

**CARBONE RENOUVELABLE
ET BIOINDUSTRIE**

RÉFLEXIONS ET PISTES DE RECHERCHE

Juillet 2006

Jean-Paul Jamet¹, Daniel Thomas², Ghislain Gosse³
Avec la collaboration de Jordan Cormeau⁴

¹ Membre nommé du Conseil Scientifique de l'INRA - Directeur Général du CNIEL

² Président de l'ADRTP - Vice Président du Conseil Scientifique de l'UTC

³ Président du Centre de Recherche de Lille - Chargé de la mission VANA

⁴ Ingénieur d'Etudes CDD



RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

**DIRECTION SCIENTIFIQUE
ENVIRONNEMENT – ÉCOSYSTÈMES
CULTIVES ET NATURELS (ECONAT)**

Monsieur Ghislain GOSSE

**INRA Présidence de Centre
Chaussée Brunehaut Estrées-Mons
B.P. 50136
80203 Péronne cedex**

N/Réf. : PS/NL - 2005/12-15

V/Réf. :

Objet : Lettre de mission VANA

Paris, le 15 décembre 2005

Cher Collègue,

La limitation des ressources énergétiques fossiles, la croissance et la consommation de carburants, les impacts de mieux en mieux compris de l'effet de serre, l'envolée du baril de pétrole amènent la France, et plus largement l'Europe, à reconsidérer sa politique de la valorisation non alimentaire des productions végétales à l'instar de ce que font de grands pays tels que les Etats-Unis, le Canada ou le Brésil.

Grâce à une approche exhaustive, l'INRA doit reprendre sa propre politique en la matière avec le double objectif de définir des programmes pertinents et d'organiser des sites ayant la masse critique de compétences pour rester compétitif.

Dans le cadre de la mission qui vous est confiée, vous analyserez la situation actuelle et ferez des propositions pour permettre aux contributions de l'INRA :

- de définir des conditions de productions végétales, y compris forestières, dont les bilans écologique, agronomique et économique seront optimaux ;
- d'enrichir les méthodes de transformation, soit pour améliorer les rendements actuels, soit pour valoriser l'énergie contenue dans des produits encore aujourd'hui délaissés, soit pour diversifier les usages en chimie verte ;
- de caractériser les contextes macro de ces filières qui pourraient bouleverser les équilibres actuels au sein de la production agricole mondiale ;
- d'élucider les conditions de l'acceptabilité de ces évolutions à l'échelle de l'exploitation agricole ou forestière, ou bien par les associations de protection de l'environnement ou plus largement pour le citoyen.



**Institut National de la Recherche Agronomique
Direction Scientifique Environnement – Écosystèmes Cultivés et Naturels (ECONAT)**

"Établissement Public à caractère Scientifique et Technologique placé sous la tutelle conjointe des ministres chargés de la recherche et de l'agriculture"

147, Rue de l'Université - 75338 PARIS Cedex 07 (France)

% (33) (0)1.42.75.92.43 - Fax (33) (0)1.42.75.94.49

Coordonnées à Avignon : ☎ (33) (0) 4.32.72.22.30 – Fax : (33) (0) 4.32.72.22.32 – E-mail : leitgold@avignon.inra.fr

D'une façon plus concrète,

- vous proposerez un positionnement global de la stratégie INRA dans un contexte européen et national ;
- vous proposerez une quinzaine de profils de recrutement de chercheurs ou ingénieurs en suggérant la meilleure équipe d'accueil ;
- vous proposerez un mode de fonctionnement qui permette d'une part d'assurer un effet mobilisateur des équipes d'accueil des profils identifiés ci-dessus, et d'autre part le suivi et la cohérence globale du programme proposé.

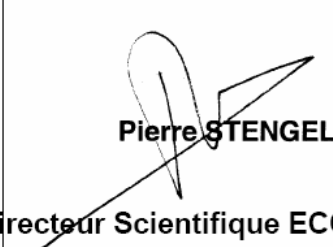
Il va de soi que vous accorderez toute l'attention à la logique des pôles de compétitivité sans pour autant considérer qu'elle est la seule déterminante de la politique de l'INRA.

Le suivi de la mission sera effectué par la Direction Scientifique ECONAT qui veillera notamment à assurer la nécessaire implication des autres directions scientifiques et départements concernés.

Pour la réalisation de cette mission, vous travaillerez en collaboration avec Daniel THOMAS (Université de Technologie de Compiègne) et Jean-Paul JAMET (Onilait et membre du Conseil Scientifique de l'INRA).

Le produit de vos réflexions sous forme d'un rapport comportant les propositions de recrutement est attendu pour la fin du mois de Juin 2006. Il fera l'objet d'une présentation au Collège de Direction et sera soumis à débat au Conseil Scientifique de notre établissement.

Sachant pouvoir compter sur votre compétence en ce domaine, je vous remercie de l'investissement que vous consentez au bénéfice d'un enjeu d'une importance majeure pour l'INRA.



Pierre STENGEL
Directeur Scientifique ECONAT

SOMMAIRE

I – CARBIO, CONTEXTE ET ENJEUX.....	p. 4
ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX.....	p. 6
ENJEUX POLITIQUES ET STRATÉGIQUES.....	p. 7
ENJEUX SOCIO-ÉCONOMIQUES LOCAUX.....	p. 7
II – CARBIO, QUELS ENJEUX POUR L’INRA ?.....	p. 8
III – CARBIO, UNE GRILLE DE LECTURE.....	p. 10
UNE APPROCHE FILIÈRE.....	p. 10
UNE APPROCHE SYSTÉMIQUE.....	p. 12
IV – PARTICIPER AU DÉVELOPPEMENT DU CARBONE RENOUVELABLE : LES PRIORITÉS POUR L’INRA.....	p. 14
POSITIONNEMENT GÉNÉRAL.....	p. 14
CHOIX DES FILIÈRES PRIORITAIRES.....	p. 14
V – CONSTRUIRE UN DISPOSITIF COHÉRENT ET PERFORMANT, LES PROFILS DE POSTE.....	p. 16
I - ADAPTER LES RESSOURCES.....	p. 16
II - OPTIMISER LES PROCÉDÉS.....	p. 20
III - EVALUER LES FILIÈRES.....	p. 24
IV - ANALYSER LE CONTEXTE MACROSCOPIQUE.....	p. 27
VI – STRUCTURATION GÉOGRAPHIQUE DU DISPOSITIF ET MANAGEMENT DU PROGRAMME.....	p. 29
STRUCTURATION GÉOGRAPHIQUE DU DISPOSITIF.....	p. 29
MANAGEMENT D’UN PROJET CARBIO.....	p. 30
VII – RÉFÉRENCES.....	p. 33

CARBONE RENOUVELABLE ET BIOINDUSTRIE

NOTE LIMINAIRE

Le secteur agro-industriel du carbone renouvelable est traditionnellement défini par l'acronyme VANA, pour valorisation non alimentaire. Ce terme est unanimement considéré comme inadapté, car la notion de valorisation liée aux excédents agricoles a évolué vers celle d'utilisation de la biomasse. En outre, le terme non-xx revêt une connotation trop négative en matière de communication. Il a donc été proposé de définir ce secteur d'activités par les termes « carbone renouvelable et bio industrie », qui donnent l'acronyme CARBIO.

I – CARBIO, CONTEXTE ET ENJEUX

Depuis leur émergence, les sociétés humaines transforment des matières végétales et animales (biomasse) pour s'alimenter, se vêtir, se loger, s'éclairer, se chauffer, faire sécher, ou encore travailler les métaux... Actuellement, pour près de la moitié de l'humanité, la biomasse représente toujours au moins un tiers de l'énergie primaire totale consommée [1]. Depuis le début du XVIII^{ème} siècle, les molécules obtenues à partir de la biomasse ont été pour une très large part remplacées par celles issues de la carbochimie puis de la pétrochimie.

Cette évolution repose fondamentalement sur l'exploitation minière d'un carbone d'origine fossile (pétrole, gaz naturel, charbon). Aujourd'hui, ce modèle de développement nous impose deux défis majeurs: i) contrôler, limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère [2] et ii) élaborer des produits de substitution aux hydrocarbures fossiles (et leurs dérivés), dont les réserves, qui pour un coût donné, sont et seront de plus en plus rares [3]. Cette raréfaction du pétrole conduit à une augmentation irréversible du coût de l'énergie. De plus, la concentration géographique de plus en plus importante des ressources de carbone fossile (pétrole, gaz) associée à des considérations géopolitiques est une source d'instabilité majeure du marché de l'énergie. Ces deux problématiques, changement climatique et effet de serre, raréfaction et coût de l'énergie, sont d'ailleurs très liées, car la combustion des hydrocarbures fossiles contribue pour partie aux émissions de GES d'origine anthropique [2].

Au niveau de la planète Terre, l'énergie solaire représente un potentiel d'énergie renouvelable abondant, largement suffisant pour satisfaire nos différents besoins (13 TW pour une énergie solaire reçue au sol de 120000 TW [4]). L'utilisation de l'énergie solaire sous toutes ses formes : photovoltaïque, thermique, biomasse..., son insertion dans le bouquet énergétique (et dérivés des produits de la pétrochimie) sont des enjeux majeurs à l'aube du XXI^{ème} siècle. Enjeux que l'on pourrait traduire par : comment transformer un potentiel important en une réalité significative dans le paysage énergétique des pays industrialisés [5, 6] ?

Parmi les différentes formes d'énergie solaire, la biomasse issue des végétaux représente le potentiel le plus important, le plus ubiquiste tant au niveau planétaire que des différents pays et régions [7]. L'utilisation de l'énergie solaire, en particulier celle issue de la biomasse, repose sur une logique de flux énergétique

plutôt que sur une logique de stock. Dans ces conditions, la question la plus prégnante devient alors : quelles sont les surfaces mobilisables pour la production de biomasse ? Depuis le début du XX^{ème} siècle, la mutation de notre système énergétique vers un système basé sur le carbone fossile a conduit l'agriculture, notamment celle des pays industrialisés, à orienter l'essentiel de ses productions vers l'alimentation humaine (produits végétaux et animaux). Ainsi, au niveau de l'EU15, ces dernières années, les surfaces consacrées à des cultures non alimentaires n'équivalent qu'à 10 à 15 % des terres mises en jachère [8].

Au niveau de la planète et en première approximation, les surfaces agricoles, au sens large, sont finies [9]. Ce constat est encore plus évident dans les pays industrialisés. Aussi, la politique d'usage des terres devient un enjeu crucial que l'on pourrait traduire par comment satisfaire les différents besoins de l'humanité : besoins alimentaires, contribution aux besoins énergétiques (et dérivés), services écologiques... dans un avenir incertain lié au changement climatique.

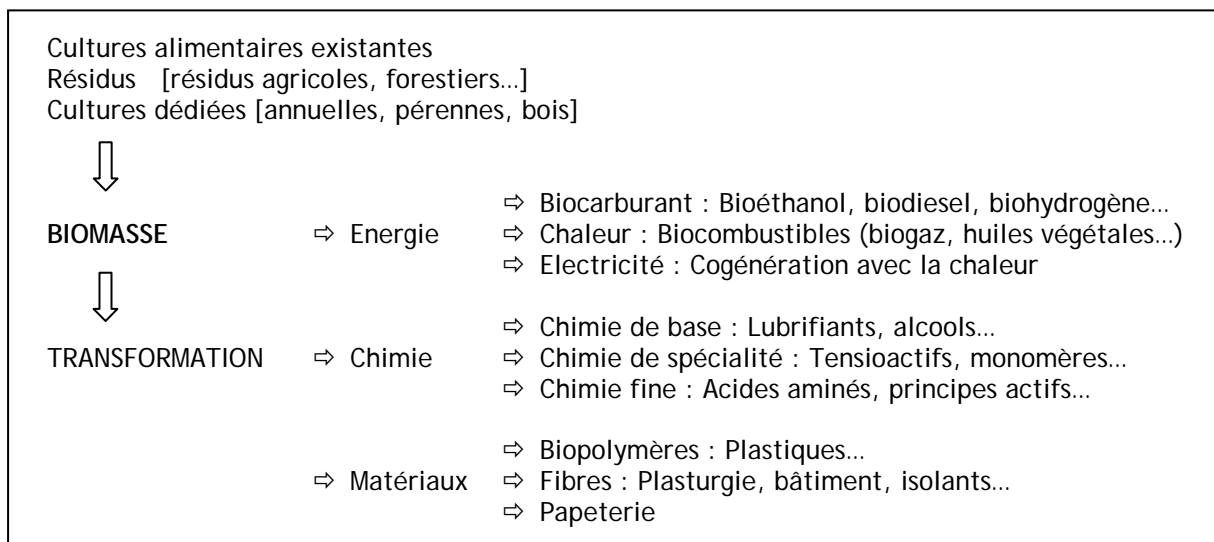


Fig. A : Champs d'applications de la transformation de la biomasse.

La figure A illustre la diversité des sources de biomasse ainsi que leurs utilisations potentielles. A ce jour, la plupart des utilisations sont réalisées à partir des organes de réserve (grain, tubercule) des plantes cultivées. Afin de minimiser la pression sur les surfaces et de réduire les coûts de production, il faut d'une part utiliser l'ensemble des composants de la plante et d'autre part élargir l'assiette des biomasses à mobiliser (résidus agricoles, forestiers, industriels et urbains, cultures classiques et cultures dédiées (agricoles, forestières)). Néanmoins, la déclinaison d'une politique à base de biomasse dans le contexte européen ou national met clairement en évidence que l'offre potentielle possible est largement inférieure à la demande. A titre d'exemple, le potentiel de biomasse mobilisable en 2050 est estimé à 40-50 Mtep/an [13, 14] alors que notre consommation énergétique primaire est aujourd'hui de 280 Mtep/an [16].

Ce constat illustre la nécessité de faire des choix judicieux dans les utilisations potentielles (chaleur, électricité, carburants, chimie, matériaux...). Parmi les critères de choix, nous mentionnerons en priorité : le coût de la tonne de CO₂ évitée et le bilan énergétique de la filière.

Enjeux environnementaux

Au niveau global, un premier enjeu est lié aux émissions des gaz à effet de serre et leurs conséquences sur le changement climatique d'une part et à l'impact sur l'épuisement des ressources (énergie, matières premières, eau) d'autre part. L'intérêt majeur de la biomasse, c'est d'être une forme de stockage de carbone renouvelable produit grâce à la photosynthèse des plantes. Lors de la phase de production, la biomasse contribue à séquestrer du carbone, avec néanmoins des plages de variation importantes liées au type photosynthétique (C3 ou C4), au type d'espèces (annuelles, pérennes, légumineuses...) ainsi qu'aux systèmes de production (niveau des intrants employés). Par ailleurs, c'est l'efficacité sur l'ensemble de la filière - du berceau à la tombe - qui doit être analysée et optimisée. De même, l'impact sur l'épuisement des ressources fossiles doit être un des éléments-clé pour évaluer une filière. En particulier, produire de la biomasse ne peut se faire sans mobiliser des ressources en eau. Aussi, dans un avenir lié au changement climatique où l'évolution et la distribution de la pluviométrie sont les facteurs les moins bien connus, les besoins en eau liés à la production de biomasse doivent être optimisés au mieux.

Au niveau local et régional, la production de biens de consommation génère des émissions ayant des impacts sur les différentes composantes de la biosphère (sol, nappes phréatiques, atmosphère, écosystèmes naturels). La production de carbone renouvelable n'échappe pas à cette logique. Les impacts locaux dépendent de multiples facteurs : localisation géographique, pédoclimat, type d'espèces, systèmes de production.... Par sa nature, la production de biomasse est spatialement distribuée sur un territoire. Aussi, la prise en compte de ces impacts, cruciaux pour l'acceptabilité d'une filière, va nécessiter l'analyse des processus qui régissent ces émissions locales mais aussi le développement d'outils de généralisation et de spatialisation des informations [40].

Les filières du carbone renouvelable ont vocation à produire des produits éco-compatibles, une condition qui intègre impérativement la fin de vie du produit. Une étape importante qui ne se limite pas à la seule évaluation d'une biodégradabilité générant des composés à écotoxicité faible ou nulle. En effet, c'est l'ensemble des scénarios possibles qui doit être envisagé, évalué comme par exemple : biodégradabilité, recyclabilité, insertion dans des filières thermo-chimiques... [12].

Une approche systémique, incluant une analyse multicritères, du berceau à la tombe, s'impose afin d'assurer des voies d'amélioration globales. Ce type d'approche évite ainsi tout transfert de pollution entre acteurs ou entre milieux, tout en permettant l'identification des points à améliorer en priorité aux différentes étapes d'une filière [17, 11]. Cette approche systémique ne doit pas se limiter à la seule approche « filière » mais aussi prendre en compte les opportunités d'intégration, de synergie entre filières sur un site industriel, un bassin d'approvisionnement. Ces différentes approches systémiques ouvrent la voie à la mise en pratique du concept de bioraffinerie [15].

Enjeux politiques et stratégiques

D'un point de vue énergétique, la production de biocarburants, de biocombustibles et de produits de substitution au carbone fossile, associée à d'autres sources d'énergie durable (éolienne, solaire, hydroélectricité, géothermie, marine), doit représenter une part significative dans le bouquet énergétique national et européen. C'est alors un élément de stabilité dans la sécurité des approvisionnements tant au niveau national qu'euro-péen [10, 18].

La production de carbone renouvelable est une des mesures pour satisfaire nos engagements internationaux en matière de maîtrise des émissions de gaz à effet de serre notamment dans le cadre du Protocole de Kyoto (1997) et ses déclinaisons en matière de directives européennes (directives 2001/77/EC, 2003/30/EC, 2003/96/EC, 2004/8/EC) [34, 35] ou de programmes nationaux [36, 37]. L'évaluation de l'efficacité des filières, illustrée par exemple par le coût de la tonne de CO₂ évitée, pourrait devenir un outil d'aide à la décision, une expertise auprès des pouvoirs publics.

Comme la production de biomasse repose largement sur une mobilisation de surfaces agricoles, l'allocation des terres entre les différents usages : alimentaires, carbone renouvelable, services écologiques notamment, devient alors une question centrale. Elle est ou devrait être largement déterminée par plusieurs échéances, à court et moyen terme : l'évolution des résolutions de l'OMC, la PAC 2013, et à moyen, long terme l'impact du changement climatique [19].

Au-delà des échanges commerciaux liés aux marchés mondiaux évoqués ci-dessus, le secteur CARBIO représente donc un vaste champ d'investigation et de recherches où les verrous technologiques restent nombreux [27]. C'est alors une source potentielle de nouveaux know-how, brevets, innovations et de développements industriels. L'impact économique ainsi que celui du rayonnement de la technologie nationale doivent être évalués car ils peuvent être importants notamment pour les voies biologiques bien adaptées à des structures industrielles de plus petite taille que les grandes filières thermochimiques (cf. procédé Fisher-Tropsch). Compte tenu de l'ubiquité de la ressource en biomasse, cette stratégie représente alors un enjeu important dans les relations avec les pays émergents ainsi que dans le cadre d'un dialogue Nord-Sud.

Enjeux socio-économiques locaux

Au niveau local, les enjeux socioéconomiques sont multiples. Ils concernent néanmoins trois grandes questions : i) la création d'emplois et le développement local, ii) l'aménagement du territoire et iii) l'acceptabilité par les acteurs de la filière, citoyens compris.

L'ouverture de nouveaux marchés par le développement du secteur CARBIO peut assurément être créatrice de richesse et d'emplois. A terme, cela peut conduire à la redynamisation de territoires (notamment ruraux) économiquement et/ou agronomiquement défavorisés. Cependant, une telle redynamisation des tissus économiques locaux, basée sur des marchés microéconomiques, ne sera pleinement effective qu'accompagnée d'une synergie avec les marchés macro-économiques de la substitution du carbone fossile. Ceci illustre les problématiques à envisager pour positionner au mieux la stratégie d'un programme CARBIO, en particulier pour la définition des priorités entre les différents marchés de substitution du carbone

fossile (biomasse/nucléaire pour l'électricité par exemple), ou encore pour l'analyse des synergies ou compétitions entre les différents acteurs économiques [20].

Le développement des agroressources constitue une opportunité de diversification des activités agricoles et forestières. Cette orientation doit être envisagée dans un contexte où l'usage des sols est/sera contraint notamment par les besoins alimentaires (humain, animal) et les services écologiques. Les utilisations non alimentaires de la biomasse représentent un élément important pour un aménagement harmonieux du territoire. La complémentarité et les synergies entre les surfaces dévolues au carbone renouvelable et celles affectées aux services écologiques doivent être envisagées sérieusement car des opportunités de multifonctionnalité sont évidentes, quelques exemples : cultures pérennes lignocellulosiques sur des zones de captation d'eau potable, exploitation de la forêt méditerranéenne et les feux de forêts par exemple [21, 18].

Face à la demande sociétale de produits respectueux de la santé humaine et de l'environnement, la diversification des usages de la biomasse constitue une des réponses pertinentes en s'inscrivant à la fois dans une logique de progrès environnemental, économique et social et sous réserve d'être acceptée par le citoyen, l'opinion publique. Y compris dans le secteur des énergies renouvelables, des expériences récentes ont montré que cette acceptabilité n'était pas triviale. Un travail de fond, en terme de communication, d'explications, de transparence, d'appropriation des projets doit être entrepris pour que la stratégie basée sur le carbone renouvelable ne termine pas par une attitude du type NIMBY [28].

EN CONCLUSION, QUELQUES MOTS-CLES

Efficacité économique et environnementale de la tonne de CO₂ évitée, Efficacité énergétique, Fin de vie des produits, Surfaces mobilisables, Aménagement de l'espace rural, Acceptabilité par les citoyens.

II – CARBIO, QUELS ENJEUX POUR L'INRA ?

Dans le cadre des réflexions conduites au sein de cette mission CARBIO, et avant d'analyser les besoins en recherche, nous nous sommes efforcés de décliner, au niveau de l'INRA, les enjeux présentés ci-dessus et surtout d'analyser les conséquences, les opportunités ou problèmes qu'impliquerait un engagement significatif sur cette thématique CARBIO.

Ses missions, L'INRA est un organisme public de recherche agronomique, qui conduit des recherches finalisées conjuguant l'excellence scientifique et l'attention portée à ses partenaires (pouvoirs publics, mondes agricoles et industriels, citoyens...) [in Quelles recherches pour l'agronomie de demain ? Orientations de l'INRA 2006-2009]. Les enjeux abordés au sein de CARBIO : réduction des émissions de GES, sécurité énergétique, surfaces mobilisables pour le carbone renouvelable et la compétition avec les surfaces pour l'alimentation, sont l'illustration même des fondements d'une recherche finalisée. Une recherche finalisée au cœur même du tripode « Alimentation - Agriculture - Environnement », avec un enjeu majeur pour

L'INRA : où se situe le barycentre dans un contexte intégrant une logique de carbone renouvelable ?

Ses compétences et ses spécificités, l'INRA a largement bâti ses compétences autour du secteur de la biologie au sens large, avec deux grandes spécificités : i) l'intégration de connaissances à différentes échelles d'organisation, de temps et d'espace et ii) une déclinaison de ces connaissances tant au niveau du secteur agricole que forestier. De l'avis de toutes les personnalités rencontrées, la disponibilité et la mobilisation de la ressource en biomasse est et sera la question clé pour le développement d'une stratégie à base de carbone renouvelable. Dans ces conditions, les approches analytiques et systémiques développées par l'INRA sont déterminantes pour le développement de ces filières.

Son organisation, les questions posées par le développement d'un programme CARBIO sont pour partie des déclinaisons, des paramétrages nouveaux, une relecture de questions déjà abordées dans le passé. Il apparaît donc logique, efficace de s'appuyer sur la structuration scientifique existante de l'institut, tant au niveau géographique que thématique. A l'opposé d'une politique centrée autour d'un seul pôle, cette option aboutit à une dilution des forces qui peut conduire à une visibilité moindre de l'action de l'institut. Un projet bâti autour d'outils structurants doit contribuer à minimiser ce risque.

Ses outils structurants, outre les compétences scientifiques à mobiliser, l'INRA peut s'appuyer fortement sur des structures, des équipements lourds qui assureraient alors une bonne visibilité de son action. Deux types sont envisageables : i) des domaines expérimentaux (Mons par exemple en liaison avec un réseau secondaire caractéristique de conditions pédoclimatiques différentes (Lusignan, Toulouse...) et ii) des plateformes technologiques comme à Toulouse.

Ses partenaires, c'est un des enjeux importants du programme CARBIO pour l'INRA. En effet, le management du programme devra assurer une cohérence, une pertinence des réponses aux questions posées à différents niveaux : i) au niveau national en liaison avec les grands programmes Biocarburants, Biocombustibles et Bioproduits, ii) au niveau régional ou local avec les pôles de compétitivité en particulier avec le pôle Industrie et Agroressources en Picardie & Champagne-Ardenne, iii) avec les partenaires industriels et iv) au niveau européen avec les plateformes technologiques (Liquid biofuels, Plant for the future...) et les différents outils du 7^{ième} PCRD. Outre la production de connaissances, c'est aussi la veille technologique, l'expertise et la prospective qu'il faut organiser pour assurer une présence de l'Institut tant au niveau national qu'international.

III – CARBIO, UNE GRILLE DE LECTURE

UNE APPROCHE FILIÈRE

Le secteur CARBIO couvre un spectre de filières dont les ressources primaires comme les produits sont d'une grande diversité. C'est pourquoi la production et la transformation de ces ressources primaires requièrent des process mobilisant des compétences dans de nombreuses disciplines.

Les marchés accessibles aux bioproduits sont de taille très variable, du très grand marché à l'échelle mondiale au marché de niche très local et à haute valeur ajoutée.. Ils concernent en premier lieu le secteur de l'énergie, avec les biocarburants et les biocombustibles (chaleur, électricité). Vient ensuite le secteur de la chimie, avec la « néo-chimie » du végétal, qui offre des opportunités pour le développement des biolubrifiants, des biosolvants, des tensioactifs éco-compatibles, ou de nombreuses autres biomolécules. Enfin, de nombreux produits issus de la biomasse ont une place à prendre dans le secteur des matériaux, que ce soit par le développement des biopolymères (plasturgie...) ou par celui des usages traditionnels des matériaux fibreux (bois-matériau, papier, textile,...).

Le développement d'une filière dépend de nombreux paramètres parmi lesquels figurent la demande et la taille du marché pour les bioproduits proposés. La capacité des bioproduits à prendre une part de ces marchés dépend en particulier de leur compétitivité au niveau économique, mais aussi de leur qualité et particulièrement de leur valeur ajoutée en matière d'environnement. La compétitivité des produits à base de carbone renouvelable peut être largement améliorée par des process de production et de transformation plus efficaces, plus performants mais aussi par une meilleure intégration tout au long de la filière notamment par une utilisation optimale de la matière première et une valorisation de tous les co-produits. Cette dernière remarque met clairement en évidence la limite d'une approche strictement « filière » et illustre les besoins d'une approche plus systémique afin de mettre en pratique le concept de « bioraffinerie ».

Deux facteurs stratégiques ont été identifiés pour assurer le développement des filières CARBIO :

- Un engagement des pouvoirs publics conduit dans la durée, au-delà des chocs pétroliers conjoncturels. Afin de favoriser les produits à base de carbone renouvelable, cet engagement peut se traduire par la mise en place i) de dispositions normatives et réglementaires, et ii) d'autre part de dispositions budgétaires et fiscales au moins de façon transitoire.
- Des efforts coordonnés entre la recherche/développement et le développement industriel, doivent être intensifiés, ciblés sur des priorités parfaitement identifiées par les acteurs de la filière et conduits dans la durée.

Dans ce qui suit, les filières sont décrites sous forme de deux « boîtes » : une première dite « ressources primaires » que l'on peut organiser selon d'une part la nature de la biomasse produite et d'autre part selon le niveau d'approche (du génome à l'exploitation) et une seconde nommée « génie des procédés et des produits ». Cette structuration schématique, nécessairement imparfaite, permet néanmoins de positionner aisément les compétences INRA ainsi que de couvrir les différents champs de compétences à mobiliser.

UNE APPROCHE SYSTÉMIQUE

A la différence des autres sources d'énergies renouvelables comme le solaire thermique et photovoltaïque, la mise en œuvre d'une stratégie à base de biomasse introduit nécessairement des interactions fortes avec plusieurs secteurs économiques. Cette complexité s'observe tant au niveau d'une filière entre la production au niveau agricole et la transformation industrielle, au niveau local lors de la mise en œuvre d'une filière dans un bassin d'approvisionnement (aménagement du territoire, multifonctionnalité, citoyens...) qu'à des niveaux plus macroéconomiques. A ces derniers niveaux, les compétitions entre les besoins alimentaires et non alimentaires, leurs conséquences en matière de gestion de l'espace rural, ainsi que l'impact sur les marchés mondiaux en particulier les échanges Nord-Sud représentent des champs d'investigation indispensables. Cette spécificité qui se décline à différentes échelles d'espace ou d'organisation requiert la mise en œuvre d'une approche systémique complémentaire de l'approche « filière » développée précédemment.

Pour cela, nous avons complété la grille de lecture par deux « boîtes » dites Evaluation. Une première (verticale) qui couvre la filière du « berceau à la tombe » et une seconde (horizontale) qui vise à analyser le positionnement des différentes filières dans un contexte socioéconomique plus large.

Les évaluations par filière doivent permettre d'apprécier la faisabilité technique d'une filière, d'évaluer leur performances environnementales tant au niveau local (eutrophisation, biodiversité...) que global (épuisement des ressources fossiles, gaz à effet de serre...) ainsi que leur performance microéconomique au niveau des exploitations pour un bassin d'approvisionnement donné.

L'évaluation dans un contexte global permet une analyse plus stratégique du positionnement des différentes filières et surtout l'analyse de l'impact de décisions de politiques publiques (Directives, PAC...), ou d'organisation des marchés (OMC...) sur l'avenir ou les conditions nécessaires au développement des filières CARBIO. Cette approche doit être conduite à un niveau national ou européen ainsi qu'au niveau des bassins d'approvisionnement. Il est clair en effet qu'en matière de ressources mobilisables, les démarches « top down » ne conduisent pas nécessairement au même résultat que les démarches « bottom up ».

Avertissement : Une représentation graphique ne peut pas illustrer toutes les interactions possibles et/ou nécessaires du secteur représenté. En particulier, c'est le cas pour les éléments suivants :

- La qualité de la ressource en adéquation avec un process donné, couvert partiellement par le volet « caractérisation physique des ressources » se situe à l'interface entre les aspects "ressources" et ceux relevant du "génie des procédés et des produits"
- Les sous-produits et les commodités qui peuvent servir de ressources à d'autres procédés font un lien entre les procédés, les produits et les ressources.
- Les approches systémiques qui visent à intégrer des ensembles de facteurs sont particulièrement sensibles aux limites de notre représentation graphique bien que les outils, les méthodes, les données nécessaires à l'élaboration des paramètres à intégrer soient bien souvent spécifiques (économie, environnement, social...).

Evaluations macroéconomique, territoriale et sociale Etudes d'impact (Environnementale, socio-économique...)

Intégration des différentes approches analytiques

Politiques publiques, marchés et échanges commerciaux

Bassins de production et territoires

Systèmes de cultures et fonctionnement des exploitations agricoles

Filières émergentes et innovation

Gestion de la biodiversité / Génie environnemental

Evaluations sectorielles

Ressources							
Niveaux d'intégration	Ressources oléagineuses	Ressources lignocellulosiques	Ressources saccharifères	Ressources amylacées	Ressources fibreuses	Ressources protéiques	Biocombustible
Biosciences végétales							
Adaptation de la quantité et de qualité de la ressource							
Système de culture							

Intégration sous forme de bioraffinerie
Utilisation de la plante entière
Utilisation des ressources II



Evaluation microéconomique

Caractérisation physique							
Traitements physiques							
Traitements chimiques							
Génie métabolique							
Génie fermentaire							
Ressources secondaires / Commodités							
Bioproduits							

Bilans filières: (Analyse de cycle de vie)
Carbone
Energétique
Environnem^t

Ressources primaires

Génies des procédés et des produits

IV – PARTICIPER AU DÉVELOPPEMENT DU CARBONE RENOUVELABLE : LES PRIORITÉS POUR L'INRA

POSITIONNEMENT GÉNÉRAL

L'investissement de l'INRA sur un questionnement aussi vaste et varié devrait satisfaire au mieux aux conditions suivantes :

- une première catégorie de conditions plus ou moins triviales : être dans le champ des compétences de l'INRA, s'inscrire dans un contexte scientifique soulevant des questions nouvelles, opportunes ou permettant un saut technologique pertinent,
- des conditions liées à l'environnement de l'Inra : le contexte régional et national, ses partenaires scientifiques et socioéconomiques. En effet, un engagement en matière de programme de recherches nécessite un effort dans la durée notamment un engagement politique fort pour une économie intégrant le carbone renouvelable, la « bioéconomie » des anglo-saxons et scandinaves. Par ailleurs, le partenariat est fondamental pour répondre efficacement à la complexité et la diversité des questions soulevées par un programme CARBIO,
- deux conditions identifiées par les membres de la mission i) **se positionner sur les marchés de masse** en s'appuyant sur le postulat que les marchés de masse entraîneront le développement des marchés de niche notamment grâce aux coproduits et au concept de bioraffinerie et ii) **choisir un nombre limité de filières** afin d'assurer une cohérence de l'action de l'Inra du « champ au consommateur ». Cette dernière condition destinée à améliorer la visibilité de l'action de l'INRA conduit à restreindre le nombre de filières retenues pour soutenir efficacement celles qui le sont.

CHOIX DES FILIÈRES PRIORITAIRES

Les priorités ont été définies en s'appuyant sur deux principes i) les marchés de masse entraîneront les marchés de niche et ii) accompagner et améliorer les filières matures (oléagineux, fibre et coproduits issus de la transformation des céréales (blé, maïs...) et betterave) tout en préparant le développement des filières en émergence (lignocellulose).

Trois filières prioritaires et une problématique nouvelle sont proposées :

- **La filière « oléagineux »**. En effet, le volume des agréments actuels pour la production de biodiesel soulève au moins deux grandes questions : quelle valorisation pour les coproduits (glycérol, tourteaux) ? et comment diminuer la pression sur les surfaces à mobiliser pour assurer la sécurité de l'approvisionnement des unités industrielles ?
- **La filière « fibres »**. Cette priorité est justifiée par les deux arguments suivants : i) l'essor de la demande en fibres végétales dans les matériaux, notamment en plasturgie (biodégradabilité, recyclabilité, gain de poids ...) et ii) l'agriculture française peut produire des fibres de grande qualité (lin, chanvre...) mais dont la production reste à optimiser.
- **La filière « lignocellulose »**. C'est la filière qui présente le plus grand potentiel de développement [26], une analyse partagée par de nombreux pays (EU, Suède,

Finlande, Etats-Unis, Canada...) et par différentes structures de réflexion : IEA, IIASA, OCDE notamment. Ce développement s'appuie d'une part sur la valorisation des coproduits des filières actuelles de biocarburants (pulpes de betterave, son de blé, tourteaux de colza) et d'autre part sur le développement des filières biocombustibles (chaleur et électricité) et les biocarburants de deuxième génération. L'INRA n'a pas vocation ni les compétences pour travailler sur les procédés de valorisation thermochimiques (combustion, gazéification, pyrolyse notamment). En revanche, l'institut a un rôle fondamental à jouer en matière de production, mobilisation et adaptation de la ressource notamment par des approches systémiques et multicritères (techniques, économiques, environnementaux et sociaux). Ainsi, l'Institut contribuera significativement à l'optimisation des bassins d'approvisionnement (taille des bassins, choix des cultures les plus adaptées, impacts sur l'usage des terres, sur l'environnement local...) tant pour les procédés thermochimiques que pour les procédés biologiques, notamment les fermentations aérobies et anérobies.

- **Le génie métabolique et CARBIO.** Au niveau international, des investissements importants sont réalisés dans le génie métabolique (Etats-Unis, Suède, Finlande, Canada et Japon notamment). L'INRA, qui travaille peu sur le génie enzymatique et le génie cellulaire jusqu'à présent, se doit de participer à cette tendance du génie métabolique, notamment autour de la cellulose. Le génie métabolique actuel, c'est à la fois la description quantitative des flux métaboliques et de leur régulation (RMN métabolique, biologique systémique) et leur modification au niveau moléculaire pour créer des voies métaboliques nouvelles débouchant sur des produits nouveaux. Ces produits sont en particulier des molécules pour l'énergie, les commodités pour l'industrie et la chimie fine. Le génie métabolique est complètement moléculaire mais dans une logique qui n'est pas réductionniste.

La logique de concentrer l'investissement sur un nombre limité de sujets conduit inéluctablement à ne pas retenir certaines filières ou thématiques. Les filières suivantes n'ont pas été retenues pour les raisons suivantes :

- Les filières liées aux sucres simples et à l'amidon car elles ont déjà été largement développées tant en interne qu'en externe notamment par la recherche industrielle. La position que nous avons adoptée ne remet pas en cause les options prises ou à prendre, notamment par le département CEPIA sur la valorisation de l'amidon. En particulier, une réflexion sur la chimie organique de l'amidon devrait être envisagée.

- Les filières à base de protéines car elles conduisent soit à des marchés de niche trop restreints soit à des marchés de masse générant à une compétition trop forte avec l'alimentation animale.

V – CONSTRUIRE UN DISPOSITIF COHÉRENT ET PERFORMANT, LES PROFILS DE POSTE

I - ADAPTER LES RESSOURCES

LA FILIÈRE « OLEAGINEUX »

Les plantes cultivées ont été jusqu'à présent sélectionnées et améliorées pour leurs usages alimentaires, et il est maintenant important d'intensifier aussi l'adaptation des ressources primaires à leurs autres usages. Ceci concerne en premier lieu des plantes déjà présentes sur le marché alimentaire et dont la demande sur d'autres marchés se développe dans le même temps. Dans la filière « oléagineux », c'est notamment le cas du colza [25], qui a fait l'objet de nombreux travaux visant à améliorer la qualité de son huile. L'augmentation de la production de diester renforce désormais l'intérêt de développer un colza avec un rendement supérieur à ce qu'il est actuellement.

Amélioration du rendement énergétique du colza par l'utilisation des biotechnologies vertes (Profil A1)

Versailles (LBC, UMR GV),

Poste CR en collaboration avec EGC Grignon et GAP Rennes

L'amélioration du rendement énergétique du colza est envisagée par une domestication accrue de la plante. Il s'agit notamment d'obtenir une meilleure mobilisation des ressources (optimisation de la gestion de l'azote,...). Il est également possible d'envisager une amélioration de l'architecture de la plante, en particulier des axes florifères (modulation du *timing* et de l'intensité de la ramification, taille et nombre des siliques et des graines).

LA FILIÈRE « FIBRES »

Les fibres végétales sont de plus en plus demandées dans le secteur du bâtiment et dans le secteur industriel, notamment par l'industrie automobile pour des applications en plasturgie (en remplacement des fibres de verres dans des plastiques par exemple). Dans ces applications, l'adhésion fibres/matrice conditionne en partie la qualité du composite (qui dépend également des qualités intrinsèques des différents composants), mais jusqu'à présent les efforts de recherche ont été axés le plus souvent sur les propriétés de la matrice plutôt que sur celles de la fibre. Les caractéristiques physico-chimiques des fibres végétales sont largement conditionnées par leur genèse et leur premier traitement. Pour les adapter à leurs usages, il s'agit donc de combiner la biologie et l'agronomie [profils A2 et A3] avec la chimie et le génie des matériaux [profils B1 et B2]. En particulier, il importe d'adapter certaines plantes à fibres à leurs usages (extraction) et d'optimiser les étapes de fonctionnalisation des fibres.

Qualité et manipulation des fibres (Profil A2)

Reims (UMR FARE)

Poste IR en collaboration avec LBC Versailles et LCB Grignon

Les fibres sont composées de polymères complexes dont il s'agit d'exploiter au mieux les propriétés. Appréhender les caractéristiques de ces assemblages moléculaires peut permettre par exemple d'améliorer l'extractabilité des fibres par

la manipulation des liens entre la cellulose et les lignines. Il peut s'agir également de diminuer la teneur en lignines de plantes d'intérêt sans affecter qualitativement ou quantitativement la production de fibres ni accroître la sensibilité des plantes aux pathogènes. Les deux plantes les plus concernées ici sont le lin à fibres et le chanvre, dont les fibres sont parmi les plus demandées sur le marché.

Etude de l'interaction génotype x milieu et agronomie du lin à fibres (Profil A3)

Mons (UMR SADV)

Poste CR en collaboration avec l'équipe USTL de Simon Hawkins (+ 1 MC en 2007 par USTL)

L'augmentation de la demande en fibres végétales incite également à optimiser les cultures de plantes à fibres. La détermination des conditions optimales de culture du lin à fibres peut passer d'une part par des études d'interaction génotype x milieu, et d'autre part par un travail d'agronomie. Ces travaux pourraient bénéficier des résultats obtenus sur le lin oléagineux, qui est très proche du lin à fibres.

LA FILIÈRE « LIGNOCELLULOSE »

Les cultures lignocellulosiques dédiées représentent le potentiel le plus important en biomasse [13], [15], [18], [35], [39]. Parmi les différentes cultures envisagées, les plantes pérennes représentent un enjeu prioritaire compte tenu de leur niveau de production élevé et de leur impact positif sur l'environnement local et régional [11]. Afin de pouvoir proposer un panel de solutions pour les différentes conditions pédoclimatiques et socioéconomiques, nous suggérons de focaliser nos efforts sur des productions ligneuses récoltées tous les 2 à 6 ans (peuplier, robinier notamment) et des herbacées pérennes récoltées annuellement, notamment celles ayant un métabolisme photosynthétique en C4 (miscanthus [22, 23], switchgrass notamment). Aujourd'hui, ces différentes espèces n'ont pas fait l'objet (ou très peu) de travaux de sélection variétale, d'analyse des interactions entre le génotype et son milieu, de mise au point d'itinéraires techniques adaptés et d'analyse de leur insertion dans les systèmes de cultures existants.

Ce projet ambitieux doit s'appuyer d'une part sur un partenariat bien construit et d'autre part sur un dispositif expérimental optimisé et conçu pour les outils de modélisation :

- Un partenariat construit à différents niveaux : i) un partenariat fort entre les équipes INRA sollicitées (Versailles, Mons, Reims), ii) un partenariat avec les autres acteurs du développement agricole et forestier (GIE Onidol-Arvalis, AFOCEL, chambres d'agriculture notamment) au sein de programmes nationaux (ANR-PNRB par exemple) ou régionaux (en liaison avec les pôles de compétitivité) et iii) au niveau européen comme par exemple dans le cadre du réseau d'excellence Bioenergy mais aussi par des partenariats bilatéraux avec le WUR (Wageningen), BBSRC (UK) et Risoe (Danemark) qui développent aujourd'hui ces thématiques.

- Un dispositif expérimental optimisé pour une modélisation de la production en qualité et quantité ainsi que des impacts environnementaux. La modélisation est en effet un outil à privilégier pour apporter des éléments de réponse suffisamment rapidement afin de définir des scénarios de développement. Le dispositif expérimental pourrait être constitué d'une plateforme lourde (site de Mons qui

servirait aussi de base expérimentale aux autres équipes notamment parisiennes) appuyée par des sites spécifiques permettant de tester des facteurs comme le stress hydrique ou des interactions pédoclimatiques différentes (Lusignan, Toulouse).

Adaptation de plantes pérennes en C4 aux usages de la filière lignocellulosique (Profil A4)

Versailles (LBC)

Poste CR en collaboration avec le dispositif expérimental « cultures lignocellulosiques » de Mons, le profil A5 sur Mons et l'UMR FARE

Il s'agit d'adapter une plante pérenne C4 à ses utilisations ultérieures, notamment à un processus de conversion biologique (conversion en éthanol), par l'utilisation des biotechnologies vertes. Cette adaptation de la plante vise principalement à améliorer la qualité de la ressource produite en modifiant les liaisons entre la cellulose, les hémicelluloses et la lignine, et en modulant les ratios de ces différents constituants au cours du cycle de végétation.

Interactions génotype x milieu chez les C4 pérennes (Profil A5)

Mons (SADV, Agronomie)

Poste CR/IR avec le profil A4 et le groupe de réflexion au niveau européen (Cliffton-Brown (IGER-BBSRC), Jensen (Risoe DK) et Elbersen (Wageningen))

Il s'agit de décrire les interactions génotype x milieu de certaines espèces C4 pérennes, et en particulier le miscanthus. La proximité phylogénétique de ces plantes avec des espèces cultivées, notamment la canne à sucre et le maïs permet d'envisager de tirer profit des résultats obtenus sur ces dernières (adaptation de modèles de croissance,...). Un accent particulier devra être mis sur les effets des basses températures et de l'azote.

Agronomie et mise au point des itinéraires techniques pour les C4 pérennes (Profil A6)

Mons (Agronomie)

Poste IR / IE à discuter en liaison avec la mission « systèmes innovants » de Jean-Marc Meynard

Un travail d'agronomie et de mise au point des itinéraires techniques doit être entrepris pour les plantes en C4 pérennes, avec un accent particulier sur la phase d'implantation, les besoins en fumure minérale (notamment azote), les besoins en eau, les dates de récoltes (automne, hiver). L'adaptation dans différents systèmes de production (céréalier, herbager, zones marginales, zones à services écologiques en liaison avec la mission « systèmes de culture innovants ») doit aussi être envisagé.

Etudes d'écophysiole et de conduite de culture du peuplier et du robinier en TCR (Profil A7)

Orléans (UAGPF)

Poste de CR / IR en s'appuyant sur les dispositifs expérimentaux de Bourges et de Mons

La diversification de la filière lignocellulosique passe entre autre par le développement de cultures d'espèces pérennes ligneuses sous forme de taillis à (très) courte rotation [T(T)CR]. Les espèces adaptées à ce type de culture (croissance rapide) et à nos latitudes sont le peuplier, le robinier ou le saule ; ce dernier étant déjà bien étudié dans les pays scandinaves, l'effort devrait être porté sur les deux autres, notamment le robinier car il présente l'avantage d'être une légumineuse (nécessite potentiellement moins d'intrants azotés). Il s'agit de réaliser des études d'écophysiologie et de conduite de culture en TCR ou en TTCR. Ces travaux pourraient être valorisés à terme par la sélection ou par la création de variétés adaptées à certaines des utilisations de la biomasse.

Note :

1) Une réflexion sur l'utilisation des légumineuses, notamment pérennes herbacées ou arbustives est en cours (animée par Jean Dénarié). Une comparaison avec les C4 pérennes devrait être conduite.

2) La limitation du nombre de postes nous a conduit à ne pas retenir la thématique visant à transformer des espèces de printemps en espèces « hiver ». La betterave sucrière reste toutefois une espèce à privilégier. Cette proposition pourrait faire l'objet d'un redéploiement de forces existantes au sein des départements GAP et BV.

RÉPARTITION PROPOSÉE DES POSTES

	Ressources oléagineuses	Ressources fibreuses	Ressources dédiées lignocellulosiques		
			Annuelle	Pérenne herbacée	Forêt et TCR
Biosciences végétales	A1			A4	
Adaptation de la quantité et de la qualité de la ressource		A2, A3		A5	A7
Système de culture				A6	

II - OPTIMISER LES PROCÉDÉS

CARACTERISER LA MATIERE PREMIERE

Tout process nécessite pour son optimisation une étape de caractérisation de la matière première ; ceci est particulièrement prégnant dans le secteur CARBIO où un grand nombre de matières premières végétales sont impliquées. Cette variabilité peut dépendre du génotype de la plante, des conditions pédoclimatiques, des premières étapes de fractionnement utilisées pour obtenir la matière première, etc.... De nombreux bio produits doivent tendre vers une plus grande homogénéité pour parvenir à concurrencer les produits conventionnels. Ceci passe par une maîtrise de la variabilité de la matière première, qui implique en premier lieu sa caractérisation fine. Dans la filière lignocellulose par exemple, il est essentiel de disposer de méthodes fiables de caractérisation du matériel lignocellulosique pour pouvoir optimiser sa conversion.

Caractérisation physique de la matière première fibreuse et lignocellulosique (Profil B1)

Toulouse (INRA / INP-ENSIACET de Chimie agro-industrielle)

Poste IR

Il s'agit d'optimiser les méthodes de caractérisation physique des matières premières fibreuses et lignocellulosiques, afin de pouvoir adapter efficacement les étapes de production de la matière première et les process de transformation ultérieurs. C'est notamment le cas pour la transformation de la lignocellulose en sucres simples, qui requiert des méthodes de caractérisation de la digestibilité de la lignocellulose pour adapter les procédés fermentaires aux différents types de matières premières.

LES FIBRES VEGETALES

Les caractéristiques des fibres végétales sont conditionnées par leur genèse [profil A2] et leur fonctionnalisation [profil B2]. Il s'agit donc de mettre au point de nouveaux procédés de fonctionnalisation des fibres végétales afin d'accroître leur adhérence à des matrices plastiques ou de minimiser certains inconvénients actuels des fibres comme leur tendance à l'attrition ou leur vieillissement lié à l'hygrothermie.

Fonctionnalisation des fibres végétales (Profil B2)

Reims (UMR FARE)

Poste CR en collaboration avec Versailles LBC et SADV (S.Hawkins USTL)

Il est nécessaire de développer et optimiser de nouvelles méthodes de fonctionnalisation des fibres végétales. Celles-ci doivent se projeter au-delà du cadre d'étude de la fibre comme simple support réactif de cellulose. Il s'agit par exemple d'explorer les potentialités du génie enzymatique pour la fonctionnalisation. Il est aussi possible d'envisager la polymérisation de différents monomères lignocellulosiques, ou encore d'utiliser la fraction « lignique » pour des greffages ou directement (comme compatibilisant des systèmes polaires).

LA FILIERE LIGNOCELLULOSIQUE

La transformation de la biomasse peut être réalisée par deux grands types de procédés : des procédés physico-chimiques (thermochimie) et des procédés biotechnologiques. Les premiers sont développés par des organismes tels que l'IFP et le CEA ou par des entreprises privées, et l'INRA n'a pas vocation à s'y investir directement. En revanche, l'Institut est directement concerné par les procédés biotechnologiques ; en particulier, il se doit d'avoir des compétences et des activités dans le domaine du génie métabolique des micro-organismes, car la capacité à moduler leurs métabolismes ou à les doter de nouvelles capacités biocatalytiques pour produire des molécules d'intérêt non alimentaire (énergie, chimie) représente un enjeu stratégique pour l'INRA.

En effet, plusieurs filières peuvent être complètement dopées par certains sauts technologiques dans la transformation de la matière première par la voie humide (voie biologique). C'est notamment le cas de la filière lignocellulosique, pour laquelle il est déterminant de disposer de génies enzymatique et fermentaire performants [B3, B4, B5], ce qui implique notamment d'obtenir de nouvelles fonctions métaboliques. En particulier, un des sauts technologiques attendus est de parvenir à moduler ou à créer des voies métaboliques permettant la conversion de la lignocellulose en éthanol par des micro-organismes.

Suivi et modélisation du métabolisme microbien (Profil B3)

Toulouse (UMR 792)

Poste de CR

La modulation du métabolisme de micro-organismes nécessite de pouvoir dresser une description dynamique du métabolome, en particulier par des mesures non invasives. Ceci doit permettre d'établir une modélisation des flux dans le métabolome.

Il est nécessaire de maîtriser certaines méthodes et d'établir un cadre conceptuel pour entamer une approche expérimentale du métabolisme et de l'enzymologie *in situ*. Ceci implique donc de développer toutes les méthodes de suivi du métabolisme *in vivo* (RMN métabolique,...). Ces travaux auront pour cadre le suivi des voies métaboliques nécessaires à la conversion de la lignocellulose en éthanol.

Modulation du métabolome chez les micro-organismes par des approches de génie enzymatique *in vivo* (Profil B4)

Département MICA

Poste CR

Il est important de pouvoir modifier et créer des voies métaboliques d'intérêt chez des micro-organismes. Leurs nouvelles fonctions enzymatiques peuvent par exemple être isolées dans d'autres organismes ou développées grâce à l'obtention de protéines recombinantes. Une attention particulière sera portée aux micro-organismes dégradant la cellulose, dans l'optique d'exploiter cette capacité dans d'autres micro-organismes, ou pour les doter de nouvelles aptitudes biocatalytiques.

Etude des interactions et des régulations des voies métaboliques de conversion de la lignocellulose (Profil B5)

Marseille (UMR UBCF à l'interface des activités de Marcel Asther (INRA) et de Chantal Tardif (CNRS))

Poste CR

La rencontre entre une bonne connaissance de la lignocellulose et d'une génétique moléculaire moderne ouvre la voie à l'élaboration de souches « multifonctionnelles » qui aient par exemple, la capacité de dégrader la cellulose et d'aboutir à la production d'éthanol. Cette opération pourrait être un partenariat fort entre l'INRA et le CNRS autour de compétences en génétique moléculaire de Chantal Tardiff (CNRS).

Obtention de bioéthanol par le traitement des pulpes de betterave et du son de céréales (Profil B6)

Reims (UMR FARE)

Poste IR en partenariat avec ARD

Le développement de la filière lignocellulosique peut débuter par la transformation des résidus issus de la production de biocarburants de première génération. Pour illustration, aux Etats-Unis, la société Green Star Products Inc projette de coproduire des biocarburants de première et deuxième générations, à savoir du biodiesel provenant de graines oléagineuses et du bioéthanol avec des tiges et des résidus [42]. Il est envisageable de développer de telles approches au niveau national, en commençant par optimiser l'intégration des filières actuelles de production de bioéthanol : celles-ci produisent des co-produits comme les pulpes de betteraves et le son de céréales, à partir desquels il est aussi potentiellement possible d'obtenir de l'éthanol. Cette opération s'inscrit donc dans une courbe d'apprentissage avec une matière première disponible et pour laquelle la cellulose est plus facilement accessible.

Mise en œuvre de biocatalyseurs par génie enzymatique et/ou par génie fermentaire (Profil B7)

Toulouse (UMR 792)

Poste de IR

L'optimisation des rendements de cultures microbiennes nécessite de comprendre l'interaction entre la physiologie microbienne et l'environnement imposé par le réacteur. Cette optimisation doit tirer partie d'un partage des connaissances recueillies pendant la genèse des nouvelles souches et pendant leur mise en culture à grande échelle.

LA FERMENTATION MÉTHANIQUE ET PRODUCTION D'HYDROGENE

La fermentation méthanique est aujourd'hui largement envisagée ou utilisée pour le traitement des effluents organiques des IAA et de l'élevage. Ce développement est justifié par des objectifs environnementaux comme la baisse de la teneur en matière organique des effluents. L'Allemagne notamment a développé un programme de production d'électricité à partir de méthanisation (plus de 3000 installations) très (trop) largement aidé fiscalement. La fermentation méthanique

pourrait être une voie de production d'hydrogène à partir de biomasse humide [11]. Cette voie de production d'hydrogène mérite donc l'intérêt de l'Institut.

Le marché des piles à combustible va commencer à se développer dans les années à venir avec des applications dans le domaine des systèmes autonomes (ordinateurs portables, scooters, alimentations de secours,...). Plusieurs pays investissent des efforts de recherche important sur ce créneau, notamment le Japon qui compte reprendre le leadership du marché des piles portables à la faveur de cette rupture technologique.

Exploration de la fermentation méthanique en vue d'une production d'hydrogène (Profil B8)

Narbonne (UR 50 LBE)

Poste de IR

La production d'hydrogène à partir de biomasse humide peut être réalisée via la fermentation méthanique. Celle-ci sera envisagée dans un premier temps à partir de résidus organiques, puis à partir de biomasse provenant de cultures dédiées.

VERS UNE CHIMIE PLUS DOUCE

L'extraction des lipides des graines oléagineuses et protéagineuses, loin d'être triviale (il reste difficile de séparer l'huile du mucilage chez le lin oléagineux par exemple), est encore réalisée par des étapes de trituration et de raffinage polluante et énergétivore. Il faut désormais orienter les process vers des méthodes plus douces, c'est-à-dire plus respectueuses des constituants de la matière première, de la santé de l'homme, et de l'environnement. Il s'agit notamment de limiter le recours à des solvants « éco-incompatibles » pendant les étapes d'extraction et les premiers traitements, par exemple en s'affranchissant du recours à l'hexane pour l'extraction des huiles de colza.

Optimisation de l'extraction des lipides destinés aux filières du carbone renouvelable (Profil B9)

Toulouse (INRA / INP-ENSIACET de Chimie agro-industrielle)

Poste CR

Il est nécessaire de développer de nouvelles méthodes d'extraction des lipides, celles-ci devant proscrire l'utilisation de solvants nocifs. Il s'agit en particulier de mettre en place une alternative à l'utilisation d'hexane (neurotoxique périphérique) dans les procédés conventionnels d'extraction des huiles.

Chimie du glycérol (Profil B10)

Toulouse (INRA / INP-ENSIACET de chimie agro-industrielle, unité déjà investie dans la valorisation du glycérol, le partenariat avec des chimistes doit être développé.

Poste CR

La valorisation du glycérol passera vraisemblablement par de multiples solutions. Cette diversification de ses usages implique notamment de poursuivre les efforts de recherche engagés sur l'obtention de dérivés du glycérol, comme le carbonate de glycérol (et ses esters) par exemple, en vue de produire des bio lubrifiants, des tensioactifs, des bio solvants, ou comme base de synthèse de biomatériaux. Il est

également possible d'explorer l'utilisation du glycérol comme substrat de fermentation pour envisager sa conversion par voie biologique.

RÉPARTITION PROPOSÉE DES POSTES

	Ressources oléagineuses	Ressources fibreuses	Ressources lignocellulosiques
Caractérisation physique		B1	B1
Traitement physique	B9		
Traitement chimique	B9, B10		
Génie métabolique			B3, B4, B5
Génie fermentaire			B7, B8
Ressources secondaires		B2	B6

III - ÉVALUER LES FILIÈRES

Les différentes filières du carbone renouvelable doivent répondre à de nombreux enjeux : rentabilité, bénéfices environnementaux, réussite de leur intégration dans des systèmes existants, etc... Certains éléments de ces filières sont totalement nouveaux, tant pour les matières premières (lignocellulose...) que pour les processus ou les débouchés. Aussi, pour les acteurs de chaque filière (agriculteurs, industriels, décideurs politiques...), il est à ce jour difficile de faire des choix parmi les nombreuses options possibles (types de culture, processus industriels, localisation géographique, organisation de l'approvisionnement...) sans disposer d'études multicritères couvrant l'ensemble de la filière. Par ailleurs, il est admis unanimement que la disponibilité en ressources sera le facteur limitant, il faut donc disposer d'outils d'évaluation multicritères permettant de réfléchir nos choix stratégiques dans un monde en évolution. L'INRA est un des rares organismes nationaux possédant ce champ de compétences. Les priorités identifiées sur un nombre très limité de filières devraient renforcer cet avantage.

Les principales questions de recherche s'articulent autour des thèmes suivants :

- Modéliser et documenter les bilans de différentes filières (carbone, effet de serre, énergétique, environnemental, économique et social), évaluer les performances des filières dans leur ensemble grâce à des outils de type ACV pour les impacts environnementaux, prendre en compte les échelles de temps long (séquestration du carbone, biodégradabilité) et spatialiser ces nombreuses informations.
- Prendre en compte les problèmes d'éco-compatibilité et la gestion des produits en fin de vie.
- Comprendre, améliorer et optimiser i) les échanges entre les différents acteurs intervenant dans une même filière (recherche, secteurs économiques (agricole,

sylvicole, industriel, énergétique), pouvoirs publics...) et ii) la cohérence des informations entre les différentes filières notamment entre les filières matures et les filières en émergence.

IMPACTS ET CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES DES FILIERES CARBIO

La production de carbone renouvelable perd pour partie sa légitimité si celle-ci se fait au détriment de l'environnement local (pollution des nappes phréatiques ou de l'air, atteinte à la biodiversité,...). Ainsi, il est nécessaire de confronter les contraintes environnementales à l'optimisation économique et énergétique des filières du carbone renouvelable. Ce couplage entre les outils d'évaluation des impacts environnementaux et les modèles microéconomiques doit donc permettre de faire un lien entre les enjeux globaux (raréfaction du pétrole, changements climatiques,...) et l'environnement local.

Couplage entre les modèles biophysiques et micro-économiques (Profil C1)

Versailles-Grignon (SA2E)

Poste CR / IR en collaboration avec EGC

Ce couplage entre les modèles biophysiques et microéconomiques permettra de quantifier économiquement les externalités environnementales. L'application des modèles biophysiques au niveau d'un bassin de production vise à obtenir des indicateurs de performances environnementales des filières du carbone renouvelable. Ces outils doivent permettre par exemple de définir les choix les plus pertinents au niveau de l'exploitation agricole (type et conduite de culture), les plus adaptés pour obtenir le meilleur compromis « bilan énergétique x bénéfices environnementaux x rendement x profitabilité ». Ceci peut être réalisé par l'intégration de déterminants environnementaux et socio-économiques dans les systèmes de production ou dans des modèles microéconomiques de fonctionnement des exploitations.

ACV et approches comparées entre filières (Profil C2)

Agronomie (Laon)

Poste IR/CR en collaboration avec EGC Grignon et en liaison avec le dispositif expérimental de Mons

Jusqu'à présent, l'évaluation environnementale des filières CARBIO est réalisée grâce à des analyses de cycle de vie (ACV). Les indicateurs de performances obtenus permettent de comparer les différentes filières du carbone renouvelable (par rapport à celles du carbone fossile) en terme de bénéfices environnementaux globaux (réduction d'émission de CO₂, bilan énergétique) mais ces mêmes outils restent très déficients pour évaluer les performances locales notamment sur les cycles Carbone/Azote/Eau. Il convient d'améliorer les outils de type ACV, notamment pour les impacts locaux grâce à une approche spatiale explicite. Il est attendu une quantification (moyenne, fréquence des risque) des émissions de GES pendant la phase de production au champ (qui dépend pour part des caractéristiques de l'agro écosystème local comme le type de sol, le climat, l'environnement immédiat, etc) et des pollutions locales (eaux superficielles et souterraines notamment) générées par les intrants. Parmi les méthodologies

envisageables, il peut s'agir notamment de prendre en compte le changement d'usage des terres dans la modélisation des cycles C/N/H₂O/pesticides et d'étendre les simulations de devenir des composés à des systèmes physiques plus vastes.

Evaluation des conséquences de l'intensification de l'exploitation forestière (Profil C3)

Le labo d'accueil dépendra du facteur que l'on souhaite traiter : impacts sur les sols et la fertilité (Orléans), impact sur la biodiversité (Nancy, Bordeaux). Compte tenu du profil C4 proposé, l'impact sur les sols pourrait être privilégié pour ce profil.

Poste CR

Les forêts représentent un gisement potentiel de biomasse lignocellulosique important dont les conditions de mobilisation restent difficiles à mettre en oeuvre. Avec 40 % de l'accroissement naturel inexploité, l'exploitation des forêts telle qu'elle est réalisée aujourd'hui peut être largement optimisée, par exemple par une meilleure valorisation de l'ensemble des rémanents. Au-delà de cette rationalisation de l'exploitation actuelle, l'augmentation de la demande de biomasse peut conduire à intensifier l'exploitation forestière. Il s'agit d'évaluer les conséquences de cette intensification pour les minimiser ou les prévenir, et si nécessaire, développer de nouveaux modes d'exploitation.

Il faut donc analyser dans un premier temps les conditions d'une optimisation de l'exploitation actuelle des forêts, particulièrement en déterminant la quantité de matière organique qui doit retourner dans les sols pour prévenir leur appauvrissement (en carbone ou en azote notamment). Il faut également évaluer l'impact d'une intensification de l'exploitation forestière, le passage plus fréquent d'engins de récolte lourds peut introduire des perturbations majeures sur le sol, sa structure et ses propriétés physiques et par conséquent une perte du potentiel de production.

Cultures pérennes, biodiversité et paysages (Profil C4)

Département SAD (localisation à déterminer)

Poste de CR

Le développement important d'espèces pérennes au niveau d'un bassin de production se traduit par une réduction des autres surfaces agricoles. Cette perturbation dans l'usage des terres peut introduire une modification de la biodiversité, des paysages et des services écologiques de l'espace rural.

En matière de biodiversité, ces nouvelles productions peuvent avantager comme pénaliser certaines populations de la faune et de la flore sauvage comme celles des ennemis des cultures, il convient donc d'en estimer les conséquences. Par ailleurs, il faut évaluer l'impact d'un essor important des cultures lignocellulosiques sur les paysages de certains bassins, et déterminer comment et à partir de quand ces changements peuvent poser des problèmes d'acceptabilité par les citoyens. Ceci peut concerner par exemple des territoires de grandes cultures, qui connaîtraient un ralentissement du renouvellement des paysages (rythme annuel à un rythme beaucoup plus lent avec des cultures pérennes), ou encore des régions touristiques, où la fermeture des paysages par des cultures pérennes peut être perçue comme négative pour le territoire.

APPROCHE SYSTÉMIQUE ET BIORAFFINERIE

Les VANA définissent un contexte où les actions à l'interface de certains secteurs sont déterminantes mais peu étudiées. La question d'une approche systémique pour coordonner ces différents secteurs est donc d'une grande importance pour parvenir à optimiser l'intégration des filières sous forme de bioraffineries, en particulier au niveau technologique et énergétique.

Intégration des filières CARBIO (Profil C5)

Département SA2E, SAD (localisation à déterminer)

Poste de IE / IR

Il est nécessaire d'intégrer différents process du secteur du carbone renouvelable ainsi qu'avec d'autres secteurs industriels. Il s'agit en particulier de parvenir à coupler les approches industrielles, économiques et environnementales pour décliner le concept de bioraffinerie sur quelques exemples concrets. Ces études devront ainsi documenter pour les filières étudiées les schémas de production, les produits et coproduits, les données économiques, les différents débouchés et produits concurrents...

RÉPARTITION PROPOSÉE DES POSTES

Evaluations sectorielles				
Intégration des filières « Bioraffinerie »	Evaluation microéconomique	Bilan filière (Analyse de cycle de vie ACV)		
		Bilan Carbone	Bilan énergétique	Bilan environnemental
C5	C1	C2, C3	C2	C3, C4

IV - ANALYSER LE CONTEXTE MACROSCOPIQUE

Certains facteurs d'ordre macroscopique comme les politiques publiques, le cours des matières premières ou les échanges commerciaux sont des éléments d'organisation des marchés internationaux. Réciproquement, le développement du secteur du carbone renouvelable peut également avoir une influence importante sur les marchés (concurrence entre le carbone renouvelable et le carbone fossile) mais aussi sur les territoires (compétition pour l'usage des terres). Il est donc nécessaire d'évaluer d'une part l'influence des facteurs macroscopiques sur le développement des filières du carbone renouvelable, et d'autre part l'impact des évolutions créées par le développement de ces filières CARBIO.

Les méthodes et les outils utilisés seront similaires à celles et ceux employés pour les marchés alimentaires avec néanmoins une différence importante, en particulier

pour les productions lignocellulosiques : une absence de références statistiques de longue durée, fiables.

Les questions de recherche s'articulent autour des deux thèmes suivants :

- Evaluer les impacts des politiques publiques sur l'émergence de nouvelles filières et sur le développement des filières du carbone renouvelable avec une prise en compte de la dimension internationale (import/export de matières premières)
- Evaluer l'impact du développement des filières du carbone renouvelable sur l'usage des terres, compétition avec les terres arables destinées à l'alimentaire, les prairies permanentes...

Evaluation de l'impact des politiques publiques sur les filières du carbone renouvelable (Profil D1)

SA2E (Rennes)

Poste IR

Les politiques publiques peuvent avoir un impact considérable sur les orientations de certaines filières du carbone renouvelable, comme par exemple les filières des biocarburants où la fiscalité a une grande influence sur les équilibres des marchés. Les décideurs publics manifestent actuellement l'intention d'impulser un élan aux filières du carbone renouvelable, et de nombreux rapports officiels (Conseil Economique et Social, Assemblée Nationale et Sénat) préconisent d'utiliser le levier fiscal pour donner un élan aux nouvelles filières. Dans ce contexte, il est important d'évaluer l'impact des différentes politiques publiques possibles sur le développement des filières CARBIO et des filières existantes homologues.

Il s'agit de décliner les outils d'économie publique au cas des filières du carbone renouvelable afin d'évaluer l'efficacité relative des différentes politiques publiques possibles. Les termes de politiques publiques doivent être entendus ici au sens large, celles-ci pouvant relever de dispositions normatives et réglementaires ou bien de dispositions fiscales et budgétaires. Cette analyse de l'efficacité des politiques publiques doit prendre en compte l'influence d'aspects internationaux comme le respect des règles internationales de commerce (éviter les distorsions de concurrence,...) ou l'impact de l'importation de matières premières brutes ou de produits finis du secteur CARBIO.

Viabilité territoriale des systèmes de culture des filières du carbone renouvelable (Profil D2)

Localisation à déterminer

Profil IR

Le développement du secteur CARBIO va conduire à une compétition pour l'usage des terres avec les cultures alimentaires (humaine et/ou animale), l'élevage, le développement urbain et les services écologiques. Cette compétition débutera lorsque la disponibilité des terres deviendra un facteur limitant, à savoir lorsque la mobilisation des terres soumises au gel administratif ne suffira plus à alimenter le secteur CARBIO.

Il est nécessaire de développer une approche spatialisée pour appréhender la concurrence pour l'usage des sols qui va s'établir dans les années à venir (une approche à base de scénarios peut être privilégiée). Il s'agit pour cela d'intégrer les nouveaux paramètres liés au développement des usages non alimentaires dans les

modèles d'économie de la production (agricoles) disponibles actuellement. Cette approche doit aussi prendre en compte la dimension « multifonctionnalité » (friches industrielles, bassin de captation,...) que peut recouvrir les productions lignocellulosiques.

RÉPARTITION PROPOSÉE DES POSTES

Evaluations macroéconomique, territoriale et sociale					
Etudes d'impact (environnement, socioéconomique)					
Marchés et échanges commerciaux	Economie et politique publique	Bassin et territoire de production	Systèmes de cultures et fonctionnement des exploitations agricoles	Filières émergentes et innovation	Gestion de la biodiversité
	D1	D2			

VI – STRUCTURATION GÉOGRAPHIQUE DU DISPOSITIF ET MANAGEMENT DU PROGRAMME

STRUCTURATION GÉOGRAPHIQUE DU DISPOSITIF

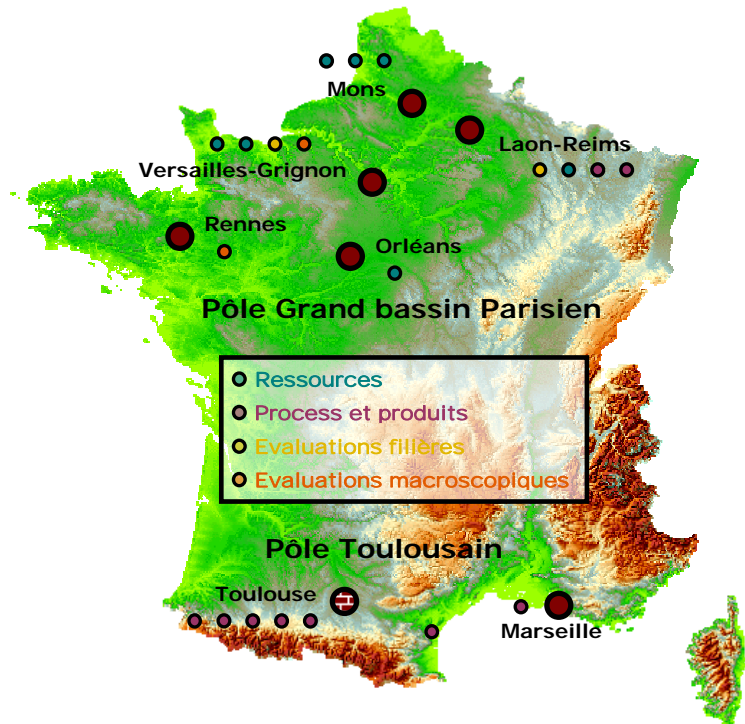
Compte tenu de la stratégie adoptée : des propositions de profils sur un nombre limité de thématiques, la structuration géographique du dispositif s'organise autour de deux grands pôles :

- Un pôle « Grand bassin parisien », avec Versailles-Grignon (BV, MICA, EA, SA2E), Mons (GAP, EA), Laon-Reims (EA, CEPIA), Orléans (EFPA) autour de l'adaptation et la mobilisation de la ressource, son évaluation technique, environnementale et économique, (2/3 des propositions de profils)
- Un pôle « Toulousain », autour du génie métabolique, enzymologie et la mise en œuvre du génie fermentaire (CEPIA). (1/3 des propositions de profils)

Cette polarisation, basée sur une cohérence des thématiques locales, devrait permettre d'atteindre une masse critique suffisante au sein d'équipes existantes et reconnues. Ainsi, cette approche devrait être propice à la création d'une animation scientifique locale, à la mise en place d'une dynamique favorable à la structuration d'un programme durable.

Cette structuration s'appuie fortement sur des outils qui ont vocation à structurer des opérations de recherches. C'est le cas notamment du dispositif expérimental de Mons et des outils de génomique végétale sur Versailles pour le pôle « bassin parisien » ainsi que des plateformes technologiques sur Toulouse.

De plus, cette structuration géographique nous paraît être une bonne base pour un management efficace d'un programme CARBIO et d'autre part un bon compromis entre un partenariat de proximité au niveau régional et une bonne visibilité de l'action de l'INRA au niveau national et européen.



MANAGEMENT D'UN PROGRAMME CARBIO

Si l'Institut se fixe comme objectif, comme ambition de se doter d'un programme CARBIO à la hauteur des enjeux mentionnés en introduction, la décision importante de recruter sur cette thématique était nécessaire mais risque néanmoins d'être insuffisante. En effet, l'effet « booster » réalisé par les nouveaux recrutements risque de n'être que temporaire si un accompagnement significatif et dans la durée n'était pas mis en place.

Un accompagnement significatif et dans la durée que l'on pourrait structurer autour des points suivants :

- une animation scientifique interne,
- des moyens humains, en fonctionnement et équipement dédiés pour ce programme sur les crédits de l'Institut,
- un pilotage et un suivi par un comité scientifique (et/ou stratégique) composé de personnalités extérieures et propres à l'Institut,
- une structuration du partenariat (public, privé) à différents niveaux
- une présence de l'INRA dans les structures de réflexion, de financement tant au niveau régional, national qu'europpéen et international.

Une animation scientifique interne, ce premier niveau d'animation pourrait s'appuyer sur une structuration inspirée des programmes européens, Work-packages et tâches avec des leaders clairement identifiés. La cohérence de l'animation devra être assurée par un scientifique, chargé de mission auprès de la Direction Générale. La connexion avec le pôle de compétitivité « Industrie et Agroressources » de Picardie & Champagne-Ardenne devra être étroite. La grille de lecture présentée précédemment pourrait être un schéma d'organisation scientifique d'un tel

programme. Ce niveau d'animation nous paraît indispensable pour dans un premier temps assurer l'appropriation de la thématique par les chercheurs et dans un second temps assurer une cohésion interne nécessaire face aux forces centrifuges externes.

Des moyens humains, en fonctionnement et équipement dédiés pour le programme CARBIO sur les crédits de l'Institut, cette proposition ne vise absolument pas à provoquer un repli en interne des forces de l'Inra mais plutôt à garantir que l'Institut pourra développer sa stratégie, son cœur de programme qui ensuite lui servira d'élément moteur dans la construction de son partenariat extérieur, pour développer son influence et son rayonnement. Cette proposition vient donc en complément d'un encouragement à positionner les équipes INRA dans les différents programmes régionaux, nationaux (ANR, AGRICE...) ou européens. En outre, cette action devra s'inscrire dans la durée, l'expérience des années 80 non suivie dans le temps a conduit à des effets négatifs durables.

Un pilotage et un suivi par un comité scientifique (et/ou stratégique) composé de personnalités extérieures et internes à l'Institut, les thématiques et problématiques liées à l'utilisation du carbone renouvelable sont beaucoup trop vastes pour que l'INRA puisse les appréhender et les traiter en solo. Ce comité, peut-être plus stratégique que scientifique, devra être composé en grande majorité de personnalités extérieures tant du domaine de la recherche (publique, privée), que du monde économique et politique. On pourrait en attendre un suivi critique des actions en cours, une aide à l'orientation du programme dans un contexte très évolutif et une aide à la construction du partenariat.

Une structuration du partenariat (public, privé) à différents niveaux, une proposition triviale dans l'absolu et néanmoins délicate à mettre en œuvre dans le contexte CARBIO. En effet, la multiplicité des questions posées, le nombre et la diversité des acteurs économiques, les niveaux d'intervention (régional, national, européen...), les échelles de temps et d'espace en jeu peuvent représenter un risque de dispersion pour l'Institut. Certains outils, comme les pôles de compétitivité, les Instituts Carnot devraient aider à cibler le partenariat. La définition et la mise en œuvre d'une stratégie au niveau de l'Institut représente néanmoins le meilleur garant d'un partenariat efficace.

Une présence de l'INRA dans les structures de réflexion, de financement tant au niveau régional, national qu'europpéen et international, en effet, l'INRA est un organisme de recherche qui par ses missions, ses compétences doit peser dans l'élaboration des stratégies de développement de l'utilisation du carbone renouvelable. Aujourd'hui, la présence de l'INRA est largement insuffisante dans les différentes structures de réflexion et de financement à tous les niveaux, du régional à l'Europe.

PEUT-ON CONCLURE ?

Certainement pas, néanmoins quelques mots-clés :

- CARBIO, une des questions prégnantes du XXI^{ème} siècle, vers une société de la bioéconomie ? [41]
- Des enjeux multiples et très corrélés dans un univers incertain : environnement et énergie, alimentaire et non-alimentaire, production locale ou importation, voie biologique ou voie thermochimique...
- La ressource disponible sera le facteur limitant face à la demande liée à la substitution au carbone fossile, l'INRA se trouve à un carrefour stratégique sur des thèmes comme usage des terres, compétition alimentaire et non alimentaire, adaptation et mobilisation de la ressource...
- Des propositions ciblées i) sur un nombre limité (3) de filières : les oléagineux, les fibres et la lignocellulose, ii) pour le développement du génie métabolique et iii) pour conforter des approches multicritères et systémiques
- Des propositions de profils mais qui doivent être assorties de mesures d'accompagnement fortes et durables

Une analyse nationale, européenne, largement partagée

**The billion ton biofuels vision
Chris Sommerville in 2006
Science 312-1277**

VII – RÉFÉRENCES

- [1] IEA (International Energy Agency) <http://www.iea.org/>
http://www.iea.org/textbase/papers/2006/renewable_factsheet.pdf
- [2] GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).
<http://www.ipcc.ch/> (Intergovernmental Panel on Climate Change)
Changements climatiques 2001 : Rapport de synthèse.
<http://www.ipcc.ch/pub/un/syrfrench/spm.pdf>
- [3] ASPO (Association for the study of Peak Oil&Gas)
www.peakoil.net et <http://aspofrance.org/>
<http://aspofrance.viabloga.com/texts/documents.shtml>
http://aspofrance.viabloga.com/files/JL_Futuribles-7juin.pdf
- [4] IEA (2005) <http://www.iea.org/textbase/papers/2005/solarthermal.pdf>
- [5] Shell International (2001) Energy needs, Choices and Possibilities ; scenarios to 2050. http://www.cleanenergy states.org/CaseStudies/shell_2050.pdf
- [6] Criqui P., Mima S., Rynikiewicz C. (2006) Prospective énergétique à 2050, contrainte carbone et changements structurels.
http://web.upmf-grenoble.fr/iepe/textes/PC-SM-CR_FONDDRlavril_260406.pdf
- [7] Bolin B., Degens E.T., Kempe S., Ketnet P. (1979) The Global Carbon Cycle. SCOPE (Scientific Committee On Problems of the Environment).
- [8] Joaris A. (Eurostat) Cultures non alimentaires et énergétique : une longue tradition et un potentiel pour l'avenir.
http://ec.europa.eu/agriculture/envir/report/fr/n-food_fr/report.htm
- [9] FAO database / Land Use Statistics (2000)
<http://faostat.fao.org/default.aspx>
- [10] Pasty J.-C. (2004) Les débouchés non alimentaires des produits agricoles : un enjeu pour la France et l'Union Européenne. Rapport du Conseil Economique et Social.
<http://www.ces.fr/rapport/doclon/04051912.PDF>
- [11] Etude WTW EUCAR/JRC/CONCAWE (2006) Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and power trains in the European context.
<http://ies.jrc.ec.europa.eu/wtw.html>
- [12] Bewa H. (2006) Matériaux polymères biodégradables et applications
ADEME publications:
<http://www.ademe.fr/partenaires/agrice/htdocs/actus03.asp>
- [13] Roy C (2005) Coordination de la valorisation de la biomasse.
www.industrie.gouv.fr/energie/prospect/pdf/facteur4-contrib-roy.pdf
- [14] Ademe Séminaire national du 20-10-05. Biomasse, de nouveaux marchés ! Comment mobiliser la biomasse ? www.ademe.fr (réf. 5663)

- [15] DOE (U.S. Department Of Energy)
<http://www.energy.gov/>
http://www1.eere.energy.gov/biomass/program_areas.html
- [16] Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières (2003) L'énergie en France en 2002. Que retenir ?
<http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/pdf/4page2002.pdf>
- [17] ADEME/DIREM (2002) Bilans énergétiques et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants en France.
<http://www.industrie.gouv.fr/energie/renou/biomasse/ecobilan-synthese.pdf>
(sur <http://www.industrie.gouv.fr/energie/publi/etudes.htm>)
- [18] Laffitte P., Saunier C. (2006) Les apports de la science et de la technologie au développement durable.
<http://www.assemblée-nationale.fr/12/pdf/rap-off/i3197-t1.pdf>
- [19] Persillet V. (2006) Les soutiens du secteur agricole, les négociations internationales sur le commerce et les pays en développement.
<http://www.inra.fr/Internet/Departement/ESR/comprendre/js/pdf/2006-06-VP-mieux-comp.pdf>
- [20] Sourie J.-C. (2005) L'ambivalence des filières biocarburants.
<http://www.inra.fr/Internet/Departements/ESR/publications/iss/pdf/iss05-2.pdf>
- [21] Pujol J.-L., Dron D. (1999) Agriculture, monde rural et environnement : Qualité oblige.
<http://lesrapports.ladocumentationfrancaise.fr/BRP/994000398/0000.pdf>
- [22] Clifton-Brown J., Stampfl P., Jones M. (2004) Miscanthus biomass production for energy in Europe and its potential contribution to decreasing fossil fuel carbon emissions. *Global change biology*. 10:509-18.
<http://www.bical.net/uploads/files/21.pdf>
- [23] Jones M. B., Walsh M. (2001) Miscanthus for energy and fibre (2001). Editions JAMES & JAMES
- [24] Nations Unies (1997) Protocole de Kyoto à la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.
<http://unfccc.int/ressource/docs/convkp/kpfrench.pdf>
- [25] PROLEA (2005-2006) Statistiques des oléagineux et protéagineux. De la production à la consommation : France, Europe, Monde.
www.prolea.com/fileadmin/extranet/Publications/plaquette_stats_2006.pdf
- [26] Rapport Commission Européenne « Biofuels in the European Union ; a vision for 2030 and beyond ».
http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/draft_vision_report_en.pdf
- [27] Rapport Commission Européenne « Plants for the future »
http://ec.europa.eu/research/biosociety/pdf/plant_genomics.pdf
- [28] Bourg D. (2003) Le nouvel âge écologique Editions Descartes et Cie

- [29] National Renewable Energy Laboratory (NREL) Multi-year analysis plan.
<http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/36999.pdf>
- [30] Reinhardt G. (EU) (2000) Bioenergy for Europe : Which ones fit best ? A comparative analysis for the Community.
<http://www.ifeu.org/landwirtschaft/pdf/biofit-exsum.pdf>
- [31] Colonna P. (2006) La chimie verte. Editions TEC & DOC
- [32] Ballerini D. (2006) Les biocarburants. Editions TECHNIP
- [33] ADEME (2004) Bilan environnemental des filières végétales pour la chimie, les matériaux et l'énergie. Etat des connaissances : Analyse de Cycle de Vie (ACV). *Synthèse publique*.
http://www.cbin-rcib.gc.ca/Docs/french/ADEME_Synthese.pdf
- [34] Directive 2003/30/CE du parlement européen et du conseil (08/05/2003) visant à promouvoir l'utilisation de biocarburants ou autres carburants renouvelables dans les transports.
http://ec.europa.eu/energy/res/legislation/doc/biofuels/fr_final.pdf
- [35] Commission européenne (1997) Energie pour l'avenir : Les sources d'énergie renouvelables. Livre blanc établissant une stratégie et un plan d'action communautaires.
http://ec.europa.eu/energy/library/599fi_fr.pdf
- [36] Gagnepain B. (2005) Nouvelles technologies de l'énergie. Proposition de programme de recherche.
<http://www.recherche.gouv.fr/rapport/energie/rapportnte2005.pdf>
- [37] Chambolle T., Meaux F. (2004) Nouvelles technologies de l'énergie.
<http://lesrapports.ladocumentationfrancaise.fr/BRP/044000232/0000.pdf>
- [38] Goldemberg J., Johansson T. B. (2004) World energy assessment. Overview, 2004 update.
http://www.undp.org/energy/docs/WEAOU_full.pdf
- [39] Johansson T. B., Goldemberg J. (2002) Energy for sustainable development. A policy agenda.
<http://www.undp.org/energy/publications/2002/20013108FNRapport.pdf>
- [40] Gabrielle B. (2005) Impacts environnementaux et écologiques des bioénergies. Journées VANA - INRA.
<http://www.inra.fr/rhone-alpes/VANA/Impactenvironnemental.pdf>
- [41] OCDE (2006) La bioéconomie en 2030 : définition d'un programme d'action.
<http://www.oecd.org/dataoecd/11/26/37002938.pdf>
- [42] Green Star Products, Inc. (2006)
<http://www.greenstarusa.com/news/06-06-28.html>