Les systèmes dédiés à la production de bois énergie en France. Travaux de recherche et projets en cours.

Jean-Charles Bastien, Nicolas Marron, Alain Berthelot, Aurelie Leplus

▶ **To cite this version:**

Jean-Charles Bastien, Nicolas Marron, Alain Berthelot, Aurelie Leplus. Les systèmes dédiés à la production de bois énergie en France. Travaux de recherche et projets en cours.. Revue forestière française, 2011, 63 (2), pp.217-228. hal-02648457

HAL Id: hal-02648457
https://hal.inrae.fr/hal-02648457

Submitted on 29 May 2020

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

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

Les systèmes dédiés à la production de bois énergie en France. travaux de recherche et projets en cours

Jean-Charles Bastien – Nicolas Marron – Alain Berthelot – Aurélie Leplus

Depuis le début du nouveau millénaire, les problèmes environnementaux et économiques ont mis sur le devant de la scène la bioénergie, énergie renouvelable produite à partir de divers matériaux biologiques, dont le bois. Les interactions entre des facteurs tels que les changements climatiques globaux (dus aux émissions anthropiques grandissantes de gaz à effet de serre dans l'atmosphère), la forte dépendance du secteur de l'énergie envers les carburants fossiles et les tensions qui régissent le marché des cultures alimentaires génèrent de nouveaux problèmes aussi bien que de nouvelles opportunités pour l'agriculture mondiale. La prévention des causes et la palliation des effets des changements climatiques passent à la fois par une réduction des émissions de carbone (par l'intermédiaire d'économies d'énergie et par la recherche de sources d'énergie et de matières premières de substitution) ainsi que par l'augmentation des stocks de carbone stable au niveau planétaire par la séquestration biologique du carbone. La production efficace et raisonnée de la biomasse puis sa valorisation par le biais d'une agriculture et d'une sylviculture productives, sobres et diversifiées semblent offrir des perspectives intéressantes à la fois en termes de réduction des émissions de carbone et d'amélioration de sa séquestration.

La biomasse représente actuellement presque 14 % de la consommation mondiale d'énergie et 3 % de la consommation d'énergie de l'Union européenne. Environ 25 % de l'utilisation sont localisés dans les pays industrialisés où, ces dernières années, un investissement significatif dans la protection de l'environnement a été fait de façon à respecter les réglementations en termes d'émissions et notamment d'émissions atmosphériques. L'Europe a un rôle prépondérant à jouer dans le développement des énergies renouvelables. L'Union européenne importe en effet actuellement 50 % de ses besoins en énergie et ce chiffre devrait passer à 70 % d'ici à 2030. Dans un effort pour réduire cette dépendance énergétique, l'Union européenne cherche à atteindre l'objectif de 20 % de ses besoins énergétiques primaires procurés par des sources d'énergie renouvelable d'ici 2020. Ces sources (biomasse, hydro, éolien, solaire, géothermie, etc.) sont en effet une option intéressante pour diversifier les approvisionnements énergétiques européens : elles sont disponibles localement, et elles contribuent à l'emploi et à la compétitivité de l'industrie européenne. En France, les bioénergies renouvelables représentaient 11 millions de tep [1] par an en 2006 sur la consommation totale d'énergie primaire du pays de 280 millions de tep par an. Sans menacer ni concurrencer les filières alimentaires et les filières matériaux, le potentiel français se situerait, selon Roy (2007), à environ 20 millions de tep par an à l'horizon 2015 et environ 50 millions de tep par an aux alentours de 2040-2050 (figure 1, p. 218), ce dernier chiffre correspondant à une superficie très importante de 8 à 10 millions d'hectares dédiés, agricoles et forestiers.

(1) Tep : tonne équivalent pétrole.

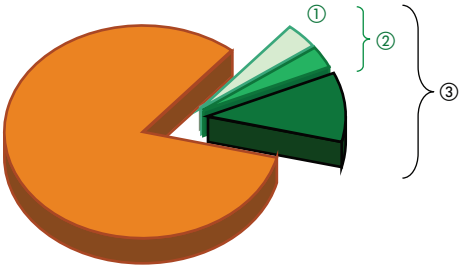


Figure 1
CONSOMMATION FRANÇAISE D'ÉNERGIE PRIMAIRE TOTALE : 280 MTEP/AN, DONT ÉNERGIES RENOUVELABLES :

① Actuellement : 11 Mtep/an
② Objectifs 2010-2015 : 20 Mtep/an
③ Objectifs 2040-2050 : 50 Mtep/an

Source : Roy (2007)

Les bioénergies peuvent être exploitées pour la production de chaleur, de carburants ou d'électricité. Parmi les bioénergies, les biocarburants liquides dérivés de cultures annuelles présentent un bilan environnemental globalement moins favorable que la biomasse provenant de produits forestiers ligneux. Un rapport de l'Agence européenne pour l'environnement (EEA, 2006) montre que dans un futur proche la quantité de bioénergie européenne actuellement basée sur le secteur forestier n'est pas amenée à augmenter, au contraire de celle issue des cultures énergétiques dédiées à la production de biodiésel, de bioéthanol et de lignocellulose.

LES SYSTÈMES DÉDIÉS À LA PRODUCTION DE BOIS ÉNERGIE

À la limite des secteurs forestier et agricole, les taillis à courte ou très courte rotation (TCR, TTCR) représentent une des options envisageables pour satisfaire la demande qualitative et quantitative en bois à venir. Les TCR sont généralement composés d'arbres à croissance rapide, issus d'espèces telles que le Peuplier, le Saule, l'Eucalyptus, le Robinier [(2)] ou l'Aulne. Ces espèces

TCR de Peuplier en fin de 2e rotation, tiges de 10 ans sur souches de 17 ans (à gauche)
et TTCR de Peuplier, rejets d'un an sur souches de 3 ans (à droite)

Photos FCBA

(2) Appartenant à la famille des Fabacées, le Robinier possède de plus la propriété de fixer l'azote atmosphérique par l'intermédiaire de son association avec une bactérie du genre *Rhizobium* (il en est de même pour l'Aulne grâce à la symbiose avec une bactérie du genre *Frankia*). Dans certains pays comme la Chine, cette propriété est déjà mise à profit pour tenter de réduire les intrants azotés en cultivant Peuplier et Robinier en mélange.

sont plantées à forte densité (1 000 à 2 000 tiges/ha pour les TCR, 7 000 à 15 000 tiges/ha pour les TTCR) pour produire de la biomasse ligneuse avec une rotation comprise entre 7 et 10 ans pour les TCR et entre 2 et 4 ans pour les TTCR. L'objectif est de produire de petits arbres en TCR (15 cm de diamètre et 15 à 20 m de hauteur totale) ou beaucoup de rejets de petite dimension en TTCR (3 à 4 cm de diamètre et 4 à 6 m de hauteur totale) (photos, p. 218).

En Europe, le Peuplier est cultivé en TCR et TTCR principalement en Italie (environ 6 000 ha). Le Saule est cultivé en TTCR essentiellement en Suède (environ 20 000 ha), en Grande-Bretagne (environ 3 000 ha) et en Europe centrale (Pologne : environ 2 000 ha, Roumanie : environ 2 500 ha). L'Eucalyptus est cultivé depuis longtemps en TCR pour approvisionner les usines de pâte à papier en Espagne et au Portugal (environ 1 million d'hectares). En France, les surfaces plantées en TCR ou TTCR restent encore modestes : Peuplier : 400 ha, Saule : 300 ha, Eucalyptus : 1 500 ha, environ. D'après la littérature mondiale, la production annuelle moyenne de ce type de plantation est généralement de l'ordre de 8 à 15 tonnes sèches par hectare selon l'espèce ou le clone utilisé, le site, la région et les modalités de gestion de la plantation (Petersen, 2007).

En marge de ces espèces pour lesquelles le potentiel de production n'est plus à prouver, d'autres espèces, rejetant ou non de souche, bien que peu documentées, laissent également entrevoir des dispositions pour produire des quantités importantes de biomasse dans le cadre d'une culture en futaie à courte révolution (FCR) dédiée ou semi-dédiée : Mélèze hybride, Douglas, Pin maritime, *Sequoia sempervirens*, *Thuya plicata*, *Cupressocyparis leylandii*, etc. Les nouvelles dispositions de la PAC permettent depuis 2007 de cultiver ces espèces ligneuses au sein des exploitations agricoles (MAP-DGPAAT, 2007). La biomasse ligneuse produite pourra être utilisée pour alimenter des chaudières, pour générer localement de l'électricité « verte » et ultérieurement fournir la matière première pour des bioconversions (carburants, synthons (3)).

QUELQUES RÉSULTATS DE TRAVAUX DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT SUR LES TCR ET TTCR EN FRANCE

Les premiers travaux, conduits par FCBA et l'INRA sur les taillis de Peuplier, remontent au début des années 1980 avec un objectif centré sur l'alimentation des usines de pâte à papier (Berthelot et Gavaland, 2007). En vingt ans, ces deux instituts ont mis en place près de 400 ha d'expérimentations destinées à mettre au point des itinéraires techniques de cultures en taillis destinés à :

— maximiser la production de biomasse sur plusieurs rotations,
— évaluer la durabilité biologique de ces cultures,
— et dresser des premiers bilans économiques.

Créée en 1995, l'association d'initiative locale pour l'énergie et l'environnement (AILE) s'intéresse à la faisabilité technico-économique de la valorisation de la culture du Saule en TTCR à des fins énergétiques et épuratoires (épandage d'eaux usées ou irrigation par des effluents de stations d'épuration) au regard de la reconquête de la qualité de l'eau en Bretagne. Dans le cadre d'un projet européen (Wilwater, 2004-2007) qu'elle a coordonné, AILE a mis en place une centaine d'hectares de TTCR de Saule (AILE, 2008a, 2008b). Les travaux menés par ces trois organismes ont porté sur divers aspects de l'itinéraire cultural et de la filière TCR et TTCR.

(3) Synthon (Chimie organique) : entité moléculaire mise en œuvre dans la synthèse d'une molécule afin d'y introduire un motif structural donné.

Choix du système de culture en fonction des objectifs

Le choix de la station, de la qualité du matériel végétal et du contrôle précoce de la végétation adventice sur la reprise et la productivité sont des critères primordiaux dont dépendra le succès des cultures en taillis pour la production de biomasse. Pour une station donnée, le producteur doit aussi faire un choix concernant le couple densité de plantation et rotation. Plantés à une densité moyenne de 12 000 tiges à l'hectare, le TTCR atteindra son optimum de production en troisième année. Le TCR, planté à une densité moyenne de 1 500 tiges/ha, aura une production moyenne maximale vers 7 ans (figure 2, ci-dessous). Ce choix influera peu sur la productivité en biomasse totale de la plantation mais sera déterminant sur la date de la première récolte (et sur les revenus associés) ainsi que sur la nature des produits : plaquettes ou billons.

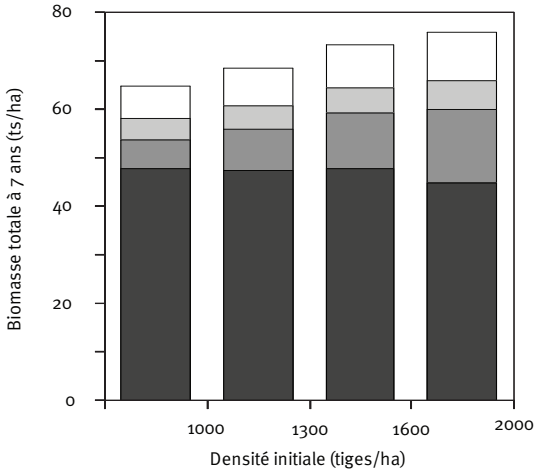


Figure 2

BIOMASSE SÈCHE TOTALE ET À DIFFÉRENTES DÉCOUPES À 7 ANS EN FONCTION DE LA DENSITÉ.

Moyenne de cinq essais de 1 000 à 2 000 tiges par ha
(Source : FCBA)

Choix raisonné du matériel végétal

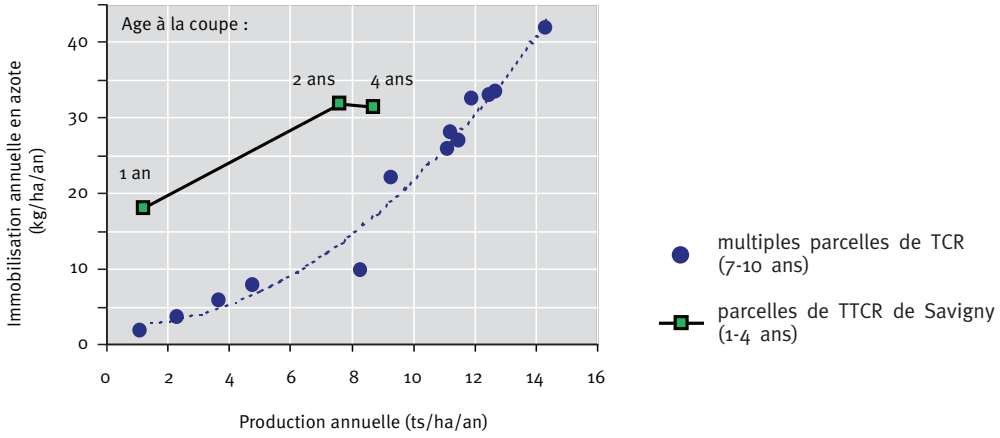
Pour le Peuplier comme pour le Saule, le choix de la variété plantée (cultivar) est prépondérant. Des différences de production de biomasse sèche pouvant atteindre 70 % ont en effet été observées entre différents cultivars de Peuplier cultivés en TTCR. De surcroît, pour un site donné, le classement entre cultivars peut changer d'une rotation à l'autre. Contrairement au Saule, peu de moyens ont été investis à ce jour en sélection variétale pour créer des cultivars de Peuplier spécifiquement orientés vers une production de biomasse. Dans la perspective attendue du développement des cultures intensives de cette espèce, le GIS Peuplier (4) incorpore maintenant dans le processus de sélection de nouveaux critères comme le nombre de rejets par souche et l'aptitude au recépage.

Maintien de la fertilité

Les TCR et TTCR se caractérisent par des exportations fréquentes de bois hors de la plantation, sans rémanents, qui peuvent impliquer à terme un appauvrissement du milieu en éléments minéraux. Cet appauvrissement sera inversement proportionnel à la longueur des rotations. Les essais FCBA et INRA montrent par exemple (figure 3, p. 221) que, pour une même production moyenne de 8 tonnes sèches par an, un TTCR récolté à 3 ans immobilise 30 kg d'azote, soit

(4) Le groupement d'intérêt scientifique "Peuplier" regroupe FCBA, le Cemagref et l'INRA et conduit un programme d'amélioration génétique pour le Peuplier.

Figure 3 **RELATION ENTRE PRODUCTION ANNUELLE DE BIOMASSE SÈCHE TOTALE ET IMMOBILISATIONS ANNUELLES EN AZOTE**
(Sources : INRA / FCBA)



deux fois plus qu'un TCR coupé vers 7 ans (Berthelot et Gavaland, 2007). Ceci s'explique par la proportion très élevée d'écorce et de bois jeune, très riches en éléments minéraux dans la biomasse produite par un TTCR. Comparativement aux cultures annuelles, ces résultats soulignent toutefois que l'impact en termes de bilan entrée-sortie reste beaucoup plus atténué, en particulier quand l'exploitation prévoit l'écorçage et le démembrement des houppiers (Nguyen The et Chaste, 2006). La culture des TCR suppose cependant une gestion agronomique adaptée au maintien de la fertilité à long terme (fertilisation compensatoire éventuelle en N, P, K et Ca).

Épandages

L'épandage de produits résiduaires de stations d'épuration en TTCR apparaît comme une pratique culturale alternative à la fertilisation. Il s'agit aussi de la valorisation d'un déchet, c'est-à-dire un service rendu à la collectivité pour une gestion intégrée du traitement des eaux usées, susceptible de compenser la faible rentabilité économique actuelle de ce mode de culture. L'apport compensatoire par « fertirrigation » par des eaux usées prétraitées ou par épandage de boues de stations d'épuration a été largement testé sur Saule par AILE dans le cadre du projet Wilwater. Les résultats de récolte de Saule observés par AILE en 2008 sur la première récolte de 12 sites de TTCR montrent que des apports raisonnés d'effluents permettent d'accroître la production de biomasse par rapport aux sites non fertilisés : production moyenne de 4,7 tonnes de matière sèche pour des TTCR de saules non fertilisés, de 5,7 tonnes de matière sèche pour des TTCR fertilisés par des boues de station d'épuration et 8,4 tonnes de matière sèche pour des TTCR fertirrigués avec des effluents prétraités.

Pour une application en génie écologique, un TTCR de Saule peut être considéré comme une excellente « pompe à nitrates ». Ainsi, un hectare de TTCR de Saule produisant 10 à 15 tonnes sèches par an peut exporter jusqu'à 80 kg d'azote par an. Certains auteurs ont également mis en évidence le rôle épurateur que pourraient jouer les TTCR de Saule et de Peuplier pour fixer des éléments métalliques (Obernberger *et al.*, 1997). Ceulemans *et al.* (2007) montrent cependant que le pouvoir fixateur des éléments métalliques du sol par le Peuplier est très variable selon les cultivars et l'élément métallique considéré. L'épandage des cendres issues de la combustion de la biomasse produite peut également être envisagé dans certains cas.

Rendement énergétique

Les études conduites par AILE sur TTCR de Saule montrent que l'efficacité énergétique (5) de cette culture est excellente : de l'ordre de 30 lorsque la biomasse est valorisée dans une filière bois énergie. La récolte (qui inclut le transport vers le lieu de stockage) et l'apport de boues ou d'effluents lorsqu'il est fait constituent les plus grands postes de consommation de carburant. Ce sont des opérations qui se répètent au minimum tous les 3 ans. Le même genre d'étude réalisée par FCBA pour des TCR de Peuplier et d'Eucalyptus (Maupu, 2009) fournit des ratios inférieurs (10 à 13), mais avec une méthodologie différente. À hypothèses retenues égales, l'auteur fournit des ratios compris entre 20 et 30. À titre d'exemple, il est admis (Roy, 2007) qu'un hectare de taillis de Saule ou de Peuplier, produisant chaque année 12 tonnes de biomasse sèche, fournit une énergie équivalente à 5 tep sous forme de bois de feu, soit 58 MWh par an. Cela représente une puissance permettant de chauffer un réseau de cinq logements par une chaudière collective dont le rendement est de 85 %.

Filière

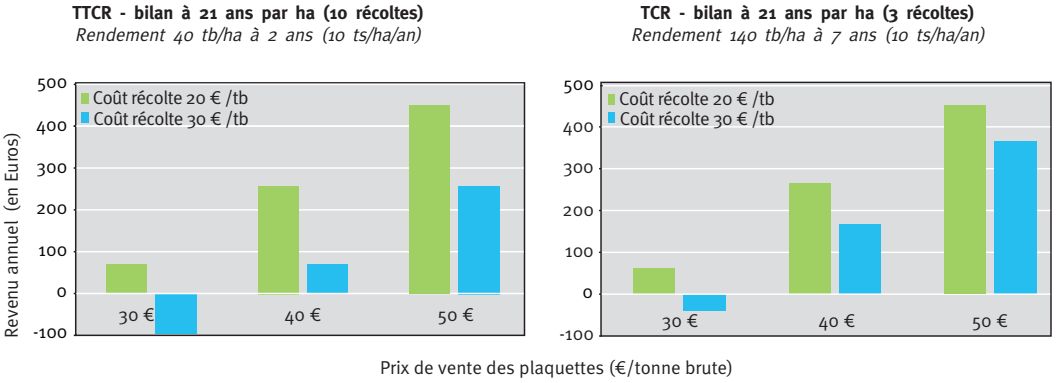
En France, comme dans la plupart des pays d'Europe, les marchés de la biomasse issue de cultures dédiées sont seulement en cours de développement. Par conséquent, les bilans économiques de cultures dédiées sont encore rares et peu documentés. Les données ci-après sont donc présentées à titre indicatif. Du fait de la plus forte densité initiale en matériel végétal, le coût d'installation des TTCR est sensiblement supérieur à celui des TCR. Réciproquement, les TTCR permettent un premier retour sur investissement plus précoce que les TCR. Enfin, toutes les études montrent que le coût de récolte par unité de surface, s'il est peu dépendant du mode de culture (TCR ou TTCR), diminue lorsque la surface de la parcelle exploitée augmente. Les estimations réalisées par FCBA sur le Peuplier et par AILE sur le Saule convergent vers un revenu moyen d'environ 200 € par ha et par an, hors subventions ou revenus complémentaires résultant d'une fonction écologique épuratoire par exemple (figure 4, p. 223).

Impacts environnementaux

Les cultures lignocellulosiques à courte et très courte rotation ont généralement mauvaise réputation en termes d'impact sur l'environnement. En fait, ces impacts dépendent fortement du contexte dans lequel ces cultures s'insèrent (Rowe *et al.*, 2009) : des effets positifs sur les propriétés des sols, la biodiversité, l'équilibre énergétique, l'atténuation des gaz à effet de serre (GES), l'empreinte carbone et l'impact visuel sur le paysage sont probables lorsque le TCR ou TTCR est comparé à des cultures annuelles. Comparés au remplacement de la mise en jachère et des prairies permanentes non améliorées et plus encore de forêt, les avantages sont moins évidents et des effets négatifs peuvent apparaître (Gosselin *et al.*, 2009). Concernant l'hydrologie, il faudrait veiller à adopter des lignes directrices strictes sur la gestion des bassins versants pour garantir que des conséquences négatives ne se produisent sur les ressources hydrologiques. La menace du changement climatique suggère enfin que des mesures seront nécessaires pour assurer que de nouveaux génotypes seront bientôt disponibles, présentant une plus grande efficacité d'utilisation de l'eau et permettant donc de préserver cette ressource. Les conséquences environnementales (notamment les effets sur la biodiversité et sur l'hydrologie) liées à un déploiement à grande échelle de Miscanthus sont nettement plus imprévisibles que celles liées aux taillis à courte rotation de Saule ou de Peuplier, qui s'apparentent vraisemblablement à celles d'un boisement plus classique. Ces aspects environnementaux méritent cependant d'être approfondis.

(5) Efficacité énergétique : rapport entre l'énergie nette produite et la somme de l'énergie nécessaire à la culture et à la transformation de la matière première.

Figure 4 **BILAN FINANCIER COMPARÉ TTCR / TCR EN FONCTION DU COÛT DE LA RÉCOLTE ET DU PRIX DE VENTE DES PLAQUETTES**
(Source FCBA ; Nguyen The, communication personnelle)



QUELQUES PROJETS DE RECHERCHE EN COURS EN FRANCE SUR LES CULTURES DÉDIÉES À LA PRODUCTION DE BOIS ÉNERGIE

Par suite de la tension récente sur les marchés des énergies non renouvelables, les appels à projets issus de diverses sources (Europe, État-ANR, Régions) se sont multipliés. L'objectif est ici de présenter les grandes lignes des recherches conduites actuellement en France en s'appuyant sur quelques exemples tirés de projets en cours dans lesquels l'INRA ou FCBA sont impliqués, qu'ils soient coordinateurs ou non. Un catalogue exhaustif des projets de recherche et développement actuellement en cours sur les cultures dédiées à la production de bois énergie n'est pas disponible.

Expertises collectives, analyses multicritères

Les cultures ligneuses à courte et très courte rotation à fins énergétiques se situent à la frontière entre les domaines agricoles et forestiers. La récolte est par exemple de type agricole (ensilage généralement) pour les TTCR, alors qu'elle est plutôt forestière pour les TCR (tronçonnage). Il était donc naturel que les agronomes et les forestiers se retrouvent au sein de groupes de travail communs pour intégrer leurs savoirs et leurs questionnements au sein d'expertises collectives.

Le projet ANR REGIX [6] (2006-2009), piloté par le groupement d'intérêt économique Arvalis-Onidol, a été un des premiers projets communs aux biomasses agricole et forestière. Après un bilan des connaissances, qui sera mis à disposition *via* un site internet et la création de plate-formes expérimentales, le projet s'est poursuivi en identifiant des méthodes de mobilisation et en qualifiant la composition chimique de la biomasse récoltée (voir Da Silva Perez *et al.*, ce numéro).

Dans ce cadre, deux initiatives complémentaires peuvent être citées :

— L'atelier de recherche prospective sur les végétaux et les systèmes de production durable pour la production de biomasse dans l'avenir (ARP VegA). Lancé en février 2008 par l'INRA, l'IFP et le CIRAD à la demande de l'ANR, cet atelier, d'une durée de 2 ans, a eu pour ambition de dresser l'état de l'art et d'identifier les pistes de recherche sur les espèces végétales et les voies métaboliques d'intérêt, pour produire durablement des biocarburants et des molécules pour la chimie du végétal. L'ARP VegA a couvert un thème particulièrement vaste, qui a nécessité de

(6) REGIX : référentiel unifié, méthodes et expérimentations en vue d'une meilleure évaluation du gisement potentiel en ressources ligno-cellulosiques agricoles et forestières pour la bioénergie en France.

combiner différentes approches méthodologiques pour explorer la grande diversité des pistes possibles concernant les végétaux du futur. Trois approches ont été privilégiées : adaptation des caractéristiques des végétaux en fonction des débouchés (synthons, produits ou matériaux) ; exploration de la diversité des solutions végétales possibles pour produire la biomasse à des fins d'énergie, de chimie ou de matériaux ; évaluation des impacts des systèmes de production végétale, dédiés à des valorisations énergétiques ou chimiques, sur l'environnement, les territoires et les marchés.

— Le réseau mixte technologique (RMT) « Biomasse, Énergie, Environnement et Territoires ». Lancé en novembre 2008 et coordonné par la Chambre régionale d'agriculture de Picardie, ce RMT se propose de répondre aux enjeux et questions soulevés par le développement de nouvelles filières de valorisation énergétique des productions agricoles et forestières en mettant l'accent sur quatre axes : connaissance de la demande et des débouchés ; étude des gisements et sélection des sources de biomasse "candidates" pour les différentes filières ; modalités d'intégration de la production de biomasse dans les systèmes de culture, dans les exploitations et dans les filières agricoles ; évaluations sociale, environnementale et territoriale des choix de production retenus dans les différents projets de filières.

Enfin, des projets plus méthodologiques cherchent à qualifier les filières bioénergies selon des analyses multicritères : économie, environnement, acceptabilité sociale, etc. (ANABIO [7] 2006-2007, BIOMAP [8] 2008-2010) ou à quantifier et spatialiser la ressource au niveau régional (ECOBIOM [9] 2006-2008, VALERBIO [10] 2007-2009).

Amélioration génétique

Une culture dédiée à la production de bois énergie en taillis ou futaie à courte rotation suppose l'utilisation d'un matériel végétal performant en termes de productivité et de qualité de la biomasse produite, notamment lorsque cette biomasse est destinée à une bioconversion. Dans le cas du Saule, des programmes d'amélioration ont été explicitement conduits (hors de France) pour des cultures énergétiques. Par contre, pour toutes les autres espèces, l'intégration dans les programmes de sélection de critères spécifiques à ce type de cultures et le développement des recherches d'amont sur le déterminisme génétique des caractères-cibles sont nécessaires. Le projet européen Energy Poplar (www.energypoplar.eu) a été lancé pour répondre à cet objectif dans le cas du Peuplier. Coordonné par l'INRA et regroupant l'expertise de dix instituts européens, Energy Poplar (2008-2011) a pour objectifs de comprendre les mécanismes qui régulent la synthèse des polysaccharides de la paroi cellulaire du bois chez le Peuplier en vue d'augmenter la teneur en cellulose et améliorer le *process* de saccharification pour sa transformation en bioéthanol.

Conduite de plantation et remédiation

Quelques projets, financés par la fondation Tuck et coordonnés par FCBA, cherchent à cerner les conditions technico-économiques qui permettraient d'insérer ces cultures ligneuses dans les exploitations agricoles (Projets CULIEXA [11] 2007-2009 et BIOMAGRI [12] 2008-2010). Certaines tâches concernent les impacts sur l'environnement. Ces projets, conduits en partenariat avec le monde agricole, incluent parfois des cultures énergétiques non ligneuses (comme le Miscanthus).

(7) ANABIO : analyse environnementale et socio-technico-économique des filières de production d'énergie.
(8) BIOMAP : analyse environnementale, socio-technico-économique et évaluation des risques des filières bioénergies.
(9) ECOBIOM : une approche socio-économique et environnementale de l'offre de biomasse ligno-cellulosique.
(10) VALERBIO : valorisation énergétique de la biomasse.
(11) CULIEXA : analyse des déterminants au développement des cultures ligneuses dans les exploitations agricoles.
(12) BIOMAGRI : évaluation des conditions nécessaires à l'insertion des cultures dédiées à vocation énergétique au sein d'une exploitation agricole.

La connaissance de la consommation d'eau et d'éléments minéraux d'une plante à vocation bioénergétique est cruciale pour la prise de décision locale et l'optimisation technique (Jørgensen et Schelde, 2001 ; Marron *et al.,* 2005 ; Monclus *et al.,* 2005, 2006). À grande échelle, la fertilisation et l'irrigation sont des solutions qu'il convient d'ajuster aux plans économique et écologique. Le développement de ce type de cultures énergétiques ligneuses passe donc obligatoirement par des itinéraires techniques possédant un bon bilan environnemental afin de minimiser les intrants nécessaires au maintien du niveau de productivité.

L'objectif du projet ARN Bioénergie SYLVABIOM (2009-2012), coordonné par l'INRA, est précisément d'étudier l'interaction triple entre plante (Peuplier, Saule, Robinier), environnement (contexte pédoclimatique, épandage de boues de stations d'épuration d'eaux usées) et méthodes de culture (TCR, TTCR, FCR) sur la productivité et l'efficience d'utilisation de l'eau et des éléments minéraux. Dans le même esprit, le projet OPTIMAL (13) (2009-2011), coordonné par FCBA et financé par la fondation Tuck, étudiera, selon un protocole légèrement différent, des systèmes basés sur l'Eucalyptus et le Pin maritime.

Un autre projet, TSAR (14), coordonné par l'INRA, se propose de mettre au point en Région Centre des itinéraires sylvicoles (Peuplier, Saule) et agricoles (Miscanthus) qui permettront d'augmenter la production de biomasse à destination des matériaux ou de l'énergie en valorisant les effluents sur des terres peu fertiles. Cela permettrait à ces territoires ruraux de se développer grâce à une économie respectueuse de l'environnement.

Logistique et transformation des produits

Un des obstacles majeurs du développement de cultures dédiées à la production de biomasse est sa compétitivité économique, en regard notamment de celle des énergies fossiles. Au-delà de la productivité pure par unité de surface, cette compétitivité repose aussi sur la mise au point de systèmes appropriés de conduite de plantation, de récolte, de logistique, de conditionnement et de transformation de la biomasse. Par l'intermédiaire d'une coopération forte entre producteurs et consommateurs et d'une analyse fine des coûts de chaque maillon de la filière de production et de transport de la biomasse jusqu'à l'arrivée sur site de transformation, le projet issu de l'ERA-NET Bioenergy CREFF (15) (www.creff.eu), étudie les différents scénarios susceptibles d'affecter le bilan financier de l'exploitation d'un TCR. Ce projet franco-allemand coordonné par l'INRA est financé pour la France par l'ADEME.

Dans le domaine de la transformation, l'ambitieux projet FUTUROL se propose de développer puis de valider un procédé « éco-efficient » permettant de produire du bioéthanol à partir de la biomasse lignocellulosique. Dans ce cadre, les partenaires (16) se sont fixé les objectifs suivants :

— produire de l'éthanol à un prix compétitif grâce à une matière première diversifiée (résidus et coproduits agricoles, biomasse forestière, cultures dédiées, etc.) ;

— développer des technologies d'extraction de la cellulose, sélectionner des enzymes et des levures et mettre au point des procédés d'hydrolyse et de fermentation les mieux adaptés à chaque configuration de matières premières ;

— obtenir les meilleurs bilans énergétiques et de gaz à effet de serre (GES) possibles sur l'ensemble de la filière de production.

(13) OPTIMAL : optimisation de la culture des ligneux à courte rotation vis-à-vis de la ressource en eau et de la fertilité des sols.
(14) TSAR : techniques sylvicoles et agricoles remédiantes.
(15) CREFF *(Cost reduction and efficiency improvement of short rotation coppice)* : réduction des coûts et amélioration de la filière taillis à courte rotation.
(16) Le projet FUTUROL, animé par une société dénommée PROCETHOL 2G, est porté par une association de 11 acteurs scientifiques, industriels et financiers dont certains sont déjà impliqués dans la production de biocarburants depuis de nombreuses années.

La biomasse lignocellulosique est diverse. Ainsi, ce qui rend le projet FUTUROL unique, c'est la volonté des partenaires d'étudier une variété de ressources issues aussi bien du monde agricole (résidus et coproduits de culture ou cultures dédiées, etc.), de l'exploitation des milieux urbains (résidus verts par exemple) que de l'industrie du bois, voire de l'agroforesterie (produits de dépressage et de premières éclaircies, rémanents, TCR, etc.).

Dans le même ordre d'idée, le projet AMAZON [17] (2009-2012), piloté par FCBA et le CEA, cherchera à mettre en adéquation la qualité de la ressource et les *process* de gazéification.

CONCLUSIONS

Jusqu'à aujourd'hui, le développement des TCR pour la production d'énergie a été lent dans la plupart des pays membres de l'Union européenne et de l'Agence internationale de l'énergie (IEA). Un rapport de l'IEA a listé les barrières techniques et non techniques à la mise en œuvre à grande échelle de ce type de système à courte rotation (Alker *et al.,* 2005). Ces barrières sont pour partie simplement la jeunesse de l'industrie, la nouveauté des approches concernant la culture des plantes et la production d'énergie à partir de la biomasse. En plus des inévitables réticences socioculturelles liées au développement de plantations ligneuses à grande échelle, la principale barrière au développement des TCR est économique. En tant que source d'énergie, le bois issu des TCR est en effet en compétition avec les carburants fossiles, les résidus agricoles et forestiers et d'autres sources d'énergie. Il reste globalement encore peu attractif sur un plan économique (le cours des matières concernées reste bas et les mesures de soutien public n'existent pas). En tout état de cause, il sera indispensable de réduire les coûts de production pour promouvoir l'utilisation de biomasse provenant de TCR. L'utilisation accrue de ces cultures dédiées comme espace de traitement final d'eaux résiduaires permettra certainement de contribuer à rendre ces cultures économiquement viables. Enfin, au-delà de l'analyse des potentialités pédoclimatiques et des améliorations techniques (sélection du matériel végétal, techniques de production et de récolte, etc.), le développement des TCR nécessitera d'analyser les conditions d'une insertion réussie dans le tissu local, fondée sur l'adhésion des acteurs du territoire (producteurs, industriels et usagers, élus, citoyens). Certains travaux ont déjà débuté sur ce thème et doivent être confortés. Le TCR doit contribuer à satisfaire des attentes bien comprises : enjeux économiques et environnementaux, utilité sociale et contribution à un équilibre global.

Jean-Charles BASTIEN
UR Amélioration, Génétique et Physiologie forestières
INRA Centre d'Orléans
2163 avenue de la Pomme de Pin - CS 40001
ARDON
F-45075 ORLÉANS Cedex 2
(jean-charles.bastien@orleans.inra.fr)

Nicolas MARRON
UMR Écologie et Écophysiologie forestières
INRA Centre de Nancy
F-54280 CHAMPENOUX
(nicolas.marron@nancy.inra.fr)

Alain BERTHELOT
FCBA Station Nord-Est
route de Bonnencontre
F-21170 CHARREY-SUR-SAÔNE
(alain.berthelot@fcba.fr)

Aurélie LEPLUS
ASSOCIATION D'INITIATIVES LOCALES
POUR L'ÉNERGIE ET L'ENVIRONNEMENT
73 rue de Saint-Brieuc - CS 56520
F-35065 RENNES Cedex
(aurelie.leplus@aile.asso.fr)

(17) AMAZON : adéquation multiressources à la gazéification.

BIBLIOGRAPHIE

AILE. — Le Taillis de Saule à très courte rotation – Guide des bonnes pratiques agricoles. Programme Life Environnement Wilwater. — 2008a. — 13 p.

AILE. — De la production d'énergie renouvelable à la valorisation d'effluents prétraités – 100 ha de taillis à très courte rotation de Saule dans le Grand Ouest. Programme Life Environnement Wilwater. — 2008b. — 20 p.

ALKER (G.), BURTON (C.), RICHARDS (K.). — Assessment of Technical and Non-Technical Barriers. IEA Bioenergy Task 30: Short rotation crops for bioenergy systems. *In* : Short Rotation Forestry, Short Rotation Coppice and perenial grasses in the European Union: Agro-environmental aspects, present use and perspectives. — JRC Technical report, 2005, pp. 19-21.

BERTHELOT (A.), GAVALAND (A.). — Produire de la biomasse avec des taillis de peupliers. — *Informations Forêt*, fiche n° 760, 2007, 6 p.

CEULEMANS (R.). — Some elements regarding phytoremediation and short rotation coppice. Annex IV, 6 p. *In :* Short Rotation Forestry, Short Rotation Coppice and energy grasses in the European Union: Agro-environmental aspects, present use and perspectives. EEA Specific Contract No 2 3604/B2006/EEA.52793 - Deliverable Task 2b: Background report on current SRF/SRC cropping patterns in Europe. — 2007.

EEA. — How much bioenergy can Europe produce without harming the environment? — EEA Report n° 7/2006, 72 p. (http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2006_7).

GOSSELIN (M.). — Chapitre 9 : Impact de la production intensive de biomasse en taillis à très courte rotation sur la biodiversité. *In* : Biomasse et biodiversité forestières. Augmentation de l'utilisation de la biomasse forestière : implications pour la biodiversité et les ressources naturelles / G. Landmann, F. Gosselin, I. Bonhême (eds). — Paris : MEEDDM ; Ecofor, 2009. — pp. 99-105.

JØRGENSEN (U.), SCHELDE (K.). — Energy crop water and nutrient use efficiency. The International Energy Agency (IEA) Bioenergy Task 17, Short Rotation Crops. — 38 p. (http://www.p2pays.org/ref/17/16275.pdf).

MAP-DGPAAT. — Note d'information sur les cultures pluriannuelles et les cultures permanentes en jachère industrielle et cultures énergétiques. — *Note d'information REF PAC*, 2007/11, 6 p.

MARRON (N.), VILLAR (M.), DREYER (E.), DELAY (D.), BOUDOURESQUE (E.), PETIT (J.-M.), DELMOTTE (F.-M.), GUEHL (J.-M.), BRIGNOLAS (F.). — Diversity of leaf traits related to productivity in 31 *Populus deltoides* x *P. nigra* clones. — *Tree Physiology*, 25, 2005, pp. 425-435.

MAUPU (P.). — Analyse environnementale des systèmes de culture ligneuse menés en taillis à (très) courte rotation. — FCBA ; UMR INRA – AgroParisTech, 2009. — 82 p. (Mémoire de fin d'étude).

MONCLUS (R.), DREYER (E.), DELMOTTE (F.-M.), VILLAR (M.), DELAY (D.), BOUDOURESQUE (E.), PETIT (J.-M.), MARRON (N.), BRECHET (C.), BRIGNOLAS (F.). — Productivity, leaf traits and carbon isotope discrimination in 29 *Populus deltoides* x *P. nigra* clones. — *New Phytologist*, 167, 2005, pp. 53-62.

MONCLUS (R.), DREYER (E.), VILLAR (M.), DELMOTTE (F.-M.), DELAY (D.), PETIT (J.-M.), BARBAROUX (C.), LE THIEC (D.), BRÉCHET (C.), BRIGNOLAS (F.). — Impact of drought on productivity and water use efficiency in 29 genotypes of *Populus deltoides* x *P. nigra*. — *New Phytologist*, 169, 2006, pp. 765-777.

NGUYEN THE (N.), CHASTE (B.). — Eucalyptus et environnement. — *Informations Forêt*, fiche n° 725, 2006, 6 p.

OBERNBERGER (I.), BIEDERMANN (F.), WIDMANN (W.), RIEDL (R.). — Concentration of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions. — *Biomass and Bioenergy*, 12, 1997, pp. 211-224.

PETERSEN (J.E.). — Short Rotation Forestry, Short Rotation Coppice and energy grasses in the European Union: Agro-environmental aspects, present use and perspectives. EEA Specific Contract No 2 3604 /B2006/EEA.52793 - Deliverable Task 2b: Background report on current SRF/SRC cropping patterns in Europe. *In* : Short Rotation Forestry, short rotation coppice and perenial grasses in the European Union: Agro-environmental aspects, present use and perspectives. — JRC Technical report, 2007, pp. 33-38.

ROWE (R.L.), STREET (N.R.), TAYLOR (G.). — Identifying potential environmental impacts of large-scale deployment of dedicated bioenergy crops in the UK. — *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13, 2009, pp. 271-290.

ROY (C.). — Formation Biomasse 2007 à l'attention des agents des DRAF et DDAF. Module 1 : Enjeux et contexte du développement des valorisations non alimentaires de la biomasse, item 4 : Prévisions et prospective. — Paris : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 2007.

Les systèmes dédiés à la production de bois énergie en France. Travaux de recherche et projets en cours (Résumé)

Parmi les sources d'énergies renouvelables, la biomasse bénéficie d'un statut particulier car elle est à la fois source de vecteurs énergétiques et source de molécules carbonées. D'après les directives européennes, la contribution de la biomasse à la production d'énergie triplera d'ici dix ans. Face à ce challenge, il est admis que le principal potentiel de croissance proviendra principalement de l'agriculture via des systèmes de production dédiés. Les recherches conduites en France sur l'utilisation de ligneux pérennes pour des cultures dédiées à la production de biomasse ont été engagées par l'INRA, FCBA et l'association AILE il y a plusieurs décennies, suite aux premiers chocs pétroliers. Des essais ont ainsi été conduits sur une sylviculture intensive d'arbres rejetant de souche : les taillis à courte et à très courte rotation (respectivement TCR et TTCR). Ces essais ont montré qu'avec des variétés productives d'espèces comme le Peuplier, le Saule ou l'Eucalyptus cultivées avec des rotations de 2 à 7 ans selon la densité initiale de plantation, il est possible d'atteindre des productions de biomasse comprises entre 8 et 15 tonnes de matière sèche par hectare et par an. S'appuyant sur des résultats obtenus par les trois organismes cités ci-dessus sur la base de plusieurs dizaines d'hectares d'expérimentations, l'influence de quelques facteurs culturaux sur la productivité des TCR et TTCR et l'impact de ces derniers sur la fertilité des stations sont démontrés. Quelques éléments sur les bilans énergétique et financier de ces cultures sont également présentés. Un éclairage est enfin apporté sur le rôle des TCR et TTCR dans le domaine du génie écologique (remédiation, phytoextraction). En guise de conclusion, une liste non exhaustive de projets de recherche en cours portant sur les systèmes dédiés à la production de biomasse ligneuse est dressée. Sur ce thème, trois axes principaux se dégagent actuellement : améliorer la productivité et la qualité des produits qui en sont issus, mieux connaître les impacts sur le milieu physique et la biodiversité, et cerner les critères de leur acceptabilité.

Dedicated forest biomass for energy systems in France. Ongoing research and projects (Abstract)

Biomass enjoys special status amongst the sources of renewable energy because it is a source both of energy vectors and of carbonaceous molecules. According to European directives, the contribution of the biomass to the production of energy will triple in the next ten years. Faced with this challenge, it is commonly accepted that the main potential for growth comes from agriculture via dedicated production systems. Research in France on the use of perennial woody plants as crops dedicated to biomass production was conducted by INRA, FCBA and the AILE association several decades ago, in the wake of the first oil shocks. Trials were carried out in intensive forestry using stump sprouting trees: short and very short rotation coppices (SRC and VSRC, respectively). These trials showed that with productive varieties of species such as poplar, willow or eucalyptus grown by rotations of 2 to 7 years depending on the initial planting density, biomass output can reach between 8 and 15 metric tons of dry material per hectare per annum. Based on the results obtained by these three organisations on the basis of several dozen hectares of experimentally grown crops, the influence of a few cropping factors on the productivity of SRCs and VSCRs and the impact of the latter on site fertility were demonstrated. Some data concerning the energy and financial balances for these crops is also presented. Finally, some insight is provided about the role of SRCs and VSCRs in the area of environmental engineering (remediation, phytoextraction). By way of conclusion, a non-exhaustive list of ongoing research projects relating to dedicated systems for producing woody biomass is drawn up. Three main areas are currently apparent: improving the productivity and quality of the products derived from the biomass, acquiring better knowledge of the impact on the physical environment and biodiversity, and defining the criteria that determine their acceptability.