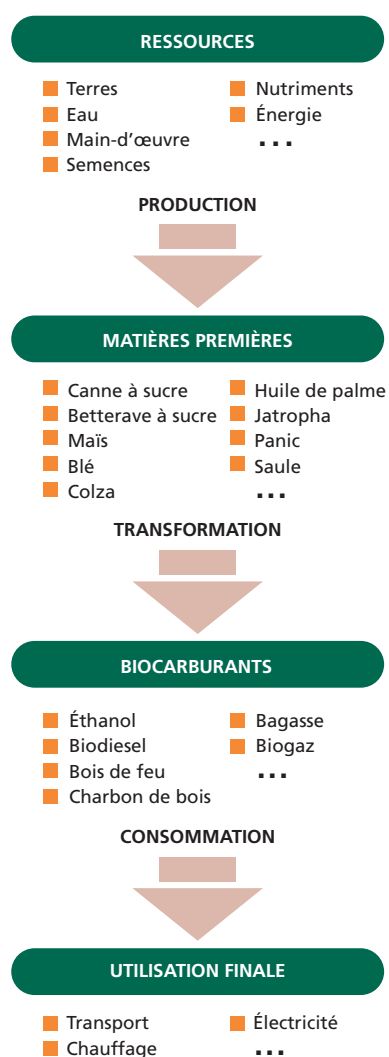


2. Biocarburants et agriculture – un aperçu technique

La biomasse traditionnelle, notamment le bois de feu, le charbon de bois et les déjections animales, reste une importante source d'énergie dans de nombreuses régions du monde. La bioénergie est la

principale source d'énergie pour la plupart de la population du monde qui vit dans des conditions d'extrême pauvreté, et elle sert essentiellement à la cuisson des aliments. Des technologies de conversions plus avancées et efficaces permettent aujourd'hui d'obtenir des biocarburants – solides, liquides ou gazeux – à partir de matériaux comme le bois, les matières premières végétales et les déchets. Le présent chapitre passe en revue les biocarburants. Que sont-ils, quel est leur potentiel, quelles sont leurs implications pour l'agriculture? Les biocarburants liquides pour les transports dont l'emploi tend à se généraliser rapidement, ont retenu particulièrement l'attention.

FIGURE 4
Biocarburants – de la matière première à l'utilisation finale



Types de biocarburants

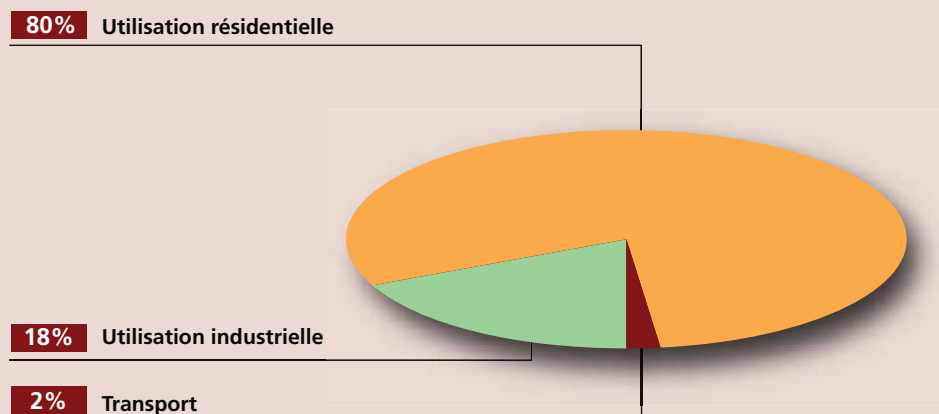
Les biocarburants sont des vecteurs d'énergie qui emmagasinent l'énergie tirée de la biomasse². L'éventail des sources de biomasse qui peuvent servir à produire de la bioénergie sous une variété de formes est large. Par exemple, les résidus de la transformation industrielle des aliments, des fibres et du bois; les cultures énergétiques, les plantations à rotation rapide, et les déchets du secteur agricole; les résidus du secteur forestier, tous peuvent servir à produire de l'électricité, de la chaleur, à cogénérer de la chaleur et de l'électricité ainsi que d'autres formes de bioénergie. Les biocarburants sont également appelés énergie *renouvelable* parce qu'ils sont de l'énergie solaire sous une autre forme.

On peut classer les biocarburants en fonction de leur origine et de leur type. Ils peuvent provenir de déchets forestiers, agricoles ou de produits de la pêche ou de déchets municipaux ou encore de sous-produits et déchets de l'agro-industrie, des industries alimentaires et des services

Source: FAO.

² Voir FAO (2004a) pour un aperçu de la terminologie relative aux biocarburants.

FIGURE 5
Utilisations de la biomasse pour l'énergie



Source: AIE, 2007.

ENCADRÉ 1

Autres types de biomasse pour la génération de chaleur, d'énergie et pour le transport

La biomasse pour la génération de chaleur et d'énergie

Différents types de biomasse sont utilisés comme combustibles pour produire de l'électricité et de la chaleur. Parmi ceux-ci on a différents types de déchets, comme les résidus agro-industriels, les résidus de récolte laissés sur le champ, les déjections animales, les déchets de bois de l'industrie et de la sylviculture, les déchets de l'industrie alimentaire et du papier, les déchets municipaux solides, les boues des systèmes d'épuration et les biogaz provenant de la fermentation de déchets agricoles et organiques. On utilise également des végétaux spécifiquement cultivés à cette fin, comme des cultures pérennes à croissance rapide (eucalyptus, peupliers, saule) et des herbes (miscanthus et panic érigé).

Les procédés de production de l'électricité sont également variés. Ceux qui utilisent la biomasse font généralement intervenir le cycle de la vapeur: la biomasse est brûlée dans une chaudière qui produit un flux de vapeur à haute pression activant des pales aérodynamiques qui mettent en rotation

une turbine laquelle entraîne à son tour un alternateur produisant de l'électricité. La biomasse peut également être compactée, par exemple en briquettes de bois servant de combustible, et la biomasse peut également être brûlée avec du charbon dans la chaudière d'une centrale conventionnelle pour produire de la vapeur et de l'électricité. À l'heure actuelle, cette dernière façon de combiner les technologies renouvelables avec la production conventionnelle d'électricité est la plus rentable parce que dans la plupart des cas il est possible d'utiliser l'infrastructure des centrales existantes sans grandes modifications.

Les biogaz dans la production de chaleur et d'électricité et dans les transports

Digestion anaérobie

La digestion anaérobie de déchets alimentaires ou animaux par des bactéries dans un environnement privé d'oxygène libère des biogaz à forte teneur en méthane et en dioxyde de carbone pouvant servir à produire de la chaleur ou de l'électricité dans un moteur à combustion interne modifié.

alimentaires. Ils peuvent être *solides*, bois de feu, charbon de bois, briquettes de bois; *liquides*, comme l'éthanol, le biodiesel et les huiles de pyrolyse; *gazeux* comme les biogaz.

On distingue également entre les biocarburants *primaires* (non transformés) et *secondaires* (transformés):

- **Les biocarburants primaires**, comme le bois de feu, les copeaux et les briquettes de bois, sont ceux où la matière organique est utilisée dans sa forme naturelle (telle qu'elle est récoltée). ils fournissent en général le combustible servant directement à cuire les aliments, à produire de la chaleur ou de l'électricité dans des applications industrielle à petite et grande échelle.
- **Les biocarburants secondaires** sous la forme de solides (par exemple, le charbon de bois), liquides (l'éthanol, le biodiesel, les huiles biologiques, etc.) ou

de gaz (biogaz, syngaz et hydrogène) peuvent servir dans un éventail d'applications plus large notamment dans les transports et les processus industriels à température élevée.

Biocarburants liquides pour le transport³

En dépit du faible volume de la production totale de biocarburants liquides, la production de biocarburants liquides pour le transport à partir essentiellement de matières premières agricoles et alimentaires est le secteur qui a enregistré la croissance la plus rapide de ces dernières années. Les plus importants sont l'éthanol et le biodiesel.

³ La présente section s'inspire de GBEP (2007, p. 2-10) et AIE (2004).

La conversion en méthane/biogaz des déchets et déjections d'origine animale peut présenter des avantages intéressants du point de vue de l'environnement et de la santé. Le méthane est un gaz à effet de serre dont le potentiel au regard du réchauffement planétaire est de 22 à 24 fois plus puissant que celui du dioxyde de carbone. En piégeant et en utilisant le méthane, on neutralise ses effets de gaz à effet de serre. De plus, la chaleur produite pendant le processus de biodigestion tue les agents pathogènes présents dans le fumier et le processus livre un résidu valorisé comme engrais.

Gazéification

Moyennant un processus de *gazéification*, la biomasse solide peut être convertie en un combustible gazeux ou biogaz. Le fonctionnement du gazéifieur est le suivant: la biomasse portée à température élevée dans un milieu pauvre en oxygène est décomposée et libère un gaz de synthèse inflammable riche en énergie que l'on appelle «syngaz». Ce gaz peut être brûlé dans une chaudière conventionnelle ou utilisé à la place du

gaz naturel dans une turbine à gaz pour actionner un générateur électrique. Le biogaz obtenu par gazéification peut être filtré pour le débarrasser des composés chimiques non désirés puis utilisé dans des centrales à rendement élevé à «cycle combiné» qui utilisent des turbines à gaz et à vapeur pour produire de l'électricité.

Biogaz pour le transport

Le biogaz non traité est impropre à l'usage comme carburant pour le transport en raison de sa faible teneur en méthane (60-70 pour cent) et de sa forte concentration en contaminants. Il peut toutefois être traité pour être débarrassé du dioxyde de carbone, de l'eau et de sulfures d'azote corrosifs, et pour être enrichi en méthane. Le biogaz traité lorsqu'il est comprimé, a des propriétés similaires à celles du gaz naturel comprimé et peut alors servir de carburant pour le transport.

Source: sur la base du GBEP, 2007.

L'éthanol

Tout matériau dont la teneur en sucre est suffisante ou tout matériau pouvant être converti en sucre, tels la cellulose ou l'amidon, peut servir à produire de l'éthanol. L'éthanol que l'on trouve aujourd'hui sur le marché des biocarburants est produit à partir de sucre ou d'amidon. Les principales cultures sucrières sont la canne à sucre, la betterave à sucre et, dans une moindre mesure, le sorgho doux. Les amylacés les plus courants sont le maïs, le blé et le manioc. La façon la plus simple de produire de l'éthanol est par fermentation directe de la biomasse contenant du sucre. Au Brésil et dans d'autres pays tropicaux qui produisent actuellement de l'éthanol, on utilise surtout la canne à sucre. Dans les pays de l'OCDE, on produit l'éthanol essentiellement à partir des amylacés contenus dans les céréales (quoiqu'on utilise également la betterave sucrière) dont la conversion en sucre est relativement aisée. Ces amylacés ne représentent toutefois qu'un petit pourcentage de la masse végétale totale. L'essentiel de cette masse consiste en cellulose, hémicellulose et lignine. Les deux premières peuvent être converties en alcool après conversion préalable en sucre, mais le processus est plus complexe que pour l'amidon. La production d'éthanol à partir de la biomasse cellulosique est pratiquement inexistante aujourd'hui mais les recherches se poursuivent très activement dans ce secteur (voir la section consacrée aux biocarburants de deuxième génération p. 20-21).

L'éthanol peut être mélangé à de l'essence ou servir de carburant dans sa forme pure dans des moteurs à combustion interne légèrement modifiés. Un litre d'éthanol contient environ 66 pour cent de l'énergie fournie par un litre d'essence, mais l'éthanol a un niveau d'octane plus élevé et, lorsqu'il est mélangé à l'essence pour le transport, il améliore la performance de cette dernière. Il améliore également la combustion des carburants dans les véhicules, réduisant par là l'émission de monoxyde de carbone, d'hydrocarbures non brûlés et de particules cancérogènes. Cependant, la combustion d'éthanol intensifie également la réaction avec l'azote dans la sphère, ce qui peut provoquer une augmentation marginale de gaz d'oxyde d'azote. Comparé au pétrole, l'éthanol ne contient du soufre qu'à l'état de trace. Par conséquent, en mélangeant

l'éthanol à l'essence, on réduit la teneur en soufre des carburants et par conséquent les émissions d'oxyde de soufre, produit cancérogène qui contribue aux pluies acides.

Le biodiesel

On obtient le biodiesel moyennant un processus chimique dit de transestérification à partir d'un mélange d'huile végétale ou de graisse animale avec un alcool en présence d'un catalyseur. L'huile servant à la production de biodiesel peut provenir de pratiquement n'importe quelle oléagineuse. Les plus couramment utilisées au niveau mondial sont le colza en Europe et le soja au Brésil et aux États-Unis d'Amérique. Dans les pays tropicaux et sous-tropicaux, on utilise l'huile de palme, de coprah et de jatropha. On emploie également de faibles volumes de graisses animales provenant des industries de transformation du poisson et des produits animaux. Le processus de production du biodiesel fournit également des sous-produits tels que les «tourteaux» de fèves triturées (servant à l'alimentation des animaux), et la glycérine. Du fait que l'on peut produire du biodiesel à partir d'un large éventail d'oléagineuses, les carburants obtenus présentent une plus grande variété de propriétés physiques que l'éthanol en matière par exemple de viscosité et de combustibilité.

Le biodiesel peut être mélangé avec le diesel habituellement utilisé comme carburant ou utilisé tel quel dans des moteurs à allumage par compression. Sa teneur en énergie équivaut à 88-95 pour cent de celle du diesel, mais il en améliore la lubrlicité tout en améliorant son indice de cétane, de sorte que grosso modo les deux carburants se valent. La teneur plus élevée en oxygène du biodiesel favorise une combustion plus complète du carburant, ce qui réduit les émissions dans l'atmosphère de particules polluantes, de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures. Comme l'éthanol, le biodiesel a une teneur en soufre négligeable, ce qui contribue à réduire les émissions d'oxyde de soufre des véhicules.

Les huiles végétales pures

Les huiles végétales pures⁴, aptes à servir de carburant pour les moteurs diesel, peuvent être produites à partir de nombreuses

⁴ On dit aussi huile végétale pure.

oléagineuses telles que le colza, le tournesol, le soja et le palmiste. On peut également employer les huiles usées des restaurants et les graisses animales des industries de transformation de la viande comme carburant pour les moteurs diesel.

Les matières premières utilisées dans la production de biocarburants

La biomasse pouvant servir à la production d'énergie est très diverse, de même que sa distribution géographique. Aujourd'hui encore la plupart de l'énergie tirée de la biomasse et utilisée comme carburant provient de sous-produits ou de co-produits de la production de bois, de fourrage et de fibres. Ainsi, les principaux sous-produits des industries forestières servent à produire du bois de chauffe et du charbon de bois, et la liqueur noire (sous-produit des usines de pâte à papier) joue un grand rôle comme carburant dans la production de bioélectricité dans des pays comme le Brésil, le Canada, la Finlande, la Suède et les États-Unis d'Amérique. Une quantité considérable de chaleur et d'électricité est produite à partir de biomasse ligneuse de récupération ou recyclée et la production d'énergie à partir de la biomasse fournie par les cultures (pailles et tiges de coton) et la sylviculture (copeaux et briquettes de bois) ne cesse de croître. Dans les pays producteurs de sucre et de café, la bagasse et les parches de café sont utilisées en combustion directe et aussi pour produire de l'énergie thermique et de la vapeur.

En termes de bioénergie, toutefois, le secteur qui a connu la plus grande croissance ces dernières années est celui des biocarburants liquides pour le transport à partir des matières premières agricoles. L'essentiel de la production a pris la forme d'éthanol à partir de cultures énergétiques à teneur élevée en sucre ou en amidon, ou de biodiesel à partir d'oléagineuses.

Comme il ressort de la Figure 6, différentes cultures énergétiques peuvent servir de matière première à la production d'éthanol et de biodiesel. Il reste que l'essentiel de la production mondiale d'éthanol repose sur le sucre de canne ou le maïs; l'essentiel d'éthanol produit au Brésil l'est à partir de la canne à sucre, aux États-Unis d'Amérique

à partir du maïs. Parmi les autres matières premières importantes figurent le manioc, le riz, la betterave à sucre et le blé. Les cultures énergétiques les plus utilisées pour la production de biodiesel sont le colza au sein de l'UE, le soja aux États-Unis d'Amérique et au Brésil, et les huiles de palme, de coprah et de ricin dans les pays tropicaux et sous-tropicaux, le jatropha semblant devoir se joindre à ce groupe.

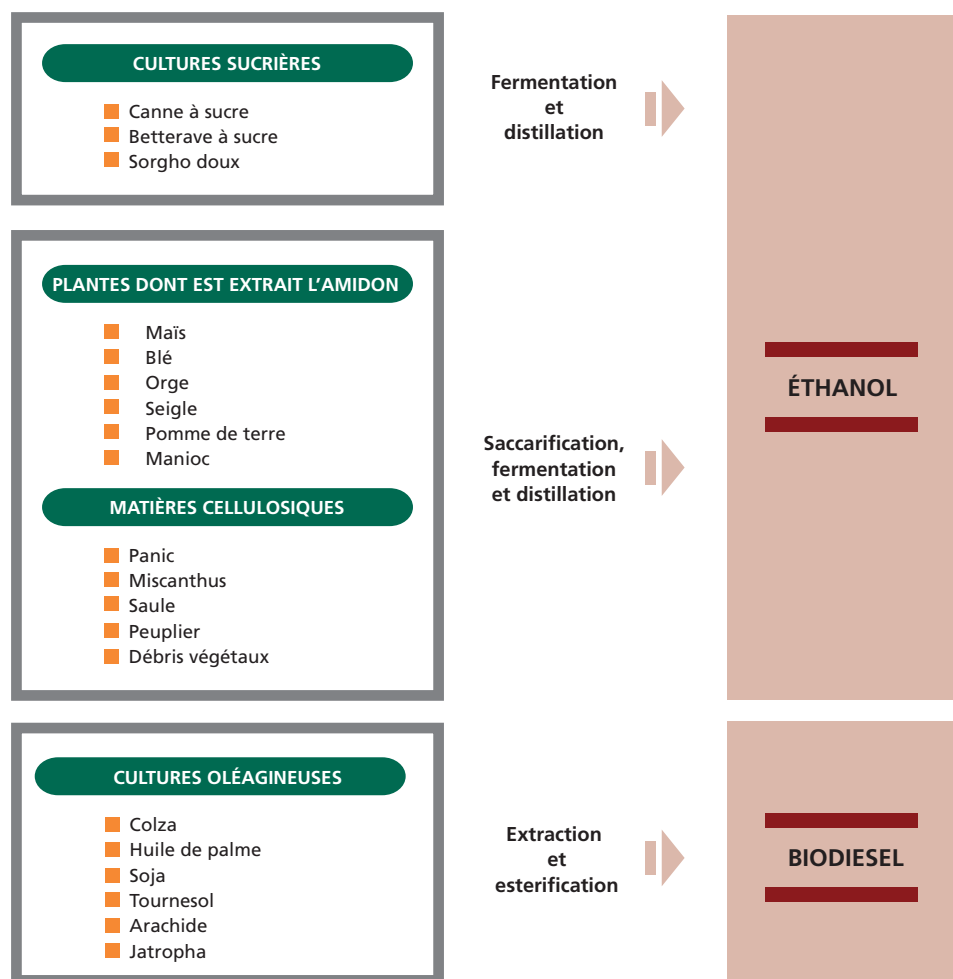
Biocarburants et agriculture

L'essor et l'élargissement actuel des marchés de l'énergie consécutifs à l'adoption par la plupart des pays développés de nouvelles politiques énergétiques et de l'environnement au cours de la décennie écoulée entraînent une réorganisation en profondeur du secteur agricole. Son rôle de fournisseur de matières premières destinées à la production de biocarburants liquides pour le transport, comme l'éthanol et le biodiesel, ne cesse de gagner en importance. Les bioénergies modernes offrent de nouveaux débouchés aux produits agricoles et sont par conséquent potentiellement créatrices d'emplois et de revenus. Elles exercent en même temps une pression croissante sur la demande de ressources naturelles, notamment sur la terre et l'eau, en particulier à court terme, quoiqu'à long terme, la hausse des rendements pourrait atténuer les effets de cette pression. La demande croissante de terre devient problématique en particulier lorsqu'elle entraîne la conversion de cultures destinées à l'alimentation (par exemple à la culture du maïs, et du soja) au profit de la production de biocarburants, ou la conversion de cultures vivrières à la production de biodiesel.

À l'heure actuelle, 85 pour cent de la production mondiale de biocarburants liquides consiste en éthanol (Tableau 1). Les deux plus gros producteurs d'éthanol, le Brésil et les États-Unis d'Amérique, entrent pour 90 pour cent dans la production totale, le Canada, la Chine, l'UE (en particulier la France et l'Allemagne) et l'Inde se répartissant pratiquement tout le reste de la production. La production de biodiesel est essentiellement concentrée dans l'UE (60 pour cent du total) et aux États-Unis (avec une bien moindre part de la production

FIGURE 6

Conversion des matières premières agricoles en biocarburants liquides



Source: FAO.

totale). Au Brésil, la production de biodiesel est bien plus récente et le volume de production reste limité. La Chine, l'Inde, l'Indonésie et la Malaisie comptent parmi les producteurs importants de biodiesel.

Les rendements de biodiesel à l'hectare varient considérablement d'une culture énergétique à l'autre, d'un pays à l'autre et d'un système de production à l'autre, comme le montre le Tableau 2. Ces variations tiennent à la fois aux différences dans des rendements à l'hectare selon les cultures énergétiques et aux différences dans l'efficacité de conversion des différentes matières premières. Il s'ensuit que la demande de terres nécessaires pour faire face aux besoins de l'accroissement de

la production de biodiesel varie elle-même considérablement en fonction de la culture énergétique de base considérée et de son emplacement géographique. À l'heure actuelle, c'est la canne à sucre et la betterave à sucre qui permettent d'obtenir les meilleurs rendements en matière de production d'éthanol, le Brésil arrivant en tête du palmarès avec sa production à base de canne à sucre en termes de rendement en biocarburants à l'hectare, suivi d'assez près par l'Inde. Les rendements à l'hectare sont un peu plus faibles pour le maïs, là aussi avec des différences importantes entre les cultures de base, par exemple entre la Chine et les États-Unis d'Amérique. Les données figurant dans le Tableau 2 ne concernent

que les rendements techniques. Les prix de revient de la production des biocarburants à partir de différentes cultures énergétiques dans différents pays présentent également une grande hétérogénéité. Cette question est examinée de manière plus détaillée au Chapitre 3.

Le cycle de vie des biocarburants: bilans énergétiques et émissions de gaz à effet de serre

Les politiques de soutien au développement des biocarburants poursuivent deux grands objectifs: garantir la sécurité énergétique et réduire les émissions de gaz à effet de serre. De même que les rendements des différentes cultures énergétiques en termes de biocarburants par hectare varient considérablement, les bilans énergétiques et les résultats obtenus en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre affichent des écarts importants selon les matières premières, les régions et les technologies considérées.

La contribution nette des biocarburants à la fourniture d'énergie est fonction à la fois de la teneur en énergie des biocarburants et de l'énergie consommée dans sa production. Cette dernière englobe l'énergie nécessaire pour cultiver

et récolter la matière première végétale, pour la transformer en biocarburant et pour transporter les matières premières et le biocarburant qui en est tiré aux différentes étapes de la production et de distribution. Le bilan énergétique exprime le rapport entre l'énergie contenue dans le biocarburant et l'énergie fossile consommée dans sa production. Lorsque ce rapport est égal à 1,0 cela veut dire que la quantité d'énergie consommée dans la production du biocarburant est égale à la quantité d'énergie qu'il contient; en d'autres termes le biocarburant n'ajoute ni ne soustrait rien à la quantité d'énergie existante.

Lorsque ce rapport est égal à 2,0 cela veut dire qu'un litre de biocarburant contient deux fois plus d'énergie qu'il n'en a fallu pour le produire. Les efforts pour établir des bilans énergétiques précis se heurtent à des difficultés relatives à la délimitation du système soumis à analyse.

La Figure 7 récapitule les résultats de différentes études sur les bilans énergétiques pour différents types de carburant, empruntés au Worldwatch Institute (2006). Les chiffres font apparaître de grandes variations dans les estimations de bilans énergétiques selon les matières premières de base et le carburant et, parfois, pour une combinaison matière première/carburant donnée en fonction de facteurs tels que la

TABLEAU 1
Production de biocarburants par pays, 2007

PAYS/REGROUPEMENT DE PAYS	ÉTHANOL		BIODIESEL		TOTAL	
	(Millions de litres)	(Mtep)	(Millions de litres)	(Mtep)	(Millions de litres)	(Mtep)
Brésil	19 000	10,44	227	0,17	19 227	10,60
Canada	1 000	0,55	97	0,07	1 097	0,62
Chine	1 840	1,01	114	0,08	1 954	1,09
Inde	400	0,22	45	0,03	445	0,25
Indonésie	0	0,00	409	0,30	409	0,30
Malaisie	0	0,00	330	0,24	330	0,24
États-Unis d'Amérique	26 500	14,55	1 688	1,25	28 188	15,80
Union européenne	2 253	1,24	6 109	4,52	8 361	5,76
Autres	1 017	0,56	1 186	0,88	2 203	1,44
Monde	52 009	28,57	10 204	7,56	62 213	36,12

Note: Les chiffres ont été arrondis.

Source: adapté de F.O. Licht, 2007, données provenant de la donnée de bases AgLink-Cosimo de l'OCDE-FAO.

TABLEAU 2

Rendements en biocarburants pour différents types de matières premières et différents pays

CULTURES	ESTIMATIONS AUX NIVEAUX MONDIAL/ NATIONAL	BIOCARBURANTS	RENDEMENT DES CULTURES	EFFICACITÉ DE CONVERSION	EFFICACITÉ DE CONVERSION
			(Tonnes/ha)	(Litres/tonne)	(Litres/ha)
Betterave à sucre	Mondial	Éthanol	46,0	110	5 060
Canne à sucre	Mondial	Éthanol	65,0	70	4 550
Manioc	Mondial	Éthanol	12,0	180	2 070
Maïs	Mondial	Éthanol	4,9	400	1 960
Riz	Mondial	Éthanol	4,2	430	1 806
Blé	Mondial	Éthanol	2,8	340	952
Sorgho	Mondial	Éthanol	1,3	380	494
Canne à sucre	Brésil	Éthanol	73,5	74,5	5 476
Canne à sucre	Inde	Éthanol	60,7	74,5	4 522
Palmier à huile	Malaisie	Biodiesel	20,6	230	4 736
Palmier à huile	Indonésie	Biodiesel	17,8	230	4 092
Maïs	États-Unis d'Amérique	Éthanol	9,4	399	3 751
Maïs	Chine	Éthanol	5,0	399	1 995
Manioc	Brésil	Éthanol	13,6	137	1 863
Manioc	Nigéria	Éthanol	10,8	137	1 480
Soja	États-Unis d'Amérique	Biodiesel	2,7	205	552
Soja	Brésil	Biodiesel	2,4	205	491

Sources: Rajagopal et al., 2007, pour les données au niveau mondial; Naylor et al., 2007, pour les données au niveau national.

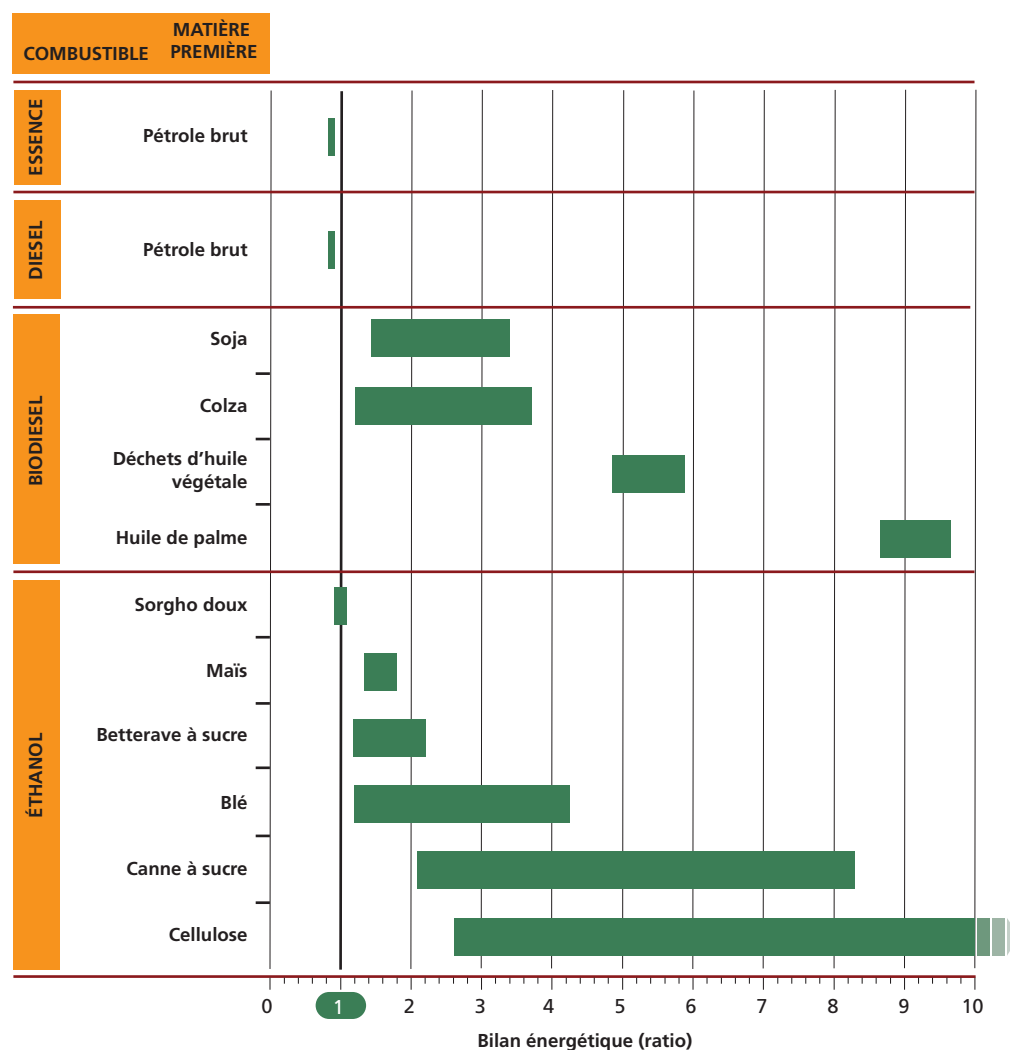
productivité des matières premières, des pratiques agricoles et les technologies de conversion.

Le bilan énergétique en termes d'énergie fossile de l'essence et du diesel classiques est de 0,8-0,9 parce qu'une partie de l'énergie est consommée pour raffiner le pétrole brut et le transformer en carburant utilisable et pour le transporter sur le marché. Si le bilan énergétique d'un biocarburant est supérieur à ses valeurs, il contribue à réduire la dépendance à l'égard des combustibles fossiles. Mesurée à cette aune, la contribution de tous les biocarburants apparaît comme positive, quoiqu'à des degrés très divers. Les valeurs estimatives obtenues pour le bilan énergétique du biodiesel varient dans une fourchette

comprise entre 1 et 4 pour le tournesol, le colza et le soja. Le bilan estimatif pour l'huile de palme est supérieur, près de 9, parce qu'il faut triturer d'autres oléagineuses avant de pouvoir extraire l'huile et cette étape supplémentaire de transformation exige de l'énergie. Pour ce qui est de l'éthanol produit à partir de matière première végétale, le bilan estimé varie entre une valeur de moins de 2,0 pour le maïs et une valeur comprise entre 2 et 8 pour la canne à sucre. Le bilan énergétique positif de l'éthanol à base de canne à sucre, comme celui produit au Brésil, tient non seulement à la productivité de la matière première de base, mais aussi au fait que l'on utilise les résidus de biomasse de la canne à sucre (bagasse) comme intrant énergétique dans sa production.

FIGURE 7

Estimation des bilans énergétiques des principaux types de combustibles



Note: Les ratios des biocarburants à base de cellulose sont théoriques. Sources: adapté du Worldwatch Institute, 2006, Tableau 10.1; Rajagopal et Zilberman, 2007.

Les écarts obtenus dans le calcul des bilans énergétiques pour les matières premières cellulosiques sont encore plus importants, ce qui reflète les incertitudes relatives à cette technologie et la diversité des matières premières et des systèmes de production.

De même, les biocarburants peuvent avoir des effets nets très différents sur les émissions de gaz à effet de serre. Les biocarburants sont produits à partir de la biomasse; par conséquent, ils devraient avoir en théorie un effet neutre en termes de carbone puisque leur combustion ne renvoie dans l'atmosphère que ce que la

plante en a retiré durant sa croissance – à la différence des combustibles fossiles qui libèrent du carbone qui a été stocké pendant des millions d'années dans l'écorce terrestre. Toutefois pour évaluer l'effet net d'un biocarburant sur les émissions de gaz à effet de serre, il faut en analyser les émissions sur tout son cycle de vie: de la plantation à la récolte de la culture de base; durant la transformation des matières premières en biocarburants; pendant le transport des matières premières puis du carburant qui a en été tiré; pendant le stockage, la distribution et la commercialisation au

détail – sans omettre les effets de son emploi comme carburant dans les véhicules ni les émissions causées par sa combustion. Il faut en outre tenir compte de tous les coproduits susceptibles de réduire les émissions. Par conséquent, le bilan énergétique en termes d'énergie fossile n'est que l'un des éléments servant à déterminer l'incidence des carburants dans le montant des émissions. D'autres facteurs liés à la production agricole revêtent également une importance critique, par exemple l'emploi d'engrais et de pesticides, les techniques d'irrigation et de traitement des sols. Les changements d'affectation des terres induits par l'extension de la production de biocarburants peuvent également avoir une importance considérable. Par exemple, la conversion de terres destinées à la sylviculture ou à la production agricole à la production de matières premières énergétiques peut se traduire par d'importantes émissions de carbone que la réduction des émissions obtenues en remplaçant les combustibles fossiles par les biocarburants ne permettra pas de compenser avant de nombreuses années. Le Chapitre 5 se livre à un examen détaillé des rapports entre biocarburants et émissions de gaz à effet de serre, et passe en revue les données montrant que l'incidence des biocarburants sur les changements climatiques n'est pas uniforme ni nécessairement positive, du moins pas aussi positive qu'on a généralement tendance à le supposer.



Biocarburants liquides de la deuxième génération⁵

L'expression de biocarburant de la première génération renvoie généralement aux cultures énergétiques à forte teneur en sucre et en amidon ainsi qu'aux oléagineuses utilisées respectivement comme matières premières dans la production d'éthanol et de biodiesel. Les technologies dites de deuxième génération en cours de développement visent quant à elles à rendre possible l'utilisation de la biomasse lignocellulosique dans ces productions. La

biomasse cellulosique offre plus de résistance à la dégradation que les amylacés, les sucres et les huiles. Sa conversion en carburant liquide présente des difficultés, ce qui rend cette méthode de production plus coûteuse que les autres en dépit du prix de revient relativement moindre de la matière première cellulosique elle-même, par rapport aux matières premières utilisées pour la production des biocarburants de la première génération. Le processus de conversion de la cellulose en éthanol se déroule en deux temps: les composants cellulose et hémicellulose de la biomasse sont d'abord décomposés en sucres, puis ces sucres sont fermentés pour produire de l'éthanol. Toutes les difficultés techniques relatives à la première étape n'ont pas encore été résolues et les recherches axées sur la mise au point de méthodes rentables et efficaces de conversion se poursuivent. Le manque de débouchés commerciaux a jusqu'ici freiné le développement du secteur.

Étant donné que la biomasse cellulosique est le matériau biologique le plus répandu sur terre, la mise au point de biocarburants de la deuxième génération à base de cellulose commercialement rentables pourrait déboucher sur une forte augmentation du volume de la production des matières premières servant de base à ces nouveaux biocarburants et sur une plus grande diversification de ces matières premières, parmi lesquelles pourraient désormais figurer les déchets cellulose, notamment ceux provenant de l'agriculture (pailles, tiges, feuilles) et de la sylviculture, ceux des industries de transformation (coques de noix, bagasse de canne à sucre, sciures) ou encore la partie organique des déchets municipaux. Il ne faut toutefois pas perdre de vue le rôle important que joue la biomasse en décomposition dans le maintien de la fertilité et de la texture des sols, ni par conséquent les effets négatifs pouvant résulter de prélèvements excessifs aux fins de la production de bioénergie.

La solution pourrait consister à s'orienter vers la mise en culture de végétaux à forte teneur en cellulose spécifiquement destinés à alimenter en matières premières les technologies de deuxième génération. Parmi les espèces ligneuses à rotation rapide offrant un potentiel intéressant,

⁵ La présente section s'inspire de GBEP (2007), AIE (2004) et Rutz et Janssen (2007).

citons le saule, les peupliers hybrides et l'eucalyptus ou certaines graminées comme le miscanthus, le panic érigé et le phalaris roseau. Leur principal avantage par rapport aux cultures énergétiques de première génération concerne le caractère durable de leur exploitation du point de vue de l'environnement. Leur rendement en biomasse à l'hectare est supérieur à celui des amylacés et des oléagineuses, du fait que dans leur cas la totalité de la récolte peut être convertie en carburant. Qui plus est, certaines des cultures pérennes à croissance rapide parmi les essences ligneuses et les graminées s'accommodent de sols pauvres et dégradés se prêtant mal aux cultures vivrières en raison des dégâts causés par l'érosion ou d'autres contraintes. Le risque que ces cultures empiètent sur les terres destinées à la production vivrière ou de fourrage pour les animaux s'en trouve donc réduit d'autant. Parmi les facteurs à inscrire au passif de ces récoltes, on peut mentionner le fait que certaines d'entre elles sont considérées comme envahissantes ou potentiellement envahissantes et qu'elles risquent d'avoir une incidence négative sur les ressources en eau, la biodiversité et l'agriculture.

Les biocarburants de la deuxième génération et les matières premières qui les sous-tendent pourraient également présenter des avantages au regard de la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il ressort de la plupart des projections réalisées en la matière que, comparés aux carburants de la première génération ou à ceux tirés du pétrole, les nouveaux carburants produits à partir des cultures pérennes et des résidus ligneux et agricoles permettront de réduire substantiellement les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie.

Cela tient à la fois au rendement supérieur à l'hectare des cultures de base utilisées et au combustible utilisé dans le processus de conversion. L'énergie utilisée dans le processus de production de l'éthanol provient en général des combustibles fossiles (sauf au Brésil où l'éthanol est produit à base de canne sucre, laquelle fournit sous forme de bagasse l'essentiel de l'énergie nécessaire à sa transformation), alors que l'énergie nécessaire à la transformation des végétaux servant de base aux biocarburants de

deuxième génération pourrait être fournie par les déchets (essentiellement la lignine) de ces mêmes végétaux.

S'il est vrai qu'il est plus difficile de décomposer la biomasse cellulosique pour la convertir en carburant liquide, elle est aussi plus robuste et résiste mieux à la manutention, ce qui réduit cette partie des coûts, et elle conserve mieux ses qualités que les cultures vivrières par exemple. Se conservant mieux, elle est également plus facile à stocker surtout si on la compare aux cultures à forte teneur en sucre. En revanche, la biomasse cellulosique étant souvent volumineuse, l'acheminement des récoltes jusqu'aux installations de transformation exigera une infrastructure de transports bien développée.

D'importantes difficultés techniques doivent encore être surmontées avant que la production d'éthanol à partir de la biomasse cellulosique devienne commercialement rentable de sorte qu'il est malaisé de prévoir combien de temps il faudra attendre avant que la part des nouveaux carburants dans la consommation mondiale de combustibles liquides devienne réellement appréciable. Bon nombre d'installations pilotes et de projets de démonstration sont déjà en fonctionnement ou à l'étude aux quatre coins du monde et leurs succès pratiques, de même que la poursuite de l'effort de financement de la recherche, le niveau des cours mondiaux du pétrole et des investissements du secteur privé seront déterminants pour la croissance de la filière de conversion biochimique et thermochimique.

En résumé, les techniques de production des biocarburants de la deuxième génération à partir de la biomasse lignocellulosique offrent un panorama complètement nouveau au regard de leurs implications pour l'agriculture et la sécurité alimentaire: elles rendent possible l'exploitation comme matière première d'une bien plus grande variété de végétaux que les technologies de la première génération et des rendements énergétiques à l'hectare plus élevés. Les effets des biocarburants sur les marchés des matières premières, les conversions de terres et l'environnement seront eux aussi différents – au gré de l'évolution que suivront les technologies de transformation et de production (voir Encadré 2).

ENCADRÉ 2

Applications de la biotechnologie aux biocarburants

Nombreuses sont les biotechnologies existantes dont les applications peuvent servir à améliorer la production de bioénergie, que ce soit par exemple en améliorant les plantes qui fournissent la biomasse ou encore en améliorant l'efficacité des méthodes de conversion de la biomasse en biocarburants.

Biotechnologies appliquées à la production de biocarburants de la première génération

Les variétés de plantes actuellement utilisées pour la production de biocarburants de la première génération ont été sélectionnées sur la base de caractères agronomiques pertinents au regard de la production de produits alimentaires et de fourrage et non pas sur la base de caractéristiques tendant à favoriser leur emploi comme matière première pour la production de biocarburants. La biotechnologie peut contribuer à accélérer le processus de sélection des variétés les mieux adaptées à ce type de production – rendement en biomasse à l'hectare supérieur, teneur plus élevée en huile (production de biodiesel) ou en sucres fermentables (production d'éthanol), facilité de transformation au niveau de la conversion en biocarburants.

Le champ d'étude du génome, c'est-à-dire de tout le matériel génétique d'un organisme, est sans doute appelé à jouer un rôle de plus en plus important. La séquence du génome de plusieurs des plantes qui servent de matière première à la production de biocarburants, comme le maïs, le sorgho et le soja, est en passe d'être établie ou a déjà été publiée. Parmi les autres biotechnologies donnant lieu à des applications figurent la sélection assistée par marqueurs et la modification génétique.

La fermentation des sucres joue un rôle central dans la production d'éthanol à partir de la biomasse. Toutefois, le micro-organisme le plus couramment utilisé dans l'industrie de la fermentation, la levure *Saccharomyces cerevisiae*, ne permet pas de fermenter directement les amylacés comme l'amidon de maïs. La biomasse doit d'abord être décomposée (par hydrolyse) en sucres fermentables au moyen d'enzymes appelées amylases. Nombre des enzymes actuellement disponibles dans le commerce sont produites au moyen de micro-organismes génétiquement modifiés. Les recherches se poursuivent concernant la mise au point de souches de levures génétiquement stables capables de produire elles-mêmes des amylases ce

 Le potentiel de la bioénergie

Qu'attendre de la production de bioénergie? Le potentiel économique et technique de la bioénergie doit être apprécié dans le contexte de la croissance démographique et de la hausse des revenus au niveau mondial avec les chocs et les tensions qu'elles génèrent au sein du système agricole mondial, corollaires de la poussée de la demande de denrées alimentaires et agricoles. Telle production techniquement possible peut ne pas être rentable sur le plan économique ou durable sur le plan de l'environnement. Dans la présente section, le potentiel économique et technique de la bioénergie est examiné plus en détail.

La bioénergie étant produite à partir de la biomasse, la limite de son potentiel global est donnée en dernière analyse par la quantité totale d'énergie produite sur la planète par photosynthèse. L'énergie totale accumulée par les végétaux est de l'ordre de 75 000 Mtep (3 150 Exajoule) par an (Kapour, 2004) – soit six à sept fois le montant actuel de la demande énergétique mondiale. En termes purement physiques, la collecte de l'énergie solaire par le biais de la biomasse est une méthode qui laisse à désirer, surtout si on la compare au rendement obtenu grâce aux panneaux solaires, toujours plus performants (FAO, 2006a).

Différentes études ont tenté de déterminer le volume de la biomasse

qui permettrait de combiner les étapes de l'hydrolyse et de la fermentation.

L'application des biotechnologies aux biocarburants de la deuxième génération

La biomasse lignocellulosique consiste essentiellement en lignine, en cellulose polysaccharides (consistant en sucres hexose) et en hémicellulose (contenant un mélange de sucres hexose et pentose). Comparé à la production d'éthanol à partir de matières premières végétales de la première génération, l'emploi de la biomasse lignocellulosique est plus compliqué parce que les polysaccharides sont plus stables et les sucres pentose ne peuvent être fermentés directement par *Saccharomyces cerevisiae*. Afin de convertir la biomasse lignocellulosique en biocarburants, les polysaccharides doivent d'abord être hydrolysés ou décomposés en sucres simples au moyen d'acides ou d'enzymes. On cherche à résoudre ce problème en recourant à diverses méthodes reposant sur les biotechnologies, y compris la mise au point de souches de *Saccharomyces cerevisiae* capables de fermenter les sucres pentose, la mise au point d'espèces de levures de remplacement capables de fermenter naturellement les sucres

pentose, et la conception d'enzymes capables de décomposer la cellulose et l'hémicellulose en simples sucres.

En dehors de l'agriculture, de la sylviculture et d'autres sous-produits, la principale source de biomasse lignocellulosique pour la production de biocarburants de la deuxième génération proviendra vraisemblablement de cultures spécifiquement destinées à cette fin, comme celle de certaines herbes pérennes et de certaines essences d'arbres de forêt. Les études se poursuivent dans le domaine du génome, des modifications génétiques et des autres biotechnologies en vue de produire des plantes ayant les caractéristiques souhaitées pour la production de biocarburants de deuxième génération, par exemple qui produisent moins de lignine (composé qui ne peut être converti par fermentation en carburant liquide), qui produisent elles-mêmes des enzymes capables de dégrader la cellulose et la lignine, et qui aient un rendement supérieur en cellulose ou en biomasse globale.

Sources: sur la base de la FAO, 2007a, et de The Royal Society, 2008.

pouvant techniquement servir à accroître l'offre d'énergie mondiale. Les estimations obtenues divergent sensiblement en raison de différences dans la portée, les présupposés et la méthodologie des analyses en question, révélant du même coup le degré élevé d'incertitude concernant l'apport éventuel de la bioénergie à l'offre énergétique mondiale de demain. Selon la dernière grande étude des bioénergies réalisée par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) sur la base d'études existantes, la part potentielle des bioénergies en 2050 varierait à l'intérieur d'une fourchette comprise entre un minimum de 1 000 Mtep et un maximum de 26 200 Mtep (AIE, 2006, p. 412-16). Ce dernier chiffre se basait sur l'hypothèse d'un progrès technologique

très rapide; l'AIE précisait toutefois qu'une évaluation plus réaliste se fondant sur une croissance plus lente des rendements donnerait une fourchette comprise entre 6 000-12 000 Mtep. Selon elle, pour obtenir un résultat de 9 500 Mtep se situant dans le milieu de cette fourchette, il faudrait qu'un cinquième environ de la superficie de toutes les terres agricoles mondiales soit consacré à la production de biomasse.

Plus importante encore que la question de la viabilité purement technique est la question de savoir quelle proportion de ce potentiel bioénergétique techniquement disponible se prêterait à une exploitation économiquement rentable. L'évaluation du potentiel économique à long terme est étroitement conditionnée par les hypothèses

TABLEAU 3

Rendement potentiel en éthanol des principales céréales et cultures sucrières

CULTURES	SUPERFICIE TOTALE	PRODUCTION TOTALE	RENDEMENT EN BIOCARBURANT	RENDEMENT MAXIMUM EN ÉTHANOL	ÉQUIVALENT PÉTROLE	PART DE LA PRODUCTION DANS LA CONSOMMATION MONDIALE DE PÉTROLE EN 2003 ¹
	(Millions d'hectares)	(Millions de tonnes)	(Litres/hectare)	(Milliards de litres)	(Milliards de litres)	(Pourcentage)
Blé	215	602	952	205	137	12
Riz	150	630	1 806	271	182	16
Maïs	145	711	1 960	284	190	17
Sorgho	45	59	494	22	15	1
Canne à sucre	20	1 300	4 550	91	61	6
Manioc	19	219	2 070	39	26	2
betterave à sucre	5,4	248	5 060	27	18	2
Total	599	...	...	940	630	57

Note: ... = non disponible. Les chiffres ont été arrondis.

¹ Consommation mondiale de pétrole en 2003 = 1 100 milliards de litres (Kim et Dale, 2004).

Source: Rajagopal et al., 2007.

relatives aux prix des énergies fossiles, au développement des matières premières agricoles et aux futures innovations techniques dans les méthodes de récolte, de conversion et l'utilisation des biocarburants. Ces différents aspects sont examinés de manière plus détaillée au Chapitre 3.

On peut aborder l'évaluation du potentiel de la production de biocarburants sous l'angle des besoins relatifs en terres. Dans le «scénario de référence» pour 2030 qu'elle décrit dans son *World Energy Outlook 2006*, l'AIE prévoit que la part des terres arables consacrées à la production de biomasse destinée à être convertie en biocarburants liquides, qui représentait 1 pour cent de la superficie mondiale totale des terres arables en 2004, passera à 2,5 pour cent en 2030, alors que dans son «scénario de politiques alternatives», leur part passe à 3,8 pour cent en 2030. Dans les deux cas, les projections reposent sur l'hypothèse que les biocarburants liquides seront produits à partir des matières premières végétales habituelles. Dans l'hypothèse où les biocarburants feraient l'objet d'une commercialisation à grande échelle avant 2030, l'AIE prévoit que la part mondiale des biocarburants dans la demande d'énergie pour les transports passerait à 10 pour cent au lieu des 3 pour cent de son scénario de référence et des 5 pour cent de son Scénario

de politiques alternatives. La demande supplémentaire de terres serait assez faible, portant la proportion des terres destinées à la production de biocarburants à 4,2 pour cent du total des terres arables, en raison de l'amélioration du rendement énergétique à l'hectare et de l'utilisation des déchets de la biomasse comme combustible pour la production, d'où il ressort, en tout état de cause, que même dans le cadre d'un scénario de la deuxième génération, une hypothétique substitution à grande échelle des combustibles d'origine fossile par des biocarburants liquides exigerait une réaffectation des terres de grande ampleur. On trouvera un examen plus détaillé de ces questions ainsi qu'une ventilation par région de l'incidence des évolutions envisagées, au Chapitre 4.

On trouve également une évaluation du potentiel des biocarburants comme source d'énergie susceptible de remplacer les combustibles fossiles dans l'étude de Rajagopal et al. (2007). Les auteurs présentent des estimations de la production théorique mondiale d'éthanol à partir des principales céréales et cultures sucrières utilisées comme matière première, établies sur la base de rendements et de coefficients d'efficacité de conversion moyens pondérés au niveau mondial. Les résultats de leurs estimations sont reproduits dans le Tableau 3.

Les cultures mentionnées représentent 42 pour cent de la totalité des terres arables aujourd'hui. La conversion de la totalité de la masse végétale récoltée donnerait un volume d'éthanol équivalant à 57 pour cent de la consommation totale de pétrole. Si l'on part de l'hypothèse, plus raisonnable, que 25 pour cent seulement de chacune de ces récoltes est convertie en éthanol, le volume d'éthanol obtenu ne correspond plus qu'à 14 pour cent de la consommation de pétrole.

Il ressort clairement de ces calculs de rendements théoriques que, compte tenu de la superficie qu'il faudrait affecter aux différentes cultures énergétiques, il ne faut pas s'attendre que les biocarburants se taillent une part autre que très modeste de la consommation totale d'énergie au détriment des combustibles fossiles. Si modeste cependant que soit leur part, les biocarburants sont susceptibles d'avoir un impact considérable sur l'agriculture et les marchés agricoles.

Principaux messages du chapitre

- La part de la bioénergie dans l'offre mondiale d'énergie est de l'ordre de 10 pour cent. Elle provient pour l'essentiel de la biomasse non transformée utilisée dans la consommation directe traditionnelle, mais la bioénergie commerciale gagne en importance.
- Les biocarburants liquides pour le transport ont la vedette et enregistrent une croissance rapide de leur production. Sur le plan quantitatif, toutefois, leur rôle reste marginal: ils couvrent 1 pour cent des besoins en carburant du secteur des transports et 0,2-0,3 pour cent des besoins énergétiques au niveau mondial.
- Les principaux biocarburants liquides sont l'éthanol et le biodiesel. L'un et l'autre peuvent être produits à partir d'un vaste éventail de matières premières. Les principaux producteurs sont le Brésil et les États-Unis d'Amérique pour l'éthanol et l'UE pour le biodiesel.
- Les technologies actuelles de production des biocarburants liquides reposent sur l'emploi de matières premières agricoles, la production d'éthanol sur les cultures sucrières et amylacées, concrètement sur la canne à sucre au Brésil et le maïs aux États-Unis d'Amérique pour les productions les plus importantes en volume, la production de biodiesel sur différentes oléagineuses.
- La production à grande échelle de biocarburants exige que de vastes superficies soient affectées à la production des matières premières. Il est par conséquent vraisemblable que les biocarburants ne se substitueront aux combustibles fossiles pour le transport que dans une mesure très limitée.
- Les biocarburants liquides, en dépit de leur faible part dans la consommation mondiale d'énergie, peuvent exercer une influence non négligeable sur l'agriculture et les marchés agricoles mondiaux, en raison du volume de matières premières et des grandes superficies indispensables à leur production.
- La contribution des différents biocarburants à la réduction de la consommation d'énergie d'origine fossile varie considérablement lorsqu'on tient compte de l'énergie fossile consommée dans leur propre production. Le bilan énergétique de chaque biocarburant dépend de facteurs tels que la matière première végétale, le lieu de production, les pratiques agricoles et la source d'énergie utilisée dans le processus de conversion. En termes de contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, les écarts entre eux sont également très importants.
- Les biocarburants de la deuxième génération en cours de mise au point seront produits à partir de la biomasse lignocellulosique provenant du bois, de certaines graminées et des résidus de la sylviculture et de l'agriculture. Cela permettra d'améliorer le rendement en biocarburants à l'hectare et vraisemblablement aussi le bilan énergétique des biocarburants et leur bilan au regard des émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, on ne sait pas quand ces nouvelles technologies pourront déboucher sur une production commerciale à une échelle appréciable.