



<p>UPR 42 Biomasse-Énergie Département des forêts du CIRAD 73 rue JF Breton – TA 10/16 34 398 Montpellier Cedex 5 Tél. : 04 67 61 44 75</p>		<p>Direction de la Prospective Direction Scientifique de Total 2 place de la Coupole – La Défense 6 92 078 Paris La Défense Cedex Tél. : 01 47 44 43 41</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

PROJET DE RECHERCHE

Convention de collaboration Total DS 2183

<p>POTENTIALITES DE LA BIOMASSE MONDIALE POUR LA FILIERE INDUSTRIELLE BIOCARBURANT</p> <p>un état des lieux des potentiels</p> <p>– Rapport final –</p>

Slim Saïdi, Jean-François Trébuchon, Laurent Gazull,
Abigaïl Fallot, Philippe Girard

Mars 2007

Synthèse et conclusions

Ce rapport final rend compte d'un travail d'identification, de localisation et de quantification des potentiels en biomasse pour une filière énergétique moderne de transformation en carburants. Y sont étudiés les potentiels en termes d'une part de plantations énergétiques et d'autre part de résidus des activités agricoles et forestières.

L'essentiel des résultats et leur originalité par rapport aux travaux existants tiennent au géo-référencement des potentiels, l'ensemble des cartes produites étant fourni sur support informatique (CD-Rom ci-joint). Les données cartographiques sont accompagnées du présent document avec une présentation : de la problématique de l'étude ; de la méthodologie suivie ; et des résultats chiffrés. La synthèse proposée ici expose la méthode dans ses grandes lignes et les principaux résultats.

Potentiels de plantation énergétique

Parmi les arbres faisant l'objet de plantations, trois genres ont été identifiés comme particulièrement intéressants pour des plantations énergétiques :

- *Pinus*, le pin, est le genre le plus répandu au monde et pousse dans une très grande diversité de contextes ;
- Du fait de son rôle dans la reconstitution des sols, le genre *Acacia* est particulièrement intéressant sur des terres non valorisables par l'agriculture ;
- L'*Eucalyptus* se caractérise par sa capacité à faire des rejets qui permet d'obtenir des rendements élevés sur de courtes rotations.

Les autres genres d'arbres sont moins performants en termes de rendements ou présentent des inconvénients en termes de longueur de rotation ou de besoins spécifiques difficiles à réunir sur des terres non agricoles ni protégées.

Qu'il s'agisse de choix méthodologiques ou d'interprétation des résultats, les auteurs ont mobilisé tout au long de la présente étude les connaissances scientifiques et pratiques du Cirad sur ces trois genres notamment en milieu tropical.

Compte tenu des meilleures pratiques existantes en matière de plantation dans ces trois genres, un rendement de vingt tonnes de matière sèche par hectare et par an (20 t/ha.an, soit quelques 40 m³/ha.an) constitue notre référence. Ce niveau de productivité :

- est atteint voire dépassé dans certains pays, des progrès en matière de sélection génétique et de pratiques sylvicoles permettent d'espérer l'atteindre de façon généralisée ;
- correspond *a priori* et sur l'expérience brésilienne, à des niveaux de coûts compatibles avec une valorisation énergétique à grande échelle du bois.

A l'échelle globale où se situe cette étude, le choix des trois genres et celui du rendement de référence de 20 t/ha.an sont des partis pris méthodologiques sur la base de l'expertise des auteurs et de collègues du Cirad spécialistes des plantations ainsi que de l'expérience brésilienne. Ces choix peuvent donc être remis en question et doivent forcément l'être si l'on quitte l'échelle globale pour s'intéresser à une zone géographique en particulier.

Description générale de la méthode

Les conditions dans lesquelles évoluent les genres *Eucalyptus*, *Acacia* et *Pinus* peuvent être caractérisées par trois principaux critères bioclimatiques :

- la température moyenne maximale journalière du mois le plus chaud (M) ;
- la température moyenne minimale journalière du mois le plus froid (m) ;
- la pluviométrie (P).

Sur chaque critère, un intervalle est défini, indiquant pour chaque genre, d'une part sa zone de subsistance et d'autre part sa zone favorable à une productivité annuelle de 20t/ha. Cette définition des

intervalles bioclimatiques repose sur la revue des travaux scientifiques décrivant les genres considérés, les publications utilisées sont référencées en annexe. La fiabilité de ces fourchettes bioclimatiques est strictement liée aux observations empiriques relatives dans ces travaux. Du fait de la grande souplesse écologique des espèces retenues, les fourchettes bioclimatiques ne constituent pas à elles seules des facteurs limitants à cette production de 20t/ha.an. (illustration de la tolérance bioclimatique en annexe). A moins de considérer des zones aux caractéristiques bioclimatiques très éloignées des fourchettes initiales, des facteurs compensatoires peuvent être mis en œuvre. Inversement et malgré la souplesse édaphique des espèces des genres retenus, il est certain que dans les zones bioclimatiques favorables mais présentant des sols superficiels et peu fertiles, des solutions de fertilisation seront indispensables. Les variables bioclimatiques ne peuvent pas à elles seules assurer le taux de production fixé.

Les cartes mondiales des trois critères bioclimatiques sont élaborées puis combinées, ce qui permet de localiser les zones de subsistance de chaque genre ainsi que les zones bioclimatiquement favorables à une productivité de 20t/ha.an.

Une série de critères d'exclusion sont ensuite appliqués, toujours sur la base d'informations cartographiées à l'échelle globale. On extrait des zones favorables aux plantations énergétiques les terres a priori non disponibles pour l'une au moins des raisons suivantes.

- * Terrains montagneux ou trop pentu pour l'exploitation de plantations énergétiques. Le seuil d'une pente de 9 degrés a été retenu, au dessus duquel les terrains sont jugés inaptes à un minimum de mécanisation par les forestiers.
- * Occupation urbaine. Une carte des zones urbaines a été utilisée qui tient compte de l'expansion des villes dans les dix prochaines années ;
- * Aires protégées. Le recours à une carte des aires protégées (base de données mondiales) permet de ne pas considérer comme potentiellement disponibles des terres aux écosystèmes fragiles et reconnus comme tels.
- * Forêts actuelles. Pour des raisons de protection de l'environnement également, il n'est pas envisagé de convertir des zones de forêts en plantations d'arbres à croissance rapide.
- * Zones agricoles, lacs, surfaces en eau et sols nus (routes e.g.). Pour des raisons de sécurité alimentaire, il n'est pas non plus envisagé d'établir des plantations sur des terres agricoles. Il n'est pas ignoré que les terres agricoles évoluent sans cesse, on suppose que cela se fait à surface constante, que l'augmentation des surfaces liée à la croissance démographique est compensée par la déprise agricole des terres dégradées et par l'intensification des pratiques.

Ces critères d'exclusion s'imposent et permettent une première délimitation des terres potentiellement disponibles pour les plantations énergétiques. Elle ne fournit aucune garantie sur la disponibilité effective des terres ni sur la faisabilité et la durabilité des plantations. La seconde limite de l'étude est qu'il s'agit d'une image instantanée, basée sur les seules cartes mondiales disponibles au moment de l'étude, cartes élaborées avec des observations satellitaires d'il y a quelques années. La réalité du terrain peut-être autre soit parce qu'il y a eu évolution entre temps soit du fait de spécificités locales invisibles à l'échelle globale.

Sur une carte du monde, les zones ainsi identifiées comme potentiellement disponibles pour des plantations d'*Eucalyptus*, d'*Acacia* et de *Pinus* se recourent là où les conditions sont favorables aux trois genres. C'est la superficie de l'union des trois zones, et non la somme de leurs superficies, qui indique le potentiel global des plantations énergétiques en millions d'hectares (Mha).

La superposition d'une carte délimitant les pays permet d'éliminer les zones situées dans des pays dont le potentiel de plantations énergétiques est jugé non significatif car inférieur au demi-million d'hectares. Cette restriction participe d'une approche plutôt conservatoire tendant à la minimisation des volumes et se base sur l'opinion qu'un pays disposant de moins de 500.000 ha de terres potentiellement exploitables pour des plantations énergétiques ne s'intéressera pas à cette activité.

Les hectares potentiellement disponibles dans des pays aux potentiels significatifs sont convertis en volumes énergétiques :

- énergie primaire de la biomasse issue des plantations sur la base d'une productivité de 20 t/ha.an et d'un contenu énergétique moyen du bois de 18,2 MJ/t ;
- énergie secondaire suite à sa conversion dans une filière Fischer-Tropsch, on fait l'hypothèse d'un rendement énergétique en carburant (PCI biocarburant/PCI biomasse) de 40% (ou 50% en cas d'amélioration de la technologie).

Les volumes énergétiques obtenus ne tiennent pas compte de l'énergie nécessaire à l'exploitation des plantations, faute d'intégrer à ce stade encore trop global, les considérations de gestion sylvicole dont dépendent les dépenses énergétiques d'exploitation.

Enfin, des restrictions liées à la dispersion des terres potentiellement disponibles et à leur enclavement (distance à la mer et donc aux éventuels ports d'exportation) sont testées pour les plantations d'*Eucalyptus* sur la base d'un volume de biomasse à réunir (5 ou 0,5 Mt) sous contraintes d'un rayon d'approvisionnement maximale et d'une distance maximale à la mer. La taille de l'usine de préconditionnement ou de conversion énergétique de la biomasse détermine le volume à réunir. Sans aller au-delà de quelques simulations globales, on examine ainsi dans quelle mesure :

- les configurations avec des usines de grande taille et de faibles rayons d'approvisionnement réduisent la disponibilité globale en éliminant les zones aux potentiels les plus dispersés ;
- l'implantation de petites usines décentralisées susceptibles de préconditionner la biomasse (pyrolyse) avant de la transporter sur longue distance évite cette réduction des potentiels ;
- l'enclavement réduit les potentiels.

Résultats, les potentiels des plantations énergétiques

Les aires de plantations potentielles pour *Eucalyptus*, *Acacia* et *Pinus* s'élèvent respectivement à environ 370, 40 et 406 millions d'hectares (Mha). La surface globale disponible pour des plantations dont la productivité annuelle atteindrait durablement 20 t/ha est de l'ordre de 450 Mha.

PAYS	Surf. potentiellement disponible (Mha)
Brazil	119,1
China	39,4
Congo, DRC	32,3
Madagascar	22,5
Central African Republic	17,7
Argentina	17,3
Indonesia	16,8
Colombia	16,2
Myanmar	13,9
Mozambique	13,7
Australia	13,6
Bolivia	12,4
Venezuela	12,2
Uruguay	12,1
Angola	11,2
United States	10,2
Laos	8,6
Paraguay	8,4
United Kingdom	8,3
Vietnam	7,6
India	7,3
Tanzania	7,0
Ireland	6,9
Congo	6,8
Cameroon	6,7
Sudan	5,2
Nigeria	5,2
New Zealand	4,9
Ethiopia	4,7
Iceland	4,7
Thailand	4,7
Zambia	4,5
Cambodia	4,1
Uganda	4,0
Malaysia	2,6
Papua New Guinea	2,5
Chile	2,2
Guyana	1,8
Bangladesh	1,7
Kenya	1,6
Guinea	1,4
Philippines	1,4
Gabon	1,3
Peru	1,2
France	1,2
Ghana	1,1
Cuba	1,0
Ecuador	1,0
Norway	1,0
Malawi	1,0

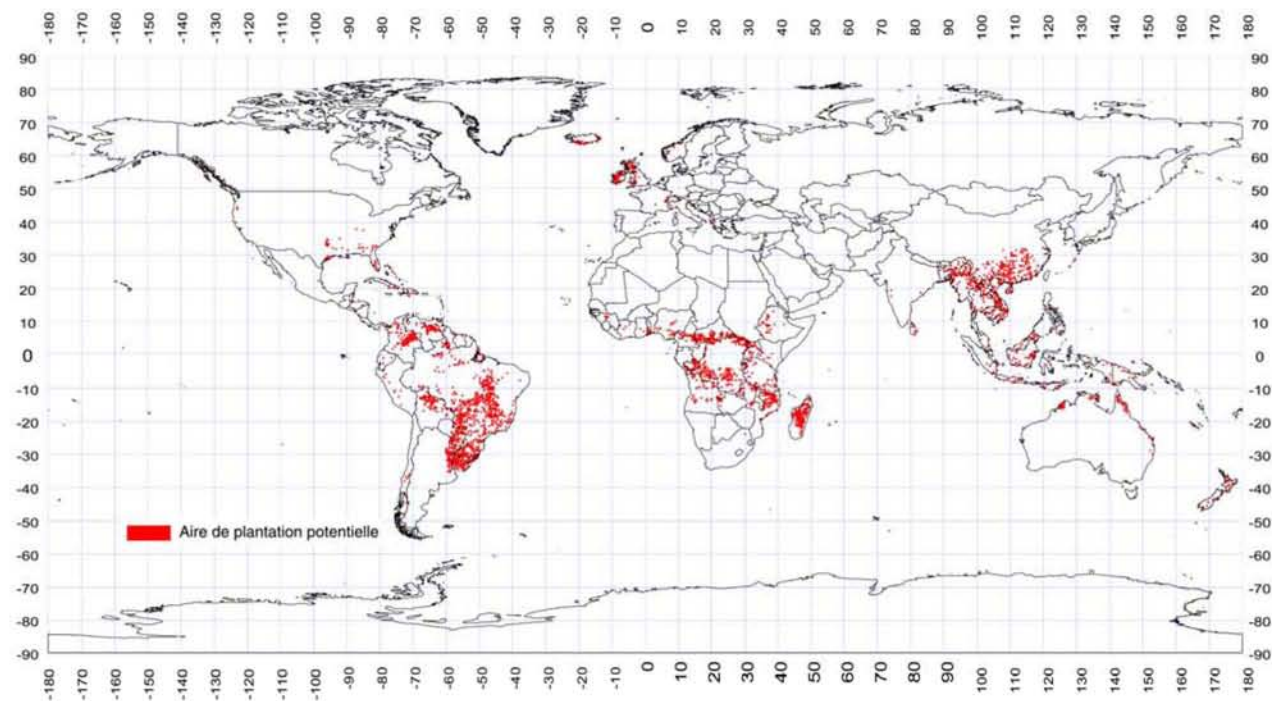
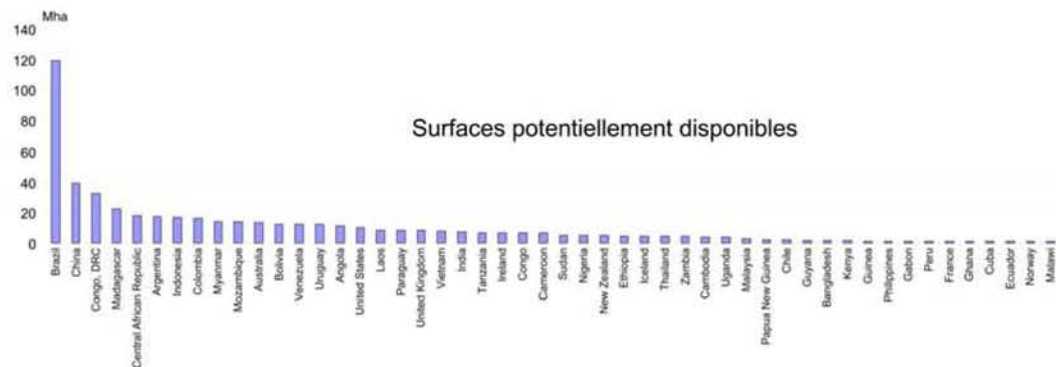


Figure 1.18 : Aire de plantation potentielle des trois genres confondus (*Pinus*, *Acacia* & *Eucalyptus*)

Ce résultat global est peu éloigné des valeurs auxquelles aboutissent des travaux prospectifs sur les potentiels menés selon d'autres méthodes. Les estimations de Hoogwijk et al. [2003] et de l'équipe du Copernicus Institute donnent un intervalle de [430; 580] Mha et l'approche de Michel Griffon au Cirad qui envisage des changements techniques de grande envergure dans les modes de culture, estime que entre 411 et 1206 Mha seraient potentiellement disponibles pour la production d'énergie, toutes filières confondues.

Comme l'illustre la carte ci-dessus avec l'*Eucalyptus* ce sont les pays d'Amérique Latine et d'Afrique qui recèlent les potentiels les plus importants, avec respectivement quelques 176 Mha de potentiels répartis sur quatorze pays latino-américains et 128 Mha de potentiels répartis sur vingt-et-un pays africain. Quant aux douze premiers pays asiatiques en termes de potentiels pour plantations, ils représentent 93 Mha environ.

Convertie en carburant, la biomasse dans les pays aux potentiels supérieurs au demi-million hectare, représenterait entre 1,5 et 2 milliards de tonne-équivalent-pétrole issus des plantations d'eucalyptus, acacias ou pins.

	<i>Eucalyptus</i>	<i>Acacia</i>	<i>Pinus</i>	3 genres
ZONE de SUBSISTANCE				
Critères bioclimatiques				
températures (°C)	-6 ; 45	- 10 ; 45	-40 ; 45	-6 ; 45
pluviosité (mm/an)	150 ; 3500	110 ; 4000	200 ; 5000	110 ; 5000
Superficies, en Mha	6.772	7.653	10.648	
ZONE de PLANTATIONS avec PRODUCTIVITE de 20t/ha.an				
Critères bioclimatiques				
températures (°C)	2 ; 35	16 ; 30	-6 ; 35	-6 ; 35
pluviosité (mm/an)	1000-3500	1000-4000	1000-5000	1000-5000
Superficies (Mha)	2.695	713	3.132	
Potentiels plantations, en Mha	370	40	406	450
POTENTIELS dans PAYS avec POTENTIEL > 0,5 Mha				
Superficies, en Mha	365	35	400	443
dont Amérique Latine (14 pays) :	155	3	154	176
dont Afrique (21 pays) :	121	22	119	128
dont Asie (12 pays) :	69	11	83	93
	133	13	146	161
Biocarburants, enMtep (valeurs basse et haute du rendement de conversion FT)	1.264 ; 1.580	123 ; 153	1.387 ; 1.733	1.534 ; 1.917
Biocarburants, en Mbpj	25,3 ; 31,6	2,5 ; 3,1	27,7 ; 34,7	30,7 ; 38,3

Tableau de synthèse des résultats

Pour les plantations d'*Eucalyptus*, des simulations ont été réalisées avec deux tailles d'usines de conversion énergétique de la biomasse (capacités de 5 Mt et de 0,5 Mt de matière sèche de biomasse), et pour chaque taille d'usine trois rayons d'approvisionnement (150, 100 et 50 km pour les grosses usines, 50, 25 et 15 km pour les petites usines) et trois niveaux de contraintes par rapport à la distance à la mer (pas de contrainte, inférieur à 100 km, inférieur à 500 km).

Ces simulations indiquent notamment :

- que limiter le rayon d'approvisionnement à 50 km dans le cas d'une grosse usine réduit de 25% le volume de biomasse collectable ;
- que le scénario d'implantation de grosses usines avec des portées de 150 km offre des quantités équivalentes au scénario d'implantation de petites usines avec des portées de 50km ;
- que plus d'un tiers des potentiels se situent à plus de 500 km des côtes.

Productions potentiellement mobilisables d'Eucalyptus selon les 2 scénarios industriels (Mt/an)			
en millions de tonnes	Volume collectable sans contrainte de distance à la mer	Volume collectable à moins de 1000 km des côtes	Volume collectable à moins de 500 km des côtes
Scénario industriel 1, "grandes" usines (5 Mt)			
Portée = 150 km	6083	5585	3895
Portée = 100 km	5901	5401	3750
Portée = 50 km	4625	4230	2875
Scénario industriel 2, "petites" usines (500 kt)			
Portée = 50 km	6183	5678	3998
Portée = 25 km	5842	5356	3741
Portée = 15 km	4174	3808	2618

Tableau 3.16 : Mobilisation de plantations d'*Eucalyptus* de productivité 20 t/ha.an

Sur le seul critère des superficies à mobiliser, la décentralisation d'un préconditionnement de la biomasse ne présentera donc pas d'avantage significatif. Les arbitrages se feront plutôt en fonction de bilans énergétiques complets et de coûts, notamment les coûts de transport par rapport aux infrastructures existantes ou à mettre en place.

Les limites de ces résultats tiennent essentiellement au caractère global de l'étude. Des études plus fines sur la base de données régionales et nationales s'imposent pour la révision de ces premiers ordres de grandeur et l'approfondissement de plusieurs questions.

Des potentiels à une disponibilité effective

Concernant les plantations, outre la nécessaire révision des informations cartographiques sur la base de données environnementales locales, notamment sur les aires protégées, c'est la question de concurrence entre usages des sols qui se pose de manière centrale.

En effet, plusieurs précautions ont été prises dans l'étude globale pour exclure des superficies potentiellement disponibles toutes celles susceptibles de servir à l'alimentation ou d'être protégées. Par contre, rien n'assure que des plantations destinées à la production de biocarburants de seconde génération représentent la meilleure option pour les différentes parties en présence. Les conditions d'accès à la terre (situation législative, populations locales, ...), de mobilisation de la biomasse (infrastructures) et de sa valorisation (main-d'œuvre et technologies,...) sont déterminantes de l'intérêt que représenterait une filière FT dans un contexte donné.

Une seconde voie d'amélioration de l'évaluation des potentiels concerne les rendements (productivité à l'hectare des plantations, contenu énergétique de la biomasse, rendement de conversion FT). Pour chaque paramètre, une valeur de référence a été choisie ici. Or une prise en compte des conditions plus locales de production et des impératifs de développement durable (conservation de la biodiversité, qualité des sols et des nappes phréatiques...) se traduira par des rendements variables selon les milieux mais aussi les modes d'exploitation.

La poursuite de l'étude des potentiels de biomasse pour des carburants oblige d'une part à quitter le niveau global pour une échelle plus fine, d'une région ou d'un pays, et d'autre part à expliciter les conditions d'émergence d'une filière FT. De chiffres sur une disponibilité potentielle globale, on passera à des niveaux de coûts associés à des volumes énergétiques mobilisables. Le caractère

novateur du travail réalisable se situerait comme pour l'étude globale dans le géo-référencement des résultats.

Autre amélioration à poursuivre pour une dimension véritablement prospective de ce travail d'évaluation des potentiels de plantations énergétiques, la prise en compte des effets du changement climatique. Il est en effet probable que les zones identifiées comme bioclimatiquement favorables à des plantations énergétiques évoluent du fait du renforcement de l'effet de serre (modifications des températures et de la pluviométrie).

Potentiels des résidus forestiers et agricoles

En matière de résidus, sous-produits des activités forestières et agricoles, la question de la concurrence entre usages se pose plus directement et lie toute estimation de la biomasse potentiellement disponible à des critères non techniques.

Dans le travail d'évaluation global présenté ici, on tente cependant une première approche avec deux valeurs d'un potentiel technique dont la disponibilité pratique pour une valorisation énergétique reste à étudier.

Description générale de la méthode

Une première valeur est calculée en fonction des productions actuelles de bois et de cultures, compte tenu des caractéristiques des arbres et plantes ainsi que des pratiques d'exploitation.

Une seconde valeur correspond à l'application des mêmes pourcentages respectifs de résidus forestiers et agricoles, sur l'intégralité des surfaces forestières et agricoles dans une perspective de maximisation des rendements.

Hypothèses sur les résidus forestiers

On suppose que si une forêt naturelle est exploitée, c'est pour la production de bois d'œuvre. La biomasse d'une forêt naturelle exploitée à des fins de bois d'œuvre se répartit en : bois abandonné en forêt (houppier + souche) ; taille sur parcs à grume ; résidus en usine et ; bois d'œuvre. Compte tenu d'une appréciation des volumes respectifs et de l'accessibilité des résidus, les auteurs et leurs collègues du Cirad font l'hypothèse d'un volume de résidus exploitables équivalent à la moitié du volume de bois d'œuvre. On calcule des tonnages en se basant sur une masse volumique moyenne de 0,45 kg/m³.

Hypothèses sur les résidus agricoles

A l'exception de la canne à sucre pour laquelle une grande partie de la plante est récoltée, les différentes cultures agricoles génèrent un volume de résidus assez homogène. Pour chaque culture, les ratios volume de paille sur volume de grain varient dans des rapports respectifs de 1 à 3 environ. Ces variabilités intra-spécifiques d'une variété à l'autre de la même culture sont aussi importantes que les variabilités interspécifiques, d'une culture à l'autre.

Notre estimation des potentiels de résidus se base sur trois plantes de référence, les plus cultivées au niveau mondial : le blé, la canne à sucre et le coton. Pour le blé, nous avons retenu un ratio de 130 % entre la quantité de paille et grain récoltée et supposons que 30% de la paille produite est prélevable pour une valorisation énergétique. Pour le coton, nous retenons 275% comme ratio de résidus sous forme de tiges sèches sur quantité de coton graine récoltée et faisons l'hypothèse que l'intégralité des résidus est potentiellement disponible. Pour la canne à sucre, les résidus primaires (bouts blancs et feuilles) représentant 30% des volumes de canne récoltés sont supposés potentiellement disponibles étant donnée leur faible valorisation actuelle.

Résultats sur les résidus

Ainsi, les potentiels de résidus d'exploitation des forêts ont-ils été estimés à environ 234 puis 1.410 millions de tonnes par an avec la Russie, les Etats-Unis et le Canada parmi les pays aux volumes les plus élevés. Cette estimation ne tient pas compte des questions de mise en œuvre d'une collecte des résidus ni des contraintes environnementales (cycles biogéochimiques).

Par rapport à l'évaluation globale des potentiels énergétiques des résidus la plus récente et la plus exhaustive à notre connaissance, ces premiers résultats sur les résidus forestiers nous situent un peu en deçà des chiffres fournis par le bureau d'étude néerlandais BTG [2006] qui, pour les résidus forestiers, désignent un potentiel technique de 2,3 Gt et un potentiel pratique de 1,4 Gt.

Quant aux résidus agricoles, les potentiels techniques bruts s'élèvent à 4 milliards de tonnes avec la première estimation et 17 milliards de tonnes avec la seconde estimation. Les volumes les plus élevés se trouvent dans les pays émergents les plus vastes, Inde, Brésil et Chine. Là encore, le statut de ces estimations de possibles productions résiduelles n'est pas le même que pour les plantations dédiées, à cause d'une moindre fiabilité des données d'une part et de la multiplicité des usages observés de ces résidus. Les besoins locaux en électricité et chaleur notamment, rendent assez illusoire la perspective de disponibilité des potentiels techniques même dans un contexte fort contraint. Au sein d'une filière intensive de valorisation de la biomasse en carburant, une contribution des résidus serait envisageable plus vraisemblablement en appoint d'un approvisionnement en biomasse de plantations énergétiques compte tenu de leur dispersion géographique et temporelle (saisonnalité des productions).

Ces évaluations nous situent à l'intérieur des larges fourchettes données par les quelques évaluations globales existantes (WWI, 2006 ; IEA, 2004). La source de données sur les productions agricoles étant la même pour toutes les évaluations (FAOSTAT), ce sont essentiellement les hypothèses de définition du potentiel qui font la différence, entre un potentiel purement technique considérable à long terme et un potentiel pratique à court terme tendant vers zéro selon certains points de vue.

Les pistes pour affiner les estimations sont multiples et amènent à reconsidérer la notion même de résidus. En effet, leur intégration dans une filière industrielle de valorisation énergétique créerait de fait un nouveau marché avec, comme pour les plantations, diverses demandes en compétition. On entrerait alors pour les forêts comme pour les terres agricoles, dans le registre de la co-exploitation, avec un premier arbitrage sur des critères écologiques et économiques du fait du rôle des "résidus" dans le maintien de la fertilité des sols conjointement avec les intrants. Ensuite, les potentiels pour une filière FT vont dépendre des termes dans lesquels se pose la concurrence entre usages (électricité, chaleur, carburants...), notamment entre valorisations énergétiques compte tenu des fortes croissances démographiques et économiques que connaissent plusieurs des principaux pays agricoles (Chine, Inde, VietNam...). Là encore, c'est à l'échelle d'une région ou d'un pays que la poursuite du travail d'évaluation des potentiels se situera.

Remerciements

Le travail présenté dans ce rapport final a grandement bénéficié de l'intérêt soutenu de Monsieur Dominique Chauvin et de ses relectures minutieuses. Nous voulons le remercier pour les nombreuses améliorations du document auxquelles il a contribué sans pour autant l'impliquer dans les insuffisances qui pourraient subsister.

Table des matières

Synthèse et conclusions	iii
Potentiels de plantation énergétique	iii
Description générale de la méthode	iii
Résultats, les potentiels des plantations énergétiques	v
Des potentiels à une disponibilité effective	viii
Potentiels des résidus forestiers et agricoles	ix
Description générale de la méthode	ix
Hypothèses sur les résidus forestiers	ix
Hypothèses sur les résidus agricoles	ix
Résultats sur les résidus	x
Table des matières	xi
Liste des Tableaux, Graphiques et Figures	xiii
Unités de mesure et équivalences pour conversion	xiv
Abréviations couramment utilisées et Variables	xv
0 – Introduction	16
Préliminaire	16
Champ de l'étude	17
Potentiels pour une filière Fischer-Tropsch	17
Potentiels pour des approvisionnements se chiffrant en millions de tonnes de biomasse	19
Plantations énergétiques	20
Une étude en trois parties: plantations, résidus, scénarios d'exploitation	22
1 – Cartographie de la disponibilité des terres pour la mise en place de plantations énergétiques	24
1.1 - Méthode	24
1.1.1 - Choix d'une méthode	24
1.1.2 - Critères bioclimatiques pris en compte	25
1.1.3 - Caractéristiques écologiques des genres retenus pour la localisation de leurs aires de subsistance et zones de production à 20 t/ha.an,	25
1.1.4 - Croisements analytiques à travers un Système d'Information Géographique	28
1.1.5 – Sources d'informations	28
1.1.6 – Localisation des zones de production	29
1.2 – Résultats, les potentiels en plantations énergétiques	31
1.2.1 – Résultats par genre	31
1.2.2 – Potentiel de plantations à l'échelle mondiale	33
1.2.3 – Importance des surfaces selon les pays	34

2 – Cartographie de la disponibilité potentielle en résidus des activités forestières et agricoles	38
2.1 – Introduction, existence d'un potentiel de résidus forestiers et agricoles	38
2.2 – Les résidus des forêts	39
2.2.1 – Hypothèses retenues et autres éléments de méthode	39
2.2.2 – Résultats pour les résidus des forêts	42
2.3 – Les résidus des zones agricoles	45
2.3.1 – Spatialisation des quantités de résidus pour une spécialisation intégrale de l'agriculture sur le blé, la canne à sucre et le coton	47
2.3.2 – Disponibilité mondiale en résidus agricoles	48
3 – Scénarios d'exploitation des potentiels de biomasse	51
3.1 – Les volumes de bio-énergie potentiellement disponibles	51
3.2 – Analyse de deux scénarios d'implantations d'usines de valorisation énergétique de la biomasse ligneuse	52
3.2.1 – Hypothèses de travail	52
3.2.1 – Méthodologie d'analyse	53
3.2.3 – Résultats	57
4 – Conclusions sur les pistes d'approfondissement de l'évaluation de potentiels	59

Annexes

Annexe A : Références bibliographiques.

Annexe B : Cartes.

Annexe C : Illustration de l'établissement de fourchettes bioclimatiques.

Annexe D : Influence de la portée des usines sur leur aire potentielle d'implantations.

Liste des Tableaux, Graphiques et Figures

Tableau 0.1 : Quelques exemples de rendements agricoles et énergétiques, données de sources diverses	18
Tableau 0.2 : les dix pays aux superficies les plus importantes de plantations [FRA2005]	20
Tableau 0.3 : les dix premiers pays en termes d'augmentation des surfaces de plantation [FRA2005]	21
Tableau 1.4 : Synthèse statistique des traitements spatiaux du genre <i>Eucalyptus</i>	31
Tableau 1.5 : Synthèse statistique des traitements spatiaux du genre <i>Acacia</i>	32
Tableau 1.6 : Synthèse statistique des traitements spatiaux du genre <i>Pinus</i>	32
Tableau 1.7 : Surface des plantations potentielles de l'Amérique Latine, principaux pays (potentiel > 0,5 Mha)	34
Tableau 1.8 : Surface des plantations potentielles de l'Afrique, principaux pays (potentiel > 0,5 Mha)	35
Tableau 1.9 : Surface des plantations potentielles de l'Asie, principaux pays (potentiel > 0,5 Mha)	36
Tableau 1.10 : Surface des plantations potentielles des autres pays au potentiel supérieur à 0,5 Mha	37
Tableau 2.11 : Agrégation de la légende de la carte de l'occupation des sols du GLC 2000 pour la forêt	42
Tableau 2.12 : Exemple de calcul des résidus forestiers potentiels sur deux pays de référence	46
Tableau 2.13 : Ratios massiques paille/grain pour quelques cultures	46
Tableau 2.14 : Agrégation de la légende de la carte de l'occupation des sols du GLC 2000 pour l'agriculture.	47
Tableau 3.15 : Synthèse des potentiels issus des plantations	52
Tableau 3.16 : Mobilisation de plantations d' <i>Eucalyptus</i> de productivité 20 t/ha.an	57
Tableau 3.17 : Production de résidus forestiers	58
Graphique 2.1 : Pays produisant plus de 5 millions de tonnes par an de résidus issus des exploitations forestières actuelles pour l'année 2000, sur la base des données de la FAO.	43
Graphique 2.2 : Pays produisant plus de 20 millions de tonnes par an de résidus issus des exploitations forestières dans l'hypothèse d'une mise en exploitation durable de toutes les surfaces de forêts sur la base des données FAO de l'année 2000.	44
Graphique 2.3 : Pays produisant plus de 50 Mt/an de résidus issus de l'exploitation agricole des zones actuelles cultivées, moyenne de 2001 à 2005, exprimé en Mt/an, d'après les données FAO et GLC 2000.	48
Graphique 2.4 : Pays produisant plus de 100 Mt/an de résidus issus de l'exploitation agricole des zones actuelles cultivées, moyenne de 2001 à 2005, exprimé en Mt/an, d'après données FAO et GLC 2000.	50
Figure 0.1 : Principe de la conversion de biomasse en carburant Fischer-Tropsch.	18
Figure 0.2 : Estimation des effets d'échelle sur les coûts de production des carburants FT avec technologie CFB (lit fluidisé circulant) [Tijmensen et al., 2002 et Copernicus Institute, 2005].	19
Figure 0.3 : Les vingt cinq genres d'arbres les plus répandus au monde en forêts et plantations (FRA2005)	22
Figure 1.4 : Principe de l'union spatiale sous SIG	28
Figure 2.5 : Potentiels par pays de résidus issus des exploitations forestières actuelles, en mégatonne par an, sur la base de données de l'année 2000.	43
Figure 3.6 : Principes de maillage de l'espace de production, sans recouvrement des aires d'approvisionnement.	53
Figure 3.7 : Scénario 1 (centralisé) d'implantation d'usines FT	46
Figure 3.8 : Scénario 2 (décentralisé) d'implantation d'usines FT	47

Unités de mesure et équivalences pour conversion

Bpj : baril par jour

E : exa = 10^{18}

G : giga ou milliard = 10^9

GJ : gigajoules

ha : hectare

J : joule

km : kilomètre

l : litre

M : million = 10^6

m³ : mètre cube

Mha : million d'hectares

mm : millimètre

Mt : million de tonnes métriques

Mtep : million de tonne-équivalent-pétrole

P : peta = 10^{15}

t : tonne métrique

T : tera = 10^{12}

Wh : watt-heure

°C : degré Celsius

\$: dollar des Etats-Unis

Biomasse [Afocel, 2005]

- 1 tonne sèche sous écorce de feuillu = 2,24 m³ de bois sur écorce
- 1 tonne sèche de résineux = 2,65 m³ de bois sur écorce

- la valeur calorifique d'une tonne de bois anhydre est d'environ 18 GJ soit 0,43 tep
- la valeur calorifique d'une tonne de bois à 50% d'humidité est d'environ 8 GJ soit 0,19 tep

Energie [propres calculs et Combarous, 2002]

- 1 Wh = 3600 J, donc 1 MWh = 3,6 GJ,
- 1 tep = 42 GJ ou 1 GWh = 86 tep environ, donc 1 Mtep = 42 PJ ou 1 Gtep = 42 EJ
- 1 tonne de pétrole brut = 7,3 barils environ
- 1 baril = 159 l de pétrole, soit environ 0,130 tep, 5,5 GJ ou 1,5 MWh
- 1 tonne de charbon = 0,667 tep, 1000 m³ de gaz naturel = 1 tonne de brut (en pouvoir calorifique, conditions standard), 1 tonne de tout produit pétrolier = 1 tep,
- dans les statistiques mondiales : 1 MWh d'électricité primaire = 0,083 tep (pour l'électricité nucléaire, 1 MWh = 0,222 tep).

- Un baril par jour est équivalent à 50 tep/an, un million de barils par jour correspond à 50 Mtep/an.
- 10.000 bpj équivalent donc à 0,5 Mtep/an
- approximativement, 1 tep/an = 1400W.

Abréviations couramment utilisées

BtL : *Biomass to Liquid*, nom des filières où de la biomasse ligneuse est transformé en carburant liquide

FAO : *Food and Agriculture Organisation*

FRA : *Forest Resource Assessment*

FT : Fischer-Tropsch

GtL : *Gas to Liquid*, nom des filières où du gaz est transformé en carburant liquide

Variables

m : température moyenne minimale journalière du mois le plus froid

M : température moyenne maximale journalière du mois le plus chaud

P : hauteur annuelle des précipitations ou pluviosité

0 – Introduction

Préliminaire

Souhaitant élaborer les scénarii des avenir énergétiques possibles pour le monde à 2050 et en tracer les axes de développement énergétique correspondants, Total a contacté le CIRAD et son département Forêts pour l'aider à mieux appréhender le potentiel de la biomasse pour la production de carburant selon le procédé gazéification Fischer-Tropsch.

Les objectifs d'un premier travail ont été identifiés conjointement : compréhension du paysage dans lequel se joue l'avenir des biocarburants, estimation des ordres de grandeur utiles à la définition des volumes massiques et énergétiques utilisables pour une filière gazéification/Fischer-Tropsch sur le moyen et long terme.

Il a donc été convenu de réaliser un état des lieux des potentiels de valorisation énergétique de la biomasse pour la production de biocarburant Fischer-Tropsch. La proposition du Cirad incluait une estimation géo-référencée de la biomasse potentiellement disponible, selon différents scénarios Fischer-Tropsch envisageables compte tenu de l'état des connaissances et du progrès technique attendu. Le potentiel ainsi identifié serait exprimé en volume massique et, après explicitation des rendements de conversion atteignables, en volume énergétique.

Les grandes lignes de la méthode sur laquelle Total et le Cirad se sont accordés pour un état des lieux des potentiels de valorisation énergétique de la biomasse à court, moyen et long termes sont les suivantes :

- identification des types de biomasse valorisables, issus directement ou non de la sylviculture, y compris intensive, et de l'agriculture y compris les cultures pérennes ;
- étude globale et géo-référencée de l'évolution des disponibilités en terres pour ces différents types de biomasse ;
- estimation des productivités escomptables et des autres facteurs de production pour déterminer la disponibilité en biomasse pour une valorisation énergétique, avec introduction des notions de coût et de valorisations concurrentes de la biomasse ;
- explicitation des rendements de conversion atteignables selon les différentes filières envisageables compte tenu de l'état des connaissances et du progrès technique attendu ;
- estimation des volumes énergétiques correspondants à la biomasse potentiellement disponible ;
- première synthèse.

Ces grandes lignes ont été suivies pour le travail dont rend compte le présent rapport final. Comme expliqué au fur et à mesure dans ce document, les choix méthodologiques plus détaillés ont été revus et précisés en milieu de parcours avec Slim Saïdi, Jean-François Trébuchon et Laurent Gazull. Les résultats présentés ici ont été obtenus suite à leur implication.

Ce rapport final se concentre donc sur les derniers résultats suite aux améliorations progressivement apportées au cours de l'étude, tant sur les outils que sur les résultats et leur interprétation. Le détail des données obtenues sur les potentiels fait l'objet de cartes et tableaux dont certains sont relégués en annexe pour plus de lisibilité du rapport.

Champ de l'étude

La question à la fois initiale et centrale de notre étude porte sur la part que la biomasse pourrait représenter globalement dans la satisfaction des besoins énergétiques mondiaux.

Il existe de nombreuses manières de préciser cette question comme d'y répondre, selon l'horizon temporel où l'on se situe et selon par exemple que l'on focalise sur les technologies de conversion ou l'évolution des besoins énergétiques, sur un type de ressource ou une problématique d'aménagement du territoire et de restauration des sols, ou encore sur d'autres aspects environnementaux.

A la diversité des angles d'approche de la question des potentiels, correspond la variété des travaux qui apportent déjà des éléments de réponses, souvent ponctuels et difficiles à remettre en perspective : cas d'étude, extrapolations et projections de certaines variables, "toutes choses restant égales par ailleurs".

Dans ce contexte à la fois riche et lacunaire, la présente étude formule une réponse globale sur les potentiels. Compte tenu du temps imparti, quelques simplifications ont conduit à la délimitation du domaine d'étude, élaborée en concertation entre le Cirad et Total, sur la base des éléments rappelés ci-dessous.

Potentiels pour une filière Fischer-Tropsch

L'étude considère uniquement la filière Fischer-Tropsch (FT) de valorisation énergétique de la biomasse, filière présentant plusieurs avantages spécifiques :

- la synthèse FT dont le principe est rapidement présentée ci-après (Figure 0.1) offre une flexibilité pour le choix des carburants produits, diesel, essence et kérosène notamment, et de leurs proportions respectives;
- la qualité des carburants obtenus par synthèse FT assure leur substituabilité totale aux carburants fossiles sans modification des moteurs, contrairement à la plupart des biocarburants d'autres filières ;
- par rapport aux biocarburants de première génération déjà produits à grande échelle sur les mêmes terres que les cultures alimentaires, une filière FT industrielle mobiliserait des terres non agricoles et offrirait des rendements à l'hectare élevés (Tableau 0.1) car toute la plante peut être valorisée dans la ressource en biomasse et non uniquement les parties riches en sucre, amidon ou huile ;
- enfin, il est communément jugé que la filière FT peut émerger dans les 15 prochaines années. Aujourd'hui à un stade pré-industriel de développement, les biocarburants FT bénéficient non seulement de R&D spécifique mais aussi des effets d'échelle et d'apprentissage liés à la valorisation du gaz naturel et du charbon (aujourd'hui quelques 100.000 barils par jour, plus de 1 Mbpj en projets réalisés d'ici 5 ans, toutes filières "*Gaz to Liquid*" confondues).

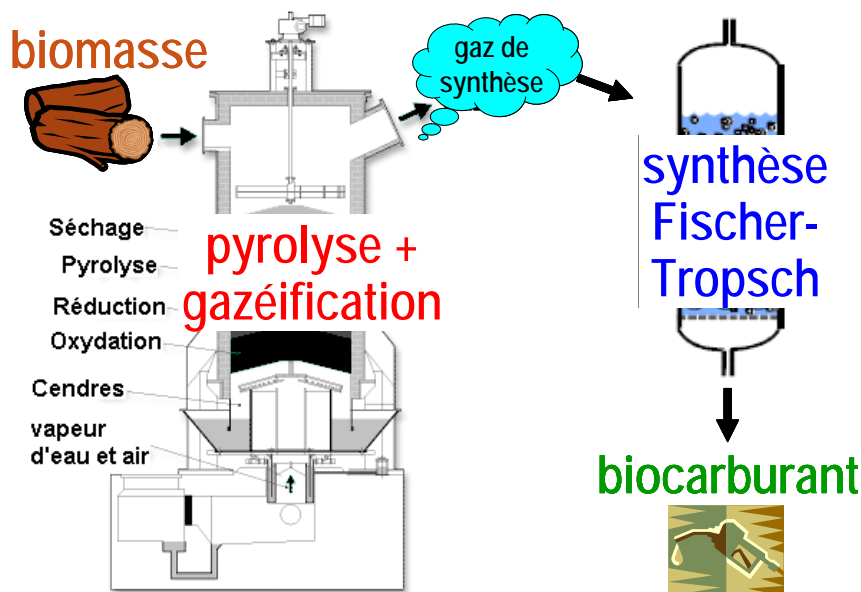


Figure 0.1 : Principe de la conversion de biomasse en carburant Fischer-Tropsch.

La synthèse FT de gaz en carburant consiste en l'hydrogénation du CO que contient ce gaz, dans certaines conditions établies par ; la qualité du gaz (rapport H₂/CO, pureté), son prétraitement éventuel, le type de catalyseur utilisé (Co, Fe, Ni), la température (200-400°C) et la pression (jusqu'à 60 bars).

génération	Filière biocarburant	Rendement biomasse t/ha	Rendement biocarburant	
			volumique l/ha	énergétique GJ/ha
1 ^{ère}	Biodiesel de tournesol	1.52 (graine)	660-1000	35.7
	Biodiesel de soja	2.67 (gr.)	500-700	17.8- 25.0
	Biodiesel de colza	1.47-3.1 (gr.)	600-1500	40.3-80
	Biodiesel de graine de coton	1.54 (gr.)	216	
	Biodiesel d'arachide	3.40 (gr.)	920	
	Biodiesel de pourghère (jatropha)	2 (gr.)	701	
	Biodiesel de palme	3 - 20 (gr.)	2000-3000	
	Ethanol de blé	6.7 - 8.3	2500	53-72
	Ethanol de maïs	6 - 8.7	2200-3500	63-76
	Ethanol de betterave	56.4 - 80	4300-5500	30-117
	Ethanol de canne à sucre	50-85	3500-6500	111-138
	Ethanol de sorgho	92	5000	
Ethanol de cassava	12	2160		
2 nd	Ethanol de paille de blé	3.2 mat. sèche	1300	26.3
	Ethanol d'herbes pérennes, voie biochimique	12.3mat. sèche	5000	132
	Biodiesel FT d'eucalyptus		5000	172
	Méthanol d'eucalyptus	20 mat. sèche	9000-11000	140-172
	DME d'eucalyptus		10000	188

Tableau 0.1 : Quelques exemples de rendements agricoles et énergétiques, données de sources diverses

Potentiels pour des approvisionnements se chiffrant en millions de tonnes de biomasse

Au niveau de l'utilisation de la biomasse dans une filière FT *via* la pyrolyse ou la gazéification et la conversion en un gaz riche en CO et H₂, les contraintes portent moins sur la qualité de la biomasse que sur les volumes mobilisables. Si l'on se fie à la courbe de coût ci-dessous (Figure 0.2), les technologies biocarburants FT actuelles permettraient d'atteindre des niveaux de coûts potentiellement compétitifs (13 \$ US/GJ correspond à environ 72 \$ US/baril), pour des puissances installées supérieures à quelques 700 MW_{th} correspondant à environ 10.000 baril par jour.

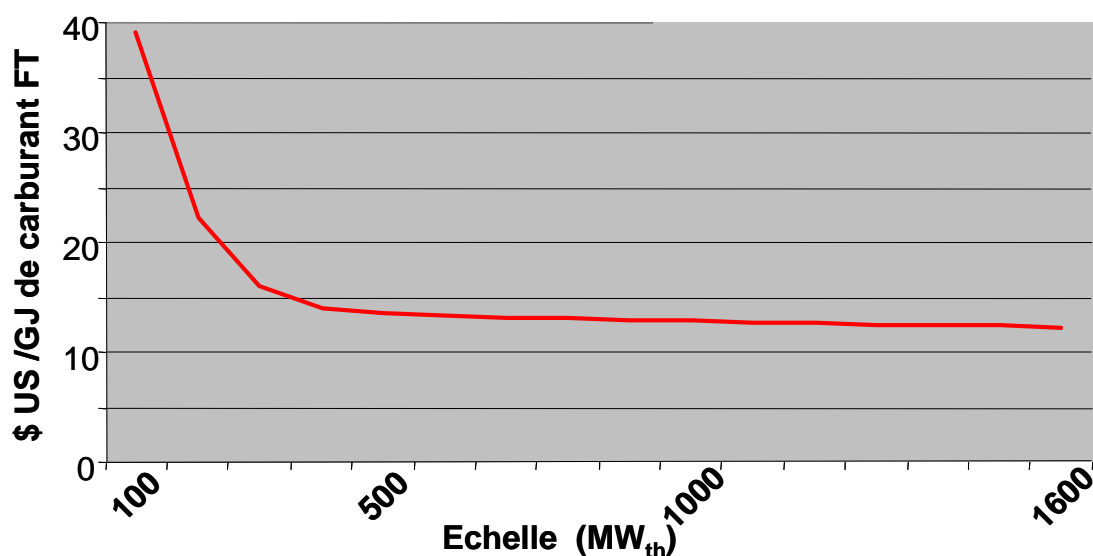


Figure 0.2 : Estimation des effets d'échelle sur les coûts de production des biocarburants FT avec technologie CFB (lit fluidisé circulant) [Tijmensen et al., 2002 et Copernicus Institute, 2005].

De la biomasse au biocarburant FT sans prise en compte des dépenses énergétiques de l'exploitation et du transport de biomasse, le rendement énergétique (PCI biocarburant/PCI biomasse) de 40%, voire 50% si amélioration de la conversion FT, s'accompagne de rendements massiques entre 18 et 30% selon la biomasse considérée.

Ainsi une unité FT de 10.000 bpj soit 0,5 Mtep/an nécessiterait entre 1 et 1,25 Mtep/an de biomasse, soit entre 2,3 et 2,9 millions de tonnes de matière sèche de biomasse, représentant par exemple entre 3 et 4 Mt de bois à 25% d'humidité.

Pour des unités FT qui restent industriellement de taille modeste d'un point de vue énergétique, les volumes de biomasse à mobiliser sont donc considérables à l'aune des productions agricoles et forestières et justifient que l'on exclue des potentiels les sources trop dispersées de biomasse. La dispersion se traduit par des coûts rédhitoires de collecte de la biomasse. Ainsi, l'étude considère-t-elle exclusivement les zones de plantations à productivité élevée. S'y ajoute cependant une évaluation de la disponibilité en résidus forestiers et agricoles dont l'intérêt réside dans la possibilité de coûts avant collecte faibles voire nuls ou même négatifs, les résidus étant par définition générés non intentionnellement au cours des activités agricoles et forestières de production puis de transformation.

Par contre, le potentiel énergétique des déchets ménagers n'est pas considéré ici à cause des niveaux d'hétérogénéité en jeu, rendant complexe et coûteuse la production d'un gaz suffisamment pur pour une synthèse FT. Ne serait-ce que techniquement, les procédés de méthanisation actuellement développés sans équivoque sont plus prometteurs pour la valorisation énergétique des déchets ménagers.

Les herbes pérennes et autres produits herbacés ne sont pas davantage pris en compte. Qu'ils soient issus de cultures énergétiques (sorgho, triticale, ...) ou de zones naturelles (roseaux, herbe à éléphants, ...) ces produits se caractérisent généralement par une humidité élevée. En outre, leur récolte, transport et conditionnement doivent être envisagés avant toute valorisation. La récolte peut être mécanisée mais à un coût souvent élevé. En tout état de cause, les volumes concernés sont là encore importants par rapport à la masse de matière sèche finalement disponible. Les produits sont généralement très cendreux, ce qui dans une filière de thermochimique de valorisation en énergie, poserait des problèmes de qualité des gaz.

Plantations énergétiques

Selon la FAO et son dernier recensement des ressources forestières [FRA2005] qui n'élude pas le problème de la fiabilité des données, les plantations productives (par opposition aux plantations de préservation, nous utiliserons dans ce rapport le terme de plantations exclusivement pour les plantations productives) représenteraient quelques 110 millions d'hectares (Mha) dans le monde : 10,7 en Afrique ; 44,4 en Asie ; 21,5 en Europe ; 17,7 en Amérique du Nord et Centrale ; 3,8 en Océanie ; 11,3 en Amérique du Sud.

Sur tous les continents, les surfaces de plantations augmentent depuis les précédents recensements où elles s'élevaient globalement à 77 Mha en 1990 et 97 Mha en 2000. Les dix premiers pays en termes de superficies en plantations comptent pour la plupart aussi parmi les plus dynamiques, comme l'illustrent les deux tableaux 0.2 et 0.3 extraits du rapport FRA2005.

Country/area	Area of productive forest plantations (1 000 ha)			Annual change (1 000 ha)	Annual change rate (%)
	1990	2000	2005	2000-2005	2000-2005
China	17 131	21 765	28 530	1 353	5.6
United States	10 305	16 274	17 061	157	0.9
Russian Federation	9 244	10 712	11 888	235	2.1
Brazil	5 070	5 279	5 384	21	0.4
Sudan	5 347	4 934	4 728	-41	-0.8
Indonesia	2 209	3 002	3 399	79	2.5
Chile	1 741	2 354	2 661	61	2.5
Thailand	1 979	1 996	1 997	n.s.	n.s.
France	1 842	1 936	1 968	6	0.3
Turkey	1 459	1 763	1 916	31	1.7

Tableau 0.3 : les dix pays aux superficies les plus importantes de plantations [FRA2005]

Country/area	Area of productive forest plantations (1 000 ha)			Annual change (1 000 ha)	Annual change rate (%)
	1990	2000	2005	2000-2005	2000-2005
China	17 131	21 765	28 530	1 353	5.6
Russian Federation	9 244	10 712	11 888	235	2.1
United States	10 305	16 274	17 061	157	0.9
Viet Nam	664	1 384	1 792	82	5.3
Indonesia	2 209	3 002	3 399	79	2.5
Chile	1 741	2 354	2 661	61	2.5
Australia	1 023	1 485	1 766	56	3.5
Portugal	383	867	1 067	40	4.2
Republic of Korea	748	1 188	1 364	35	2.8
Turkey	1 459	1 763	1 916	31	1.7

Tableau 0.3 : les dix premiers pays en termes d'augmentation des surfaces de plantation [FRA2005]

Les rendements à l'hectare ne reflètent pas tout à fait ce dynamisme, les plus élevés étant observés en Afrique Centrale et Occidentale et en Amérique du Sud, où ils sont deux fois supérieurs aux rendements en Asie. Les écarts se creusent puisque les rendements augmentent en Afrique et Amérique, ils diminuent en Asie, pour des raisons notamment de pratiques de gestion des plantations conduisant à la diminution de la fertilité des sols (exportation d'une trop grande partie de l'arbre par exemple).

A ce niveau global d'analyse, les données ne sont guère précises ni fiables sur les valorisations des produits de ces plantations. La destination des plantations productives est en premier lieu les usines de pâte à papier, puis de bois d'œuvre. L'énergie ne concerne encore qu'une part limitée de ces surfaces.

Dans la liste des vingt cinq genres d'arbres les plus répandus toutes plantations et forêts confondues, liste reproduite dans la Figure 0.3, trois genres se distinguent par l'intérêt qu'ils présentent pour des plantations énergétiques, sans besoin de conditions très spécifiques :

- *Pinus*, le pin, est le genre le plus répandu au monde et pousse dans une très grande diversité de contextes ;
- Du fait de son rôle dans la reconstitution des sols (action des rhizobiums), le genre *Acacia* est particulièrement intéressant sur des terres dégradées et autres, non valorisables par l'agriculture, notamment en milieu aride et semi-aride mais aussi (autres espèces d'*Acacia*) en zones inondées ;
- L'*Eucalyptus* se caractérise par sa capacité à faire des rejets qui permet d'obtenir des rendements élevés sur de courtes rotations.

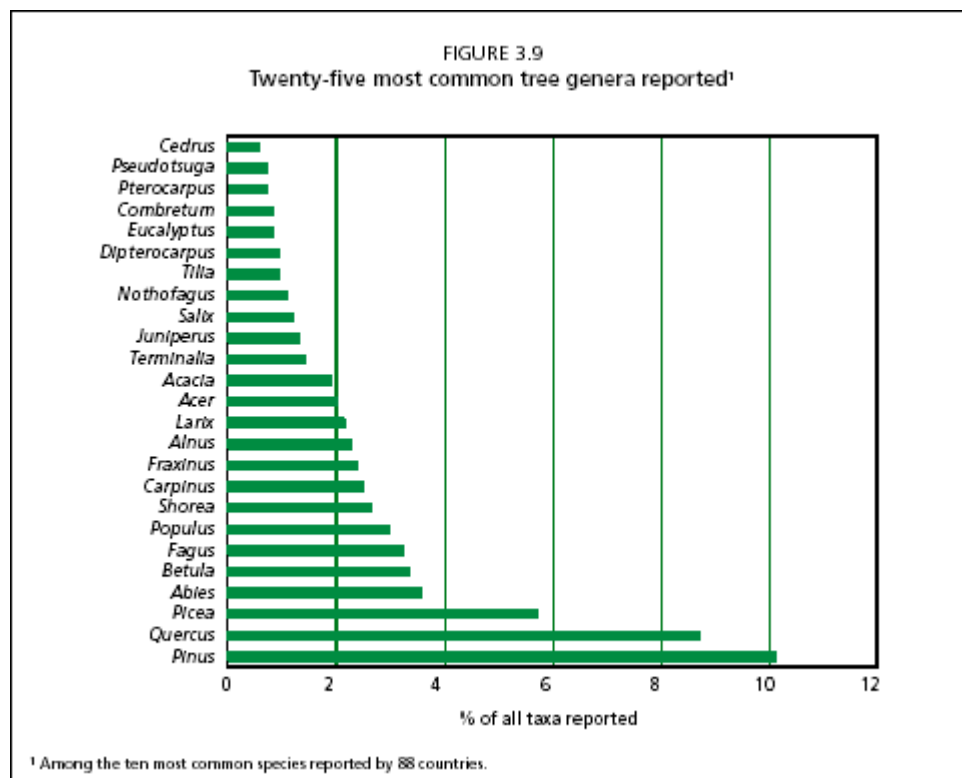


Figure 0.3 : Les vingt cinq genres d'arbres les plus répanus au monde en forêts et plantations [FRA2005]

Après considération des inconvénients des autres genres, notamment en termes de rendements, de longueur de rotation ou de besoins spécifiques difficiles à réunir sur des terres non agricoles ni protégées, il a été décidé pour cette première étude, de ne retenir que les trois genres, *Eucalyptus*, *Acacia* et *Pinus* pour des plantations énergétiques.

En ce qui concerne les résidus agricoles et forestiers, la délimitation du champ d'étude pour l'analyse des potentiels énergétiques est un élément de méthodologie que nous présentons et expliquons plus loin dans le rapport (partie 2).

Une étude en trois parties: plantations, résidus, scénarios d'exploitation

Les potentiels de biomasse pour une filière Fischer-Tropsch englobent toutes les matières ligneuses obtenues de manière durable. Celles-ci se répartissent en deux grandes catégories, respectivement les plantations et les résidus ou déchets. Les premières font l'objet d'une production dédiée, les seconds sont obtenus de manière résiduelle lors d'activités forestières ou agricoles. Rappelons que la catégorie supplémentaire des déchets ménagers n'est pas prise en compte ici malgré son intérêt économique car plus difficilement intégrable à une filière Fischer-Tropsch en l'état actuel des techniques en développement.

Dans la catégorie des plantations, les meilleurs rendements sont aujourd'hui obtenus sur des rotations de six à vingt ans avec les trois genres *Eucalyptus*, *Acacia* et *Pinus*. Compte tenu des meilleures pratiques existantes en matière de plantation actuellement, un rendement de vingt tonnes de matière sèche par hectare et par an (20 t/ha.an, soit quelques 40 m³/ha.an) constitue notre référence. Ce niveau de productivité :

- est atteint voire dépassé dans certains pays, des progrès en matière de sélection génétique et de pratiques sylvicoles permettent d'espérer l'atteindre de façon généralisée ;

- correspond *a priori* à des niveaux de coûts compatibles avec une valorisation énergétique à grande échelle du bois. Au Brésil par exemple, le coût du bois d'*Eucalyptus* des plantations produisant 20 t/ha.an se situe entre 4,9 et 7,7 euros le mètre cube (6,4 €/m³ en moyenne), soit entre 9,8 et 15,4 euros la tonne de matière sèche (12,8 €/m³ en moyenne).

Selon les espèces, ce rendement de 20 t/ha.an correspond à certaines conditions de température et de pluviosité que nous précisons avant d'identifier à l'échelle globale, les zones remplissant ces conditions. Sont exclues des zones identifiées, les superficies déjà mobilisées pour d'autres usages notamment alimentaires et les zones protégées. La première partie du rapport final explicite et discute les choix méthodologiques ainsi que les résultats obtenus sur la disponibilité potentielle des terres pour des plantations énergétiques.

Dans la catégorie des résidus, sous-produits des activités forestières et agricoles, deux valeurs estiment le potentiel technique brut :

- une première valeur est calculée en fonction des productions actuelles de bois et de cultures, compte tenu des caractéristiques des arbres et plantes ainsi que des pratiques d'exploitation ;
- une seconde valeur plus haute, correspond à l'application des mêmes pourcentages respectifs de résidus forestiers et agricoles, sur l'intégralité des surfaces forestières et agricoles.

La deuxième partie de ce rapport explicite et discute les choix méthodologiques ainsi que les résultats obtenus sur la disponibilité potentielle technique de résidus pour valorisation énergétique des activités forestières et agricoles.

Une troisième partie reprend les résultats sur les terres potentiellement disponibles pour des plantations énergétiques et les résidus potentiellement intégrables à une filière Fischer-Tropsch. On propose une première évaluation globale des volumes énergétiques correspondants et l'on poursuit l'évaluation des potentiels en examinant deux schémas alternatifs plus ou moins centralisés de transformation de la biomasse en carburant.

1 – Cartographie de la disponibilité des terres pour la mise en place de plantations énergétiques

L'objectif de cette étude est d'estimer des ordres de grandeur de la biomasse mondiale pour une filière Fischer-Tropsch sur les moyen et long termes. Ce potentiel est tributaire des plantations énergétiques et des possibilités d'étendre leurs surfaces. Parce qu'elles déterminent ces possibilités pour les trois genres considérés *Pinus*, *Acacia* et *Eucalyptus*, les conditions de croissance des arbres sont au cœur de notre démarche descriptive.

1.1 - Méthode

Pour identifier les zones de subsistance et de production des trois genres considérés avec un rendement de 20 t/ha.an, notre approche est l'analyse spatiale, qui déduit les caractéristiques des surfaces recherchées en faisant intervenir des données à références spatiales.

1.1.1 - Choix d'une méthode

Comment estimer la surface potentiellement disponible pour des plantations de *Pinus*, *Acacia* et *Eucalyptus* ? La réponse proposée consiste à commencer par décrire et classer les différents types de climats [Eldin, 1971 & Emberger, 1954] afin de pouvoir déterminer les aires de distribution bioclimatiques des genres choisis. Deux méthodes étaient possibles pour la réalisation de ce travail :

* La première est de réaliser des cartes *éoclimatiques* à l'échelle régionale ou continentale en fonction des facteurs limitants de la vie végétale que sont le stress hydrique et la saison sèche d'une part et le stress thermique dû à la froidure hivernale (ou son absence) d'autre part. On spatialise dans un premier temps le Climagramme d'Emberger [Emberger 1955, Bagnouls et Gaussen, 1957] en calculant le quotient pluviothermique ($Q_2 = 2000P/M^2 - m^2$)¹. L'union de la carte ainsi obtenue avec celle du quotient pluvio-évapotranspiratoire² ($P/ETP^3 = 0,00650 * Q_2$, Le Houerou, 1989 & Penman, 1948) permet une zonation bioclimatique en accord avec l'objectif poursuivi : étages bioclimatiques depuis l'hyper-aride jusqu'au perhumide avec les variantes thermiques depuis la variante glaciaire jusqu'à la variante très chaude.

* La seconde méthode consiste pour les genres *Pinus*, *Acacia* et *Eucalyptus* à établir et combiner à l'échelle mondiale, des cartes de températures moyennes maximales journalières du mois le plus chaud, de températures moyennes minimales journalières du mois le plus froid (au sens d'Emberger, 1955) et des cartes pluviométriques, respectivement m (°C), M(°C) et P(mm). Cette démarche revient à définir un intervalle bioclimatique dans lequel les genres choisis évoluent à différents taux de production. Seules les zones favorables à une productivité annuelle de 20t/ha seront retenues.

La seconde méthode a été retenue en raison de la disponibilité des données notamment celles sur l'autoécologie des genres retenus et produisant 20 t/ha.an dans les conditions très favorables des stations équatoriales avec une grande pluviosité [Maxwell R.J., 1983 ; Aung Din, 1958 ; CAB International, 2001 ; ACIAR, 1986]. Son principal inconvénient est de ne pas tenir compte du quotient pluvio-évapotranspiratoire ($P/ETP = 0,00650 * Q_2$). De ce fait, nous nous sommes basés sur les expériences empiriques des travaux précités.

¹ P = Précipitations annuelles ; M= moyenne des températures maximale journalière du mois le plus chaud ; m = moyenne des températures minimale journalière du mois le plus froid.

² Le quotient pluvio-évapotranspiratoire P/ETP est un indice d'aridité climatique utilisé pour définir les zones arides ($0,03 < P/ETP < 0,20$), semi-arides ($0,20 < P/ETP < 0,50$) et les zones subhumides ($0,5 < P/ETP < 0,65$). Selon: UNEP (United Nations Environment Programme) & CBD (Convention on Biological Diversity) – 2005.

³ ETP = Evapotranspiration potentielle.

1.1.2 - Critères bioclimatiques pris en compte

Les précipitations annuelles (P mm)

Bien que leur intérêt biologique soit moins évident que celui des précipitations estivales, les précipitations annuelles méritent d'être prises en compte car elles constituent les données à la fois les plus abondantes et souvent les plus sûres des réseaux climatologiques. La variabilité annuelle des tranches pluviométriques et leur importance relative sont représentées par une carte et un graphe consultables en annexe (carte 1.1). Une certaine ressemblance avec la disposition des grandes masses montagneuses nous a suggéré une nette corrélation entre précipitations et altitudes. Cette corrélation a été confirmée par la mise en relation d'un très grand nombre de stations météorologiques (27 000) est le modèle numérique de Terrain (Gtopo-30). Cependant, le gradient altitudinal varie d'un continent à l'autre et à altitude égale, les totaux pluviométriques dépendent de la situation biogéographique.

Il est certain qu'à des échelles plus locales, les situations topographiques perturbent la canalisation des flux aériens et par conséquent le gradient pluviométrique se retrouve bien moins dépendant de l'altitude.

Le stress thermique hivernal, la tolérance au froid (m°C)

Certaines espèces tolèrent des températures basses tandis que d'autres y sont très sensibles. A l'échelle du globe on estime généralement que les plantes se développent lorsque la température moyenne mensuelle atteint ou dépasse 5°C ; ce qui correspond à des minima moyens de 0°C [Le Houerou, 1989]. Il existe de très grandes différences entre les espèces puisque la photosynthèse est encore susceptible d'intervenir sous des températures de -5°C chez plusieurs espèces d'épicéa, tandis que la plupart des espèces tropicales n'entrent en activité que vers 10 à 15°C. Le critère le plus sensible et le plus précis pour la mesure de la tolérance au stress thermique hivernal est sans aucun doute la moyenne des températures minimales journalières du mois le plus froid (m). De ce fait, la variabilité de ce critère est cartographiée à l'échelle du globe, la carte correspondante (carte 1.2) est consultable en annexe.

Le stress thermique estival (M°C)

La saison sèche est celle où se manifestent des conditions de stress thermique estival plus ou moins intense et plus ou moins continu. Ce sont les vents chauds et secs qui assèchent l'atmosphère et favorisent un certain déficit hydrique de la végétation. Pour mieux résister à des dessèchements importants, certaines espèces limitent leurs pertes transpiratoires en fermant progressivement leurs stomates.

Afin de tenir compte de la sensibilité de nos espèces aux journées chaudes et ensoleillées, la température moyenne maximale journalière du mois le plus chaud (M) est cartographiée (carte 1.3 consultable en annexe). Il ne s'agit donc pas d'évaluer l'intensité et la durée de la période chaude mais bien de rendre compte des seuils de tolérance à celle-ci.

1.1.3 - Caractéristiques écologiques des genres retenus pour la localisation de leurs aires de subsistance et zones de production à 20 t/ha.an,

Pour localiser les aires de subsistance des *Pinus*, *Acacia* et *Eucalyptus*, nous avons retenu les données fournies par : Pedley, [1978] ; Johnson et Burrows, [1981] ; Beadle, [1981 a, 1981 b] ; Ross, [1979 & 1981] ; FAO, [1968] ; CAB International [2001] ; ACIAR. [1986] ; Maxwell R. J. [1982] ; Quezel [1980] et Aung Din U. [1958].

Dans le Système d'Information Géographique (SIG), une requête spatiale a été réalisée sur le résultat de l'union des trois cartes produites, cf. les cartes 1.1, 1.2 et 1.3 mentionnées précédemment et figurant en annexe.

Pour définir les exigences bioclimatiques des zones de production où les rendements

atteindraient durablement 20 t/ha.an, on s'est basé sur les variétés les mieux connues⁴ de ce point de vue [Maxwell R.J., 1983 ; Aung Din, 1958 ; CAB International, 2001 ; ACIAR, 1986]. Par la suite, et selon une requête spatiale dans le SIG, les aires de production ont été cartographiées (cf. cartes 1.5, 1.13 et 1.14 en annexe).

Le genre *Eucalyptus*

L'*Eucalyptus* est une essence dont l'introduction a connu un immense succès dans un grand nombre de pays. Ce succès est dû à son aptitude à croître rapidement dans des conditions de climat et de sol très diverses.

Les principaux facteurs qui limitent la distribution de cette essence sont les basses températures ($m > -6^{\circ}\text{C}$ voire $> -9^{\circ}\text{C}$ en Tasmanie)⁵ et son inaptitude à se régénérer si l'humidité du sol ne reste pas élevée pendant plusieurs mois après la germination des graines. Par contre, les conditions édaphiques ne semblent imposer que peu de limites à son implantation. Il pousse sur des sols argileux lourds ou plus généralement sur des sols d'alluvion sableux. Dans certaines régions, il s'accommode de sols peu profonds sur roche calcaire.

Bien que l'humidité du sol soit un élément indispensable pendant le premier stade de croissance du jeune plant, l'*Eucalyptus* une fois bien implanté, est l'une des essences les plus tolérante à la sécheresse. Il peut subsister dans des régions où les précipitations sont très faibles et aléatoires (ex : *Eucalyptus camaldulensis*).

Cette essence croît sous une gamme étendue de conditions climatologiques, du climat tropical au climat tempéré. Les principales régions où il se rencontre (Australie) sont caractérisées par 5 à 20 jours de gelées en hiver et de hautes températures en été. La température peut varier entre un minimum de -6°C et un maximum de 50°C , l'amplitude diurne pouvant aller jusqu'à 21°C . La hauteur annuelle des précipitations se situe généralement entre 250 et 650 mm, mais elle peut atteindre 1000 mm et plus dans quelques zones peu nombreuses [Maxwell, 1982 ; ACIAR, 1986]. Son implantation dans des conditions très favorables des stations équatoriales avec une grande pluviosité lui confère une croissance rapide.

Critères bioclimatiques retenus afin de définir pour le genre *Eucalyptus* :

- sa zone de subsistance (carte 1.4) : $m > -6^{\circ}\text{C}$, $M < 45^{\circ}\text{C}$ et $150 < P < 3500$ même ;
- sa zone de production à 20 t/ha.an (carte 1.5) : $m > 2^{\circ}\text{C}$, $M < 35$, et $1000 < P < 3500$ mm.

Le genre *Acacia*

Les acacias sont des végétaux de taille très variable. Certains sont des lianes ligneuses, d'autres des buissons bas, tandis que d'autres encore sont de grands arbres forestiers de plus de 35 mètres de hauteur. La cime de l'arbre adulte est souvent caractéristique de l'espèce. De nombreux acacias africains ont une cime aplatie typique, tandis que la plupart des espèces australiennes ont une cime plus ou moins sphérique.

Les caractéristiques des feuilles et du feuillage des acacias sont diverses. De nombreux acacias africains tendent à perdre leurs feuilles durant la saison sèche, tandis que la plupart des acacias australiens ont un feuillage persistant. En Amérique du Sud on trouve des espèces aussi bien à feuillage caduc que persistant [Ross 1981]. Les feuilles de certaines espèces ont une position plus ou moins horizontale, tandis que les phyllodes de nombreuses espèces de stations sèches sont pendantes, ce qui constitue sans doute une adaptation permettant d'éviter les radiations solaires directes. La

⁴ *Eucalyptus* (*E. cloeziana*, *E. grandis*, *E. maculata*, *E. microcorys*, *E. resinifera*, *E. robusta* et *E. tereticornis*).

Acacia (*A. aulacocarpa*, *A. auriculiformis*, *A. crassicaarpa*, *A. mangium*, *A. caribaea* et *A. elliotii*).

Pinus (*P. caribaea*, *P. elliotii*, *P. patula* et *P. kesiya*).

⁵ "m" est la température moyenne minimale journalière du mois le plus froid.

régénération naturelle se fait principalement par semis, mais certaines espèces peuvent se régénérer par drageons, et d'autres par rejets de souche.

Il existe plus de 1200 espèces d'*Acacia* [Simmons, 1981]. Leur aire naturelle s'étend sur tous les continents à l'exception de l'Europe et de l'Antarctique. Il y a à l'heure actuelle 729 espèces reconnues en Australie, et on estime qu'il existe environ 120 espèces non encore décrites [Maslin, 1980 a]. L'Afrique en possède environ 115 espèces [Ross 1973 et 1981], le reste se trouvant en Asie (y compris la Chine) et dans les Amériques. En Nouvelle-Zélande le genre n'est connu qu'à l'état fossile [Ross 1981].

L'écologie des acacias est présentée par Pedley [1978], Johnson et Burrows [1981] et Beadle [1981a, 1981b] et Ross [1979, 1981].

Le genre *Acacia* est caractéristique des régions climatiques aride et semi-aride, en Australie notamment, où il est également commun dans une grande partie de la région subhumide. Il est moins représenté dans la région humide, et l'est rarement dans la forêt dense tropicale ou dans les formations herbacées. D'une manière générale, les acacias subafricains tolèrent les climats chauds et arides, chauds et humides, froids et arides, mais non froids et humides.

En zone aride les acacias prédominent surtout sur des sols contenant une forte proportion de sable et de gravier dans leur profil, tels que les dunes, plaines sableuses ou crêtes rocheuses, où il forment des forêts claires ou des "scrubs" [Beadle 1981 b]. Dans les zones semi-arides cette essence évolue sur des sols superficiels à texture fine situés sur les crêtes. Une caractéristique intéressante des acacias est leur aptitude à coloniser des sols de basse fertilité, du fait de leur capacité à fixer l'azote atmosphérique grâce à leur association symbiotique avec les *Rhizobium*.

Critères bioclimatiques retenus afin de définir pour le genre *Acacia*:

- sa zone de subsistance (carte 1.12) : $m > -10^{\circ}\text{C}$, $M < 45^{\circ}\text{C}$ et $110 < P < 4000$ mm ;
- sa zone de production à 20 t/ha.an (carte 1.13) : $m > 16^{\circ}\text{C}$, $m < 30$, et $1000 < P < 4000$ mm.

Le genre Pinus

D'un point de vue taxonomique, les pins sont divisés en 2 ou 3 sous-genres. Les 2 sous-genres universellement reconnus sont *Pinus* et *Strobus*. Une à plusieurs espèces du sous-genre *Strobus* sont parfois séparées dans un troisième sous-genre: *Ducampopinus*. Chaque sous-genre peut être à son tour subdivisé en sections et sous-sections [Small 1903, Huxley et al. 1992], les 3 sous-genres sont les suivants :

a/ *Pinus* "hard-pines" ou pins typiques ; environ 73 espèces ; écailles du cône à ombilic dorsal et mucroné, avec bande de scellement ; aile peu ou pas adhérente à la graine ; 2 faisceaux libéro-ligneux foliaires ; feuilles par 2 à 6, avec stomates répartis plus ou moins équitablement sur toutes les faces ; gaine en général persistante.

b/ *Ducampopinus* "pin-noix", pins à queue de renard, pins à écorce de dentelle ; environ 20 espèces ; écailles des cônes à ombilic dorsal et mucroné, sans bande de scellement ; aile non adhérente à la gaine ; 1 seul faisceau libéro-ligneux foliaire ; feuilles par 1 à 5 ; stomates répartis de façon inégale, surtout présents sur les faces internes ; gaine caduque ou persistante.

c/ *Stobus* "soft ou white-pines" ; environ 23 espèces ; écailles du cône à ombilic terminal non mucroné, sans bande de scellement ; aile fortement adhérente à la graine ; un seul faisceau libéro-ligneux foliaire ; feuilles par 5 ; stomates répartis sur toutes les faces ou surtout sur les faces internes, rarement de façon égale ; gaine caduque.

Le Mexique et le Guatemala possèdent davantage d'espèces du genre *Pinus* qu'aucune autre région d'étendue comparable dans le monde [Mirov et Larsen, 1958]; on en rencontre neuf dans la seule zone montagneuse du Guatemala occidental [Aguilar, 1961].

Généralement, les pins tolèrent les étés secs, la neige en hiver et de fortes variations pour ce qui est des températures et des précipitations. Ils préfèrent souvent les sols serpentins dolomitiques, avec quelques exceptions. Dans certaines parties des zones montagneuses, certains peuplements se développent sur des sols dérivés du calcaire ou du gypse. Certaines essences sont d'une très grande amplitude édaphique et peuvent être présentes sur des sols très différents.

Critères bioclimatiques retenus afin de définir pour le genre *Pinus*:

- sa zone de subsistance (carte 1.14) : $m > -40^{\circ}\text{C}$, $M < 45^{\circ}\text{C}$ et $200 < P < 5000$ mm ;
- sa zone de production à 20 t/ha.an (carte 1.15) : $m > -6^{\circ}\text{C}$, $M < 35$, et $1000 < P < 5000$ mm.

1.1.4 - Croisements analytiques à travers un Système d'Information Géographique

Notre base bioclimatique est générée à travers l'utilisation d'un SIG. Cet outil informatique a permis de stocker, de gérer, de traiter et de représenter sur un plan spatial l'information géographique. Cette information géographique combine des données géométriques (localisation et forme) et thématiques (températures et précipitations).

A chaque couche (carte) est associée la représentation cartographique des objets spatiaux (polygones) et la table d'information statistique qui leur est associée. L'information y est stockée et représentée au niveau du pixel, on est alors en mode *raster*.

Afin de rendre compte des zones potentiellement disponibles pour des plantations énergétiques avec une productivité de 20 t/ha.an, nous avons combiné les trois critères bioclimatiques retenus (m, M et P) selon une union spatiale (Figure 1.4).

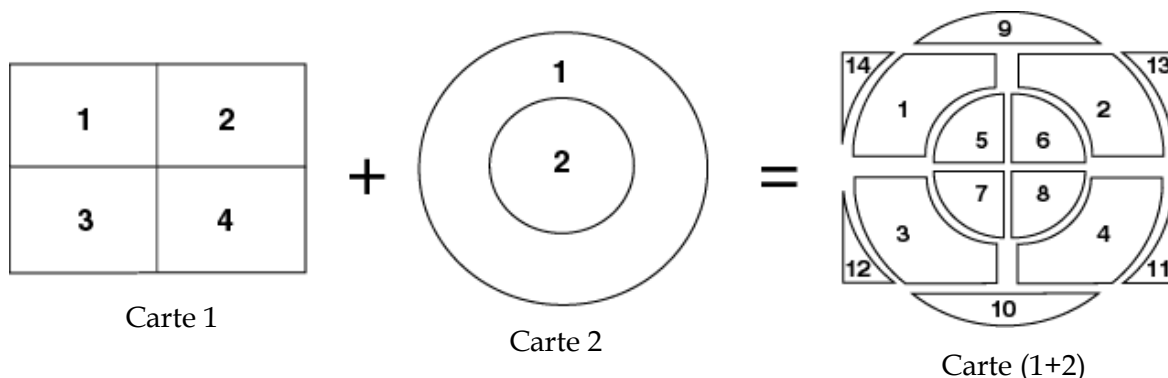


Figure 1.2 : Principe de l'union spatiale sous SIG

Le principe fondamental de cette union est de découper l'espace étudié en plusieurs unités spatiales permettant de délimiter des ensembles spatiaux correspondant à certains critères. Ces opérations donnent lieu à la création de nouvelles informations géométriques ou d'une nouvelle information sémantique. Le résultat obtenu est une combinaison globale des trois critères bioclimatiques retenus (m, M et P).

1.1.5 – Sources d'informations

Les données agroclimatiques de base sont constituées par les annuaires des services climatologiques de la FAO [FaoClim, 2001] et le WordClim [Hijmans *et al.*, 2003 et 2005 ; Jones et Gladkov, 2003 & Parra *et al.*, 2004] dont les données climatiques ont été rassemblées selon un nombre

important de sources [GHCN⁶, WMO⁷, FAOCLIM⁸, CIAT⁹, BOM¹⁰ et INTECSA¹¹]. Quant aux données topographiques, elles sont issues du Modèle Numérique de Terrain - GTOPO30 [USGS, 1996].

Quatre autres ensembles de cartes ont été utilisés, Il s'agit :

* du *Global Land Cover 2000* [GLC-2000, 2003] produit par le centre Européen des sciences et technologie et son unité *GEM*¹². Les cartes sont basées sur une analyse d'images satellites suivie de vérifications sur le terrain réalisées par de multiples laboratoires de recherche. GLC-2000 offre une nouvelle classification du couvert végétal terrestre qui permet l'extraction des zones dites non disponibles ;

* de la carte des réserves naturelles extraite du "*World Data base of Protected Areas*" [WDPA, 2005]. Cette couche est la base de donnée principale et la plus complète pour les aires protégées à l'échelle globale ;

* de la carte des zones urbaines à l'échelle du globe construite selon une prévision de la population pour 2015 [SEDAC-CIESIN, 2004] ;

* de la carte des sols réalisée par la FAO-UNESCO [2003].

L'ensemble de ces données (de type raster) ont une résolution spatiale de 0,0083 degré, soit approximativement un kilomètre.

Chaque raster est une matrice de pixels ayant un ensemble de valeurs numériques représentant soit des valeurs de température soit des valeurs de précipitations, régulièrement espacées et ordonnées selon un balayage du terrain (par exemple d'ouest en est et du nord au sud). Cette notion de balayage régulier explique l'emploi du terme raster. Chaque valeur ainsi positionnée correspond à ce qui doit être alors considéré comme une valeur moyenne d'un élément de surface du terrain. Cette distribution régulière de points définit alors un maillage de la surface du terrain, les dimensions de la maille (de fait, rectangulaire ou carrée) définissant ce qu'on appelle la résolution spatiale planimétrique du relief. Celle-ci est approximativement de 1 kilomètre à l'équateur. Chaque point est au centre d'une maille. Plus l'espacement des points est réduit, plus la résolution spatiale est grande, plus le relief est fin et riche en détails topographiques.

1.1.6 – Localisation des zones de production

Afin de localiser les aires de production potentielle à partir de la délimitation des terres aux conditions favorables selon les trois critères bioclimatiques choisis, un certain nombre de traitements spatiaux ont été réalisés. Il s'agit de l'exclusion :

- * de toutes les surfaces ayant une pente supérieure à 9 degrés ;
- * des zones urbaines ;
- * des aires protégées ;
- * des forêts actuelles ;

⁶ *The Global Historical Climatology Network.*

⁷ *The World Meteorological Organization.*

⁸ Données agroclimatiques mondiales de la FAO sur CD-ROM.

⁹ *International Center for Tropical Agriculture.*

¹⁰ *The Australian Data Archive of Meteorology.*

¹¹ *Estudio de Climatología.*

¹² *Global Environment Monitoring*, unité faisant partie de l'"*Institute for Environment and Sustainability*"(IES) au *Joint Research Centre* (JRC).

* des zones agricoles, des lacs, des surfaces en eau solide et des sols nus.

Prise en compte des pentes défavorables

Le seuil de 9 degré est justifié par le fait que les plantations sur pentes supérieures à 9° restent difficiles d'accès pour l'exploitation de plantations à hauts rendements.

L'extraction de toutes les surfaces ayant une pente supérieure à 9° (carte 1.6 en annexe) est réalisée par une requête spatiale sur le modèle Numérique de Terrain (MNT - Gtopo30). Deux types de traitements ont été nécessaires.

Le premier consiste à construire à partir du MNT une grille de pentes ayant des valeurs de 0 à 90°;

Le second consiste à recoder l'ensemble de ces valeurs pour extraire celles supérieures à 9°.

Prise en compte des zones urbaines

La carte utilisée [SEDAC-CIESIN, 2004] met en évidence un modèle de projection pour 2015, de l'extension des zones urbaines à l'échelle du globe¹³. Ce modèle est basé dans un premier temps sur les limites administratives existantes des zones urbaines. Dans un second temps pour les villes où il y a une corrélation entre la taille de la population et son taux d'activité, on suppose qu'il y a une dynamique d'étalement de la zone urbaine et l'on assigne une zone tampon supplémentaire de 3km au delà des limites administratives. La projection cartographique de ce modèle est présentée en annexe (carte 1.7).

Prise en compte des aires protégées (réserves naturelles)

Le WDPA (*World Data base of Protected Areas – 2005*) compile les informations sur les aires protégées à l'échelle du globe. La construction et la mise à jour de cette base de données au PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) est basée sur l'apport d'informations issues de source multiples (centres de recherche, Ministères, etc.). L'étendue cartographique de ces zones protégées est illustrée à travers la carte 1.8 en annexe.

Prise en compte des forêts, et des zones agricoles, lacs et sols nus

Le principe de cette démarche est de localiser à l'échelle du globe l'occupation des sols en termes de forêts, de zones agricoles actuelles de lacs et de sol nus. La méthode suivie définit un ensemble de traitements spatiaux dans le SIG, permettant la codification des thèmes en question afin de pouvoir les extraire par des requêtes spatiales.

Cette occupation des sols est produite par le GLC-2000. Les étendues cartographiques de ces

¹³ Ce modèle est basé sur le calcul de la moyenne annuelle du ratio d'accroissement, $r = \text{Ln}(P_2/P_1)/(t_2-t_1)$ avec P_1 et P_2 = recensements de la population respectivement aux deux années de références t_1 et t_2 . L'extrapolation de la population pour 2015 est estimée par la formule suivante : $e^{rt} * P_1$, avec r = moyenne annuelle du ratio d'accroissement et t = nombre d'années sur lesquelles l'estimation est basée.

Pour combiner cette estimation de l'évolution de la population avec l'évolution des limites spatiales, les limites administratives existantes des zones urbaines (polygones) ont été cartographiées à partir d'images satellites entre autres sur l'éclairage nocturne des zones urbaines. Par la suite, ces polygones ont été renseignés par leurs populations respectives. Pour chaque ville une zone tampon de 3 km lui a été assignée. Si plusieurs villes se trouvent à l'intérieur de cette zone tampon, celle-ci est retenue et agrégée aux limites administratives initiales. Cependant, pour les villes présentant une difficulté d'assignation de zones tampons (absence d'éclairage nocturne), une corrélation entre la taille de la population de cette ville et son extension spatiale est mise en évidence. Cette corrélation est dérivée d'une régression logarithmique mettant en évidence une extension géographique en fonction de différents paramètres de développement.

zones forestières sont présentées avec la carte 1.9, celles des zones agricoles, des lacs et sols nus avec la carte 1.10.

L'évolution en permanence des surfaces agricoles n'est pas ignorée. On fait l'hypothèse qu'elle se fait et se poursuivra à surface constante. On suppose ainsi que les augmentations de surfaces agricoles du fait notamment de la croissance démographique seront compensées par la déprise agricole liée à la dégradation des terres et par l'intensification lié aux progrès technologiques.

1.2 – Résultats, les potentiels en plantations énergétiques

1.2.1 – Résultats par genre

Les cartes 1.11, 1.16 et 1.17 illustrent le résultat spatial final obtenu, respectivement pour les genres *Eucalyptus*, *Acacia* et *Pinus*.

L'*Eucalyptus*

Après l'extraction de l'ensemble des surfaces relatives aux aires urbaines, aux aires protégées, aux pentes défavorables, aux forêts, aux zones agricoles en cours d'exploitation, à celles occupées par les lacs ou des sols nus, l'aire de plantation potentielle du genre *Eucalyptus* représente une surface de 370 millions d'hectares (Mha). La synthèse des résultats est présentée dans le Tableau 1.4.

<i>EUCALYPTUS</i>	Surface en Mha
Aire de subsistance (carte 1.4)	6.772
Aire de production à 20 t/ha.an (carte 1.5)	2.695
Aires urbaines	93
Zones agricoles, lacs, sols nus	712
Forêts	1.499
Aires protégée	355
Pentes défavorables	308
<i>Total arithmétique</i>	<i>-272</i>
Calcul spatial de l'aire de plantation potentielle (carte 1.11)	370

Tableau 1.4 : Synthèse statistique des traitements spatiaux du genre *Eucalyptus*

Le total arithmétique ne correspond à aucun résultat interprétable car non seulement on y additionne les approximations réalisées à l'échelle du pixel, mais on y cumule aussi les critères d'exclusion. Par exemple une zone d'aire protégée, en forêt naturelle et de pente supérieure à 9 degré aura été soustraite trois fois.

L'*Acacia*

La synthèse statistique en tableau 1.5 montre que le résultat final de ce genre apparaît comme peu significatif.

<i>Acacia</i>	Surface en Mha
Aire de subsistance (carte 1.12)	7.653
Aire de production à 20 t/ha.an (carte 1.13)	713
Aires urbaines	16
Zones agricoles, lacs, sols nus	141
Forêts	514
Aires protégées	134
Pentes défavorables	98
<i>Total arithmétique</i>	-190
Calcul spatial de l'aire de plantation potentielle (carte 1.16)	40

Tableau 1.5 : **Synthèse statistique des traitements spatiaux du genre *Acacia***

Le pin

La synthèse statistique traduite par le tableau 1.6 montre que le résultat final donne le potentiel le plus élevé des trois genres.

<i>Pinus</i>	Surface en Mha
Aire de subsistance (carte 1.14)	10.648
Aire de production à 20 t/ha.an (carte 1.15)	3.132
Aires urbaines	138
Zones agricoles, lacs, sols nus	830
Forêts	1.754
Aires protégées	422
Pentes défavorables	437
<i>Total arithmétique</i>	-449
Calcul spatial de l'aire de plantation potentielle (carte 1.17)	406

Tableau 1.6 : **Synthèse statistique des traitements spatiaux du genre *Pinus***

1.2.2 – Potentiel de plantations à l'échelle mondiale

Les aires de plantations des trois genres retenus présentent des zones de recouvrement que nous avons exclus. La surface globale disponible pour des plantations dont la productivité annuelle atteindrait durablement 20 t/ha est de l'ordre de 450 Mha (cf. carte 1.18).

Cette valeur est le résultat de l'union dans le SIG des surfaces des zones de production potentielle des trois genres considérées, les zones de recouvrement n'y sont comptées qu'une fois.

Il convient de rappeler que la productivité annuelle de 20 t/ha n'est pas une valeur moyenne mais correspond bien (dires d'experts) à un niveau de meilleures pratiques actuelles et que l'on peut estimer raisonnable à moyen terme compte tenu des progrès en génétique et dans les pratiques sylvicoles. Ce niveau de productivité correspond aussi *a priori* (dires d'experts encore) à des niveaux de coûts compatibles avec une valorisation énergétique à grande échelle du bois. Une productivité plus faible avec des conditions climatiques plus défavorables entraînerait des coûts plus élevés de production. De même le recours à des engrais et à l'irrigation permettrait d'accroître de manière significative les rendements en biomasse même en zones plus défavorables mais pourraient se traduire par des coûts de production plus importants et des problèmes environnementaux. Or l'objectif ici est d'estimer un potentiel de production durable de biomasse au niveau mondial.

Notre résultat global de 450 Mha potentiellement disponibles pour des plantations énergétiques indique un ordre de grandeur peu éloigné des valeurs auxquelles aboutissent des travaux prospectifs sur les potentiels menés selon d'autres méthodes. Les estimations de Hoogwijk et al. [2003] et de l'équipe du Copernicus Institute donnent un intervalle de [430; 580] Mha et l'approche de Michel Griffon au Cirad qui envisage des changements techniques de grande envergure dans les modes de culture, estime que entre 411 et 1206 Mha seraient potentiellement disponibles pour la production d'énergie, toutes filières confondues.

En plus d'être géo-référencés, nos résultats traduisent une démarche originale par rapport aux deux autres approches mentionnées du fait que, plutôt que de travailler sur des projections en termes de besoins alimentaires et d'usages des sols correspondants, nous repartons des fondamentaux, c'est-à-dire les conditions pédo-climatiques de production de la biomasse et les coefficients de conversion énergétique. Toutefois, on retrouve une démarche d'analyse spatiale à l'amont des estimations de M. Griffon et du Copernicus Institute pour la construction des scénarios qu'ils utilisent de changement d'usages des sols, travaux respectifs de l'IIASA¹⁴ (Autriche) et du RIVM/MNP (Pays Bas).

Au niveau de l'analyse spatiale, notre approche diffère encore de celle de ces travaux car, comme expliqué ci-dessus (1.1.1), nous ne procédons pas à une zonation bioclimatique ou agroécologique globale mais directement à l'identification des zones propices aux plantations de pins, eucalyptus et acacias.

Si la méthode est différente, les sources d'informations les plus brutes le sont moins, du fait du nombre limité de données globales notamment sur le couvert végétal. Les cartes d'usage des sols que nous utilisons pour l'extraction des zones non disponibles et que l'IIASA et le RIVM utilisent pour une zonation agroécologique du monde, sont issues des mêmes données d'observation satellitaire. En effet le GLCCD¹⁵ est à l'origine de nombreuses bases de données, dont la qualité dépend des performances de l'instrument AVHRR¹⁶ et des traitements réalisés en fonction des besoins finaux. Les travaux de validation menés sur différents terrains ont montré l'imprécision des données globales et la difficulté de les améliorer en demeurant à un niveau global.

En résumé, la complexité des travaux à l'échelle mondiale de télédétection et cartographie explique la faible diversité des sources des informations à l'origine (plus ou moins lointaine) des travaux

¹⁴ Institut International d'Analyse des Systèmes Appliqués à Laxenbourg en Autriche.

¹⁵ *Global Land Cover Characteristics Database*.

¹⁶ Advanced Very High Resolution Radiometer.

d'évaluation des potentiels de biomasse-énergie.

Seules les corrections géométriques apportées aux résultats finaux, renforcent la réalité géographique de nos résultats et notre marge d'erreur reste strictement liée à la distribution statistique. Or l'erreur statistique de notre résultat reste difficilement calculable à l'échelle du globe. Une analyse statistique de la distribution spatiale de l'erreur reste logiquement réalisable si l'on connaît les lois de distributions des erreurs de chaque source de données utilisée. Malheureusement, les données cartographiques qui ont été utilisées ne présentent pas les lois de distribution de l'erreur statistique.

Une expertise supplémentaire à l'échelle du pays ou de la région permettra d'affiner ce travail et préciser l'erreur de notre premier état des lieux.

1.2.3 – Importance des surfaces selon les pays

Les tableaux 1.8 à 1.11 traduisent l'ensemble des surfaces obtenues en fonction des pays. Cette information permet d'identifier les pays les plus aptes à recevoir des plantations des genres considérés dont le rendement est de 20 t/ha.an.

En Amérique latine

L'*Eucalyptus* en Amérique Latine représente un potentiel de 155,4 Mha contre 4,1 Mha pour l'*Acacia* et 155 Mha pour le pin. Les trois genres confondus représentent 176,6 Mha. Le tableau 1.7 résume les résultats par pays pour les principaux.

3 genres confondus 20t/ha.an		Pays	Potentiels <i>Eucalyptus</i>		Potentiels <i>Acacia</i>		Potentiels <i>Pinus</i>	
Mha	rang mondial		Mha	rang mondial	Mha	rang mondial	rang mondial	
101,4	1	Brésil	88,3	1	1,8	5	86,9	1
14,7	6	Argentine	13,3	6	-		13,1	6
13,7	8	Colombie	12,5	7	0,6	11	12,7	7
10,6	12	Bolivie	9,8	11	-		9,7	13
10,4	13	Venezuela	9,8	12	0,4	16	9,7	12
10,3	14	Uruguay	9,6	14	-		9,4	14
7,2	18	Paraguay	6,3	17	-		6,2	19
1,8	37	Chili	0,8	41	-		1,6	37
1,5	38	Guyana	1,4	35	0,3	20	1,4	38
1,1	44	Pérou	0,4	53	0,1	28	0,9	44
0,9	47	Cuba	0,8	43	0,1	34	0,8	49
0,8	48	Equateur	0,6	48	0,5	14	0,7	51
0,6	55	Haïti	0,5	49	0,1	28	0,5	55
0,6	56	Rép. Dominicaine	0,5	50	-		0,5	56
175,5		TOTAL 14 pays	154,5		3,3		154,1	

Tableau 1.7 : Surface des plantations potentielles de l'Amérique Latine, principaux pays (potentiel > 0,5 Mha)

Ces résultats concordent assez bien avec la réalité du terrain puisqu'on retrouve dans les 14 principaux pays du continent le Brésil, l'Argentine ou le Chili par exemple qui sont aussi référencés comme étant les pays ayant des surfaces plantées parmi les plus importantes. Cuba, bien qu'ayant démarré plus tardivement, a réalisé de nombreux essais de plantations d'espèces à croissance rapide ces dernières

années. Dans ce pays plus particulièrement, les vastes espaces libérés par la diminution des surfaces plantées en canne à sucre suite à la libéralisation du marché du sucre rendent tout à fait plausible l'exploitation du potentiel de presque un million d'hectares indiqué ci-dessus. La faible densité de population et le dynamisme d'un grand nombre de ces pays vont dans le même sens.

Sur le continent africain

L'*Eucalyptus* en Afrique représente un potentiel de 120,9 Mha contre 22,3 Mha pour L'*Acacia* et 119,6 Mha pour le pin. Les trois genres confondus représentent 128,4 Mha. Le tableau 1.8 résume les résultats par pays pour les principaux.

3 genres confondus 20t/ha.an		Pays	Potentiels <i>Eucalyptus</i>		Potentiels <i>Acacia</i>		Potentiels <i>Pinus</i>	
<i>Mha</i>	rang mondial		<i>Mha</i>	rang mondial	<i>Mha</i>	Rang mondial	<i>Mha</i>	rang mondial
27,5	3	Congo, RDC	25,3	3	10,3	1	24,8	3
19,2	4	Madagascar	19,1	4	0,3	18	18,9	4
15,1	5	Rép. Centrafrique	14,4	5	1,2	6	14,2	5
11,7	10	Mozambique	11,1	9	0,1	29	11,0	9
9,5	15	Angola	8,7	15	0,3	19	8,6	15
6,0	22	Tanzanie	5,4	23	0,9	9	5,4	23
5,8	24	Congo	5,4	25	4,8	3	5,3	25
5,7	25	Cameroun	5,5	24	3,2	4	5,4	24
4,5	26	Soudan	4,5	26	-		4,4	26
4,4	27	Nigeria	4,0	27	-		4,0	27
4,0	29	Ethiopie	3,7	29	-		3,8	29
3,9	32	Zambie	3,5	31	-		3,5	31
3,4	34	Uganda	3,2	33	0,4	15	3,2	33
1,4	40	Kenya	1,3	39	-		1,3	39
1,2	41	Guinée	1,1	41	-		1,1	41
1,1	43	Gabon	1,1	42	0,8	10	1,0	42
1,0	46	Ghana	0,8	46	-		0,9	46
0,8	50	Malawi	0,7	50	-		0,7	50
0,7	53	Cote d'Ivoire	0,6	53	-		0,6	53
0,7	54	Burundi	0,6	54	-		0,6	54
0,6	57	Togo	0,5	57	-		0,5	57
128,0		TOTAL 21 pays	120,6		22,3		119,3	

Tableau 1.8 : Surface des plantations potentielles de l'Afrique, principaux pays (potentiel > 0,5 Mha)

Le potentiel de plantations au niveau du continent africain est important mais comparativement à l'Amérique latine, la faisabilité de ces plantations au niveau des pays est plus contrastée. En effet, parmi les pays qui présentent un potentiel élevé, certains sont enclavés, cas de la République de Centrafrique avec ses 15 Mha de terres potentiellement disponibles pour des plantations et du Burundi, d'autres en état de guerre larvée, cas de l'Angola ou du Mozambique. Dans les deux types de situations, la mise en exploitation des potentiels est difficile voire peu probable à moyen terme. Au sein même d'un pays comme la République Démocratique du Congo (RDC), une grande part des zones identifiées correspond aujourd'hui à des zones enclavées ou en guerre. Etudié à l'échelle nationale ou régionale, le potentiel de terres disponibles pour des plantations sera donc probablement revu significativement à la baisse par rapport à l'étude globale. Le continent africain mérite une analyse plus

fine dans la mesure où il est le lieu d'enjeux majeurs pour le long terme avec ses vastes étendues dans des zones pédoclimatiques favorables, notamment au niveau de la compétition entre usages alimentaires et non alimentaires des terres.

En Asie

L'*Eucalyptus* en Asie représente un potentiel de 69,7 Mha contre 11,3 Mha pour L'*Acacia* et 83 Mha pour le pin. Les trois genres confondus représentent 93 Mha. Le tableau 1.9 résume les résultats par pays pour les principaux.

les 3 genres confondus à productivité 20t/ha.an		Pays	Potentiels <i>Eucalyptus</i>		Potentiels <i>Acacia</i>		Potentiels <i>Pinus</i>	
Mha	rang mondial		Mha	rang mondial	Mha	rang mondial	Mha	rang mondial
33,5	2	Chine	20,0	3	-	-	30,7	2
14,3	7	Indonésie	11,7	8	8,9	2	12,0	8
11,9	9	Myanmar	9,7	13	-	-	10,8	10
7,3	17	Laos	6,7	16	-	-	6,7	18
6,5	20	Vietnam	5,8	18	0,6	12	5,7	20
6,2	21	Inde	5,1	22	-	-	5,7	22
4,0	31	Thaïlande	3,3	28	-	-	3,4	32
3,5	33	Cambodge	3,0	30	-	-	3,0	34
2,2	35	Malaisie	1,4	34	1,2	7	1,8	35
1,5	39	Bangladesh	1,2	37	-	-	1,3	40
1,2	42	Philippines	0,8	42	0,5	13	0,9	45
0,8	51	Sri Lanka	0,7	45	0,1	27	0,7	52
92,9		TOTAL 12 pays	69,4		11,2		82,8	

Tableau 1.9 : Surface des plantations potentielles de l'Asie, principaux pays (potentiel > 0,5 Mha)

Le nombre de pays en Asie qui disposeraient d'une surface disponible supérieure au demi million d'hectares pour des plantations est plus limité que dans les autres continents. Parmi ceux-ci, la Chine, l'Indonésie, ou le Vietnam, ont des croissances démographiques élevées qui vont accroître la compétition des usages des terres pour les productions agricoles alimentaires, conduisant à moyen terme à des potentiels très inférieurs à ceux identifiés dans cette étude. Il semble par exemple peu réaliste de considérer l'Inde ou les Philippines parmi les pays aux meilleurs potentiels de production à grande échelle de biocarburants.

Autres pays présentant une superficie potentiellement disponible supérieure à 500.000 ha

L'Australie et les Etats-Unis d'Amérique présentent des potentiels importants avec l'*Eucalyptus* et le *Pinus*. Le genre *Acacia* reste non significatif. Le tableau 1.10 résume l'ensemble des résultats par pays.

Pays	3 genres confondus	<u>Eucalyptus</u>	<u>Acacia</u>	<u>Pinus</u>
	Mha	Mha	Mha	Mha
Australie	11,6	10,6	0,1	10,8
Etats-Unis	8,7	4,1	-	8,2
Royaume-Uni	7,1	0,3	-	7,1
Irlande	5,8	2,7	-	5,7
Nouvelle Zélande	4,2	2,2	-	3,7
Islande	4,0	-	-	4,0
Papouasie Nouvelle Guinée	2,1	1,4	1,1	1,7
France	1,0	0,1	-	1,0
Norvège	0,8	-	-	0,8
Canada	0,8	-	-	0,8

Tableau 1.2 : Surface des plantations potentielles des autres pays au potentiel supérieur à 0,5 Mha

Pour un grand nombre de ces pays, notamment l'Australie, les Etats-Unis et la Nouvelle-Zélande,..., la mise en oeuvre de plantations à grande échelle est plausible. La limite principale à de telles plantations devrait concerner les coûts, compte tenu de la relative cherté de la terre et de l'existence de *lobbies* agricoles bien structurés. Dans ces pays, plus encore que précédemment avec les carburants de première génération, seules des politiques publiques volontaristes pourraient conduire à la mise en oeuvre de plantations à large échelle.

Notons aussi que dans la plupart des pays d'Europe et d'Amérique y compris ceux qui n'apparaissent pas avec un potentiel supérieur au demi-million d'hectare, les plantations énergétiques concernent principalement d'autres arbres que les trois genres pris en compte ici, notamment le peuplier, l'épicéa et le sapin. De plus, leurs potentiels pour des plantations de pin augmenteraient considérablement si l'on diminuait le rendement souhaité à l'hectare, ici 20 t/ha.an soit quelques 40 à 45 m³/ha.an.

2 – Cartographie de la disponibilité potentielle en résidus des activités forestières et agricoles

2.1 – Introduction, existence d'un potentiel de résidus forestiers et agricoles

Parmi les sources renouvelables de biomasse utilisable à des fins énergétiques, les forêts et les espaces agricoles représentent un potentiel lié à la co-valorisation de leurs produits. Les forêts couvrent environ 3,9 milliards d'hectares [FAO, 2000] et l'agriculture 2,8 milliards d'hectares [GLC 2000].

Les biomasses résiduelles peuvent être regroupées en deux grands groupes.

Les sous produits d'exploitation forestière :

Lors de l'exploitation des forêts pour le bois d'oeuvre, les activités humaines génèrent différents types de résidus tout au long de la filière de transformation de l'arbre en bois. En forêt, l'exploitant forestier prélève sur les arbres la partie facilement transportable et propice à une transformation et un affinage mécanique en usine. Ainsi, d'un arbre abattu en forêt pour le bois d'oeuvre, le bûcheron découpe la partie cylindrique du tronc (du dessus des contreforts à la première branche), abandonnant sur la zone d'abattage le houppier (cime des arbres à partir de la première branche), les contreforts de l'arbre (du sol à la première coupe), la souche et les arbres entraînés par la chute de l'arbre prélevé. Ce cylindre de bois est débardé jusqu'au parc à grumes, où celui-ci est retaillé dans sa longueur pour l'adapter au transport vers la scierie. Lors de la découpe en scierie, le sciage et le déroulage produisent des chutes de bois ainsi que des sciures.

Les sous-produits de l'activité agricole,

résidus primaires : pailles diverses, rafles de maïs, tiges de coton, ..., ont des humidités généralement faibles s'ils ont été récoltés dans de bonnes conditions, dans la mesure où les récoltes se font généralement après maturation et séchage sur pied. Leur disponibilité est saisonnière et limitée à quelques mois dans l'année. Il est rare (riz irrigué) que plusieurs récoltes se succèdent sur les mêmes surfaces dans la même année. La disponibilité à l'hectare est de quelques tonnes à l'hectare. Plus elle est faible, plus grands sont les problèmes de récolte, accentués par la faible masse volumique apparente des sous-produits et donc les volumes considérables à manutentionner pour des tonnages faibles. La récolte, mécanisée ou mécanisable, ne pose cependant pas de problème technique. C'est au niveau économique que la dispersion de la ressource est problématique, surtout si les résidus ne sont pas récoltés avec le produit principal. Certains résidus sont laissés aux champs et d'autres sont brûlés. Si cette dernière pratique conduit à des émissions de CO₂ et à un gaspillage de matière première combustible, elle permet d'éliminer certains ravageurs et de restituer une partie des matières minérales aux sols et donc de limiter les exportations et l'appauvrissement de ces sols. Pour une valorisation énergétique, les sous-produits agricoles doivent être récoltés puis stockés. Les tiges de coton en particulier ne peuvent être stockées et doivent être éliminées ou traitées rapidement pour éviter le développement et la prolifération de champignons ravageurs.

Cette situation conditionne la disponibilité de la ressource. De plus, les sous-produits agricoles sont souvent utilisés pour les litières ou l'alimentation du bétail. Ces usages limitent les volumes réellement disponibles pour une utilisation énergétique et confèrent un coût d'opportunité voire un prix aux résidus.

résidus secondaires, résidus de transformation des produits agricoles, :

Balles de riz, coques d'arachide, bagasse, ..., ces ressources potentielles présentent l'avantage par rapport aux précédentes d'être moins dispersées. Le traitement des produits agricoles se réalisant rarement au champ, les résidus secondaires ont déjà été transportés et se trouvent en aval des agro-industries, en quantités importantes, voire très importantes. Leur utilisation *in situ* peut avoir lieu, ainsi sans coût supplémentaire de transport. Leur granulométrie est généralement assez homogène, ce qui représente un avantage pour leur manutention et la maîtrise des systèmes d'alimentation d'un équipement énergétique. Par contre, selon l'origine des résidus, leur humidité peut être variable. Plutôt faible pour les sous-produits de décorticage tels que les balles de riz, elle sera élevée pour les sous-produits de pressage tels que la bagasse de canne à sucre. Une étape de séchage peut donc être nécessaire avant carbonisation.

D'une grande diversité, les biomasses à caractère résiduel se caractérisent donc par quelques spécificités communes :

- une dispersion sur de grandes surfaces avec des volumes de matière sèche à l'hectare plutôt faibles,
- une faible masse volumique,
- la saisonnalité de leur disponibilité y comprise en forêt (portance des sols),
- une granulométrie plutôt faible et très hétérogène,
- un taux de cendre plutôt élevé.

Notre objectif est, sur la base des données existantes, statistiques et géographiques, de fournir une estimation cartographiée des potentiels techniques en résidus à l'échelle mondiale pour une production de biocarburants de type BTL.

Plusieurs travaux en cours font état de potentiels de résidus considérables à l'échelle mondiale avec d'importantes variations selon les auteurs. Nous n'avons pas cherché à améliorer et discuter de ces chiffres non publiés de potentiels purement qui, globalement et hors contexte économique (marchés) ont une faible signification. En effet, les multiples applications des résidus rendent très hypothétique leur disponibilité pour de nouvelles applications du type FT. Par contre, sur des localisations particulières ou si la production d'alcool à partir de l'hydrolyse de la cellulose (voie biochimique) se développe, les résidus agricoles pourraient constituer un approvisionnement d'appoint significatif. La présente étude cantonnée aux potentiels de biomasse pour une valorisation thermochimique n'approfondit pas la question de l'apport des résidus à une filière biochimique.

En plus de ces réserves, la piètre qualité des données statistiques agricoles et forestières au niveau international nous ont amené à nous cantonner à des estimations "techniques" selon deux approches simples, l'une basée sur la situation actuelle et la seconde sur des extrapolations à caractère théorique.

2.2 – Les résidus forestiers

2.2.1 – Hypothèses retenues et autres éléments de méthode

Dans cette partie de l'analyse, on entendra par forêt tout espace boisé susceptible de produire du bois. Ce terme inclue donc les forêts primaires, les forêts secondaires, les forêts semi-naturelles (forêts plantées), les plantations de production. Seules les forêts de protection (parcs naturels, réserves) ne seront pas considérés.

On suppose que si une forêt est exploitée, c'est pour la production de bois d'œuvre. Une exploitation de la forêt à des fins énergétiques n'est pas envisagée ici, sinon pour la partie résiduelle de l'exploitation forestière qui n'aboutit pas à du bois d'œuvre.

On prend la masse volumique de référence : 0,45 t de bois sec par m³ de bois sur écorce.

Résidus pris en compte

Les résidus issus de la production de bois d'œuvre peuvent être classés en deux grands types : les résidus d'exploitation et les résidus de transformation.

- Les résidus d'exploitation correspondent i) aux rémanents forestiers (souches, contrefort, branches et houppier) laissés sur les lieux de coupe ; ii) aux arbres non récupérés (pour cause d'oubli ou de problème lors de l'abattage) ; et iii) aux branches et jeunes plants provenant de la première éclaircie réalisée dans certains peuplements du Nord (Suède, Finlande ...).
- Les résidus de transformation correspondent aux déchets ligneux non valorisables par les industriels lors des différentes étapes de sciage, déroulage, trituration etc ...

Ces résidus de transformation sont actuellement déjà valorisés pour de la cogénération ou pour d'autres dérivés du bois (pâte à papier notamment).

On considérera donc ici que cette ressource n'est pas mobilisable pour la production de biocarburants.

La disponibilité potentielle en résidus d'exploitation dépend de nombreux facteurs dont principalement le mode d'exploitation (manuel ou mécanisé) et la structure du peuplement (densité, accessibilité ...). Les situations sont donc très différentes pour les forêts tropicales et les forêts boréales et tempérées.

En forêt tropicale l'abattage est manuel et la densité d'arbres abattus à l'ha est très faible (environ 1 arbre/ha en Afrique centrale). La mobilisation des rémanents forestiers (branche, houppier) est difficile et coûteuse du fait notamment de leur dissémination sur des surfaces importantes et de leur collecte difficile conduisant à des coûts de mobilisation élevés. Nous avons estimé qu'en l'état actuel des conditions d'exploitation, seuls les arbres non récupérés, car abîmés ou de mauvaise qualité, sont réellement mobilisables.

D'après les études faites par la FAO et l'ITTO, pour 1m³ de grume de bois brut produite en forêt tropicale il reste en forêt :

- Souche et contreforts : 0,5 m³
- Houppier : 0,5 m³
- Grumes non récupérés : 0,5 m³

Nous retiendrons donc le ratio de 0,5 m³ de résidus forestiers valorisables à des fins énergétiques pour 1 m³ de bois brut produit en zone tropicale.

Dans les forêts boréales et tempérées, l'exploitation est majoritairement mécanisée et les peuplements sont denses. Le département américain à l'agriculture (USDA) estime que 70 % des rémanents sont récoltables. Des tests récents faits en France sur différents types de peuplements, avec de nouveaux engins (fagoteuses) mettent en évidence qu'en pratique plus de 50% des rémanents sont effectivement récoltables sur les sites de coupes.

Les études faites sur diverses parcelles de résineux aux Etats-Unis et dans les pays du Nord mettent en évidence que pour 1 m³ de bois produit, il reste entre 0,6 m³ et 0,8 m³ de résidus sur les lieux d'exploitation. Compte tenu d'un taux de recouvrement optimal de 70%, on peut espérer récupérer au mieux entre 0,4m³ et 0,6 m³ de résidus par m³ de bois d'œuvre produit.

Nous retiendrons donc le ratio de 0,5 m³ de résidus forestiers valorisables à des fins énergétiques pour 1 m³ de bois brut produit en zone tempérée ou boréale.

Qu'il s'agisse de forêts tropicales ou de forêts tempérées, les zones forestières restent souvent non accessibles pendant de larges périodes de l'année du fait d'une faible portance des sols. Dans tous les

cas, les forêts situées dans des zones excentrées et peu accessibles conviennent mal pour l'approvisionnement d'unités centralisées, un scénario passant par un intermédiaire énergétique doit impérativement être envisagé, qui limiterait les coûts de transport.

De plus, le maintien de la biomasse résiduelle en forêt présente un intérêt écologique et environnemental pour lequel seules quelques données scientifiques sont déjà disponibles (Laclau et al., 2005 ; Nzila et al., 2002). La question du maintien des résidus en forêt reste de fait très controversée. La disponibilité réelle des sous-produits dépendra essentiellement dans les faits de la capacité à payer des utilisateurs.

Deux estimations de potentiels bruts

A défaut de disposer des données des superficies mises en exploitation forestière et de la localisation des permis d'exploitation forestière sur les forêts (futur FRA 2010), deux calculs distincts basés respectivement sur deux types de données de référence ont été réalisés pour l'estimation des volumes de biomasse disponible.

Pour le premier calcul, on a recours aux données statistiques de la production industrielle annuelle de bois à l'échelle mondiale en calculant les volumes correspondants de résidus forestiers valorisables. Les données de production industrielle de bois sont exprimées en m³ de bois humide ou bois sur écorce.

$\text{Résidus d'exploitation forestière actuelle (tonne/an)} = \text{Volume de bois produit (m}^3\text{)} \times 0.5 \text{ (car résidus valorisable = 50\% bois d'œuvre)} \times 0.45 \text{ (pour passer des mètres cubes aux tonnes)}$

Le second calcul, d'une valeur plus haute des potentiels en résidus forestiers, se base sur l'éventualité d'une mise en exploitation totale et durable (production de bois d'œuvre) des volumes de bois sur pied à partir des données de superficies forestières dans le monde.

Afin de rendre cette exploitation durable, l'hypothèse retenue est de n'exploiter qu'au rythme de la productivité forestière (croissance naturelle de la forêt au cours de l'année, exprimée en m³/ha). Les données de productivité totale des forêts sont tirées du rapport FRA 2005 de la FAO.

Mais toute la productivité forestière n'est pas valorisable en bois d'œuvre : certaines essences ne sont techniquement intéressantes, les jeunes arbres doivent encore grandir, etc. La FAO [FRA 2000] estime que le volume de bois exploitable en forêt naturelle ne représente que 1 % du volume de bois sur pied.

A partir de ces hypothèses, chaque forêt cartographiée par le projet GLC 2000 a reçu la valeur de productivité estimée par la FAO. Puis la quantité de bois durablement exploitable a été estimée selon le principe suivant : surface forestière x productivité totale x 1%.

$\text{Résidus d'exploitation forestière potentielle (tonne/pixel)} = \text{Productivité forestière totale (m}^3\text{/ha)} \times 0.01 \text{ (1\% car bois d'œuvre = du volume de bois de sur pied)} \times 0.5 \text{ (car résidus valorisable = 50\% bois d'œuvre)} \times 0.45 \text{ (pour passer des mètres cubes aux tonnes)} \times 100 \text{ (car 1 pixel = 100ha)}$

Les deux valeurs qui estiment le potentiel de résidus mobilisables sont donc (i) une valeur égale à un pourcentage des volumes de bois extrait des surfaces forestières exploitées actuellement et (ii) une valeur plus haute en imaginant une mise en exploitation durable de toutes les forêts de la planète.

Sources de données et ressources pour la spatialisation des potentiels de résidus

La carte produite par le projet européen Global Land Cover 2000 [GLC 2000] fournit une image de l'occupation des sols par les différentes classes de forêt et d'agriculture sur toutes les terres émergées de la planète sur une maille de 1 km². Les classes retenues dans notre étude agrègent chacune plusieurs classes de la nomenclature GLC 2000. Les classes qui ont été retenues dans notre étude comme étant des zones de forêt sont données dans le tableau 2.11 ci-dessous.

GLC 2000, classes d'occupation des sols	présente étude
<i>Tree Cover, broadleaved, evergreen (LCCS >15% tree cover, tree height >3m)</i>	FORET
<i>Tree Cover, broadleaved, deciduous, closed</i>	
<i>Tree Cover, broadleaved, deciduous, open</i>	
<i>Tree Cover, needle-leaved, evergreen</i>	
<i>Tree Cover, mixed leaf type</i>	
<i>Tree Cover, regularly flooded, fresh</i>	
<i>Tree Cover, regularly flooded, saline, (daily variation)</i>	
<i>Mosaic: Tree cover / Other natural vegetation</i>	
<i>Tree Cover, burnt</i>	

Tableau 2.11 : Agrégation de la légende de la carte de l'occupation des sols du GLC 2000 pour la forêt

Aux cartes GLC 2000, s'ajoutent les statistiques de bois rond de la FAO (2004) et les données de productivité des forêts du projet *Forest Resource Assessment 2000* de la FAO [FRA2000] ainsi que les fonds de cartes de la société ESRI.

Le tableau 2.12 ci-dessous illustre les deux estimations pour deux pays de référence en termes de production forestière : Le Canada et la Russie.

Pays	Surface forestière	Volume de bois sur pied	Production actuelle de bois rond	Résidus d'exploitation actuels valeur basse	Résidus d'une mise en exploitation totale valeur haute
<i>Unités</i>	<i>(Mha)</i>	<i>(m3/ha)</i>	<i>(Mm3)</i>	<i>(MT/an)</i>	<i>(MT/an)</i>
<i>Sources</i>	<i>GLC 2000</i>	<i>FRA 2000</i>	<i>FAO 2004</i>		
Russie	1786	105	43 699	10	422
Canada	762	120	149 894	34	214

Tableau 2.3 : Exemple de calcul des résidus forestiers potentiels sur deux pays de référence

2.2.2 – Résultats pour les résidus des forêts

Résidus des forêts en exploitation actuelle (première valeur)

Les résidus de l'exploitation actuelle des forêts représenteraient au total pour l'année 2000 une quantité de 234 millions de tonnes par an. La figure 2.5 illustre la répartition géographique des résidus d'exploitation forestière.

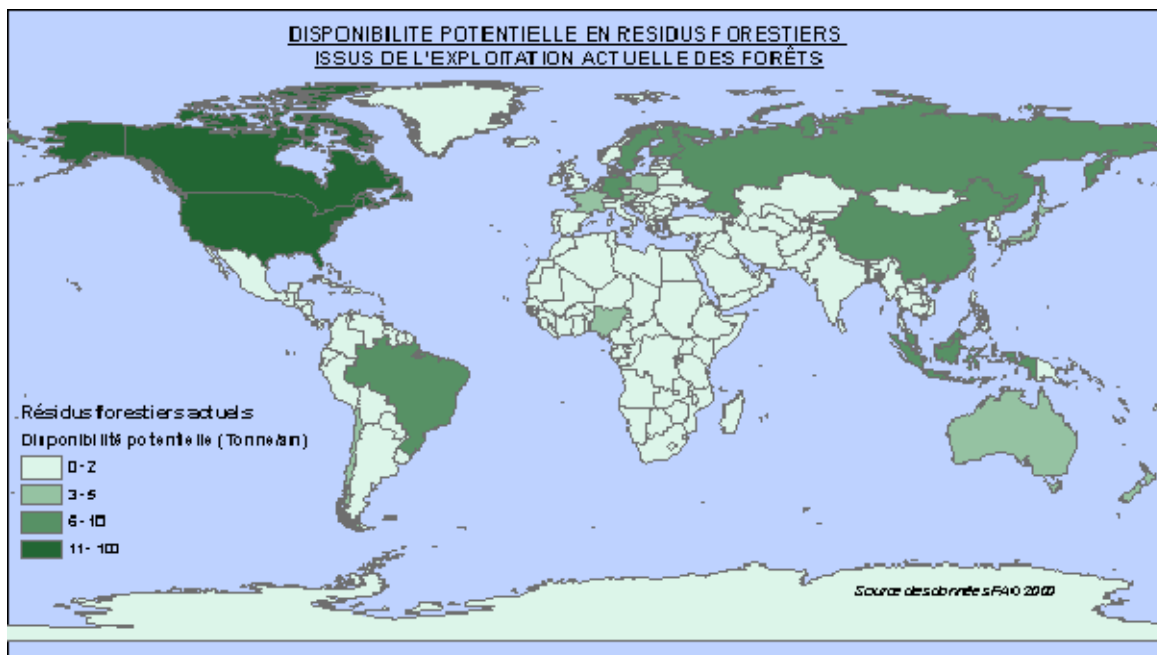
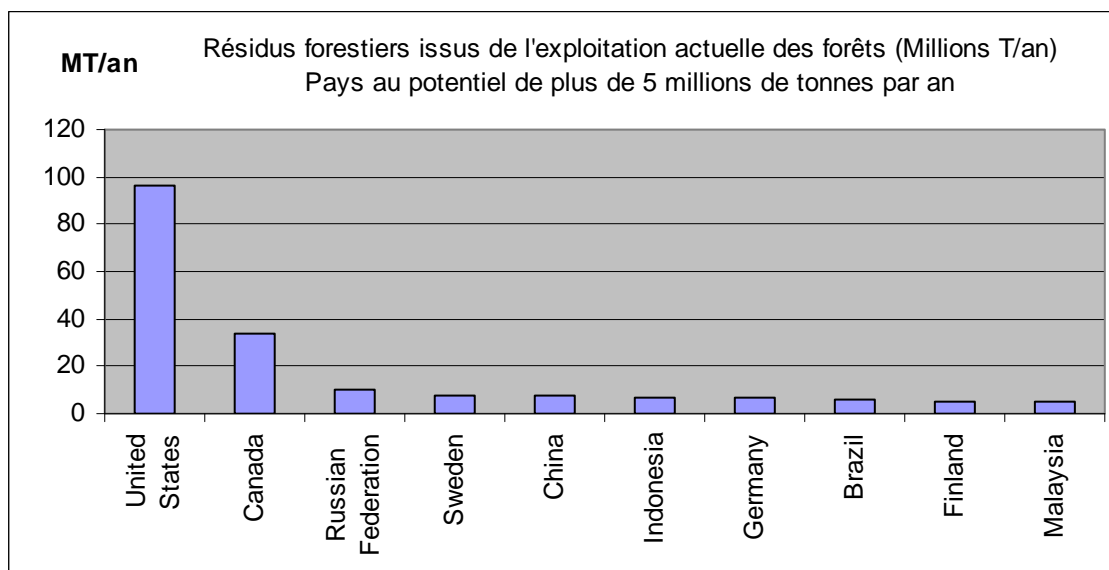


Figure 2.3 : Potentiels par pays de résidus issus des exploitations forestières actuelles, en mégatonne par an, sur la base de données de l'année 2000.

Les pays produisant plus de 5 millions de tonnes de bois sec par an sont au nombre de 10 et totalisent 89 % du potentiel total (Graphique 2.1). Les Etats-Unis et le Canada apparaissent de loin les plus gros producteurs, fournissant à eux deux plus de la moitié de ce potentiel.

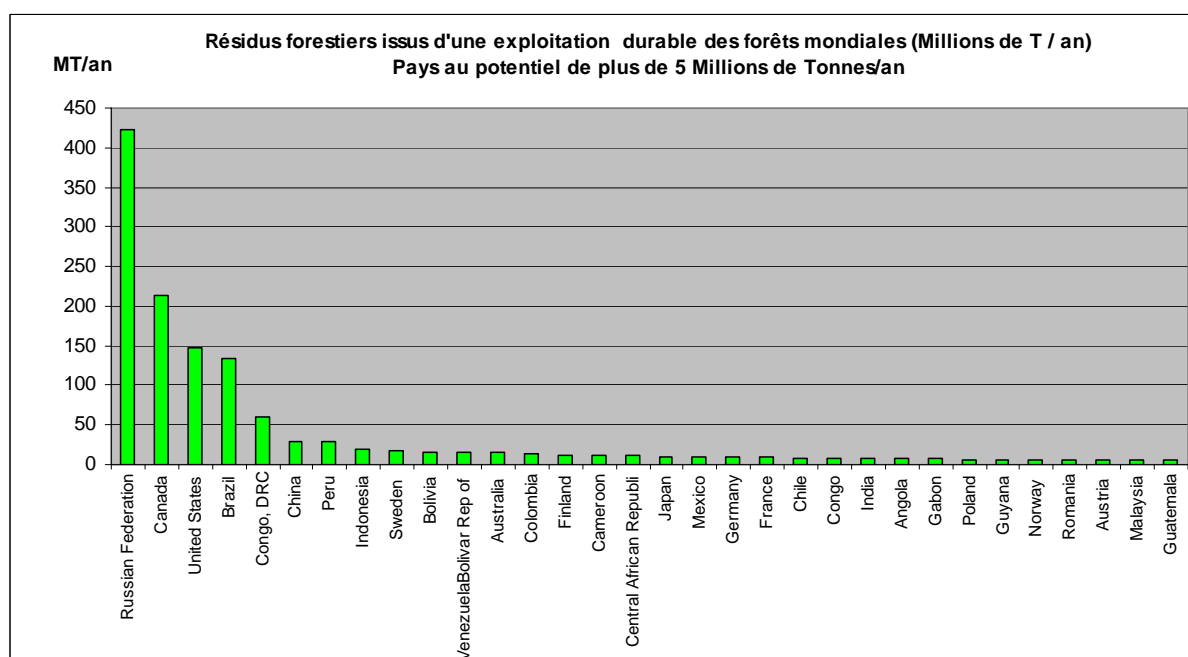


Graphique 2.1 : Pays produisant plus de 5 millions de tonnes par an de résidus issus des exploitations forestières actuelles pour l'année 2000, sur la base des données de la FAO.

Résidus des forêts intégralement mises en exploitation (deuxième valeur)

Les résidus des forêts générés par une éventuelle mise en exploitation durable de toutes les surfaces forestières représentent au total pour l'année 2000 une masse de 1.410 millions de tonnes par an (détail par pays en annexe).

Les pays produisant plus de 5 millions de tonnes de bois sec par an sont au nombre de 32 et totalisent 1.280 millions de tonnes par an soit 91 % du potentiel total (Graphique 2.2). Le potentiel à ce niveau devient considérable. En effet, la mise en exploitation de l'intégralité des forêts de la Fédération de Russie, du Canada et des États-Unis représenterait avec ces seuls pays plus de la moitié du potentiel. Ces forêts, encore intactes dans leur grande majorité, présentent un enjeu considérable pour l'avenir.



Graphique 2.2 : Pays produisant plus de 5 millions de tonnes par an de résidus issus des exploitations forestières dans l'hypothèse d'une mise en exploitation durable de toutes les surfaces de forêts.

Cette estimation reste théorique et ne tient pas compte à ce niveau de ce que, parmi les forêts identifiées, des zones peuvent être inaccessibles à l'exploitation (pentes fortes, zones humides, zones protégées, zones d'usage local). De plus, la forêt ne représente pas forcément un intérêt pour l'exploitation (si faible richesse spécifique pour l'exploitation par exemple).

Par rapport à l'évaluation globale des potentiels énergétiques des résidus la plus récente et la plus exhaustive à notre connaissance, nos premiers résultats sur les résidus forestiers (234 Mt et 1.410 Mt) nous situent un peu en deçà des chiffres fournis par le bureau d'étude néerlandais BTG [2006] qui, pour les résidus forestiers, désignent un potentiel technique de 2.300 Mt et un potentiel pratique de 1.370 Mt.

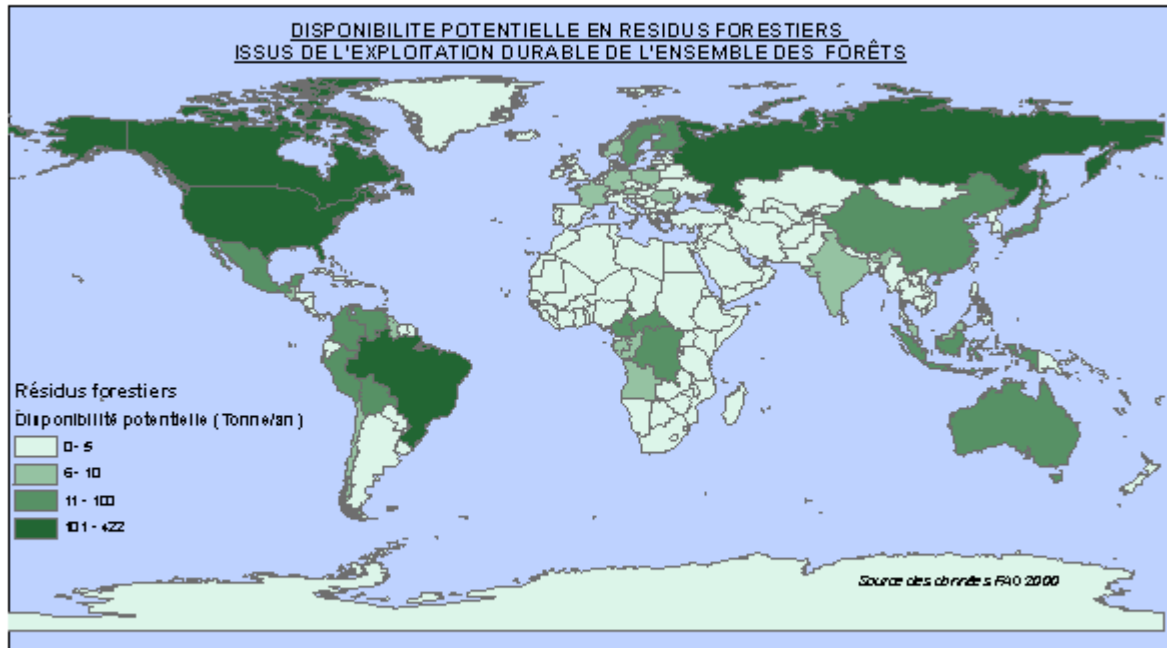


Figure 2.4 : Potentiels par pays de résidus issus d'une mise en exploitation durable de l'ensemble des forêts.

2.3 – Les résidus des zones agricoles

Afin d'estimer les volumes de résidus agricoles potentiellement disponibles et leur concentration, on commence par examiner pour quelques cultures, les quantités (poids) de résidus rapportés à la production valorisée dans l'alimentation, cf. Tableau 2.13.

Cultures	Ratio paille/grain	
	valeurs basse et haute	moyenne de ces valeurs
Orge	0,82–2,50	2,07
Maïs	0,55–1,50	1,03
Coton	0,95–2,0	1,48
Colza	1,25–2,0	1,63
Soja	0,8–2,6	1,70
Riz	0,75–2,5	1,63
Sorgho	0,85–2,0	1,42
Blé	1,10–2,57	1,93
Canne à sucre	0,102	
<i>Ensemble des cultures</i>		<i>1,03–2,07</i>

Tableau 2.4 : Ratios massiques paille/grain pour quelques cultures

On constate qu'à l'exception de la canne à sucre pour laquelle une grande partie de la plante est récoltée, les différentes cultures agricoles génèrent un volume de résidus assez homogène. Pour chaque culture, le ratio volume de paille sur volume de grain varie dans un rapport de 1 à 3 environ. Cette variabilité s'explique par le grand nombre de variétés cultivées et par des conditions de mise en culture différentes selon les conditions climatiques et la quantité d'engrais utilisés, entre autres. Ces variabilités intra-spécifiques d'une variété à l'autre de la même culture (cf. les rapports entre valeurs basse et haute pour chaque culture) sont finalement aussi importantes que les variabilités interspécifiques, d'une culture à l'autre (cf. la dernière colonne du Tableau 2.13).

Ne disposant pas de statistiques complètes pour l'ensemble des pays et pour la même année de référence ni de données spatialisées à l'échelle mondiale, nous avons donc choisi de retenir quelques plantes de référence, pour l'estimation des quantités de résidus. Ces plantes, les plus cultivées au niveau mondial, sont : le blé, la canne à sucre et le coton. En fonction des latitudes et des conditions de climat, on assimile les surfaces agricoles à des champs de blé, de coton, ou de canne à sucre. L'approximation ainsi réalisée est du même ordre de grandeur que celle qui réduit la variabilité des rendements d'une culture à une valeur moyenne.

Le blé se cultive en zones tempérées avec une température comprise entre -6°C et 20°C et avec une pluviométrie allant de 300 à 1000 mm d'eau par an. Le rendement moyen de récolte est de 5,3 t/ha en Europe et la moyenne mondiale est de 2 t/ha [CNUCED, 2006]. Le résidu de la culture de blé est la paille. Nous avons retenu un ratio de 130 % entre la quantité de paille et grain récoltée. Compte tenu des usages courants de cette paille, notamment sa réintégration sur les lieux de culture pour le maintien de la fertilité des sols et la fourniture de litière et d'aliments pour bétail, nous supposons que 30% de la paille produite est prélevable pour une valorisation énergétique.

Le coton se cultive dans les zones subtropicales arides avec des températures comprises entre 11°C et 25°C. La récolte se fait sous forme de coton graine et de coton fibre. Le rendement moyen pour le coton graine est de 1760 kg/ha alors que pour le coton fibre il est de 644 kg/ha [CNUCED, 2006]. Nous retenons 275% comme ratio de résidus sous forme de tiges sèches sur quantité de coton graine récoltée. Par contre dans le cas du coton, la totalité de ces tiges doit être exportée des champs pour éviter la prolifération de champignons. L'intégralité des résidus

peut ainsi être considérée disponible.

La canne à sucre se cultive entre les latitudes 35° Nord et 30° Sud de la planète avec des températures comprises entre 10°C et 30°C. Le rendement est compris entre 58 et 65 t/ha [CNUCED, 2006]. Les résidus de canne à sucre sont en partie primaires avec les bouts blancs et feuilles, et secondaires avec la bagasse, sous-produit de transformation de la canne à sucre. Ces deux types de résidus représentent 30% chacun des volumes de canne récoltée. L'intégralité de la bagasse générée en usine est couramment utilisée pour la production d'électricité de chaleur nécessaire au processus et à l'alimentation d'un réseau local. Cependant une part significative de cette bagasse pourrait être disponible dans la mesure où l'énergie qu'elle contient excède largement les besoins de procédés modernes de transformation de la canne à sucre. Les résidus primaires sont jugés potentiellement disponibles étant donné leur faible valorisation actuelle (alimentation du bétail).

2.3.1 – Spatialisation des quantités de résidus pour une spécialisation intégrale de l'agriculture sur le blé, la canne à sucre et le coton

La carte de l'occupation des sols de la planète GLC 2000 localise les zones d'agriculture suivant 3 classes. Ces classes ont été agrégées (cf. tableau 2.14) pour déterminer la totalité des surfaces agricoles.

Classes d'occupation des sols dans GLC 2000	présente étude
<i>Cultivated and managed areas</i>	AGRICULTURE
<i>Mosaic: Cropland / Tree Cover / Other Natural Vegetation</i>	
<i>Mosaic: Cropland / Shrub and/or Herbaceous cover</i>	

Tableau 2.5 : Agrégation de la légende de la carte de l'occupation des sols du GLC 2000 pour l'agriculture.

Comme nous l'avons signalé, les superficies agricoles ont une productivité annuelle variant suivant le type de culture et la région d'implantation de cette culture. Ainsi à défaut d'une localisation de chaque parcelle agricole à l'échelle de la planète, un rendement moyen agricole a été affecté à chaque pixel agricole cartographié par GLC 2000. Chaque pixel dans un pays a reçu le rendement de la culture de référence correspondant à sa latitude, blé, canne à sucre ou coton. Ensuite le résultat du calcul de la part de résidus a été affecté à chaque pixel. Pour les pays possédant de vastes superficies agricoles, couvrant plusieurs "catégories" de latitudes, deux ou les trois cultures de référence peuvent être concernées.

Là encore, les cartes GLC 2000 et les statistiques de production agricole de la FAO [FAOSTAT] ont été utilisées ainsi que les fonds de carte ESRI délimitant les pays à l'échelle planétaire (1 :20 000 000). Les deux approches utilisent les données statistiques de la production agricole annuelle des trois cultures de référence (blé, canne à sucre et coton) à l'échelle mondiale.

Le premier calcul estime les quantités de résidus d'exploitation agricole correspondantes aux trois cultures de référence. Un rendement minimum est calculé sur la base des quantités récoltées par pays et des surfaces déclarées (données FAO) en affectant à chaque pixel la quantité produite avec la culture de référence au rendement le plus faible, tout en respectant les latitudes de cultures possibles.

Le deuxième calcul estime une valeur plus haute des quantités de résidus issus de l'activité agricole que pourrait traduire à moyen/long terme une intensification agricole rendue nécessaire par la croissance démographique. A chaque pixel, il a été affecté la quantité produite avec la culture de

référence au rendement le plus élevé, toujours selon les données de la FAO, en respectant les latitudes de cultures possibles.

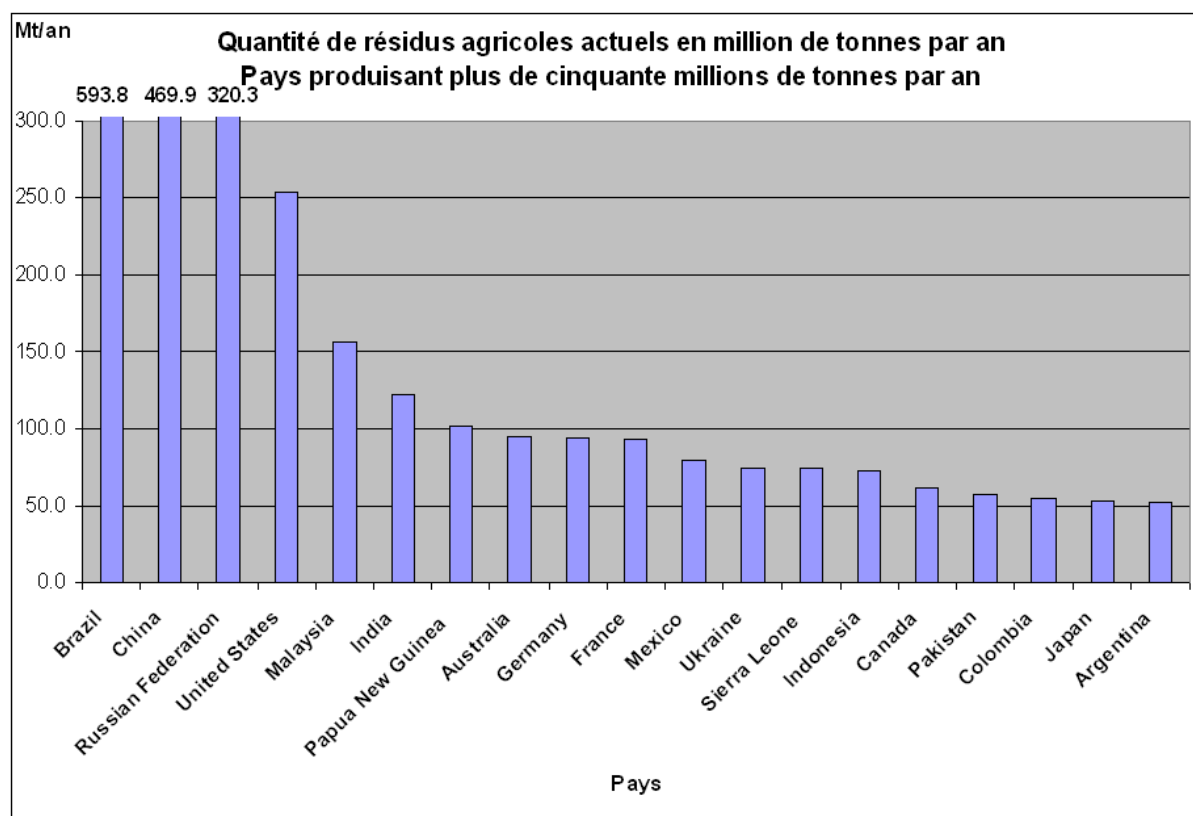
2.3.2 – Disponibilité mondiale en résidus agricoles

Les résidus des zones agricoles en exploitation actuelle (première valeur)

Les résidus d'exploitation des zones agricoles représentent un potentiel total pour l'année 2005 de 4.095 millions de tonnes. Le détail par pays est donné en annexe. La carte de répartition par pays est jointe en annexe sur CD-ROM.

Les pays produisant plus de 50 millions de tonnes de résidus agricoles sec par an sont au nombre de 19 (Graphique 2.3). Ils représentent un potentiel technique de 2.877 millions de tonnes par an soit 70% du potentiel total.

A eux seuls, le Brésil, la Chine, la Russie, les Etats-Unis, la Malaisie, l'Inde et la Papouasie Nouvelle Guinée représentent 50 % du potentiel de résidus agricoles.



Graphique 2.3 : Pays produisant plus de 50 Mt/an de résidus issus de l'exploitation agricole des zones actuelles cultivées, moyenne de 2001 à 2005, exprimé en Mt/an, d'après les données FAO et GLC 2000.

Bien que ces résultats ne reflètent pas la variabilité dans chaque pays, ils soulignent quand même les disparités globales entre pays, car les rendements pour chaque pays ont été calculés sur la base des déclarations de récolte du pays.

Résidus des zones agricoles par suite de l'intensification agricole (valeur haute)

Les résidus d'exploitation des zones agricoles représentent un potentiel total pour l'année 2005 de 17.409 millions de tonnes. Le détail par pays est donné en annexe. La carte de répartition par pays est jointe en annexe.

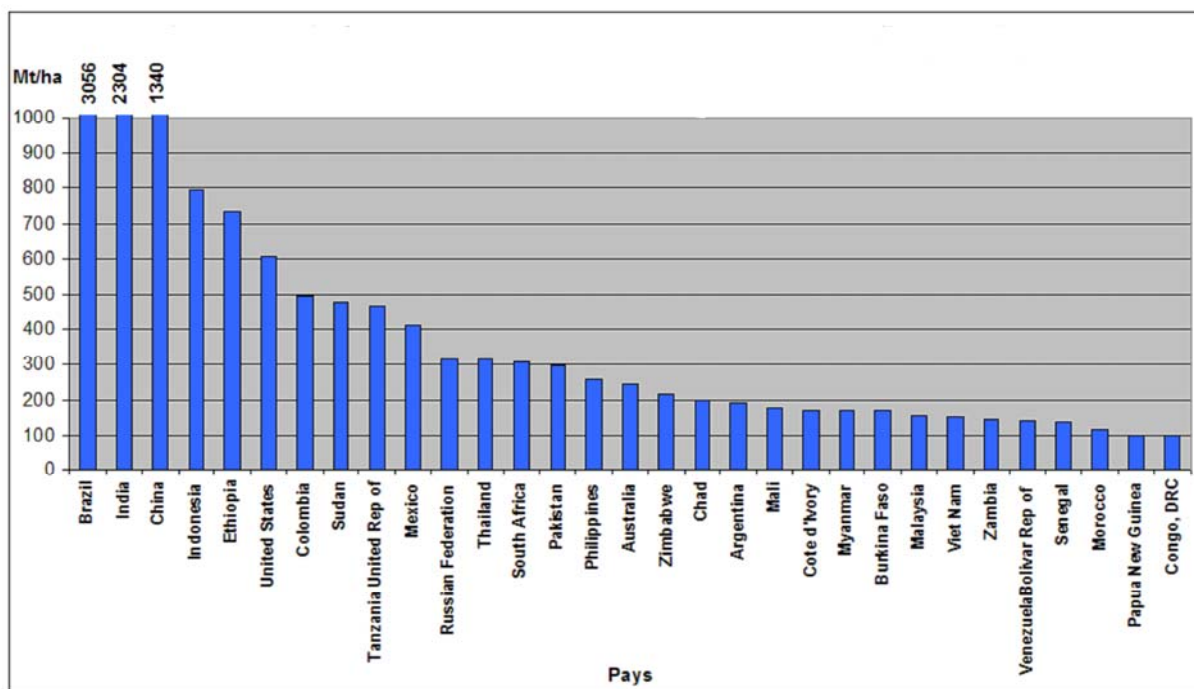
Les pays produisant plus de 100 millions de tonnes de résidus agricoles sec par an sont au nombre de 31 (graphique 2.4). Ils représentent un potentiel technique de 14.779 millions de tonnes par an soit 85% du potentiel total. Sans surprise, l'Inde, le Brésil et la Chine représentent à eux seuls environ la moitié de ce potentiel.

Cette approche est purement théorique, elle correspond à des scénarios de long terme pour lesquels la co-valorisation, alimentaire et énergie des cultures agricoles serait visée, avec pour souci de maximiser les rendements en matière sèche.

Dans cette perspective, les volumes disponibles considérables serviront à une diversité d'usages en compétition : maintien de la fertilité des sols (matières organiques), filières énergétiques courtes telles que la production d'électricité décentralisée, et filières plus longues telles que celle qui nous intéresse, de biocarburants.

La grande majorité des résidus agricoles sont localisés dans les pays tropicaux. Ces mêmes pays font dans leur grande majorité face à des crises énergétiques notamment en matière de production d'électricité. Ils ont pour la plupart mis en place des politiques incitatives de production d'électricité privée et de rachat du kWh, avec le plus souvent un bonus pour la production d'électricité d'origine renouvelable. Cette situation se traduit par une utilisation importante et prioritaire des sous-produits agricoles et forestiers pour la production d'électricité. Le renchérissement du coût de l'énergie et notamment des produits pétroliers devrait accentuer cette tendance. La production d'électricité décentralisée, filière courte minimisant les coûts de transports, risque donc à terme de mobiliser une part significative des déchets et les résidus agricoles, pour la majorité des pays tropicaux, pays émergents.

L'utilisation des résidus agricoles pour approvisionner une filière plus longue ("bio raffinerie") ne serait alors que exceptionnelle, en fonction de contextes spécifiques, au niveau du continent européen et nord-américain (Etats-Unis) probablement.



Graphique 2.4 : Pays produisant plus de 100 Mt/an de résidus issus de l'exploitation agricole des zones actuelles cultivées, moyenne de 2001 à 2005, exprimé en Mt/an, d'après données FAO et GLC 2000.

3 – Scénarios d'exploitation des potentiels de biomasse

Les travaux présentés dans les deux premières parties de ce rapport ont localisé et comptabilisé quelques centaines de millions d'hectares de plantations qui pourraient intégrer l'amont d'une filière Fischer-Tropsch pour l'approvisionnement d'unités de production de biocarburants.

Dans cette troisième et dernière partie, ces résultats sont synthétisés et discutés, non plus du point de vue des spécialistes en écologie, agronomie, foresterie et télédétection mais en termes énergétiques, logistiques et économiques. L'analyse spatiale reste cependant au cœur de notre approche, avec l'examen de scénarios alternatifs d'implantations d'usines de valorisation de la biomasse en carburant.

3.1 – Les volumes de bio-énergie potentiellement disponibles

Pour convertir des millions d'hectare en volumes de biomasse et ces volumes en potentiels d'énergie primaire puis en volumes de carburants FT, les paramètres suivants ont été utilisés.

- Les plantations offrent un rendement de 20 t/ha.an, soit quelques 40 à 45 m³.
- Il s'agit de tonnes de matière sèche, dont le contenu énergétique est de 18,2 GJ/t ou 0,44 tep/t.
- Le rendement énergétique de la conversion FT se situe entre 40 et 50%, respectivement valeurs basse et haute.
- Un baril par jour équivaut à 50 tonne-équivalent-pétrole par an : 1 bpj = 50 tep/an

L'énergie nécessaire à l'exploitation de la biomasse (mécanisation des opérations dans les plantations) et à son transport n'est pas prise en compte.

Les potentiels comptabilisés ici sont ceux des principaux pays listés en première partie, ils excluent donc les surfaces des pays dans lesquels les potentiels identifiés sont inférieurs à 500.000 ha.

Cette limite a été fixée de manière arbitraire selon le raisonnement que si la moitié des superficies potentiellement disponibles peut effectivement être mobilisée, 500.000 ha correspondent à 250.000 ha, de plantations effectives, soit une production de 5 Mt de bois susceptibles d'alimenter une unité FT produisant quelques 17.000 à 22.000 baril par jour (bpj). Cette capacité est suffisamment élevée pour garantir que l'on se situe à des niveaux de prix potentiellement compétitifs, légèrement supérieurs à 70 \$ US/baril si l'on en croit les courbes d'apprentissage en vigueur, nous l'avons vu en introduction. Notons qu'en termes de superficies de plantations, les besoins d'une unité de production de biocarburants se situeraient au même niveau que ceux d'une grosse usine de pâte à papier.

Tableau 3.6 : Synthèse des potentiels issus des plantations

Potentiels en plantations énergétiques des pays avec potentiels > 0,5Mha					
		<i>Eucalyptus</i>	<i>Acacia</i>	<i>Pinus</i>	3 genres
Potentiels plantations	<i>Mha</i>	364,7	35,4	400,0	442,5
Production de biomasse valorisable (matière sèche)	<i>Mt</i>	7294,1	707,5	7999,0	8849,6
Energie primaire correspondante	<i>PJ</i>	132.752	12.877	145.583	161.062
	<i>Mtep</i>	3.161	307	3.466	3.835
Production de biocarburants potentielle	avec valeurs basse et haute du rendement énergétique FT				
	<i>Mtep</i>	1.264 – 1.580	123 – 153	1.387 – 1.733	1.534 – 1.917
	<i>Mbpj</i>	25,3 – 31,6	2,5 – 3,1	27,7 – 34,7	30,7 – 38,3

3.2 – Analyse de deux scénarios d'implantations d'usines de valorisation énergétique de la biomasse ligneuse

Les scénarios de concentration du tissu industriel ont 3 conséquences majeures :

- Ils redéfinissent les surfaces potentiellement exploitables ;
- Ils influencent les coûts directs de l'exploitation ;
- D'une certaine manière ils redéfinissent également les coûts indirects : un ensemble de petites plantations discontinues n'a pas le même impact sur la biodiversité qu'un ensemble continu. De même, il devient plus facilement possible de concilier agriculture et foresterie dans un ensemble morcelé.

Dans le cadre de cette étude, deux grands types de scénarios ont étudiés :

- **Scénario 1** : Implantation de grosses usines centralisées directement alimentées par de la biomasse « brute ».
- **Scénario 2** : Implantation de petites usines décentralisées susceptibles de préconditionner la biomasse (pyrolyse) avant de la transporter sur longue distance.

L'intérêt de cette dichotomie d'organisation de la filière résulte à la fois des possibilités d'économies de coûts escomptables au niveau du transport d'un produit ex-biomasse énergiquement concentré par rapport à la ressource brute, et de la faculté de pouvoir implanter un nombre plus important de sites industriels dans le cas de schémas décentralisés et ainsi de mieux utiliser l'espace. Examinons en effet dans quelle mesure les unités centralisées conduisent à éliminer les zones potentielles de plantations trop dispersées.

3.2.1 – Hypothèses de travail

Capacité des usines

- Les grosses usines ont une capacité de transformation de 5 Mt de biomasse/an. En supposant qu'elles sont alimentées par des plantations produisant 20 t/ha.an de biomasse, l'aire d'approvisionnement d'une telle usine est de 250.000 ha, soit un cercle de 30 km de rayon minimum.
- Les petites usines ont une capacité de transformation de 500 kt de biomasse/an. En supposant

qu'elles sont alimentées par des plantations produisant 20 t/ha.an de biomasse, l'aire d'approvisionnement d'une telle usine est de 25.000 ha, soit un cercle de 10 km de rayon minimum.

Stratégie de localisation

En l'état actuel de l'étude et compte tenu du peu de données disponibles à l'échelle mondiale sur les voies de communication, la stratégie de localisation retenue est un maillage systématique de l'espace potentiel de production selon un maillage de type Löschien.

Chaque usine a son propre bassin d'approvisionnement modélisé par un cercle ou une cellule octogonale. Et nous cherchons à collecter le maximum de biomasse en saturant l'espace de production sans recouvrement des aires d'approvisionnement.

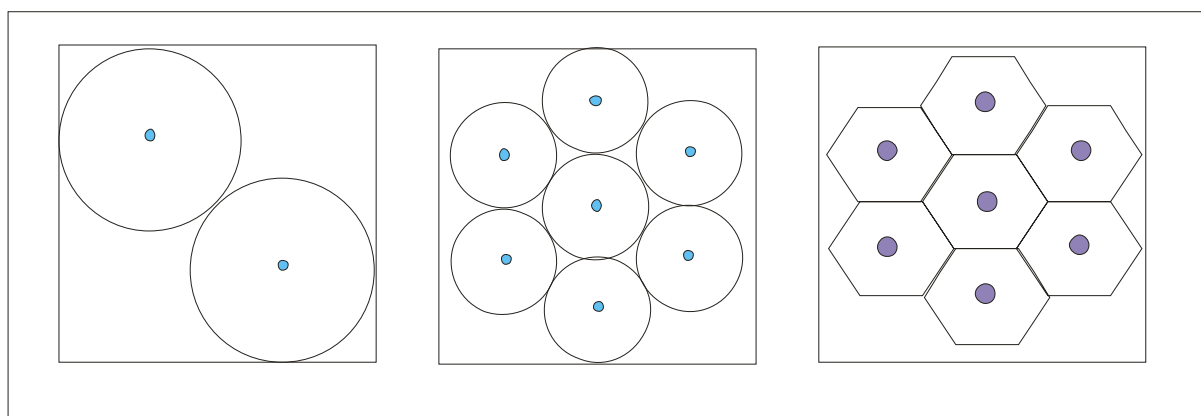


Figure 3.5 : Principes de maillage de l'espace de production, sans recouvrement des aires d'approvisionnement.

3.2.1 – Méthodologie d'analyse

Les analyses antérieures fournissent l'espace de production potentielle de biomasse. Cet espace est modélisé sous la forme d'une grille (une couche *raster*) dans laquelle chaque maille est renseignée sur sa capacité de production annuelle.

Sur cette grille, en chaque maille on analyse la possibilité d'implantation d'une usine en calculant dans son « voisinage » la somme de la biomasse collectable. Le voisinage utilisé pour une telle analyse correspond au bassin d'approvisionnement de l'usine.

Dans le cadre de cette étude nous avons fait varier la portée limite du bassin de 15 km à 150 km de manière à pouvoir apprécier les quantités collectables au regard des coûts de déplacement nécessaires et du degré de concentration ou dispersion des potentiels. Des explications complémentaires sur l'influence ainsi étudiée de la portée des usines sur leur aire potentielle d'implantations, sont fournies en Annexe D.

Un site est déclaré « site potentiel d'implantation » si la biomasse collectable dans son bassin est supérieure à 5 Mt ou 500 kt selon le scénario étudié.

Les cartes ci-après illustrent les sites potentiels d'implantation d'usines de transformation de la biomasse issue de plantations d'*Eucalyptus*.

L'ensemble des « sites potentiels d'implantation » définit une zone potentielle de production collectable et ainsi une quantité potentielle de biomasse collectable.

Ce sont ces quantités (en Mt/an) qui sont fournies en résultat ci-après pour chaque scénario et pour chaque portée de bassin étudiée.

Les sites potentiels d'implantation étant localisés, il a également été possible de calculer leur distance à la côte la plus proche. Ce calcul permet d'évaluer les potentialités d'exportation de biomasse en fonction de la distance aux ports potentiels les plus proches. Ce calcul reste sans doute à affiner en tenant compte des voies de communication et des infrastructures portuaires actuelles susceptibles d'accepter un tel trafic. Néanmoins les résultats fournis donnent un ordre de grandeur des difficultés potentielles que le transport de ce type d'énergie pourrait être amené à rencontrer.

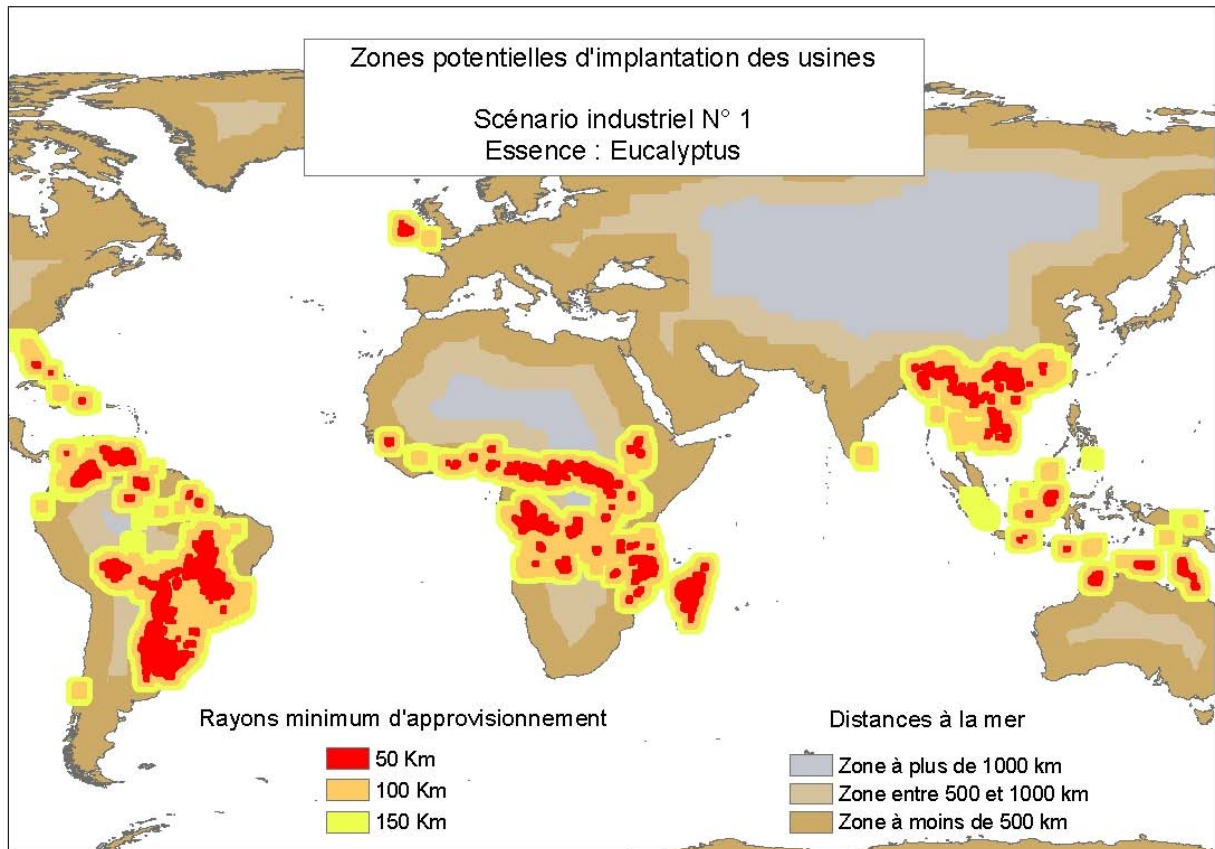


Figure 3.6 : Scénario 1 (centralisé) d'implantation d'usines FT de grosse capacité (5 Mt)

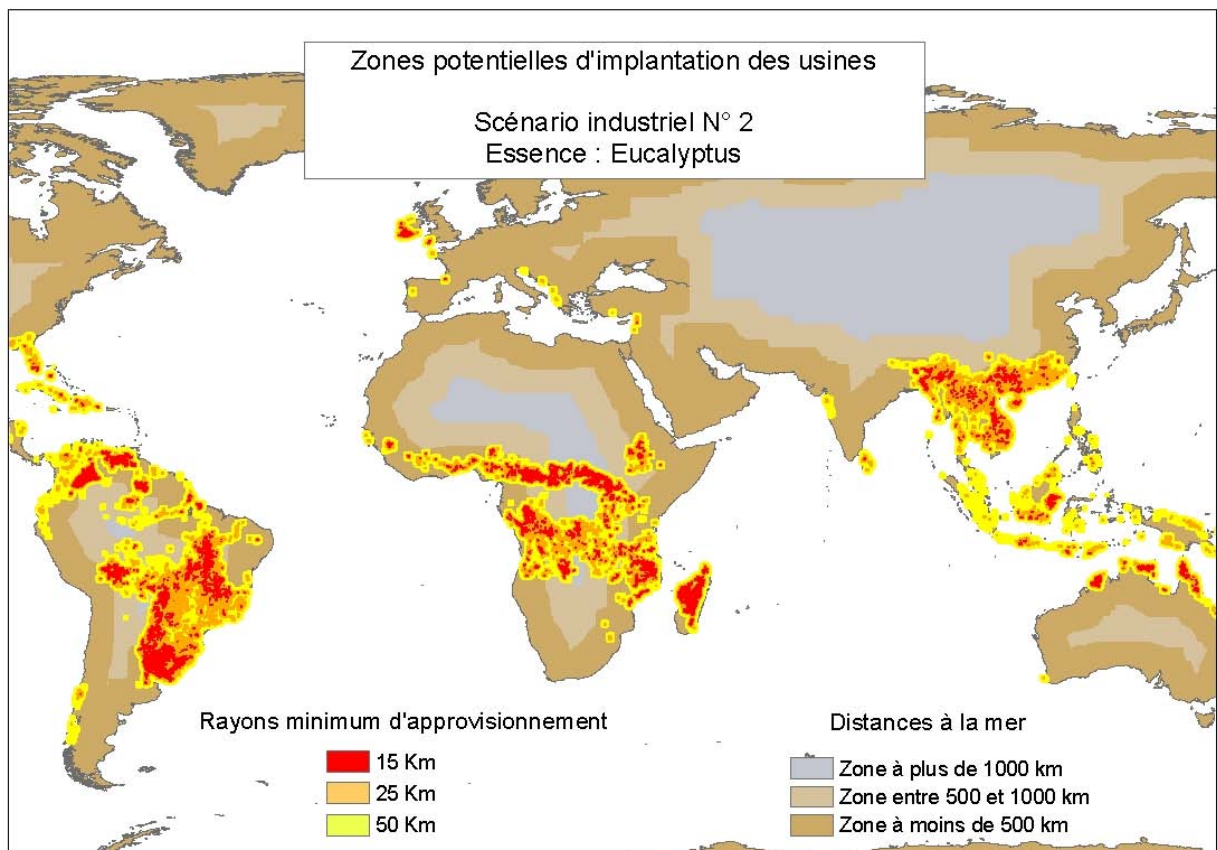


Figure 3.7 : Scénario 2 (décentralisé) d'implantation d'usines FT de petite capacité (500 kt)

3.2.3 – Résultats

Les résultats sont fournis pour une seule grande source de biomasse, les plantations d'*Eucalyptus* à 20 t/ha.an. Ils sont modulés par scénario et par portée limite de bassin.

Ces résultats montrent, contrairement à ce que nous escomptions, qu'en termes de collecte, le scénario 1 d'implantation de grosses usines avec des portées de 150 km offre des quantités équivalentes au scénario 2 d'implantation de petites usines avec des portées de 50km qui auraient dû correspondre à un scénario permettant de mieux valoriser l'espace et notamment les petites surfaces disséminées.

Ils montrent également qu'en se fixant des portées de l'ordre de 50 km, le scénario 1 délaisse 25% de la biomasse récoltable.

L'optimum de localisation en terme économique est sans doute à rechercher en alliant de grosses et de petites unités.

Productions potentiellement mobilisables d'Eucalyptus selon les 2 scénarios industriels (Mt/an)			
	Volume collectable sans contrainte de distance à la mer	Volume collectable à moins 1000 km des côtes	Volume collectable à moins de 500 km des côtes
Scénario industriel 1, "grandes" usines (5 Mt)			
Portée = 150 km	6083	5585	3895
Portée = 100 km	5901	5401	3750
Portée = 50 km	4625	4230	2875
Scénario industriel 2, "petites" usines (500 kt)			
Portée = 50 km	6183	5678	3998
Portée = 25 km	5842	5356	3741
Portée = 15 km	4174	3808	2618

Tableau 3.7 : Mobilisation de plantations d'*Eucalyptus* de productivité 20 t/ha.an

Le même exercice avec les résidus forestiers (résidus de l'exploitation de toutes les forêts) confirme les doutes sur la disponibilité en résidus puisque selon le scénario 1, le volume mobilisable est nul pour des distances de transport inférieur à 50 km, très faible en deçà de 100 km et que, compte tenu des coûts de transport et des contraintes logistiques, il vraisemblablement peu réaliste de l'envisager sauf exception au delà de 100 km.

Productions potentiellement mobilisables de résidus forestiers selon les 2 scénarios industriels (<i>Mt/an</i>)			
	Production collectable sans contrainte de distance à la mer	Production collectable à moins 1000 km des côtes	Production collectable à moins de 500 km des côtes
Scénario industriel 1, "grosses" usines (5 Mt)			
Portée = 150 km	1009	812	492
Portée = 100 km	24	24	23
Portée = 50 km	0	0	0
Scénario industriel 2, "petites" usines (500 kt)			
Portée = 50 km	1085	889	561
Portée = 25 km	3	3	3
Portée = 15 km	0	0	0

Tableau 3.8 : Production de résidus forestiers

Le scénario 2 est par contre plus conforme avec des situations occidentales où les résidus viendraient compléter un approvisionnement essentiellement basé sur des plantations énergétiques. Cette combinaison des approvisionnements devra être étudiée à une échelle suffisamment fine pour intégrer des variables d'infrastructures (routes, ports...).

4 – Conclusions sur les pistes d'approfondissement de l'évaluation de potentiels

Quelques 370 millions d'hectares seraient situés dans des zones bioclimatiquement favorables à des plantations à forte productivité et hors des zones non disponibles pour de telles plantations.

Environ 4,2 milliards de tonnes de matière sèche collectables seraient générées de manière résiduelle par les activités forestières et agricoles actuelles, 18,4 Gt pourraient l'être si ces activités étaient intensifiées sur les superficies agricoles et forestières existantes.

Examinons dans cette conclusion comment aux différentes étapes de l'évaluation, ces résultats méritent d'être approfondis selon deux axes :

- la fiabilité des données utilisées pour ces évaluations globales;
- les critères de disponibilité potentielle de la ressource en biomasse.

Pour les plantations, des hypothèses relativement restrictives ou conservatrices ont été choisies afin d'éviter des effets d'annonce possiblement trompeurs à un niveau global sur la disponibilité des terres pour la production d'énergie. Cependant le décalage entre nos résultats et la réalité incertaine ne tient pas uniquement à la fragilité de ces hypothèses mais aussi à la qualité des données disponibles.

Révision du niveau de production de référence et des genres retenus

Le rendement élevé pris comme référence (20 t/ha.an) et les genres retenus pour être capables de l'atteindre conduisent à des potentiels essentiellement situés en zone intertropicale

Pour le genre *Pinus* par exemple, une productivité de référence de 10 t/ha.an au lieu de 20, ajouterait plus de 280 Mha de potentiels (687 au lieu de 406).

L'introduction d'autres genres dans l'évaluation des potentiels supposerait de retenir aussi un niveau plus faible de rendement.

Au-delà des avis d'experts, une analyse des conditions de viabilité économique des plantations énergétiques est nécessaire à la révision du niveau de production de référence. Nous proposons de mener cette analyse sur une base comparative entre différents niveaux de productivité et différentes conditions d'exploitation (mécanisation, etc). On quittera forcément l'échelle globale pour caractériser l'influence de sa productivité sur la viabilité économique d'une plantation.

Définition des fourchettes bioclimatiques

Les fourchettes bioclimatiques au sein desquelles les genres génèreraient des rendements élevés ont été définies à partir d'un nombre limité de publications relatant des travaux empiriques, moins d'une dizaine de références sont citées. L'absence de données sur l'état des sols à l'échelle globale, la plasticité des genres retenus et la possibilité de pratiques fertilisantes plus ou moins intensives, relativise la signification des fourchettes bioclimatiques dans la délimitation des zones favorables à une productivité élevée.

S'il est méthodologiquement impossible de déterminer des intervalles de confiance dans cette définition des fourchettes bioclimatiques, la recherche de travaux empiriques complémentaires, plus spécifiques ou n'ayant pas encore donné lieu à publication scientifique, permettrait de consolider ou de réviser les fourchettes bioclimatiques.

Révision des données utilisées

Les bases de données utilisées comportent des imperfections relatives à leur caractère global. Il est possible d'y remédier avec l'utilisation de données disponibles à moindre échelle, régionale ou nationale. Un travail de cette nature mené pour le Brésil et le recours à des cartes nationales notamment sur les aires réservées pour les Indiens nous a par exemple amené à significativement revoir à la baisse les surfaces potentiellement disponibles pour des plantations industrielles. Nous proposons d'améliorer l'évaluation de potentiels sur certaines zones par l'utilisation de données à des échelles plus fines (mais non disponibles pour l'ensemble du monde).

Autre amélioration à poursuivre pour une dimension véritablement prospective de l'évaluation des potentiels de plantations énergétiques, la prise en compte des effets du changement climatique et des dynamiques d'occupation des sols (déforestation...). Il est en effet probable que les zones identifiées comme bioclimatiquement favorables à des plantations énergétiques évoluent du fait du renforcement de l'effet de serre (modifications des températures et de la pluviométrie). Les zones exclues des potentiels (agricoles, de forêts...) évoluent également. Différents modèles d'évaluation intégrée répertoriés et évalués par le GIEC (rapport à paraître) renseignent l'évolution des variables bioclimatiques selon plusieurs scénarios. Nous proposons de construire de nouvelles cartes tenant compte de ces scénarios.

Révision des critères d'exclusion de zones a priori non disponibles

L'exclusion des forêts et des zones agricoles est une condition nécessaire mais non suffisante pour garantir que les plantations énergétiques ne causeront pas de déforestation ni de conflit d'usage entre énergie et alimentation. Et ce, pas uniquement pour les raisons indiquées ci-dessus de fiabilité des données.

La concurrence entre usages des sols peut être indirecte et porter sur un autre facteur de production tel que l'eau par exemple.

Introduction de critères supplémentaires de disponibilité de la biomasse

Rien n'assure que des plantations destinées à la production de biocarburants de seconde génération représentent la meilleure option pour les différentes parties en présence sur les terres identifiées comme potentiellement disponibles. Les conditions d'accès à la terre (situation législative, populations locales, ...), de mobilisation de la biomasse (infrastructures) et de sa valorisation (dépenses énergétiques, main-d'œuvre et technologies,...) sont déterminantes de l'intérêt que représenterait une filière FT dans un contexte donné.

L'amélioration de l'évaluation des potentiels exprimés en volumes énergétiques concerne les rendements (productivité à l'hectare des plantations, contenu énergétique de la biomasse, rendement de conversion FT). Pour chaque paramètre, une valeur de référence a été choisie ici. Or une prise en compte des conditions plus locales de production et des impératifs de développement durable (conservation de la biodiversité, qualité des sols et des nappes phréatiques...) se traduira par des rendements variables selon les milieux mais aussi les modes d'exploitation. Absentes de l'évaluation globale des potentiels, les dépenses énergétiques d'exploitation et de collecte de la biomasse intégreront ainsi les données de rendements de filières.

La poursuite de l'étude des potentiels de biomasse pour des carburants oblige d'une part à quitter le niveau global pour une échelle plus fine, d'une région ou d'un pays, et d'autre part à expliciter les conditions d'émergence d'une filière FT parallèlement à d'autres filières de valorisation. De chiffres sur une disponibilité potentielle globale, on passera à des niveaux de coûts associés à des volumes énergétiques mobilisables. Le caractère novateur du travail réalisable se situerait comme pour l'étude globale dans le géo-référencement des résultats.

Pour les résidus, nous avons procédé à beaucoup de simplifications pour rendre compte en quelques chiffres de situations très diversifiées depuis la production de résidus jusqu'aux pratiques actuelles de valorisation. Nous basons nos approximations sur l'hypothèse que le potentiel technique (production brute) des résidus est très supérieur au potentiel pratique (volumes mobilisables) et avons situé nos évaluations à mi-chemin compte-tenu de notre perception des pratiques et objectifs actuels. Les pistes d'amélioration sont nombreuses et passent toutes par la clarification du statut de résidu.

Révision des hypothèses sur les fractions de résidus générés lors des activités agricoles et forestières

Les approximations par moyenne des différentes fractions valorisables d'une plante de culture ou d'un arbre en forêt ne correspondent à aucune réalité tellement la diversité des situations recouvertes est grande. Nous proposons de reprendre les hypothèses sur les fractions de résidus en fonction de données locales sur les espèces concernés dans les cultures agricoles et les forêts.

Révision des données

Les données globales utilisées présentent quelques incohérences du essentiellement à leur niveau de perception Si le travail d'évaluation des potentiels de résidus est poursuivi à moindre échelle, les sources de données seront diversifiées et croisées pour une meilleure qualité des données.

Explicitation des alternatives de valorisation de ces "résidus"

Qu'elle soit énergétique ou non, moderne ou non, la valorisation des résidus dans une filière de valorisation crée de fait un marché avec, comme pour les plantations, diverses demandes en compétition.

On entre alors pour les forêts comme pour les terres agricoles, dans le registre de la co-exploitation, avec un premier arbitrage sur des critères écologiques et économiques du fait du rôle des "résidus" dans le maintien de la fertilité des sols conjointement avec les intrants.

Ensuite, les potentiels pour une filière FT vont dépendre des termes dans lesquels se pose la concurrence entre usages (électricité, chaleur, carburants...), notamment entre valorisations énergétiques compte tenu des fortes croissances démographiques et économiques que connaissent plusieurs des principaux pays agricoles (Chine, Inde, VietNam...).

Là encore, c'est à l'échelle d'une région ou d'un pays que la poursuite du travail d'évaluation des potentiels se situera.

Enfin l'intérêt d'une valorisation énergétique industrielle de ces résidus dépendra de leur dispersion, dans des termes qu'il reste à préciser. On pourra alors étudier l'intérêt d'une combinaison des approvisionnements issus des plantations énergétiques d'une part et des résidus d'autre part.