques sur les bioproduits	Pol. spécifiques d'appui aux filières bioproduits	Politiques d'appui territorialisées, selon objectifs de développement local (emplois, accès énergie, environnement etc.)	Politiques nationales d'appui aux filières (objectifs d'incorporation, fiscalité, aides à l'investissement etc.)		Pas d'appui public à la structuration des filières
	Politiques de R&D et régime de production de savoirs	Recherche publique sur les bioproduits ; appui à la mise en réseau des acteurs et à la circulation des savoirs (licences, systèmes de gestion PI innovants)	Pilotage fort de la R&D par Etats + collaboration grandes entreprises. Privatisation des savoirs et accords de PI bilatéraux		Innovation tournée vers les marchés – course à la propriété intellectuelle
		↓	↓	↓	↓
Microscénarios		Des politiques territoriales tournées vers une gestion durable, soutenues par des accords internationaux et des politiques nationales. Innovation ouverte.	Accords internationaux sur changement climatique et politiques publiques motrices dans les mutations sectorielles – transferts technologiques	Sécurité énergétique des Etats, échanges internationaux et standards environnementaux a minima. Accords bilatéraux sur la PI.	Laisser-faire, peu de régulations internationales et privatisation de la connaissance

Composante 5 : Croissance et développement

Le développement des filières bioproduits est étroitement lié à l'évolution du paysage économique et sociétal dans lequel elles s'insèrent. Cette dernière composante s'intéresse aux évolutions générales du contexte économique et géopolitique mondial, qui peuvent influencer de manière significative les stratégies et les marges de manœuvre des acteurs publics et privés concernés par les filières bioproduits. Les transformations dans les modes de vie et de consommation, en particulier énergétique et alimentaire, sont explorés. Enfin, ont été pris en compte l'effet global que les activités humaines auront eu sur l'état des écosystèmes et le niveau de pression exercé sur les ressources naturelles

Tout d'abord, s'inspirant des scénarios du MEA, du GIEC et d'Agrimonde, des hypothèses sur le contexte général économique et géopolitique mondial ont été réalisées.

(1) Une première hypothèse explore l'éventualité d'un **ordre mondial très fortement marqué par la libéralisation du commerce international**, avec l'OMC comme institution centrale de ce processus de mondialisation. Selon cette hypothèse encore, l'économie mondiale connaît une croissance soutenue pendant la période, tirée par l'essor des pays initialement « émergents » au début du siècle. Malgré un accroissement global des revenus, les inégalités de développement restent marquées, entre pays comme en leur sein, en particulier dans les pays en développement entre les métropoles et les autres territoires, marquant l'avènement d'un monde à deux vitesses.

(2) Une seconde hypothèse se place au contraire dans le cadre d'une **coopération internationale très forte, qui se cristallise autour de l'enjeu du changement climatique**, et encourage l'émergence d'une économie de la connaissance autour des nouvelles technologies faibles en carbone. Pour être en mesure de traiter ces enjeux globaux, une coopération Nord-Sud très étroite s'est mise en place pour faciliter les transferts de technologies, les flux de capitaux et étendre le développement de cette économie « verte » aux pays en développement.

(3) Autre voie envisagée, celle d'une **gouvernance mondiale multilatérale** qui, à la suite de crises répétées, **s'organise autour de la gestion des biens publics mondiaux**, avec entre autres pour objectif d'accroître la résilience et la durabilité des systèmes alimentaires et énergétiques. L'éventualité d'une mondialisation de plus en plus portée par des **pouvoirs décentralisés** a été ici explorée, avec une montée des grandes régions métropolitaines et des territoires, porteurs d'innovations organisationnelles et institutionnelles. Pour remédier aux problèmes majeurs d'insécurité alimentaire, l'action publique et l'aide au développement se situent ici dans la logique qui privilégie l'amélioration de la répartition des revenus et le développement agricole et territorial. Celui des pays en développement est particulièrement moteur de la croissance économique.

(4) Enfin, l'hypothèse d'un **monde fragmenté et hétérogène**, marqué durant la première moitié du XXIème siècle par une série de **crises économiques et géopolitiques**, a été formulée. En résulte une tendance au repli national et aux stratégies sécuritaires, notamment vis-à-vis de l'accès aux ressources, avec des Etats qui entretiennent des relations bilatérales par le biais desquelles s'expriment pleinement les rapports de force.

Une deuxième dimension a été abordée, celle relative aux évolutions possibles de la démographie mondiale et du phénomène d'urbanisation, liée notamment aux migrations rural-urbain. Cette dimension peut en effet orienter à la fois l'évolution de la demande énergétique et alimentaire, l'évolution des modes de consommation, ainsi que les usages du sol. Trois hypothèses contrastées ont été retenues.

(1) D'abord, celle d'une **croissance moyenne de la population**, qui s'élève à 9 milliards d'individus en 2050⁴⁹, sous l'effet du développement économique et d'une transition démographique qui concerne de plus en plus de pays. Cette éventualité a été associée à différentes évolutions des équilibres urbain-rural. (i) Une poursuite de la **tendance lourde à l'urbanisation**, qui peut être nourrie à la fois par

⁴⁹ en référence au scénario médian des projection de l'ONU (ONU, 2006).

la tendance à la métropolisation et par un exode de subsistance des populations rurales. L'emprise au sol des espaces artificialisés pourrait ainsi plus que doubler d'ici 2050, pour atteindre de l'ordre de 1,2 millions d'hectares (UNEP 2008). Les espaces périurbains, qui comptent aujourd'hui pour une grande part des terres cultivées et fertiles pourraient être les plus touchés. (ii) Une **inflexion de ce phénomène et une stabilisation des flux de population entre villes et campagnes** peut également être envisagée. Dans les pays du Nord, un des moteurs de cette inflexion résiderait dans l'attractivité des territoires ruraux, pour leur qualité de vie notamment, qui repose sur la mise en œuvre de relations urbains-rural plus équilibrées (Mora, 2009). Dans les pays en développement, le principal élément déterminant serait la vitalité du développement rural et l'évolution de l'accès aux services.

(2) Enfin, s'inspirant du scénario *Order from Strength* du MEA (Carpenter et al. 2005), une hypothèse **d'accroissement démographique plus rapide a été considérée** (9,5 milliards en 2050) liée à une transition démographique beaucoup plus lente dans un certain nombre de pays, résultant notamment d'un faible développement économique. Cette évolution va ici de pair avec **un exode massif vers les villes et se traduit par une urbanisation non maîtrisée**, un fort étalement urbain et une ghettoïsation accrue des populations pauvres.

Un troisième axe a été discuté, celui portant sur l'évolution des modes de vie et de consommation, étroitement associé à celui sur l'évolution du contexte économique et sociétal.

















(1) L'éventualité de **l'adoption par une part importante de la population mondiale de modes de consommation comparables à celles des sociétés occidentales actuelles** a tout d'abord été envisagée. Une telle perspective traduite sur le plan énergétique conduit à une augmentation considérable (voire un doublement à 2050) de la consommation énergétique, comme le laissent suggérer les projections tendanciennes de l'AIE (WEO 2008), avec en particulier une explosion de la demande dans les transports⁵⁰. Côté consommation alimentaire peuvent être envisagées une « occidentalisation » des pratiques et des filières alimentaires et l'adoption de régimes alimentaires plus carnés, évolutions qui peuvent être associées à une hausse des revenus et/ou un mode de vie plus urbain. Ces évolutions vont de pair, selon cette hypothèse, avec la poursuite de la tendance globale à l'industrialisation et à la concentration des filières agro-alimentaires, associées à des modes de distribution et de consommation générateurs de pertes, aussi bien chez les usagers que dans les systèmes de restauration ou plus en amont.

(2) A l'opposé, une rupture pourrait être envisagée dans les pays du Nord, avec **l'adoption de modèles de consommation plus sobres**, et la transition vers des modes de développement qui découplent croissance et consommation de matières premières, d'énergie et de ressources naturelles, par exemple en mettant en œuvre une économie de fonctionnalité (consommation centrée sur l'usage d'un produit plutôt que sur l'acquisition du produit lui-même). De plus, des transformations dans les pratiques de consommation énergétique, associées plus largement à des mutations sectorielles profondes, contribuent à infléchir significativement la tendance à l'explosion de la demande énergétique. Cette hypothèse concerne également le domaine de l'alimentation, avec l'adoption de régimes et de comportements alimentaires moins utilisateurs de denrées et moins générateurs de pertes, guidée en premier lieu par des préoccupations d'ordre nutritionnel et sanitaire, et par une prise en compte globale des effets environnementaux des systèmes alimentaires (Paillard et al., 2010). L'hypothèse, dans les pays en développement et émergents, d'une amélioration des régimes alimentaires sans pour autant qu'il y ait convergence vers des modes occidentalisés, mais un **maintien d'une diversité** dans la composition des régimes et des filières alimentaires a également été retenue.

⁵⁰ Le scénario tendanciel de l'ETP 2008 de l'AIE projette un triplement du nombre de véhicules individuels à l'horizon 2050 (AIE 2008).

Synthèse des hypothèses et microscénarios :

Composante 5 : Croissance et développement

Variables	Hypothèses d'évolution à 2050			
Contexte économique et géopolitique	Libéralisation commerce mondial 	Coopération autour de l'émergence d'une économie verte 	Coopération et renforcement échelon territorial 	Monde fragmenté et hétérogène 
Démographie et urbanisation	Croissance moyenne, urbanisation forte 	Croissance moyenne, stabilisation des flux villes/campagne et développement rural 		Croissance démographique forte, exode rural massif 
Modes de consommation	Extension des modèles occidentaux de consommation 	Transformation des modes de consommation au Nord, sobriété – maintien de diversité 		Inégalités, dualisme métropoles/arrières pays 
				
Microscénarios	Mondialisation libérale et <i>occidentalisation</i>	Mondialisation des technologies vertes	Mondialisation des territoires	Régionalisation de crise

ANNEXE 3 – Hypothèses de rendements culturaux et rendements de conversion

1. Rendements surfaciques en biomasse

- Cultures agricoles classiques :

Culture	Rendement annuel moyen (t/ha)
colza	1,6
palmier à huile	12,8
blé	2,8
maïs	4,6
canne à sucre	65,9
soja	2,3

Source : FAOSTAT, moyenne mondiale 1998-2007

- Productions lignocellulosiques :

Biomasse	Rendement annuel moyen (t/ha)
miscanthus, switchgrass	15
TCR	10
résidus cultures	4,5

Sources : Rajagopal et Zilberman, 2007 ; AIE/OCDE, 2008 ; Laurier et al. , 2010 ⁵¹ ; dires d'experts.

⁵¹ Pour les TCR, les ordres de grandeur trouvés dans la littérature scientifique ont été comparés aux résultats récents des expérimentations menées par le FCBA dans le cadre du programme REGIX. Voir Jean-Pierre Laurier, Nancy Mendow, Christophe Périnot, Patrice Maine, Philippe Ruch, 2010. Récolte en plaquettes des Taillis à Courte Révolution - Synthèse des résultats techniques et économiques du Programme REGIX, FCBA.

2. Rendements de conversion en biocarburant liquide pour différents types de biomasse :

type de biocarburant	biomasse	rendement de conversion en tep/tonne* (conversion efficiency)
biodiesel	palmier à huile	0,16
	colza	0,25
	miscanthus, switchgrass, TCR	0,11
bioéthanol	manioc	0,09
	maïs	0,21
	riz	0,22
	sorgho	0,19
	betterave à sucre	0,05
	canne à sucre	0,04
	blé	0,15
	miscanthus, switchgrass, TCR, résidus agricoles	0,14

* en moyenne dans les publications analysées.

Sources : Thamsiriroj and Murphy, 2008 ; Rajagopal et Zilberman, 2007 ; AIE/OCDE, 2008; Sims R.E.H. et al. 2006.

3. Rendement de conversion pour la production d'électricité et de chaleur

	Rendement de conversion GJ / t MS	Rendement de conversion (tep/t MS)
électricité (40% efficacité de conversion)	7,4	0,18
cogénération (70% efficacité de conversion)	12,95	0,30

Sources : Sims, 2006 ; Cannell, 2003.