

**PROGRAMME NATIONAL DE  
RECHERCHE SUR LES BIOENERGIES  
(PNRB)**

**DOCUMENT DE RÉFÉRENCE**



## Sommaire

1. Introduction
2. Synthèse
3. Synoptique du contenu d'un 1<sup>er</sup> appel à projets
4. Descriptif du programme
  - 4.1. Module 1 "ressources lignocellulosiques"

Tâche 1 : Evaluation technique du gisement en ressource lignocellulosique mobilisable à l'échelle de la parcelle, conséquences logistiques, économiques et environnementales

Tâche 2 : Adéquation de la qualité de la ressource lignocellulosique aux technologies de transformation envisagées (thermochimie, voie biologique)

Tâche 3 : Evaluation micro économique, environnementale de la ressource lignocellulosique

Tâche 4 : Evaluation de scénarios concrets appliqués à des bassins d'approvisionnement présentant une ressource lignocellulosique contrastée
  - 4.2. Module 2 "conversion par voie thermochimique"

Tâche 1 : Evaluation socio-technico-économique et environnementale

Tâche 2 : Recherche et développement

Tâche 3 : Conception d'une plate-forme de développement
  - 4.3. Module 3 "conversion par voie biologique"

Tâche 1 : Substrats et prétraitements

Tâche 2 : Conception et production d'enzymes de saccharification

Tâche 3 – Hydrolyse enzymatique

Tâche 4 : Fermentation éthanolique des hydrolysats de lignocellulose

Tâche 5 – Distillation – Traitement des effluents – Vinasses – Co-produits

Tâche 6 – Intégration du procédé (Process Integration)

Tâche 7 : Bilans ACV : massique et énergétique et effet de serre
  - 4.4. Module 4 "évaluation"

Tâche 1 : définir le cadre méthodologique permettant l'évaluation et la comparaison des filières.

Tâche 2 : établir les bilans intra-filière énergétique et leur comparaison

## 1. Introduction

Ce document résulte des travaux d'un groupe, coordonné par un comité de pilotage animé par l'ADEME en liaison avec les ministères chargés de la Recherche et de l'Industrie, et qui a réuni depuis début 2004 les principaux acteurs de l'industrie et de la recherche publique dans le domaine de la conversion de la biomasse lignocellulosique à usage énergétique, notamment pour les transports.

La liste des membres du groupe de travail est la suivante :

<b>NOM</b>	<b>PRENOM</b>	<b>ORGANISME/SOCIETE</b>
DOHY	Maurice	ADEME
POITRAT	Etienne	ADEME
LACOUR	Paul Antoine	AFOCEL
LE NET	Elisabeth	AFOCEL
CIEUTAT	Denis	AIR LIQUIDE
MORIN	Jean-Xavier	ALSTOM POWER
LE HENAFF	Yvon	ARD
CLAUDET	Gérard	CEA
GAUTHIER	Alain	CEA
SEILER	Jean-Marie	CEA
GIRARD	Philippe	CIRAD
LEDE	Jacques	CNRS/INPL Nancy
LAMY	Claude	CNRS/Univ.-Poitiers
CREDOZ	Paul	CRISTAL UNION
BELLOT	Christophe	EDF
CARLOTTI	Bruno	EDF
MICHON	Ulysse	EUROPLASMA
BICHAT	Henry-Hervé	EUROPOL'AGRO
NORMAND	Sébastien	GAZ DE France
BALLERINI	Daniel	IFP
DUPLAN	Jean-Luc	IFP
MONOT	Frédéric	IFP
ROJEY	Alexandre	IFP
ASTHER	Marcel	INRA
GOSSE	Ghislain	INRA
SOURIE	Jean-Claude	INRA
BLANC	Philippe	INSA Toulouse
GOMA	Gérard	INSA Toulouse
JOUVE	Carole	INSA Toulouse
FUENTES	Jean-Luc	LESAFFRE
GOURDON	Jean-Marc	MAAPAR
BRUDI	Gerard	MAGUIN SAS

VALIERGUE	Laurent	ONF
LABALETTE	Françoise	ONIDOL
ROUVEIROLLES	Pierre	RENAULT
TAILLADE	Patrick	SAF-ISIS
VERMEERSCH	Georges	SOFIPROTEOL
LEDRU	Dominique	THALES
CANTEGRIL	Marc	THALES E&C
BOURGOGNE	Michel	TOTAL
HERVOUET	Véronique	TOTAL

Une note de synthèse, que l'on trouvera ci-après, a été finalisée le 11 février 2005.

Ce présent document comporte en outre un synoptique des tâches qui pourraient être lancées dans un premier appel à projets, ainsi qu'un descriptif du programme par module. Ce document a pour objet de servir de base à l'élaboration du cahier des charges du 1<sup>er</sup> appel à projets.

## 2. Synthèse

### **Programme National de Recherche sur les Bioénergies (PNRB) Production de carburants à partir de biomasse lignocellulosique**

La France, comme beaucoup d'autres pays, est confrontée au double problème de son indépendance énergétique, fortement conditionnée par l'importation de ressources fossiles, et dont l'utilisation intensive entraîne une augmentation importante des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, dont le CO<sub>2</sub>, contribuant ainsi au réchauffement de la planète.

Le développement des bioénergies (biocarburants, hydrogène, chaleur, électricité) à partir de la biomasse peut apporter un début de réponse significative à ce double problème. En France, le potentiel de biomasse encore mobilisable pour l'énergie et les matières premières est supérieur à 30 millions de tep\* dont environ 80% sont constitués par la partie lignocellulosique de la biomasse. Or, si l'on sait produire des biocarburants à partir des réserves de la plante, on ne dispose pas, à l'heure actuelle, de technologie pour la conversion industrielle de la biomasse lignocellulosique en carburants.

Cette proposition vise :

- l'élargissement du périmètre des bio-ressources mobilisables et économiquement acceptables en élaborant des stratégies de production, de mobilisation de la biomasse lignocellulosique (bois, paille, cultures énergétiques) et de déchets organiques,
- le développement et la démonstration de la faisabilité technico-économique de nouvelles filières technologiques de conversion énergétique de la biomasse lignocellulosique, notamment pour la production à moyen terme de biocarburants de seconde génération utilisables directement ou en mélange avec les essences ou le gazole, dans les moteurs à combustion interne et pour la production à plus long terme d'hydrogène.

---

\* tep = tonne équivalent pétrole  
Source: Prospective ADEME 2004

Cette proposition de programme, qui rassemble et mobilise les principaux acteurs nationaux, situe la mise en application des recherches au-delà de 2010. Sa mise en œuvre doit accroître la crédibilité technique française dans le domaine et favoriser l'établissement de coopérations avec des programmes internationaux, notamment européens en liaison avec les plate-formes technologiques. Le programme de R et D proposé constitue une étape préalable indispensable au lancement des filières industrielles compétitives et correspondant aux besoins des utilisateurs finaux.

La proposition est constituée de 4 modules traitant chacun d'une thématique, mais reliés entre eux, à l'intérieur desquels les études sont regroupées en tâches indépendantes. Son déroulement est marqué de jalons qui correspondent à des bilans intermédiaires visant à valider ou réorienter les choix technologiques. La mise en œuvre de ce programme reposera sur une concertation entre partenaires publics et privés, selon un mode de gouvernance à définir, qui associerait les fonctions suivantes: orientation et pilotage, animation et expertise scientifique.

## **MODULE 1 : Production et mobilisation de la ressource en biomasse lignocellulosique**

La lignocellulose, schématiquement les tissus de soutien des organes végétaux (tiges, troncs, feuilles...), représente le gisement en biomasse végétale le plus ubiquiste et le plus important sur le territoire national ou européen. Cette ressource peut-être caractérisée selon la typologie suivante : les résidus secs d'exploitation agricole et forestière (paille...), les produits de l'exploitation forestière, les cultures dédiées annuelles (triticale...) ou pérennes (*Miscanthus*, taillis à courte rotation...).

L'échelle d'espace envisagée pour l'analyse du gisement en biomasse lignocellulosique est celle du bassin d'approvisionnement d'un site industriel défini selon les modules 2 & 3, compte tenu des différents usages concurrents de cette ressource. Les processus analysés couvriront les étapes de production au niveau d'une parcelle agricole ou forestière, la récolte, le conditionnement et le stockage de cette matière première ainsi que les aspects logistiques entre les sites de collecte et le site industriel.

Les opérations de R&D sont organisées en quatre tâches. Les trois premières sont destinées à fournir les références, données, méthodes et modèles technologiques, économiques, environnementaux pour chacun des types de ressource définis ci-dessus, la dernière est une application destinée à valider ces outils.

La tâche 1 propose une évaluation technique du gisement en ressource lignocellulosique mobilisable à l'échelle des sites de production (agricole, forestier, sites urbains notamment) à partir d'une part des données existantes et de sites expérimentaux à mettre en place. Les méthodes, données et modèles seront technologiques (techniques de récolte...), économiques, environnementaux et logistiques.

La tâche 2 propose dans un premier temps la caractérisation des critères de qualité de la ressource lignocellulosique selon les technologies de transformation envisagées (cf. Modules 2 & 3) et dans un second temps l'optimisation et l'amélioration des critères les plus sensibles identifiés précédemment.

La tâche 3 propose des outils, notamment des modèles, d'évaluation technique, micro et macroéconomique, environnementale de la production et de la mobilisation de la ressource lignocellulosique à l'échelle d'un bassin d'approvisionnement.

La tâche 4 consiste à valider les outils développés dans les tâches précédentes (tâche 3 notamment) en les appliquant à des bassins d'approvisionnement contrastés (de taille définie par les modules 2 & 3) quant à l'origine de la ressource, qui sera soit essentiellement agricole, soit forestière, soit mixte.

## MODULE 2 : Conversion de la biomasse lignocellulosique par voie thermochimique

La voie thermochimique regroupe l'ensemble des filières de valorisation énergétique de la biomasse lignocellulosique, mettant en œuvre des procédés tels que la combustion, la pyrolyse, la gazéification et la conversion du gaz de synthèse. Ces filières sont composées d'un enchaînement de technologies, qui pour l'essentiel, se sont développées jusqu'à présent dans le cadre de la production de chaleur et d'électricité. Cette proposition vise la conception de process adaptés à la production de biocarburants et optimisant l'usage de la biomasse, en intégrant les possibles valorisations thermique et électrique.

A titre d'exemple, la gazéification permet de transformer la biomasse en un mélange gazeux riche en  $\text{CO} + \text{H}_2$ . Ce gaz de synthèse peut ensuite être converti, après purification, en carburant liquide (gazole), par exemple par synthèse Fischer-Tropsch. A plus long terme, ce gaz pourrait être converti en hydrogène pour alimenter, par exemple, des piles à combustible.

Le programme de travail, à un horizon de 4 ans, se décompose en 3 tâches majeures fortement imbriquées.

- **Une évaluation socio-technico-économique** des filières et technologies envisagées, au travers d'analyses techniques, économiques, énergétiques, environnementales et sociétales, visant à faire émerger les plus adaptées. Cette évaluation permettra d'identifier les verrous et limitations respectifs (nature et complexité) et d'orienter les choix techniques.
- **Des actions de Recherche et Développement** visant à répondre à la fois aux problèmes génériques communs aux filières et technologies examinées dans le cadre de l'évaluation technico-économique, tels que le comportement des inorganiques, les phénomènes d'agglomération et de corrosion, le traitement des gaz etc..., et aux problèmes spécifiques à certaines d'entre elles.

Des actions de recherche à plus long terme, préparant les ruptures technologiques permettant par exemple d'augmenter significativement le rendement masse en biocarburant et d'abaisser le montant des investissements, pourront être menées en parallèle.

- **La conception d'une plate-forme de développement** visant à valider les technologies retenues pour chacun des maillons de la (des) filière(s) proposées, en couvrant tous les aspects depuis le prétraitement (éventuellement) déporté de la biomasse dans les bassins de collecte jusqu'à la production de biocarburant. Celle-ci permettra de capitaliser les connaissances, les avancées techniques et les moyens développés dans le programme pour offrir aux acteurs économiques une aide au choix des filières et technologies adaptées à des scénarios spécifiques de valorisation de bio-ressources.

Le livrable principal du programme consistera en un dossier technico-économique permettant de décider à l'horizon 2009 du lancement de la construction d'une plate-forme de développement. Il sera constitué des options technologiques retenues, du cahier des charges des composants et outils à développer, des moyens techniques à mettre en œuvre, du programme d'essais envisagé ainsi que des coûts d'investissement et d'exploitation. En cas de décision positive, cette plate-forme pourrait être opérationnelle à l'issue de ce programme.

### **MODULE 3 : Conversion de la biomasse lignocellulosique par voie biologique**

Les grandes étapes du procédé qui vise à la production sont le prétraitement de la biomasse, la production d'enzymes et l'hydrolyse enzymatique de la cellulose et la fermentation éthanolique des hexoses et des pentoses. Les deux verrous majeurs sont le manque d'efficacité de l'hydrolyse enzymatique et les mauvais rendements de conversion des pentoses issus de la fraction hémicellulosique.

Le programme R&D sera réalisé essentiellement à l'échelle du laboratoire et du petit pilote, sur les quatre premières années, avec pour principal objectif, l'amélioration de la faisabilité technico-économique de cette filière.

A titre d'exemples :

- le coût d'hydrolyse enzymatique de la biomasse lignocellulosique encore trop élevé à l'heure actuelle, devra se rapprocher de celui de l'hydrolyse de l'amidon qui est industrialisée,
- les performances de la fermentation éthanolique des pentoses (rendement, productivité, concentration en éthanol) devront avoisiner celles obtenues à partir des hexoses.

Ce sont là les principaux enjeux des travaux proposés.

Les substrats carbonés traités seront les pailles de céréales, dans un premier temps. D'autres ressources végétales seront ensuite étudiées en liaison avec les partenaires du module 1.

En fonction des résultats obtenus, les options techniques choisies seront validées, au cours de la quatrième année, dans des installations préindustrielles, disponibles chez certains des partenaires. Seul l'équipement nécessaire au prétraitement de la biomasse, dont le type aura été sélectionné en petit pilote, devra être conçu et testé à plus grande échelle avant d'être validé.

Les bilans massique, énergétique et économique, seront finalisés au cours de cette dernière phase, ainsi que le «design» d'une unité industrielle.

### **MODULE 4 : Evaluation socio-technico-économique et environnementale**

Les données socio-technico-économiques et environnementales fournies par les différents modules seront globalisées au fur et à mesure afin d'établir un bilan comparé des filières techniques étudiées et d'orienter les choix de façon interactive. Il se décomposera en 2 tâches principales consacrées respectivement à la modélisation socio-technico-économique et à l'établissement des bilans environnementaux de la ou des filières de conversion retenues. La valorisation des acquis du programme sera assurée tant au niveau national qu'international, en respectant les accords de confidentialité établis au préalable.

*Le Comité de Pilotage*

### 3. Synoptique du contenu du 1<sup>er</sup> appel à projets

Le PNRB comporte 4 modules qui sont décrits ci-après: (1) "ressources lignocellulosiques", (2) "conversion par voie thermochimique", (3) "conversion par voie biologique", (4) "évaluation".

Les projets de recherche, correspondant à une répartition du programme en tâches, sous-tâches et actions, sont ventilés par nature:

- recherche exploratoire (RE)
- recherche et développement technologique (RDT)
- prototypage et expérimentation (PEX), incluant les étapes de validation expérimentale et de retour d'expérience
- démonstration industrielle.

Sont présentés ici les projets relevant des catégories RE, RDT et PEX. L'on veillera particulièrement, quelque soit la procédure choisie pour gérer cet appel à projets, à préserver la cohérence d'ensemble de ce programme, en particulier en ce qui concerne la chronologie et l'articulation des travaux entre eux.

Le PNRB, doit déboucher à l'issue d'une première période de 4 ans: pour la voie thermochimique, sur la définition et la construction d'une plateforme de développement technologique; pour la voie biologique, sur la validation sur pilote pré-industriel et la définition d'une unité industrielle. C'est cette première tranche que décrit le présent document.

Une seconde tranche devra suivre alors pour la démonstration industrielle de la faisabilité validée sur plateforme ou pilote. Elle sera définie en fin de première tranche.

Le présent programme pourra donc donner lieu à plusieurs appels à projets. Les projets peuvent être pluriannuels et se répartissent soit en projets fédérateurs (regroupant un ensemble de compétences diverses) soit en projets spécifiques.

Les projets font l'objet d'un phasage dans le temps de rang 1 ou 2.

## Module 1 : Thème - Ressources lignocellulosiques

Intitulé			Nature du projet	Fédérateur ou spécifique	Phasage 1 ou 2	
Tâche (sous-thème)	Sous-tâche (sous-thème secondaire)	Action				
1 : Evaluation technique, économique, environnementale du gisement en ressources	1.1 : Référentiel des ressources lignocellulosiques	1 : Déchets autres que les coproduits issus de l'agriculture et de la forêt	RDT	Fed	1	
		2 : Coproduits secs issus de l'agriculture, de sa filière collecte et première transformation	RDT	Fed	1	
		3 : Cultures dédiées : annuelles, pérennes herbacées, pérennes ligneuses	RDT	Fed	1	
		4 : Evaluation des informations existantes pour la ressource bois forestière.	RDT	Fed	1	
		1-2 : Mise en place et suivi de sites expérimentaux de production		RDT	Fed	1
		1-3 : Expérimentation et modélisation de la production et de la mobilisation de la ressource	1 : Coproduits secs de l'agriculture et cultures annuelles dédiées	RE	Fed	1
			2 : Cultures pérennes herbacées et récoltées annuellement	RE	Fed	1
			3 : Taillis à courte rotation (TCR)	RE	Fed	1
			4 : La ressource forestière	RE	Fed	1
		2 : Adéquation de la qualité de la ressource aux technologies de transformation	2-1 : Elaboration d'un référentiel de la qualité de la ressource		RDT	Fed
2-2 : Amélioration de la qualité de la ressource	1 : Qualité de la ressource coproduits secs de l'agriculture et cultures dédiées agricoles			RE	Fed	2
	2 : Qualité de la ressource taillis à courte rotation et de la ressource forestière			RE	Fed	2
3 : Evaluation micro économique, environnementale de la ressource	3-1 : Microéconomie de la mobilisation de la ressource agricole	1 : Offre de co-produits et de ressources lignocellulosiques	RDT	Fed	2	
		2 : Consentement à offrir la matière première	RDT	Fed	2	
		3 : Modélisation de la demande en co-produits agricoles liés aux procédés de transformation	RDT	Fed	2	
		4 : Technologie et modélisation de la mobilisation de la ressource agricole	RDT	Fed	2	
	3-2 : Conditions d'une mobilisation accrue de la ressource forestière	1 : Anticiper le comportement des marchés du bois	RE	Fed	2	
		2 : Accroître l'offre compétitive de bois brut de la forêt privée et public	RE	Fed	2	
4 : Evaluation de scénarios de bassins d'approvisionnement avec une ressource contrastée	4-1 : Sélection de l'implantation géographique des sites		RDT	Fed	2	
		4-2 : Scénario à court terme (2010) : implantation	RDT	Fed	2	
		4-3 : Scénarios à moyen-long terme (2010-20) : enracinement	RDT	Fed	2	

## Module 2 : Thème – Conversion de la biomasse lignocellulosique par voie thermochimique

Tâche (sous-thème)	Sous-tâche (sous-thème secondaire)	Action	Intitulé	Nature du projet RE recherche exploratoire RDT rech. et dével. techno.	Type projet FED fédérateur SPEC spécifique	Phasage 1 ou 2
1	1.1		<b>Evaluation socio-technico-économique et environnementale</b> Analyse technique, économique et environnementale	RDT	FED	1
2			<b>Recherche et développement</b>			
	2.1		Pyrolyse rapide et production d'huiles de pyrolyse	RE	FED	1
	2.2		Gazéification locale	RDT	SPEC	1
	2.3		Réacteur haute température de gazéification à flux entraîné autothermique	RDT	FED	1
	2.4		Technologie lit mixte (lit entraîné et fluidisé)			
		2.4.1	<i>Pyrolyse rapide en lit entraîné à haute température</i>	RDT	FED	1
		2.4.2	<i>Gazéification en lit fluidisé à haute température et haute pression</i>	RDT	FED	1
		2.4.3	<i>Conversion des goudrons et du méthane dans un étage haute température</i>	RE	FED	1
	2.5		Procédés allothermiques : apports d'énergie externes			
		2.5.1	<i>Faisabilité d'une torche à plasma fonctionnant avec un gaz plasmagène</i>	RDT	SPEC	2
		2.5.2	<i>Reformage du gaz dans étage haute température chauffé par torche plasma</i>	RE	SPEC	2
		2.5.3	<i>Cinétique de gazéification directe de la biomasse dans un réacteur plasma</i>	RE	SPEC	2
	2.6		Synthèse Fischer-Tropsch	RDT	FED	1
	2.7		R&D générique			
		2.7.1	<i>Corrélation entre nature/composition et réactivité de la biomasse</i>	RE	FED	1
		2.7.2	<i>Utilisation de déchets</i>	RE	FED	1
		2.7.3	<i>Technologie de paroi haute température</i>	RDT	FED	1
		2.7.4	<i>Comportement des inorganiques</i>	RE	FED	1
		2.7.5	<i>Conditionnement du gaz de synthèse (traitement, séparation, purification)</i>	RE	FED	1
		2.7.6	<i>Modélisation et calculs procédés</i>	RE	FED	1
3			<b>Conception d'une plate-forme de développement</b>			
	3.1		Etude d'ingénierie	RDT	FED	2

### Module 3 : Thème - Conversion de la biomasse lignocellulosique par voie biologique

Intitulé		Nature du projet	Fédérateur (F) ou Spécifique (S)	Phasage
Tâche (sous-thème)	Sous-tâche (sous-thème secondaire)			
1. Substrats et prétraitements	1.2. Critères de qualité et de quantité de la ressource	RTD	F	1
	1.3. Prétraitement par voie physico-chimique	RTD	F	1
	1.4. Délignification par voie enzymatique	RE	F	1
	1.5. Bilans et comparaisons	RTD	F	2
2. Conception et production d'enzymes de saccharification	2.2. Recherche à haut débit d'enzymes auxiliaires	RE	F	1
	2.3. Amélioration des performances des enzymes ciblées	RE	F	1
	2.4. Analyse des protéomes de <i>Trichoderma reesei</i>	RE	F	1
	2.5. Modelage du génome de <i>T. reesei</i> pour la construction de souches spécialisées pour la saccharification de biomasse lignocellulosique	RE	F	1
	2.6. Production des enzymes fongiques à l'échelle laboratoire et pilote	RTD	F	1
	2.7. Génomique dynamique appliquée à <i>T. reesei</i>	RE	F	1
3. Hydrolyse enzymatique		RTD	F	1
4. Fermentation éthanolique des hydrolysats de lignocellulose	4.2. Sélection d'une souche de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	RTD	F	1
	4.3. Production de la souche de <i>S. cerevisiae</i> sélectionnée	RTD	F	1
	4.4. Construction d'une souche capable de fermenter les C5	RE	F	1
	4.5. Définition d'une stratégie de fermentation pertinente	RTD	F	1
	4.6. Extrapolation à l'échelle pilote	PEX	F	2
	4.7 Pertinence des co-cultures	RTD	F	2
5. Distillation – Traitement des effluents	5.1. Distillation et déshydratation	PEX	F	2
	5.2. Traitement des effluents	PEX	F	2
	5.3. Vinasses	PEX	F	2
	5.4. Coproduits	PEX	F	2
6. Intégration du procédé	6.1. Instrumentation	RTD-PEX	F	2
	6.2. Traitement des données	RTD-PEX	F	2
	6.3. Intégration des différentes étapes du procédé	RTD-PEX	F	2
7. Bilans ACV	7.1. Description de la méthode	RTD	F	1
	7.2. Recueil de la description des procédés	RTD	F	2
	7.3. Recueil des données massiques	RTD	F	2
	7.4. Recueil des données de consommation énergétique	RTD	F	2
	7.5. Imputation des consommations énergétiques aux différents produits obtenus	RTD	F	2
	7.6. Etablissement des bilans énergétiques			
	7.7. Identification des émissions de gaz à effet de serre	RTD	F	2
	7.8. Etablissement des bilans des émissions de gaz à effet de serre	RTD	F	2

**Module 4 : Thème - Evaluation socio-technico-économique et environnementale**

<b>Tâche (sous -thème)</b>	<b>Intitulé (sous -thème secondaire)</b>	<b>Nature du projet RE recherche exploratoire RDT Recherche et développement technologique</b>	<b>Type de projet FED: fédérateur</b>	<b>Phasage 1 ou 2</b>
1	Cadre méthodologique des évaluations	RE	FED	1
2	Bilans intra-filières énergétiques et comparaisons	RDT	FED	2

## **4. Descriptif du programme**

## **4.1. Module 1 "ressources lignocellulosiques"**

### **Objectifs et enjeux**

Les ressources lignocellulosiques peuvent constituer également des matières premières additionnelles pour la production de biocarburants par des voies biologiques ou thermochimiques. La biomasse considérée sera essentiellement d'origine végétale : résidus agricoles et forestiers, cultures dédiées , auxquels pourront être ajoutés certains déchets comme les déchets urbains ou de station d'épuration. Il apparaît comme important de pouvoir évaluer ces ressources tant en terme de qualité que de quantité, en prenant aussi en compte les usages concurrentiels.

Compte tenu de l'état de l'art tant au niveau national, qu'international (UE, Etats-Unis, Brésil...), le programme de recherche proposé s'appuie essentiellement sur une démarche « bottom-up » à l'échelle d'un bassin d'approvisionnement défini par la technologie de transformation envisagée, soit de la parcelle agricole et/ou forestière à l'usine de transformation. En effet, si l'on dispose aujourd'hui d'inventaires des gisements de biomasse, ceux-ci ont été réalisés aux échelles nationale et des grandes régions administratives .

Dans ces conditions, le programme proposé s'organise autour de quatre thèmes majeurs, largement interdépendants et en connexion avec certaines tâches des autres modules technologiques concernant les voies de conversion thermochimique et biologique :

- **Tâche 1** : Evaluation technique du gisement en ressource lignocellulosique mobilisable à l'échelle de la parcelle, conséquences logistiques, économiques et environnementales
- **Tâche 2** : Adéquation de la qualité de la ressource lignocellulosique aux technologies de transformation envisagées (thermochimie, voie fermentaire),
- **Tâche 3** : Evaluation micro et macro-économique, environnementale des filières de productions lignocellulosiques,
- **Tâche 4** : Evaluation de scénarios concrets appliqués à des régions présentant une ressource lignocellulosique contrastée.

### **Tâche 1 : Evaluation technique du gisement en ressource lignocellulosique mobilisable à l'échelle de la parcelle, conséquences logistiques, économiques et environnementales**

#### **Objectif**

La ressource lignocellulosique considérée sera la biomasse lignocellulosique d'origine végétale soit : les déchets d'origine urbaine, les co-produits agricoles (paille...) ainsi que les déchets issus de la collecte et de la première transformation, les cultures dédiées herbacées (triticale, Miscanthus...) ou ligneuses (peuplier...) et les ressources forestières actuellement non utilisées par les filières de transformation classiques (produits de première éclaircie par exemple). On dispose aujourd'hui de nombreux inventaires de ce gisement potentiel, notamment pour les déchets secs, les co-produits agricoles et la ressource forestière proprement dite. Ces inventaires sont issus d'études régionales, nationales (ADEME/AGRICE, ...) et européennes (Joule, AIR, FAIR, ALTENER...) conduites à la suite des chocs pétroliers des années 80.

Ces inventaires qui ont été conduits au niveau national ou à l'échelle de grandes régions administratives, ne permettent pas une approche spatialisée au niveau d'un bassin d'alimentation d'une unité industrielle de production de biocarburants. Par ailleurs, ces informations ne sont pas (ou trop peu) documentées quant au contexte pédoclimatique, socioéconomique, environnemental ou technique

Pour répondre aux enjeux, il va être nécessaire :

- a) d'établir, à partir des informations existantes, un référentiel des gisements mobilisables connecté au contexte pédoclimatique, socioéconomique, environnemental et technique,

- b) d'établir un réseau de sites expérimentaux afin d'une part de fournir une matière première « caractérisée » pour les pilotes industriels et d'autre part d'établir ou compléter les références techniques et environnementales (rendement, qualité, itinéraires techniques, émissions au champ) pour les espèces les moins documentées (annuelles « plante entière », pérennes herbacées et pérennes ligneuses, et ressources forestières, notamment)
- c) d'élaborer des modèles de production spatialisés pour les différentes espèces, suffisamment génériques pour être transposables aisément à des espèces voisines. La base méthodologique de ces modèles pourra être issue des modèles déjà développés pour les espèces alimentaires
- d) d'élaborer des modèles d'émissions pour évaluer les impacts environnementaux liés à la partie agricole de cette filière biocarburants.
- e) d'estimer les impacts socio-économiques et environnementaux de la production à grande échelles de cultures dédiées

### **Sous-tâche 1.1 : Elaboration d'un référentiel des ressources lignocellulosiques**

#### **Action 1 : Déchets autres que les coproduits issus de l'agriculture et de la forêt**

Réalisation d'une recherche exhaustive des flux de déchets pouvant rentrer d'un strict point de vue réglementaire dans un processus de production de biocarburant. Pour réaliser ce travail, les documents de base sont la liste européenne des déchets (cf ADEME) et la directive européenne 2003/30/CE définissant les termes « biocarburant », « biomasse », « autres carburants renouvelables » au sens de la directive 2001/77/CE.

Ensuite seront retenus dans la liste exhaustive, les déchets provenant majoritairement de biomasse végétale (excluant les déchets constitués ou provenant de tissus animaux). Cette liste constituera le gisement susceptible d'être intégré à un gisement majoritaire de biomasse lignocellulosique.

#### **Action 2 : Coproduits secs issus de l'agriculture, de sa filière collecte et première transformation**

A partir des études et références existantes au niveau national, mise en place d'un référentiel exhaustif sous forme d'une base de données sur les différents coproduits secs issus de l'agriculture (paille de céréales, rafles de maïs...). Analyse critique des données existantes quant à leur niveau de documentation (localisation géographique, technique, organisation de la collecte, socio-économique, environnemental...), possibilité d'extrapolation et de spatialisation permettant d'envisager une utilisation directe dans les tâches 3 et 4.

#### **Action 3 : Cultures dédiées : annuelles, pérennes herbacées, pérennes ligneuses**

A partir des études et références existantes au niveau national et international notamment européen, mise en place d'un référentiel sur les différentes cultures dédiées : des espèces annuelles (triticale, sorgho...) aux pérennes herbacées récoltées annuellement (*Miscanthus*, *Arundo donax*...) ou pérennes ligneuses récoltées toutes les  $x$  ( $x = 3$  à  $7$ ) années (taillis à courte rotation (TCR) de peuplier, eucalyptus, saule...). Analyse critique des données existantes quant à leur niveau de documentation (localisation géographique, technique, organisation de la collecte, socio-économique, environnemental...), possibilité d'extrapolation, de spatialisation et de représentation cartographique des aires potentielles de production, permettant d'envisager une utilisation directe dans les autres tâches du programme notamment les tâches 3 et 4.

#### **Action 4 : Evaluation des informations existantes pour la ressource bois forestière.**

A partir des études et références existantes au niveau national, mise en place d'un référentiel sur la ressource en plaquette forestière (rémanents, bois d'éclaircie etc.). Analyse critique des données existantes quant à leur niveau de documentation (localisation géographique, technique, organisation de la collecte, socio-économique, environnemental...), possibilité d'extrapolation et de spatialisation permettant d'envisager une utilisation directe dans les autres tâches du programme.

Les actions 1, 2, 3 et 4 constituent un jalon important au terme des 18 premiers mois du programme. En effet, cet état des lieux documenté offrira une première représentation des potentialités régionales françaises intégrant ressources forestières, agricoles et déchets biomasse, à même d'orienter les choix

de la tâche 4. Ces actions pointeront aussi les données et connaissances manquantes des processus de mobilisation des biomasses qui permettront le cas échéant d'optimiser les contenus expérimentaux des sous-tâches 1-2 et 1-3. Enfin elles fourniront une architecture de base de données qui sera structurante pour la suite du programme.

### **Sous-tâche 1-2 : Mise en place et suivi de sites expérimentaux de production**

Ce réseau de sites expérimentaux a un double objectif : d'une part, fournir une matière première caractérisée (itinéraire technique, condition de production...) et en quantité suffisante pour les expérimentations au niveau des process industriels et d'autre part, établir ou compléter les références techniques et environnementales (rendement, qualité, itinéraires techniques, émissions au champ) pour les espèces les moins documentées (annuelles « plante entière », pérennes herbacées et pérennes ligneuses et ressources forestières notamment).

Ce réseau présente quatre déclinaisons :

- a) un réseau « qualité de la matière première » Paille et Cultures annuelles (triticale) à partir d'un réseau multilocal et pluriannuel existant (Arvalis) depuis 2000 et en voie d'extension
- b) un réseau Cultures annuelles (4 à 5 espèces dont triticale, sorgho fibre,..) et Cultures pérennes herbacées (4 espèces dont miscanthus, panic érigé..) dédiées à l'énergie, articulé autour de deux plate-formes expérimentales, l'une, existante, située au Nord (INRA) et l'autre, à créer, dans le Sud-Ouest (GIE ARVALIS/ONIDOL). Les dispositifs combineront petites parcelles pour les tests et observations agro-physiologiques et environnementaux de précision et grandes parcelles pour l'évaluation, en condition agricole, des itinéraires techniques et de collecte.
- c) un réseau Taillis à courte rotation (peuplier, eucalyptus) à partir du réseau existant de l'AFOCEL
- d) un réseau de parcelles de production de plaquettes forestières à partir du réseau existant de l'UCFF

A la fin des 18 premiers de programme, un bilan sur la qualité d'implantation et le niveau d'équipement de ces sites sera conduit afin d'envisager certaines actions correctives telles que un complément de semis, une localisation supplémentaire, une modification des méthodes de conduite technique ou un équipement supplémentaire.

Les différents suivis et mesures effectués sur ces sites sont développés dans les tâches adhoc, notamment la tâche 1-3 et 2. Les produits récoltés seront caractérisés pour leurs propriétés physiques et chimiques selon les principes décrits dans la tâche 2.

### **Sous-tâche 1-3 : Acquisition des références techniques et modélisation des conditions de mobilisation de la ressource lignocellulosique au niveau du gisement élémentaire**

#### **Objectif :**

- Fournir les bases techniques, logistiques, économiques, environnementales absentes ou insuffisamment documentées pour les différentes ressources lignocellulosiques envisagées dans l'esprit d'une approche « bottom-up » c'est-à-dire de la parcelle, du gisement élémentaire à l'usine de production de biocarburants
- Evaluer, par département, les volumes théoriques des différentes ressources et leur coût de mobilisation permettant de déterminer les bassins d'approvisionnement les plus favorables à l'installation d'unités de production (cf Tâche 4)

#### **Méthode :**

- Appuyer l'expérimentation sur le réseau défini en sous-tâche 1-2 et les conclusions de l'état des lieux documenté réalisé dans la sous-tâche 1-1
- Centrer l'expérimentation sur un nombre réduit d'espèces dites « modèles »,
- Elaborer des modèles de comportement génériques aisément extrapolables à d'autres espèces similaires

### **Action 1 : Coproduits secs de l'agriculture et cultures annuelles dédiées**

En utilisant la paille de céréales comme modèle de coproduits secs issus de l'agriculture et le triticale comme modèle de culture annuelle dédiée, les opérations suivantes sont envisagées :

- a) Détermination pour les cultures annuelles dédiées étudiées d'itinéraires techniques à faible niveau d'intrants et répondant aux exigences de qualité des process énergétiques considérés (tâche 2)
- b) Mesures des potentiels de production de biomasse et des critères de qualité au cours du cycle des cultures annuelles conduites selon les itinéraires définis en a)
- c) Expérimentation et définition de nouvelles chaînes de conditionnement/approvisionnement (broyage et densification par exemple) en relation avec des équipementiers et les acteurs des deux GTs « technologies de conversion »
- d) Amélioration et calibrage des outils d'analyse de la mobilisation de ce type de gisement : technique de collecte/conditionnement, stockage et logistique, modes d'organisation et contractualisation,
- e) Elaboration des coûts de production et de revient à chaque étape de la chaîne, selon un modèle numérique paramétrable,
- f) Evaluation et modélisation des impacts environnementaux notamment le bilan Carbone/Azote du sol, une adaptation des modèles existants pour les cultures alimentaires est envisageable
- g) Elaboration de scénarios d'enlèvement des pailles prenant en compte les résultats de f) et de la tâche 3 (aspect consentement à offrir notamment) ainsi que les compétitions d'usage pour définir les niveaux de mobilisation possibles des pailles compatibles avec le maintien de la fertilité des sols et l'acceptabilité des agriculteurs. Spatialisation des potentiels disponibles.
- h) Elaboration de scénarios d'introduction de cultures énergétiques annuelles dans des rotations culturales types prenant en compte les résultats de c) de la sous-tâche 3-1 et les perspectives de compétition d'usage
- i) Développement d'outils de spatialisation et de transposition à d'autres espèces ou coproduits si nécessaire et évaluation des ressources potentielles à l'échelle des départements
- j) Réalisation d'une ACV de la production jusqu'à la transformation pour le cas d'un co-produit sec type paille et d'une culture annuelle modèle

Les travaux des 18 premiers mois seront concentrés pour les actions a), b), c) à des tests de réponse à un itinéraire technique par espèce type que l'on aura dégagé de la sous-tâche 1-1 et à une méthode de récolte élaborée sur les mêmes bases. Le résultat de ces essais constituera un jalon qui nous permettra de valider ou corriger nos dispositifs expérimentaux et d'orienter, les contenus de recherche. Les résultats de la tâche 2, dont un jalon important sera placé à 18 mois impacteront aussi la suite des travaux. Pour les autres actions, les 18 premiers mois seront surtout consacrés à de l'analyse de transposition de modèles au cas des cultures énergétiques et à de la mise au point de méthodes.

### **Action 2 : Cultures pérennes herbacées et récoltées annuellement**

De nombreuses espèces peuvent être envisagées dans le contexte pédoclimatique français notamment : *Miscanthus*×*Giganteus* (appelée par la suite *Miscanthus*), une graminée originaire d'Asie, *Arundo Donax* (appelée par la suite *Arundo*), une graminée originaire de la région méditerranéenne et *Panicum virgatum* (appelée par la suite *panic érigé*), une graminée de type C4 originaire des Etats-Unis. Elles ont été étudiées notamment dans le cadre de projets européens auxquels ont participé l'INRA et le GIE Arvalis-Onidol. Ces espèces sont souvent des graminées de type C4 qui présentent une efficacité de la photosynthèse ainsi qu'une efficacité en eau supérieure aux espèces alimentaires classiques de type C3 (sauf le maïs).

Dans le cadre de cette action, le *Miscanthus* sera retenu comme plante modèle.

En utilisant le miscanthus comme modèle, les opérations suivantes sont envisagées :

- a) Analyse des conditions optimales tant au niveau technique qu'économique pour l'implantation de ce type de culture, à partir du réseau de sites expérimentaux défini,
- b) Suivi des critères de qualité (cf tâche 2) et de rendement au cours des différents cycles de végétation et adaptation d'un modèle de production de biomasse totale à partir d'un modèle type CERES-EGC développé par l'INRA. La validation du modèle pourra se faire à partir du réseau de sites expérimentaux définis dans la sous-tâche 1-2,
- c) Mesure et modélisation des émissions ou flux/stock ayant un impact environnemental notamment le bilan de carbone et d'éléments minéraux (azote) sur des échelles de temps longues,
- d) Définition des itinéraires techniques adéquats ainsi que de la chaîne de matériel et logistique à mobiliser. L'expérimentation avec de nouvelles chaînes de conditionnement (cf Action 1) peut être appliquée à ces espèces,
- e) Evaluation du changement d'échelle : de la parcelle expérimentale à une parcelle d'exploitation. Cette évaluation devra être conduite sur les aspects niveau de production, contraintes techniques et conséquences microéconomiques
- f) Elaboration des coûts de production et de revient à chaque étape de la chaîne, selon un modèle numérique paramétrable
- g) Développement d'outils/modèles de spatialisation permettant de répondre à la tâche 4 « Evaluation de scénarios concrets »
- h) Analyse des conditions de transposition à d'autres espèces si nécessaire (Arundo, Switchgrass, Phalaris...)
- i) Elaboration de scénarios d'introduction de cultures énergétiques dédiées dans des rotations culturales
- j) Réalisation d'une ACV de la production jusqu'à la transformation pour le cas de l'espèce modèle

### **Action 3 : Taillis à courte rotation (TCR)**

Deux modèles sont retenus : le peuplier bien adapté à la moitié nord de la France, aux vallées fluviales de la Seine, de la Loire et de la Garonne, et l'eucalyptus bien adapté au sud-ouest de la France.

#### **Objectifs :**

1. Conditions techniques de mobilisation : étudier la faisabilité et comparer différents schémas logistiques de mobilisation de la ressource issue des TCR en tenant compte des autres usages (plaquettes papetières, bois énergie).
2. Estimation du coût rendu unité de transformation : analyser le prix de la biomasse rendue à l'unité de production suivant différents schémas logistiques.
3. Condition de développement des TCR : étudier les conditions socio-économiques de l'acceptabilité des TCR à des fins d'utilisation mixte ou à des fins d'utilisation en biocarburants.
4. Estimer les impacts possibles sur l'environnement de cultures de TCR à grandes échelles.

#### **Méthode :**

Conditions techniques de mobilisation

- a) Expérimenter les nouveaux équipements d'exploitation utilisables pour les TCR (abatteuse - groupeuse). Expérimentation et définition de nouvelles chaînes de conditionnement (mise en fagot), des chaînes logistique et de broyage associés Produire les données de productivité nécessaires pour compléter les modèles existants (voir tâche ci dessous).
- b) Décrire, sur la base des tests déjà réalisés et en synergie avec l'action sur le déchetage des plaquettes forestières (tâche 1.3.4), les schémas logistiques pertinents pour la mobilisation de la ressource issue des TCR (arbres entiers déchetés sur coupe, billons déchetés bord de route, billons déchetés sur parc). La partie logistique doit considérer l'approvisionnement direct et la rupture de charge associée au stockage.
- c) Au sein des départements identifiés comme favorables à la culture des TCR et retenus dans la phase 4, repérer les zones géographiques les plus propices.

Estimation du coût rendu unité de transformation

- d) Modéliser la production moyenne des TCR de peuplier et d'eucalyptus en s'appuyant sur le logiciel « TCR »<sup>1</sup> de l'AFOCEL.
- e) Evaluer le prix de revient en fonction des différents scénarios de mobilisation retenus.

Condition de développement des TCR

- f) Estimer les impacts socio-économiques du schéma TCR pour l'approvisionnement d'une unité de production.
- g) Réaliser un audit patrimonial pour définir les conditions d'acceptabilité (planteurs potentiels, population, identifier les points de synergie et de concurrence avec les autres usages ...) et de faisabilité des plantations de TCR de peuplier et d'eucalyptus en utilisant des techniques d'audit existantes (répertorier les opportunités, les blocages et les incertitudes).
- h) Dégager des stratégies d'action pour renforcer l'intérêt des TCR auprès des planteurs potentiels.

Impacts sur l'environnement

- i) Estimer les impacts possibles sur l'environnement de cultures à grandes échelles de TCR
  - Analyse de cycle de vie depuis la pépinière jusqu'à l'unité de transformation
  - Evaluer les impacts sur l'environnement (eau, faune, flore, impacts sur le paysage, ...)

#### **Action 4 : La ressource forestière**

##### **Objectifs :**

La ressource forestière française est abondante, hétérogène et parfois difficile à mobiliser. L'objectif de l'action est d'analyser finement la mise à disposition de bois en grande quantité pour l'énergie ( la ressource nette ) et mesurer les impacts selon les indicateurs du développement durable (économique, sociale et environnemental).

Le travail apportera des réponses au niveau qualitatif (répondre au cahier des charges de la production de biocarburants) et économique. L'objectif est aussi d'établir des orientations et un plan de développement à l'horizon 2015-2020. Chaque étape devra permettre de fournir un outil adapter aux besoins des acteurs du marché.

#### **a) Analyse et modélisation des disponibilités (en complément des études déjà réalisées, action 4 de la sous-tâche 1)**

- Le résultat attendu : un outil d'analyse de l'offre de bois (cartographie régionale) permettant de prendre en compte , le prix du bois, les consommations et implantations des projets, les projets multiples, et donner des informations sur des indicateurs sociaux économiques.
- L'approche retenue : réalisation de l'outil d'analyse des disponibilités en collaboration avec les acteurs forestiers.
- En lien avec la bibliographie (action 4 de la sous-tâche 1) et l'analyse des conditions de mobilisation accrue de la ressource forestière (sous-tâche 3-2).

##### **a1) Quantifier la ressource**

Estimer et prévoir la ressource en biomasse forestière disponible pour l'énergie en fonction : du cahier des charges, des types de biomasses disponibles, des besoins des consommateurs concurrents (bois d'œuvre / bois de trituration / bois énergie et biocarburant) et du prix de revient.

La demande sera caractérisée par l'identification bibliographique des données statistiques existantes.

##### **a2) Mobiliser la ressource**

Cette mobilisation demande d'associer l'ensemble des acteurs (propriétaires forestiers privés et publics, propriétaires agricoles, coopératives, exploitants et entrepreneurs forestiers,...) pour identifier :

- les conditions de sécurisation des approvisionnements (ce qui demande notamment d'identifier les structures de mobilisation) et les concurrences ;

---

<sup>1</sup> Ce logiciel a été réalisé par l'AFOCEL dans le cadre d'une collaboration avec l'ADEME en 1995.

- l'acceptabilité et les consentements à offrir en lien avec l' action 2 de la sous-tâche3-1 (Consentement à offrir la matière 1<sup>ère</sup>) et la sous-tâche 3-2 (Conditions de mobilisation accrue de la ressource forestière) ;
- l'organisation du jeu des acteurs et l'organisation sociale du système.

a3) Mise en place de l'outil cartographique de repérage de la ressource forestière

- Synthèse des points faibles et des points forts des différents systèmes SIG utilisés dans des applications forestières. Synthèse de leur cohérence, de leur compatibilité, et de l'état d'avancement de leur mise en application concrète.
- Compréhension des besoins, des possibilités d'utilisation partielle des produits existants et rédaction du cahier des charges des développements complémentaires ou de l'adaptation des bases de données forestières s'appuyant sur des programmes de travaux et de coupe (UCFF, ONF). L'objectif est de constituer une base de données interprétable sous SIG permettant de stocker les prévisions de récoltes potentielles de biomasse liées aux documents de gestion forestière. Le SIG devra intégrer l'identification des itinéraires logistiques en tenant compte des plates formes de stockage.
- Mise en place d'un ou plusieurs outils d'analyse de l'offre et de la demande par besoin (SIG, logiciel régional d'analyse énergétique, prédiction des consommations et implantations des projets, carte de ressource, intégration des contraintes et des concurrences, prises en compte de projets multiples, y compris l'évaluation des indicateurs sociaux économiques) en collaboration avec les acteurs forestiers.
- Les tests de l'outil se feront sur une région ou un site. L'identification des données et leur intégration dans la base pour la région déterminée autour de ce site, permettront d'obtenir des valeurs concrètes.

#### **b) Impacts possibles sur l'environnement**

- b1) Mesurer les effets sur l'environnement de l'exploitation forestière pour l'énergie/carburant (méthode Analyse de cycle de vie, conformément à la série des normes ISO 14040) depuis la pépinière jusqu'au km parcouru ;
- b2) Mesurer l'impact d'un prélèvement à haute densité sur les écosystèmes forestiers et évaluer les impacts sur l'environnement (faune, flore, réduction émissions polluantes, air, eau, sol).
- b3) Etablir des recommandations et proposer des voies de correction et d'amélioration

#### **c) Chaîne de production et de récolte, recherche et modélisation des solutions d'organisation les mieux adaptées**

- c1) Analyser et tester les modèles de chantiers forestiers, y compris les matériels de grandes puissances : adapter et optimiser les données de production (fiabiliser les données technique et économique de récolte/logistique et de stockage (chaîne d'approvisionnement).
- c2) Evaluer les systèmes de logistique à flux tendus ou avec rupture de charge
- c3) Identifier, fiabiliser et modéliser les conditions optimales de stockage et de conservation de la plaquette forestière.

#### **d) Scénarios prospectifs basés sur modèles de croissance**

Proposer des scénarios de mobilisation de la ressource aux horizons 2015-2020.

Afin de tenir compte de la contribution de la filière forestière aux usages énergétiques, il est indispensable de tenir compte des usages complémentaires ( bois d'œuvre et bois d'industrie), de leur situation actuelle, et de leur probables évolutions au cours des 10/15 prochaines années.

Les contributions étudiées seront directement dépendantes des évolutions des filières existantes. Leur état actuel et leurs évolutions seront pris en compte ( interrogations d'experts et enquête).

## **Tâche 2 : Adéquation de la qualité de la ressource lignocellulosique aux technologies de transformation envisagées (thermochimie, voie biologique)**

### **Enjeux :**

La performance d'une chaîne de production dépend autant de la cohérence ou de l'homogénéité de cette chaîne que de la performance intrinsèque d'un des segments. Cette remarque s'applique particulièrement aux aspects « qualité » de la matière première lignocellulosique et son adéquation aux processus industriels envisagés.

Par ailleurs, comme la production de biocarburants est envisagé par deux voies différentes, schématiquement une voie sèche thermochimique et une voie humide biologique (hydrolyse enzymatique et fermentation), les critères de qualité requis pour chacune des voies peuvent être antagoniste, complémentaire. Ils devront dans tous les cas être analysés dans leur interaction avec les différentes étapes du process.

Les critères requis pour la voie humide biologique (hydrolyse enzymatique et fermentation) ne sont pas à ce jour connus, évalués avec le même niveau de fiabilité que pour la voie thermochimique.

### **Objectifs :**

- Apprécier l'influence des propriétés des différentes matières premières à même de pouvoir alimenter une unité industrielle.
- Evaluer les possibilités d'optimisation et d'amélioration de ces critères par des actions lors de la phase de production, collecte et stockage de la ressource lignocellulosique

Une liaison avec le groupe de travail traitant des analyses multi-critères sur l'ensemble du cycle du carburant, de la production des matières premières à l'utilisation dans un véhicule sera nécessaire de manière à éviter les éventuels transferts de pollution. De même, une interaction forte avec les groupes de travail sur les procédés sera également nécessaire.

La conduite des travaux se fera en deux étapes :

### **Sous-tâche 2-1 : Elaboration d'un référentiel de la qualité de la ressource lignocellulosique pour un process donné**

En collaboration étroite avec les technologues des deux voies de production de biocarburants et à partir des études et références existantes au niveau national et international notamment européen :

- mise en place d'un référentiel exhaustif, sous forme d'une base de données à créer, sur les différents critères de qualité concernant le spectre étudié de ressources lignocellulosique – du déchet au bois en passant par les cultures dédiées.
- analyse critique des données existantes quant à leur niveau de documentation (localisation géographique, technique, organisation de la collecte, socio-économique, environnemental...), possibilité d'extrapolation et de spatialisation permettant d'envisager une utilisation directe dans les autres tâches du programme.
- description de l'influence attendue des différents critères en terme technique, économique et environnementale sur la filière.
- identification des critères de qualité déterminants qui justifieront une optimisation ou amélioration.

Cette sous-tâche comporte deux phases :

- Phase 1 (préliminaire pour l'ensemble du programme) : Etablissement et homogénéisation de la liste des critères destinés à la caractérisation et à la sélection des différents types de ressources, adaptés à la conversion thermochimique.
- Phase 2: Mise en place d'une banque de données, alimentée par les données bibliographiques disponibles, et complétée par des essais ou mesures complémentaires.

**Objectifs :** Compte tenu de la grande variabilité apparente des produits susceptibles d'être retenus pour subir, d'abord les traitements thermiques de gazéification, puis, la synthèse de carburants liquides, il est nécessaire d'établir, dès le lancement du programme, une liste des paramètres qui permettront de caractériser, puis de sélectionner, les produits méritant d'être effectivement retenus pour figurer sur la liste constitutive de la véritable «ressource potentielle».

**Liste des critères à considérer :** Pour permettre une bonne indépendance, dans le déroulement du programme, une règle commune doit être établie entre les différents partenaires, et des conditions d'interface doivent être précisées entre les groupes appelés à travailler, soit sur la ressource, soit sur le procédé de transformation.

Les points suivants devront être définis en commun :

1. L'origine des produits étudiés sera précisée (pour référence à différentes législations ou pour appartenance à différentes classes de tarification), selon une classification, à confirmer, comme par exemple :
  - Coproduits de l'agriculture alimentaire.
  - Cultures dédiées.
  - Produits forestiers ou résidus de 1ère et 2ème transformation.
  - Déchets industriels banals.
  - Déchets spéciaux : Ménagers ou urbains, industrie agro-alimentaire, boues de papeteries, boues d'épuration des eaux,...
2. Conditionnement standard ou spécifique : Une concertation sera établie entre les « producteurs », du groupe ressource, et les « utilisateurs », du groupe transformation thermo-chimique, pour rechercher la forme optimale sous laquelle la ressource sera présentée à l'usine de transformation. Dans la mesure du possible, le conditionnement des produits sera réalisé en utilisant les standards existants (paille, en bottes pressées ou rouleaux, bois en plaquettes déchiquetées, etc.) Pour le cas où d'autres formes ou d'autres spécifications s'avèreraient souhaitables, leur incidence devra être identifiée.
3. Critères de caractérisation : Pour permettre de sélectionner les types de produits utilisables conjointement, et pour l'ajustement des paramètres du procédé de transformation, les caractéristiques suivantes devront être déterminées (si elles ne sont pas déjà connues):
  - Productivité annuelle, calendrier de récolte et possibilité d'étalement.
  - Densité de la matière massive et densité apparente, selon conditionnement.
  - Granulométrie et porosité, ou perte de charge en fonction d'un débit gazeux.
  - Taux d'humidité et variabilité selon traitement, et coût correspondant.
  - Cinétique de séchage en fonction de la température et de la granulométrie.
  - Teneur en poussières et variabilité selon traitement, et coût correspondant.
  - Composition initiale : C,H,O d'une part, inorganiques ou minéraux d'autre part, avec S, Cl, N, et métaux lourds, en particulier.
  - Composition des produits de combustion (cendres), et températures de fusion.
  - Coût de livraison à l'usine, en fonction de la quantité et, du pré traitement appliqué (type de conditionnement, taux d'humidité, taux de poussières, etc..).
  - Les propriétés thermodynamiques des produits considérés (chaleur spécifique, chaleur de transformation, PCI, etc..), et leur composition en fin de thermolyse ou de gazéification, seront directement déterminées par le groupe en charge des études de la transformation thermo-chimique.

## **Sous-tâche 2-2 : Amélioration de la qualité de la ressource lignocellulosique pour un process donné**

### **Objectif :**

Pour chaque process industriel étudié et après concertation avec les technologues, qualification de la qualité de la biomasse lignocellulosique requise pour la production de biocarburants et proposition d'itinéraires techniques culturels ou de mobilisation adaptés.

## **Deux actions principales sont envisagées :**

### **Action 1 : Qualité de la ressource coproduits secs de l'agriculture et cultures dédiées agricoles**

- Mesurer les critères identifiés pour qualifier la ressource (humidité, granulométrie, taux de cendres résiduels, métaux lourds, capacité calorifique, taux et types de sucres, bilan minéralomasse ...), les normaliser et définir le cahier des charges pour la production de biocarburants.
- Evaluer les meilleures pratiques culturales pour l'amélioration de la qualité de la ressource lignocellulosique en s'appuyant sur le réseau d'essais défini dans la sous-tâche 1-2 et la mise en œuvre d'essais réalisés dans la sous-tâche 1-3 (rotations, traitements phytosanitaires, fertilisation, choix des variétés, matériel de collecte, logistique et stockage...).

### **Action 2 : Qualité de la ressource taillis à courte rotation et de la ressource forestière**

1. Compléter la caractérisation disponible à l'heure actuelle sur la ressource sur pied et/ou sur site industriel (humidité, taux de cendres résiduels, métaux lourds, capacité calorifique, composition chimique détaillée, notamment pour les sucres qui composent les polysaccharides, bilan minéralomasse, potentiel pyrolytique, qualité des plaquettes,...), et définir le cahier des charges pour la production de biocarburants.
2. Evaluer l'utilisation de techniques de prédiction rapide de qualité de la ressource (notamment la spectroscopie proche infrarouge) sur site de production.
3. Evaluer les meilleures pratiques culturales, itinéraires sylvicoles et techniques de récolte pour l'obtention d'un produit répondant aux cahiers des charges « biocarburant » en s'appuyant
  - sur les essais de TCR suivis par l'AFOCEL (rotations, traitements phytosanitaires, fertilisation par épandage de sous-produits industriels et des collectivités...).
  - sur les essais sur parcelle forestière de l'UCFF.

## **Tâche 3 : Evaluation micro économique, environnementale de la ressource lignocellulosique**

### **Objectifs :**

L'apparition d'un nouveau et important débouché pour les productions lignocellulosiques risque de perturber l'ensemble des marchés préexistants. Anticiper les mouvements de l'offre et de la demande de ces différents produits contribue à la détermination des politiques publiques d'accompagnement de ce projet et renseigne les acteurs privés pour leur permettre d'adapter leurs stratégies. L'objectif est d'assurer la pérennité de l'approvisionnement de tous les marchés dans une perspective de croissance de l'offre de biomasse lignocellulosique.

Le décideur public doit pouvoir évaluer les coûts et bénéfices de la filière en terme économique mais aussi en terme d'externalités pour ajuster son action.

Pour répondre à ces deux objectifs, il est nécessaire de :

- déterminer les conditions microéconomiques de pérennité de l'offre de produits lignocellulosiques issue de cultures dédiées en fonction des usages alternatifs des sols
- évaluer les impacts sur les différents marchés de biens substituables (volume, prix) au niveau national, de l'apparition de nouveau débouché.
- estimer les conséquences économiques de la création de la filière (emploi, revenu, aménagement du territoire...) au niveau national et au niveau du bassin d'approvisionnement
- déterminer les impacts environnementaux (notamment effet de serre)

On dispose des méthodologies pour élaborer les coûts privés des biocarburants à une échelle nationale en fonction d'hypothèses de demande. Ainsi, l'INRA, a mis au point une méthode d'élaboration des coûts privés en faisant appel à un modèle d'équilibre partiel ; ce modèle a été appliqué aux

biocarburants classiques. Il s'agit d'un modèle multi-filières-multi-agents permettant une approche systémique de l'ensemble des filières<sup>2</sup>. Ce travail de l'INRA comporte une modélisation détaillée de l'offre agricole en fonction des régions et du contexte de la PAC. Plus d'un millier d'exploitations provenant du RICA (Réseau d'information comptable agricole) sont modélisées avec leurs contraintes techniques de production.

En revanche, la transformation et la demande de co-produits seront formalisées de façon moins approfondie.

Pour répondre aux enjeux, il va être nécessaire :

i) pour la ressource agricole :

- d'introduire les filières lignocellulosiques, notamment les cultures dédiées pérennes, dans le modèle multi-filières, multi-agents
- d'adapter le modèle multi-filières, multi-agents pour passer des coûts privés aux coûts publics ou pour tenir compte de critères de choix multiples.

ii) pour la ressource forestière

- d'élaborer une maquette d'économie expérimentale pour anticiper le comportement des marchés des produits forestiers,
- de déterminer les conditions socioéconomiques d'extension de l'offre de produits forestiers.

iii) pour les impacts économiques et environnementaux

- d'élaborer des méthodes d'évaluation des impacts macro-économiques (coûts, emplois, consommation en énergie fossile) et environnementaux
- de définir des fonctions de coût public agrégeant les effets précédents ou de procéder par des approches multicritères

### **Sous-tâche 3-1 : Microéconomie de la mobilisation de la ressource lignocellulosique agricole**

#### **Action 1 : Offre de co-produits et de ressources lignocellulosiques**

L'INRA dispose actuellement d'un modèle d'offre de productions alimentaires et non alimentaires représentant la diversité de l'agriculture française grâce à un échantillon de plus de mille exploitations, localisées au niveau cantonal. Cet outil donne actuellement les coûts d'opportunité des ressources utilisées par les filières classiques en fonction d'hypothèses de demande et des évolutions de la PAC (compromis de Luxembourg, réforme de l'OCM sucre). Parallèlement, on peut connaître les effets de la production de ressources énergétiques sur le revenu agricole et sur l'offre alimentaire.

Les coûts et les contraintes agronomiques concernant les ressources lignocellulosiques agricoles vont être introduits dans ce modèle. Pour cela, on utilisera tout un ensemble de travaux existants ou à venir sur la disponibilité de ces ressources, sur les coûts de production et de collecte qui ont été réalisés ou qui vont être réalisés par les autres participants au programme (cf tâche 1) Ces travaux vont être faits à une échelle régionale, pour différents contextes agricoles et pédoclimatiques, ce qui permettra une spatialisation des références. Pour la paille de céréales ainsi que pour le triticale, la spatialisation des références et leur insertion dans le modèle d'offre ne devraient pas poser de difficultés majeures. Par contre pour les productions pérennes, Miscanthus, Taillis à courtes rotations, ayant des exigences agronomiques sans doute fort différentes des cultures pratiquées actuellement par les agriculteurs, l'estimation d'une variabilité spatiale des coûts et des surfaces en terre aptes à recevoir ces productions (surfaces et localisations) sera sans doute plus sommaire, au moins dans un premier temps.

De même, les coûts et les contraintes sylvicoles concernant la ressource lignocellulosique forestière vont être introduits dans ce modèle. Pour cela, on utilisera un ensemble de travaux existants ou à venir sur la disponibilité de cette ressource, sur les coûts de production et de collecte qui ont été ou vont être réalisés par différents participants au programme (UCFF, AFOCEL, ADEME).

---

<sup>2</sup> En raison de leur interdépendance, les filières doivent être étudiées globalement et non séparément

Ces travaux seront faits à une échelle régionale, pour différents contextes sylvicole et pédoclimatiques, ce qui permettra une spatialisation des références. La sylviculture traditionnelle ayant des exigences agronomiques fort différentes des cultures agricoles, l'estimation d'une variabilité spatiale des coûts et des surfaces en parcelles aptes à suivre des itinéraires sylvicoles particuliers sera sans doute sommaire, au moins dans un premier temps.

Les concurrences entre usages au niveau de l'exploitation des forêts (papeteries, plaquettes destinées au chauffage bois dont les besoins devraient augmenter de 50%) devra être pris en compte.

### **Action 2 : Consentement à offrir la matière première**

**Pour la paille**, on ne peut se contenter de connaître les coûts en raison des risques mal quantifiables que peut faire courir l'enlèvement des pailles aux agriculteurs (délais d'enlèvement des pailles gênant l'implantation de cultures d'hiver, impact sur la fertilité des sols découlant du moindre enfouissement des pailles). Les travaux réalisés par l'INRA sur la paille dans les années 80 avaient déjà fait ressortir cette question. Ce consentement sera estimé par enquête auprès d'agriculteurs soigneusement choisis pour tenir compte des différents types de sols et pour corriger les biais pouvant fausser les réponses.

**Pour les produits issus de la forêt**, ces questions de consentement à offrir se posent avec la même pertinence. Une démarche similaire à celle établie pour la paille sera utilisée pour les différents produits (plaquettes forestières notamment).

Ces questions de consentement à offrir se posent pour l'exploitation des bois destinés à la fabrication de plaquettes forestières, du fait de sa faible valorisation, et tout comme les pailles, parce qu'elle est susceptible de générer une exportation supplémentaire de matière organique et minérale.

Les enquêtes seront réalisées auprès des propriétaires forestiers, mais aussi auprès du grand public. Il s'agit de définir les conditions d'acceptabilité du propriétaire et du public, et de dégager les stratégies d'action pour renforcer l'intérêt des deux parties.

L'offre de TCR relève de deux problématiques :

- Déterminer les conditions d'acceptabilité du propriétaire, principalement des agriculteurs, à la mise en culture sous forme de TCR de ses terres. L'expérience montre que la décision de culture est plutôt d'ordre patrimonial. Cette thématique est étudiée dans l'action 3 de la sous-tâche 1.3.
- Un arbitrage économique dans l'affectation du sol, qui est capté par le modèle de l'INRA en terme de rente du sol. Il est alors possible d'estimer le prix de vente des TCR. En le comparant avec les coûts de production, qui sont estimés à une échelle régionale, pour différents contextes agricoles et pédoclimatiques (voir l'action 3 de la sous-tâche 1.1), on peut établir le montant du soutien susceptible de pérenniser cette culture.

### **Action 3: Modélisation de la demande en co-produits agricoles liés aux procédés de transformation**

Les filières actuelles de production d'éthanol de blé et d'ester de colza génèrent des co-produits importants ; un accroissement de leur production peut influencer sur les niveaux de leur prix ; d'où l'importance de connaître les fonctions de demande. Pour les filières lignocellulosiques, les co-produits sont utilisés localement pour la production d'énergie destinée au fonctionnement des usines ; leur prise en compte dans le modèle semble donc plus simple.

### **Action 4 : Technologie et modélisation de la mobilisation de la ressource lignocellulosique agricoles**

Concernant la filière biologique de production d'éthanol, de nombreuses références américaines existent dans la littérature. Il faudra les adapter à la situation française à partir des travaux de l'IFP et de l'INRA. Une coordination avec le groupe de travail en charge de ce procédé sera également nécessaire.

Concernant les filières thermochimiques, on pense que les collaborations en cours dans le cadre du programme européen NOE-BIOENERGY devraient permettre dans un premier temps de trouver les références techniques et économiques nécessaires qui pourraient être complétées par les résultats des travaux conduits dans le cadre de ce programme dans le groupe de travail dédié à ce procédé (cf module 2).

### **Sous -Tâche 3-2 : Conditions d'une mobilisation accrue de la ressource forestière**

Pour ce qui est de la ressource forestière française, les économistes ne disposent pas d'un modèle intégrant l'élasticité de l'offre qui soit pertinent pour cette problématique biocarburant.

L'approche économique retenue repose sur des expérimentations où les concurrences entre usages au niveau de l'exploitation des forêts (valorisation matière, plaquettes forestières destinées aux chaufferies bois dont les besoins devraient augmenter de 50%) devra être pris en compte.

Compte tenu de la répartition de la propriété forestière française et de la sociologie des propriétaires, l'incitation à l'accroissement de l'offre ne se résume pas à des aspects purement économiques. Si des considérations d'ordre fiscal et de revenus ne sont pas à écarter, les enjeux d'ordre patrimoniaux au niveau individuel ainsi que les structures et conditions de regroupements de l'offre au niveau collectif sont déterminants.

#### **Action 1 : Anticiper le comportement des marchés du bois**

L'apparition d'une nouvelle demande de bois importante rend possible la déstabilisation des marchés du bois et de leurs acteurs au niveau national. Les concurrences entre usages du bois (bois de trituration, bois énergie, voire bois d'œuvre) est au cœur de cette problématique. L'objectif est de pouvoir :

- décrire les comportements des marchés au niveau national et les ajustements en quantité et prix suite à la création de la filière biocarburant ;
- identifier les stratégies d'adaptation des acteurs ;
- identifier les politiques publiques pertinentes pour assurer la pérennité d'approvisionnements compétitifs.

La démarche d'économie expérimentale, déjà utilisée pour l'analyse et la conception des marchés, permet d'obtenir les résultats attendus. Au préalable, pour la forêt publique, une analyse des facteurs déclenchant et de blocages sera faite notamment pour avoir une connaissance plus fine des différents acteurs (collectivités « urbaines, naturalistes, chasseur... ») et de leurs attentes.

#### **Action 2 : Accroître l'offre compétitive de bois brut de la forêt privée et public**

La structure de la propriété forestière constitue un des handicaps importants à une mobilisation des bois compétitive. L'objectif est de déterminer les actions qui favorisent la mise sur le marché des bois et une meilleure organisation de l'offre. Cela passe par

- a) une connaissance des motivations des propriétaires suivant leurs caractéristiques (audit et enquêtes) notamment par une analyse de typologie des propriétaires et plus particulièrement de ceux adhérents à des organismes de regroupements ;
- b) une analyse des dispositifs actuels de massification de l'offre ;
- c) une analyse des mesures mises en œuvre dans les régions françaises qui ont un impact sur l'amélioration de la structure de la propriété dans une perspective de moyen long terme.

Les points b) et c) reposent notamment sur une analyse critique et comparative des regroupements (chantier et foncier) qui permettra d'avoir des informations en matière de volume mobilisable et de coûts.

### **Tâche 4 : Evaluation de scénarios concrets appliqués à des bassins d'approvisionnement présentant une ressource lignocellulosique contrastée**

#### **Objectif**

L'atteinte des objectifs ambitieux de l'Europe en matière de bio-énergies exige de valoriser plus largement les différentes ressources de biomasse disponibles : produits et co-produits agricoles, cultures dédiées, ressource forestière, déchets. La mise à disposition de ces ressources à des coûts compétitifs et dans des scénarios durables suppose de mettre en place des méthodologies pour identifier les ressources effectivement mobilisables à moindre coût, les freins et les moteurs qui animent les acteurs de la filière, lever les difficultés de la chaîne de mobilisation, et maîtriser la pérennité de ce schéma de valorisation (impact environnemental, adaptation des pratiques agricoles et sylvicoles, ..).

Les études de cas vont permettre de valider les méthodologies et les outils développés dans les tâches 1, 2 et 3, sur trois sites dont les bassins d'approvisionnement présentent des caractéristiques contrastées, en vue de disposer d'une évaluation plus précise des coûts, quantités et conditions de mobilisation de la ressource.

Elles permettront aux différents acteurs d'appréhender plus concrètement l'intérêt et les difficultés de ces nouvelles opportunités. Elles permettront également d'identifier les mécanismes de soutien et d'encouragement à mettre en œuvre (niveau local, niveau national) qui pourront être proposés aux pouvoirs publics.

#### **Sous-tâche 4.1 : Sélection de l'implantation géographique des sites**

Dans une approche purement économique, dans la mesure où le coût de transport du produit final (biocarburant sorti unité de production) est inférieur à celui du coût d'approvisionnement de l'intrant principal (la biomasse), il est préférable que le choix d'implantation soit guidé par la définition des bassins d'approvisionnement. Dans un deuxième temps, il convient de compléter l'information par des données d'ordre structurel (infrastructures existantes et tissu industriel). Dans un troisième temps, afin d'avoir un soutien local dans le bassin d'approvisionnement, sera préparée une action spécifique vers les acteurs locaux.

##### **Action 4-1-1 : Définition des bassins d'approvisionnement**

Les étapes de la définition des bassins d'approvisionnement :

1. En utilisant les résultats des tâches 1, 2 et 3, établir pour chaque type de ressource et par département, les volumes mini-max de chaque ressource (bois, paille, ..) mobilisables aujourd'hui et, potentiellement, à moyen/long terme et les coûts de production (hors transport)
2. Déterminer le contour de bassins d'approvisionnement en fonction des quantités demandées par la taille des unités de biocarburants, des quantités de biomasse disponibles, des coûts de production de ces ressources et avec l'objectif de retenir 3 bassins contrastés en terme de ressource : dominante agricole, dominante forestière, mixte  
S'agissant de la taille des unités de valorisation énergétique :
  - Pour la voie thermochimie, une taille moyenne d'unité de 1 000 000 t/an de biomasse et deux valeurs extrêmes 500 000 et 2 000 000 t/an sont envisagées. Deux systèmes d'approvisionnement seront étudiés : un système d'approvisionnement en biomasse brute vers une usine centralisée et un système avec une densification préliminaire de la biomasse dans de petites unités avant sa transformation en biocarburant dans une usine centralisée.
  - Pour la voie biologique, deux tailles d'unité de 500 000 et 1 000 000 t/an de biomasse seront étudiées. Seul un système d'approvisionnement centralisé est envisagé.

##### **Action 4-1-2 : Identification des lieux d'implantation possibles**

Pour les bassins d'approvisionnement définis en 4-1-1, sera identifié l'environnement industriel :

- infrastructures logistiques existantes (embranchement ferroviaire, proximité de voies navigables, port maritime...);

- le tissu industriel lié à la biomasse (agriculture, sylviculture) et aux besoins du procédé de valorisation énergétique : fournisseurs ou clients d'utilités et services industriels afin de détecter les possibles synergies.

#### **Action 4-1-3 : Appel à candidatures**

La sélection des sites demande non seulement de combiner un ensemble de critères techniques de faisabilité (ensemble des tâches amont et leur synthèse en 4-1-1 et données complémentaires en 4-1-2), mais également, dans un souci opérationnel, d'avoir le soutien de tout ou partie des possibles parties-prenantes du bassin d'approvisionnement.

Pour ce faire, la détermination des sites d'implantation de l'unité de transformation fera l'objet d'un appel à candidatures sur plusieurs lieux dans les bassins d'approvisionnement.

- 1) Mise en place de l'appel à candidatures auprès des autorités locales régionales intégrant :
  - Positionnement par rapport au projet
  - Actions envisagées dont communication auprès des acteurs locaux (planning à court, moyen et long-terme)
- 2) Lancement de l'appel à candidatures
- 3) Analyse des réponses

#### **Action 4-1-4 : Sélection des sites**

La sélection des sites portera sur le croisement :

- critères des tâches amont,
- caractéristiques régionales de l'environnement industriel,
- réponses à l'appel à candidatures (l'un des critères de choix importants portera sur les actions de concertation et de recherche de synergies qui comptent être menées tout ou long du projet).

A l'issue de ce croisement, 3 sites industriels seront identifiés.

#### **Sous-tâche 4.2 : Scénario « court terme » (2010) : implantation**

Chacun des trois bassins sélectionnés fera l'objet des actions à visée opérationnelle suivantes pour les deux voies de conversion possible (schéma centralisé vs. schémas centralisé et décentralisé).

##### **Action 4-2-1- La ressource : identification et caractérisation**

- Recensement précis des sources de biomasse agricole et forestière, en quantité et qualité, et évaluation de leur répartition spatiale à l'échelle cantonale
- Identification et caractérisation (quantité, qualité, prix) de ressources complémentaires mobilisables (co-produits industriels situés à proximité, déchets, résidus urbains..)

##### **Action 4-2-2- L'acceptabilité du projet**

Il s'agit d'identifier, par une étude sociologique, les conditions d'acceptation d'une unité de biocarburant ou d'un schéma avec unités intermédiaires. L'étude visera les élus, les agriculteurs et forestiers, les riverains, les associations, les professionnels des filières impactées (IAA, valorisation matière et énergétique du bois). Elle aura une dimension ressource (4-2-1), approvisionnement (4-2-3) et valorisation énergétique (4-2-4) et bénéficiera du soutien des régions retenues (voir appel à candidatures, action 4-1-4).

##### **Action 4-2-3- Conditions d'approvisionnement**

- Evaluation des chaînes logistiques mobilisables, en intégrant la nécessaire continuité d'approvisionnement de l'unité de valorisation.

- Détermination de la courbe (quantité/coût « rendu unité ») des ressources mobilisables.

#### **Action 4-2-4- Production de biocarburants**

- Repérage des sites industriels existants susceptibles d'offrir des synergies intéressantes
- Identification du(des) schéma(s) de valorisation envisageable
- Description de l'unité de traitement
- Estimation du coût du biocarburant produit
- Emission de CO<sub>2</sub> par litre de biocarburant produit

#### **Action 4-2-5- Impacts socio-économiques du projet**

- Impacts sur les territoires (bassin d'approvisionnement) : impacts économiques nets (revenu, emploi,...)
- Impact environnementaux (modification paysage, flux de camions, ...)
- Identification des mécanismes de soutien à mettre en œuvre au niveau local et national.

#### **Sous-tâche 4.3 : Scénarios « moyen-long terme » (2010-2020) : enracinement**

##### **Objectifs :**

1. Diversifier l'approvisionnement par l'utilisation de biomasse ligno-cellulosique dédiée à une utilisation énergétique
2. Inscrire les projets dans un avenir concerté des territoires

#### **Action 4-3-1- Schémas de valorisation biomasse**

Pour chaque bassin d'approvisionnement :

- Détermination des cultures énergétiques envisageables (compte tenu de la nature des sols et du climat) en s'appuyant sur les résultats des tâches 1, 2 et 3.
- Analyse des opportunités de conversion des usages des sols pour des cultures dédiées.
- Identification des chaînes logistiques à mettre en œuvre
- Calcul des coûts de la ressource rendue usine
- Ré-évaluation de la pertinence du choix des filières de valorisation et identification des schémas les plus prometteurs
- Pour les schémas les plus prometteurs, estimation des coûts de production des bio-énergies et des impacts environnementaux.

Les sous-tâches 2 et 3 s'appuieront sur les méthodes et les données issues des tâches amont, notamment sur un outil de type SIG pour caractériser les parcelles forestières utilisées, estimer la densité spatiale de la ressource agricole, déterminer les points de stockage intermédiaire et calculer le coût de la ressource « rendue unité ».

#### **Action 4-3-2- Les futurs possibles des bio-énergies**

Une analyse prospective permettra d'envisager les scénarios à moyen et long-terme, notamment en matière d'acceptabilité à venir (groupe de travail pour chaque bassin d'approvisionnement ; définition des variables importantes, des scénarios possibles, des leviers d'action).

Cette action vise à :

- séparer les facteurs locaux (sur lesquels les acteurs peuvent agir), des facteurs globaux pour lesquels les leviers se situent à d'autres échelles ;

- identifier les possibles synergies avec les autres filières existantes (dont la filière bois),
- identifier les possibilités de coordination entre les différents échelons administratifs et géographiques.

L'analyse prospective prendra appui sur le diagnostic de court terme.

## 4.2. Module 2 "conversion par voie thermochimique"

### 1. Contexte général

Dans le domaine de la transformation de la biomasse lignocellulosique par voie thermochimique, la France n'a pas connu, ces dernières décennies, un développement continu des technologies comme cela a pu être le cas dans des pays européens comme la Suède, la Finlande ou encore l'Autriche et l'Allemagne. Ces pays ont développé principalement des technologies de gazéification, essentiellement tournées vers des applications cogénération (production de chaleur et d'électricité). Il n'existe actuellement pas de référence industrielle de production de biocarburants par conversion thermochimique de biomasse lignocellulosique. Dans la voie gazéification notamment, la composition et la qualité du gaz requises pour la synthèse des biocarburants sont des points clé et leur optimisation nécessite encore de fortes évolutions technologiques. La France peut mettre à profit le délai nécessaire au développement de ces technologies pour se positionner dans le domaine de la production de biocarburants dans un premier temps, puis d'hydrogène dans un second temps, et répondre ainsi aux exigences du futur.

Dans cette perspective, le présent programme met en priorité la synthèse d'hydrocarbures (telle que la synthèse Fischer-Tropsch) qui sont des carburants d'excellente qualité, substituables au gazole actuel (en mélange ou à 100%) tout en présentant une combustion beaucoup plus propre ; il est préféré à l'essence pour des raisons de dynamique de marché, d'utilisation beaucoup plus large à la fois sur le parc des véhicules particuliers, des petits véhicules utilitaires et des poids lourds et bus, et finalement de structure de l'industrie européenne du raffinage.

Dans ce contexte, les objectifs du programme national de R&D pour la voie thermochimique sont avant tout :

- Identifier et analyser les filières les plus prometteuses de production de ces biocarburants compte tenu des spécificités nationales, tout en recherchant les synergies et valorisations maximales pour les flux énergétiques connexes.
- Démontrer la faisabilité technico-économique et environnementale des filières de production retenues.
- Proposer une organisation industrielle des filières.

Les objectifs à moyen terme (environ trois ans) sont :

- Le choix, pour chaque filière retenue, de concepts à la fois industrialisables à moyen terme (première génération) et à plus long terme, voies plus innovantes (deuxième génération) pour accroître les performances globales.
- La mise en œuvre des actions de recherche y afférents permettant de faire émerger les procédés les plus prometteurs et de lever les principaux verrous, techniques et économiques.
- La validation partielle sur des points clefs, des options technologiques et économiques.

Les objectifs à plus long terme (cing à dix ans) sont :

- La réalisation et le fonctionnement d'une plate forme de développement pour la validation des choix procédé, notamment ceux de la première génération
- La mise en oeuvre d'un pilote industriel de première génération (rendement masse <sup>1</sup>~15%) avec la meilleure technologie issue des développements actuels
- Le développement de technologies de deuxième génération permettant une augmentation marquée des rendements masse et énergie (rendement masse ~25 à 40% selon le procédé choisi).
- Le lancement d'une filière industrielle de production de carburant de synthèse.

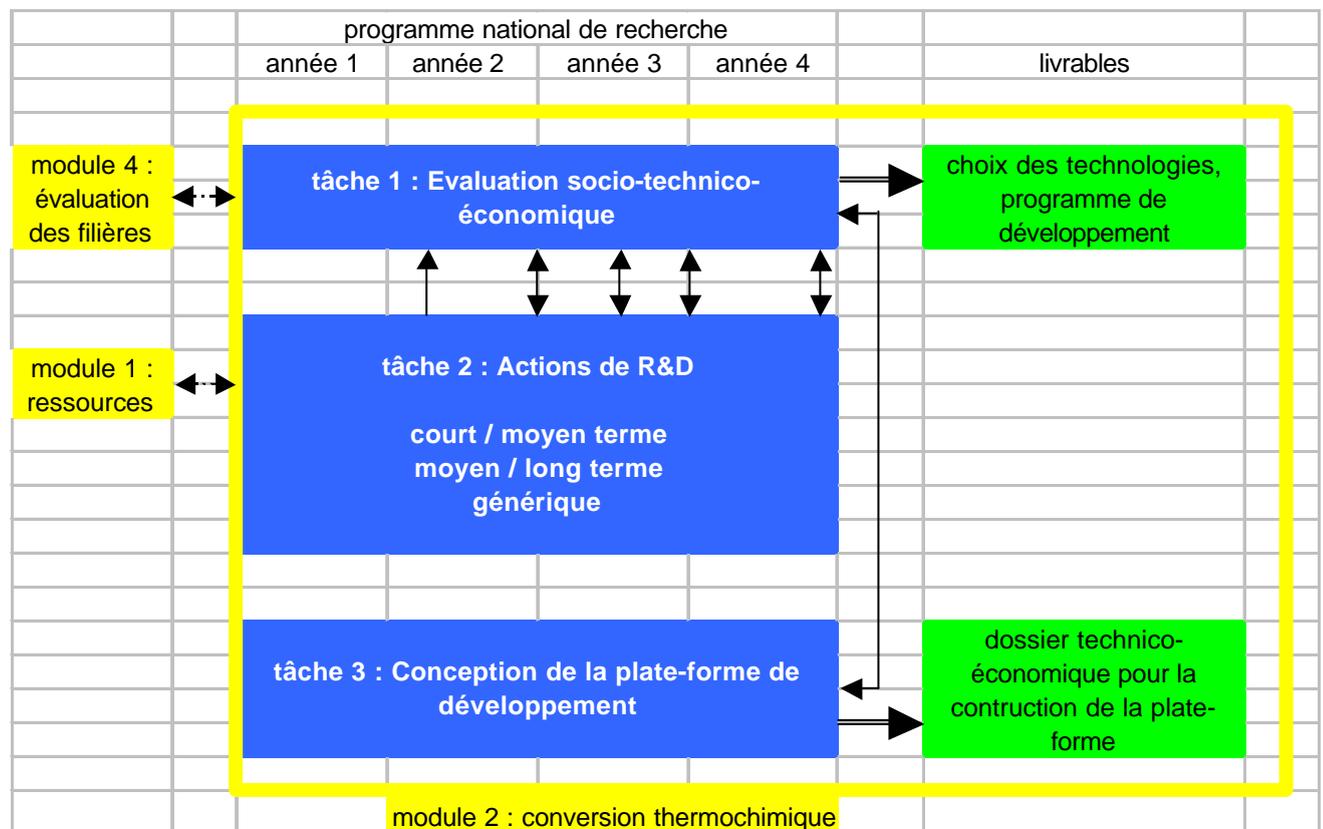
Les filières s'appuient, en priorité, sur l'utilisation de la biomasse renouvelable produite sur le territoire (forêt, cultures dédiées, ...). L'utilisation de certains déchets (issus de la biomasse, certains déchets industriels, ...) est également étudiée.

Le programme proposé s'articule autour de 3 tâches principales fortement imbriquées :

**Tâche 1 :** Evaluation socio-technico-économique et environnementale

**Tâche 2 :** Recherche et développement

**Tâche 3 :** Conception d'une plate-forme de développement



## **Tâche 1 : Evaluation socio-technico-économique et environnementale**

### **Contexte**

L'objectif de cette tâche est d'identifier les filières et technologies de conversion par voie thermo-chimique les plus pertinentes à développer, au travers d'analyses techniques, économiques, énergétiques, environnementales et sociétales. La démarche couvrira tous les aspects depuis le pré-traitement de la biomasse jusqu'à la production de carburant liquide (gazole) avec une étude approfondies des technologies les plus intéressantes.

On apportera une attention particulière aux points suivants :

- les problèmes liés aux conditions locales de mise à disposition de la ressource (nature, quantités, stockages, transports, ...). Ces problèmes seront analysés en liaison avec le groupe ressource (module 1).
- les options de production centralisée, décentralisée ou de densification locale.
- le problème de la taille optimale de l'installation de production de biocarburant en vue d'une minimisation du coût du carburant
- les possibilités de valorisation énergétiques connexes (électricité, chaleur)
- l'intérêt d'une production locale de méthanol (en vue de la production d'EMHV)
- la possibilité d'utiliser les déchets.

Au cours de cette évaluation, une étude du cœur des différents procédés de conversion de la biomasse en carburants sera menée :

- inventaire exhaustif de l'ensemble des procédés en y incluant une revue des procédés de production de carburant via la production d'un gaz de synthèse (gazéification) et à partir de pyrolyse/conversion hydrothermale sans passer par une étape de gazéification.
- analyse des avantages et inconvénients respectifs.
- positionnement sur la meilleure façon de convertir de la biomasse en gazole, tout en analysant la valorisation des flux énergétiques connexes, dans le cadre de cas concrets proposés par ailleurs, ceci à court et plus long termes.
- définition des actions de R&D nouvelles à engager pour résoudre les problèmes en suspens sur les technologies identifiées et réaliser les ruptures technologiques permettant d'améliorer les rendements masse (procédés allothermiques par exemple) et énergétique.

Les travaux seront menés en concertation avec le module 4 du programme national chargé de l'évaluation globale de valorisation de la biomasse et les résultats constitueront le principal apport de la voie thermo-chimique à ce module.

### **Sous-tâche 1.1 : Analyse technique, économique et environnementale**

Cette sous-tâche se décompose en 6 parties :

#### a. Définition du cadre de l'étude

Définir les limites de l'étude

- frontières
- qualité biomasse (lignocellulose et déchets organiques) en entrée et biocarburants et hydrogène en sortie
- profondeur
- ACV

Choix de 2 horizons de temps : 2010 et 2020

Définition des critères de sélection et de leur pondération  
Définition des paramètres économiques : taux d'intérêt, durée d'amortissement, ...  
Détermination des filières et des procédés à analyser (pyrolyse, gazéification)  
Confidentialité des informations des partenaires

#### b. Recueil des données

A partir de données cohérentes pour évaluer les procédés sur une base commune

Approvisionnement biomasse : collecte des données auprès des fournisseurs de biomasse et des transporteurs (module 1)

Conversion biomasse : collecte des données auprès des fournisseurs de procédés (données techniques, économiques, état de développement, ...)

Analyse critique des données fournies (simulation numérique, croisement d'informations, ...)

#### c. Analyse technique

Pour chaque filière / procédé

Bilan énergétique :  $h_{bioc}$   $h_{elec}$   $h_{chaleur}$   $h_{global}$  selon différentes stratégies de valorisation (maximisation C renouvelable, maximisation production<sup>o</sup> biocarburant, hydrogène, ...)

Bilan matières (gazeux, liquides, solides)

Niveau de maturité associé à la techno, composant par composant

#### d. Analyse économique

Approvisionnement biomasse :

- ◆ coût biomasse « bord de route » 2010 / 2020
- ◆ coût transport
- ◆ coût traitement biomasse avant gazéification

Evaluation du coût d'investissement, à partir des données fournies par les constructeurs composant par composant (ou estimées), en intégrant les courbes d'apprentissage (horizons 2010 et 2020)

Evaluation du coût d'exploitation (MO, consommables)

Evaluation du coût de production biocarburant (sortie usine et rendu pompe)

Analyse de la robustesse des résultats aux hypothèses

- ◆ incertitudes sur les données Procédé,
- ◆ prix biomasse
- ◆ maillon du procédé
- ◆ extrapolation en taille

#### e. Analyse environnementale

ACV sur les émissions de GES, autres impacts

Consommation d'énergie fossile (efficacité « énergétique » exprimée en GJ biocarburant / GJ fossile)

Acceptation sociale

#### f. Synthèse

Comparaison des différentes filières et procédés sur la base des critères définis lors de l'étape 1

Synthèse

Sélection de(s) la filière(s)

Construction du plan de développement

Livrables :

- cahier des charges de l'évaluation socio-technico-économico-environnementale,
- base de données sur les différentes filières,
- évaluation multi-critères des filières.

## Tâche 2 : Recherche et développement

### Contexte

Les actions de Recherche et Développement proposées visent à répondre à la fois aux problèmes génériques communs aux filières et technologies examinées dans le cadre de l'évaluation technico-économique (tâche 1) tels que le comportement des inorganiques, les phénomènes d'agglomération et de corrosion, le traitement des gaz, etc..., et aux problèmes spécifiques à certaines d'entre elles.

Des actions de recherche à plus long terme préparant les ruptures technologiques, permettant par exemple d'augmenter significativement le rendement masse en biocarburant et d'abaisser le montant des investissements, sont menées en parallèle.

### La R&D à court et moyen terme

#### *a) Les points clefs pour la production d'un gaz de synthèse riche en CO et H<sub>2</sub>*

Cette R&D à court terme vise à apporter, dans les meilleurs délais possibles, des réponses à certains problèmes clefs se posant pour les procédés qui semblent actuellement les plus intéressants. Ces procédés englobent actuellement des technologies encore relativement ouvertes (lit entraînés, lits fluidisés, réacteurs à flux entraîné) et l'objectif de cette R&D est, pour l'essentiel, de lever des points clefs dans le domaine des hautes températures favorisant la production de H<sub>2</sub> et de CO. En effet, une analyse des données disponibles dans la littérature montre que, si de très nombreuses données ont été accumulées dans le passé, celles-ci sont de qualité très variable et sont parfois contradictoires. Les données couvrent essentiellement le domaine basse pression et température inférieure à ~850°C. Il existe peu de données suffisamment fiables à haute température (850°C < T < 1500°C) pour les transformations rapides (quelques 0,1 seconde à quelques secondes) ou lentes (lit fluidisé haute température) à basse pression (sans parler de haute pression).

#### *b) Une approche réacteur*

Cette R&D est classiquement présentée par thématiques liées à une échelle de verrous : pyrolyse, gazéification, lits fluidisés, agglomération, catalyse, élimination des goudrons, filtration, corrosion, élimination des inorganiques, traitement du gaz.

C'est intentionnellement que nous avons choisi de ne pas présenter les actions de R&D en fonction de cette échelle de verrous mais plutôt en fonction des besoins et priorités liés aux concepts réacteur et procédés qui nous paraissent intéressants. Bien entendu cette présentation recoupe l'échelle traditionnelle de verrous, mais permet de mieux cibler les conditions spécifiques des besoins et les jalons techniques associés. On identifiera cependant séparément des besoins génériques qui restent communs aux différents concepts envisagés.

### La R&D à plus long terme

La R&D à plus long terme (entre trois et dix ans) se décline en 2 catégories :

- les actions d'améliorations des technologies qui seraient retenues à court terme : technologies hautes températures, résistance à la corrosion, obtention d'un gaz propre, etc ...
- les actions de préparation des ruptures technologiques ; par exemple : les procédés allothermiques en vue d'augmenter le rendement masse en biocarburants.

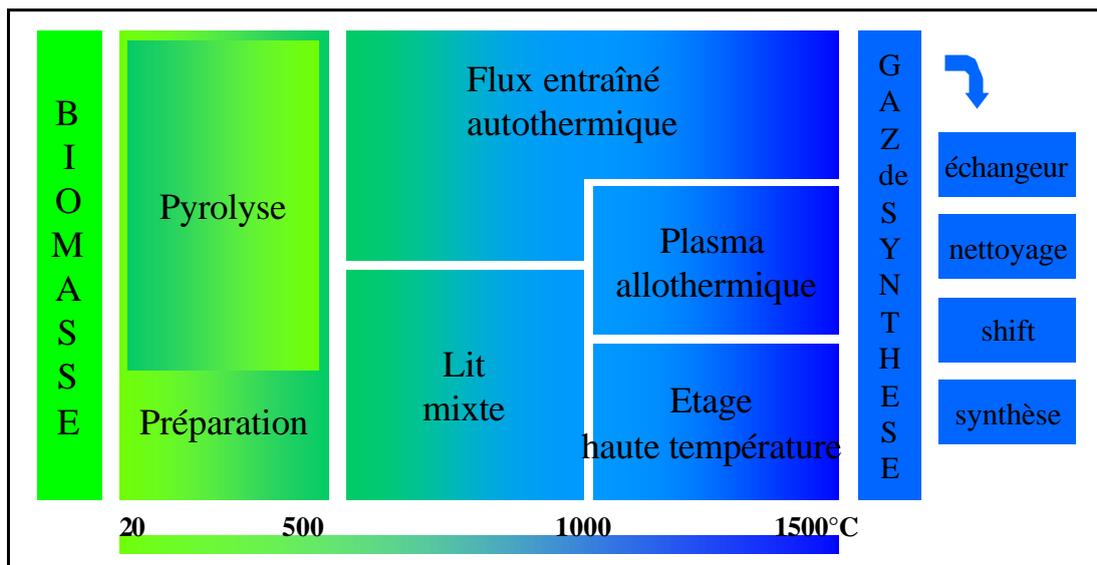
Les actions sont présentées par points clefs ou verrous à lever pour les différents concepts de réacteurs intéressants identifiés à ce jour. Certaines actions considérées comme génériques (c'est-à-dire communes à l'ensemble des concepts) sont regroupées.

Dans un premier temps, les actions privilégiées contribuent à la réflexion sur l'évaluation socio-technico-économique et environnementale des technologies permettant de faire les choix des procédés les plus pertinents à investiguer. Les travaux de R&D proposés sont de type génériques ou communs à plusieurs procédés ou options procédés (compréhension, faisabilité, retour d'expérience, modélisation, simulation).

A ce jour, certains procédés nécessitent d'être étudiés plus avant pour alimenter l'évaluation (tâche 1) ci-avant définie :

- la pyrolyse de la biomasse,
- la gazéification locale,
- les procédés à flux entraîné à haute température issus des technologies développées au stade de pilote en Europe et en particulier en Allemagne,
- les procédés lit mixte (lit entraîné et lit fluidisé) alternatifs aux procédés précédents,
- la synthèse Fischer-Tropsch.

Parmi les procédés à forte innovation, une voie prometteuse consiste à développer une technologie allothermique utilisant une torche à plasma (en complément des procédés à flux entraîné et lit mixte) soit en temps qu'étage haute température, soit en entrée de réacteur de gazéification. Les principaux avantages de cette solution sont de viser une augmentation du taux de conversion de carbone et de carburant dans un facteur 3, d'accroître la conversion d'hydrocarbures et de goudrons en gaz de synthèse, et d'envisager l'exploitation de déchets organiques. Les premières actions proposées sur ce thème cherchent avant tout à évaluer la faisabilité d'un tel concept par des essais préliminaires.



En parallèle, des actions génériques à l'ensemble des technologies envisagées sont proposées afin de lever les verrous directement liés à la réactivité de la biomasse, au comportement des inorganiques, au conditionnement des gaz, à la connaissance et au dimensionnement des procédés nécessaire pour l'évaluation des technologies.

### Sous-tâche 2.1 : Pyrolyse rapide et production d'huiles de pyrolyse

#### Objectifs :

- expertise des technologies, étude technico-économique, comparaison aux technologies de pyrolyse lente ou d'injection directe du solide dans le réacteur
- définition des caractéristiques attendues
- recensement des outils de laboratoires existants pour la production d'huiles
- caractérisation des produits de pyrolyse (solides, liquides, gazeux)

- développement de méthodes analytiques
- prétraitement des huiles avant valorisation
- conclusion sur l'intérêt d'une pyrolyse décentralisée

### **Sous-tâche 2.2 : Gazéification locale**

#### **Objectif :**

La gazéification au niveau local permet de limiter l'impact économique et environnemental du transport de biomasse. Elle permet aussi de valoriser les déchets municipaux d'origine végétale. Les technologies en sont à un stade de développement avancé. L'extrapolation à des unités de taille moyenne (50 MWpci) reste à faire. De plus, des améliorations sont nécessaires pour diminuer les coûts d'investissement et d'exploitation.

#### **Descriptif :**

- améliorations du procédé FICFB (simplification du process, réduction des consommables)
- études, essais sur pilote
- APS d'une unité de 50 MWpci

### **Sous-tâche 2.3 : Réacteur haute température (> 1300 °C) de gazéification à flux entraîné autothermique**

#### **Objectifs :**

- retour d'expérience sur une installation existante (effet de la température, nature de la biomasse, taux de conversion du solide résiduel, taux de destruction des goudrons, ...)
- interprétation des résultats et modélisation
- évaluation des performances actuelles (utilisées pour l'évaluation technico-économique)
- définition de voies d'amélioration
- spécification de l'oxydant en relation avec la qualité du gaz de synthèse

### **Sous-tâche 2.4 - Technologie lit mixte (lit entraîné et fluidisé)**

#### **Action 2.4.1 : Pyrolyse rapide en lit entraîné à haute température (< 1000°C)**

##### **Objectifs :**

- Evaluation expérimentale de la composition du gaz, concentration de goudrons
- Modélisation hydrodynamique et cinétique
- Validation de la mise en œuvre de la technologique en terme hydrodynamique
- Fourniture bilans matière et thermique pour l'évaluation technico-économique

#### **Action 2.4.2 : Gazéification en lit fluidisé à haute température (< 1000°C) et haute pression (40 bars)**

##### **Objectifs :**

- Etude de comportement de différentes biomasses
- Interprétation et spécification d'un modèle
- Evaluation de la performance (rendements)

#### **Action 2.4.3 : Conversion des goudrons et du méthane dans un étage gaz haute température homogène**

Objectifs :

- évaluer les cinétiques de conversion CH<sub>4</sub>
- mesurer concentration goudrons (< 0,1 mg/Nm<sup>3</sup>) sur essais
- évaluation des performances techniques

### **Sous-tâche 2.5 – Procédés allothermiques : apports d'énergie externes**

#### **Action 2.5.1 : Faisabilité d'une torche à plasma fonctionnant avec un gaz plasmagène (CP+H<sub>2</sub>)**

Objectifs :

- définition / adaptation / réalisation d'une torche
- évaluation du fonctionnement et des performances en gaz plasmagène

#### **Action 2.5.2 : Reformage du gaz dans un étage haute température chauffé par torche à plasma**

Objectifs :

- étude de faisabilité
- essais en gaz simulant (CO+H<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>O+...)
- caractérisation et retour d'expérience

#### **Action 2.5.3 : Cinétique de gazéification directe de la biomasse dans un réacteur à flamme plasma**

Objectifs :

- évaluer la faisabilité
- tests injection de biomasse
- caractérisation mélange plasma, homogénéisation, cinétiques réactionnelles

### **Sous-tâche 2.6 : Synthèse Fischer-Tropsch**

Objectifs :

- Mise en place d'un outil de screening de catalyseurs
- Modélisation spécifique au syngas ex biomasse

### **Sous-tâche 2.7 – R&D générique**

#### **Action 2.7.1 : Corrélation entre nature/composition et réactivité de la biomasse**

Objectifs :

- synthèse des modèles de grains existants
- évaluation de leur applicabilité aux procédés envisagés
- développements de nouveaux modèles adaptés

#### **Action 2.7.2 : Utilisation de déchets**

Objectifs :

Développement et qualification des technologies nécessaires pour l'utilisation de certains déchets (organiques, certains déchets industriels,...) dans les procédés de gazéification au niveau local ou centralisés; impact sur la qualité des jus de pyrolyse, du gaz de synthèse, quantification de l'impact sur les problèmes associés aux espèces inorganiques (agglomération et corrosion)

Descriptif :

- faire un bilan approfondi des connaissances (en particulier du côté incinération),
- transposer à la gazéification,
- réaliser certains essais complémentaires (caractérisation, pyrolyse, traitement chimiques intermédiaires, gazéification).

### **Action 2.7.3 : Technologie de paroi haute température**

Objectifs :

- Etude des conditions de fonctionnement paroi et zone réactionnelle
- Modélisation de la paroi, stabilité en présence de cendres liquides
- Calculs des pertes thermiques par couplage avec la zone réactionnelle; optimisation géométrie

### **Action 2.7.4 : Comportement des inorganiques**

Objectifs :

- Comportement des inorganiques
  - Approche thermodynamique, identification des espèces à éliminer
  - Détermination expérimentale des espèces inorganiques par condensation dans un tube à gradient de température et mesures de la teneur du gaz en espèces incondensables
- Expertise des procédés d'élimination des inorganiques

### **Action 2.7.5 : Conditionnement du gaz de synthèse (traitement, séparation, purification)**

Objectifs :

- Expertise des technologies disponibles
- Nature et origine des aérosols. Propriétés physicochimiques des goudrons à éliminer
- Analyse de la spécification cible du gaz de synthèse
- Analyse des écarts et identification et définition d'actions spécifiques R&D correspondantes
- Conversion à la vapeur et ajustement du ratio H<sub>2</sub>/CO

### **Action 2.7.6 : Modélisation et calculs procédés**

Objectifs :

- + Développement de modèles
  - Base littérature
  - Base résultats d'essais spécifiques
- + Introduction dans les logiciels procédés
- + Lois d'extrapolation, dimensionnement
- + Calculs procédés Flux Entraîné
  - Autothermiques
  - Allothermiques
- + Comparaison des procédés/bilans énergétiques/bilans CO<sub>2</sub>

### **TÂCHE 3 : Conception d'une plate-forme de développement**

#### **Objectifs :**

- A. Disposer d'un outil national de développement, de validation et d'optimisation de procédés et de technologies (développements en tant qu'améliorations apportées aux concepts actuels et innovations de rupture) de taille intermédiaire entre équipements de laboratoire et site de production industrielle, couvrant tous les aspects depuis le prétraitement éventuellement déporté de la biomasse dans les bassins de collecte jusqu'à la production de biocarburant.
- B. Permettre de capitaliser les connaissances, les avancées techniques et les moyens développés dans le programme pour offrir aux acteurs économiques une aide au choix des filières et technologies adaptées à des scénarios spécifiques de valorisation de bio-ressources.
- C. Disposer d'infrastructures permettant de modifier facilement et à moindre frais un ou plusieurs composants, et à une échelle suffisante pour une extrapolation industrielle.

#### **Sous-tâche 3.1 : Etude d'ingénierie**

#### **Objectifs :**

- Définir le périmètre et les attendus de la plate-forme,
- Etablir les spécifications techniques,
- Identifier les possibilités d'implantation,
- Identifier les clients de la plate-forme.

### 4.3. Module 3 "conversion par voie biologique"

#### Conversion de la biomasse lignocellulosique par voie biologique

##### 1. Objectifs et enjeux

Cette voie de conversion de la biomasse lignocellulosique concerne essentiellement la transformation par voie biologique de la cellulose et des hémicelluloses, deux des trois principaux polymères constitutifs de cette matière végétale, en éthanol. Le troisième composant, la lignine, sera utilisé avant tout pour satisfaire aux besoins en énergie du procédé de conversion. S'il apparaissait, au cours du déroulement du programme, d'autres possibilités de valorisation, plus intéressantes économiquement de ce dernier produit, elles seraient alors mises à l'étude.

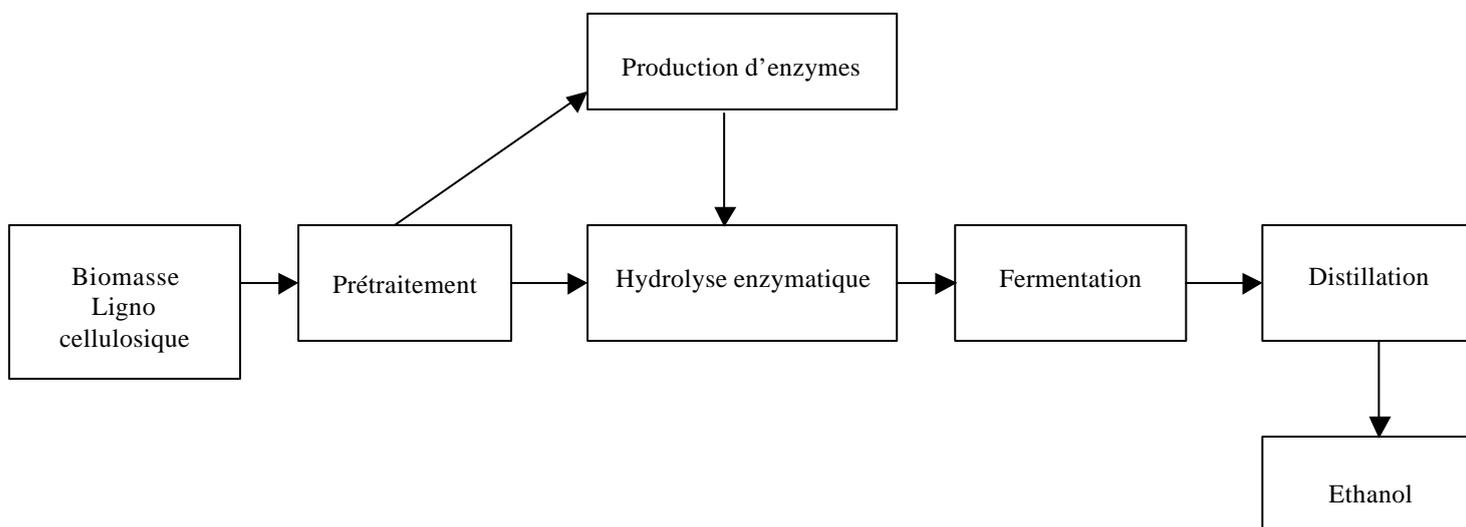
Cette voie est reconnue comme des plus attractives, dans l'apport d'une réponse rapide et significative à la réduction des émissions, dans l'atmosphère, de gaz à effet de serre, dont le CO<sub>2</sub>, générés par les transports et qui contribuent au réchauffement climatique.

Les principaux objectifs des travaux de recherche et développement, engagés dans le cadre de ce sous-projet, visent à démontrer la faisabilité technique et la rentabilité économique à moyen terme (2010-2015) de cette filière de production de biocarburants, tout en diversifiant les ressources en matières premières, principalement d'origine végétale.

Dans les procédés industriels actuels utilisant les plantes sucrières ou amylacées, le coût de la matière première représente environ 60 % du coût de production de l'éthanol.

Une des voies d'amélioration la plus prometteuse est de convertir des substrats nettement moins onéreux, tels que les matériaux ligno-cellulosiques, en éthanol.

Les grandes étapes du procédé de transformation sont représentées dans le schéma suivant.



Après pré-traitement de la biomasse lignocellulosique, celle-ci est hydrolysée par voie enzymatique. Les sucres ainsi obtenus sont fermentés en éthanol qui est séparé par distillation.

Les deux verrous techniques majeurs sont en premier, le manque d'efficacité de l'hydrolyse enzymatique des matériaux lignocellulosiques et en second, la mauvaise conversion en éthanol des pentoses issus de la fraction hémicellulosique.

Concernant le premier aspect, un important travail de R et D est engagé depuis plusieurs années aux Etats-Unis sur l'activité des enzymes cellulolytiques. Le Department of Energy (DOE) supporte les programmes de recherche de deux sociétés industrielles de production d'enzymes, Genencor et Novozymes et du NREL (National Renewable Energy Laboratory). L'aide apportée, de 2001 à 2004, représente 80 % d'un coût global compris entre 35 et 50 M\$. En Europe, plusieurs organismes de recherche, dont le VTT en Finlande, continuent de travailler dans le domaine.

L'autre étape majeure concerne la valorisation des hémicelluloses. Une des possibilités les plus évidentes consiste à faire acquérir aux souches de levures productrices d'éthanol la capacité à utiliser les pentoses. Dans cette éventualité, le rendement en éthanol pourrait augmenter de 50 % à partir de certains végétaux riches en pentoses et s'élever à 30 % par rapport à la biomasse sèche. Les études les plus avancées sur ce thème sont effectuées en Suède.

## 2. Mise en œuvre du programme

Le programme R et D sera réalisé essentiellement à l'échelle du laboratoire et du petit pilote. Les matières premières testées seront, dans un premier temps, la paille de blé (au moins les deux premières années) avant de passer à d'autres, après concertation avec les acteurs du sous-projet consacré aux ressources.

En dépit de l'implication directe des différents participants du programme dans les diverses étapes de la filière et de leur connaissance des travaux réalisés dans leurs domaines d'activités respectifs, un état de l'art approfondi est nécessaire afin de disposer de toutes les informations, y compris les plus récentes. Cette étude s'appuiera sur la littérature scientifique, les brevets, les rapports techniques, les bases de données, les sites Internet,... Certains points du programme donnant actuellement lieu à une multitude de travaux, notamment ceux consacrés aux enzymes cellulolytiques, devront faire l'objet d'une étude exhaustive.

Cet état de l'art couvrira l'ensemble du procédé et sera effectué sous la responsabilité de différents partenaires. Les études sont regroupées en 7 tâches :

Tâche 1 : Substrats et pré-traitement

Tâche 2 : Production d'enzymes

Tâche 3 : Hydrolyse enzymatique

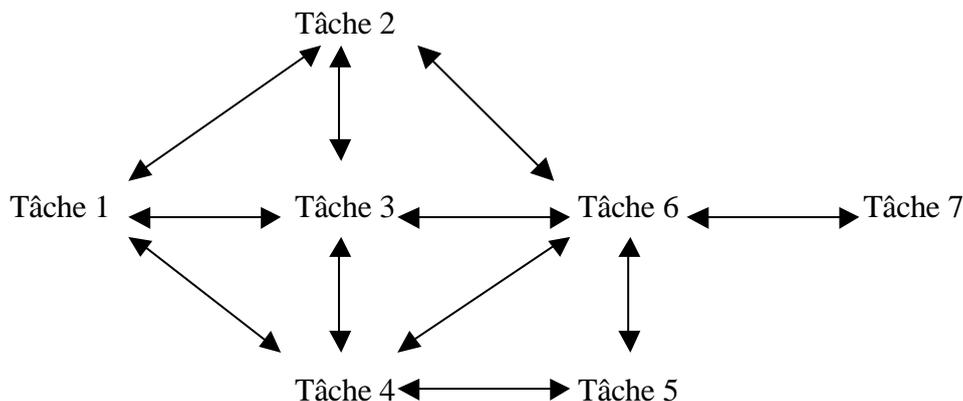
Tâche 4 : Fermentation éthanolique

Tâche 5 : Distillation – Traitement des effluents

Tâche 6 : Intégration du procédé

Tâche 7 : Bilans ACV : massique, énergétique et effet de serre

Toutes ces tâches sont interconnectées.



Pour l'optimisation de la transformation des pentoses en éthanol, il serait certainement judicieux d'associer les acteurs de ce Programme français avec ceux d'un programme national d'un autre pays européen, la Suède par exemple. Cette collaboration devrait déboucher sur des gains de temps et des diminutions des coûts de réalisation des études.

La démonstration du procédé à plus grande échelle est envisageable directement dans les installations mises à disposition par les industriels de la fermentation, sans qu'il soit nécessaire de passer par une unité construite spécialement à cet effet. Pour le conditionnement et le pré-traitement des matières premières lignocellulosiques, un rapprochement avec les acteurs d'un autre Programme National Ethanol, par exemple le Programme Suédois qui dispose déjà d'installations de démonstration, serait utile.

## **Tâche 1 : Substrats et prétraitements**

### **Objectifs et enjeux**

Le succès d'un développement industriel de production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique repose pour partie sur la nécessité d'obtenir un substrat prétraité, dont l'hydrolyse enzymatique sera facilitée tout en contenant un minimum de produits de dégradation susceptibles d'inhiber partiellement les processus biologiques de la fermentation éthanolique.

L'objectif premier de cette étape de prétraitement consiste en l'amélioration de l'accessibilité des polymères saccharidiques aux enzymes. En facilitant l'action hydrolytique de ces dernières, on diminuera le coût de l'étape d'hydrolyse.

L'autre question, à laquelle il est nécessaire d'apporter une réponse, concerne le degré d'extraction des lignines qui constituent un «inerte» tout au long du processus de conversion biologique. S'il est connu que ces lignines sont en quelque sorte le «ciment» consolidant la structure des matériaux lignocellulosiques, et qu'il est nécessaire de fragiliser cette structure afin d'avoir accès aux sucres fermentescibles, il est impératif de définir l'optimum du niveau de délignification de la biomasse, tout en conservant à l'esprit que cette mise en œuvre doit être optimisée afin de générer le moins possible de produits de dégradation.

Comme décrit ci-dessus, il est clair que cette tâche ne pourra pas se dérouler de façon isolée, mais bien au contraire en concertation avec les autres tâches, afin d'intégrer en continu les impératifs découlant des autres étapes du procédé de conversion.

Plusieurs études décrites dans les sous-tâches suivantes doivent permettre de répondre à ces objectifs.

#### **Sous-tâche 1.1 : Etat de l'art**

De nombreux travaux ont été déjà effectués, tant en France qu'au niveau international, à partir desquels il s'agira d'identifier les points susceptibles d'être modifiés et améliorés.

#### **Sous-tâche 1.2 : Définition de la ressource**

Cette action sera réalisée en concertation avec les acteurs du sous-projet 1 « ressources », avec lesquels il s'agira de définir des critères d'évaluation de la qualité et de la quantité de matières premières, en essayant d'anticiper ainsi les difficultés liées aux processus de prétraitement.

Sur les deux premières années, les travaux expérimentaux seront faits en prenant la paille de blé comme matière de référence. Des choix seront faits pendant cette période pour envisager d'autres substrats parmi les résidus forestiers, les taillis à courte rotation, le triticales, le miscanthus.

#### **Sous-tâche 1.3 : délignification par voie physico chimique**

Une délignification du matériau ligno-cellulosique préalable au prétraitement peut avoir des effets bénéfiques sur les conditions de celui-ci, sur la concentration en inhibiteur de la fermentation

éthanolique et sur les possibilités de recyclage dans les étapes ultérieures du procédé. Cet apport sera quantifié par des expérimentations au stade du laboratoire. Si l'incorporation de cette étape se révélait intéressante, des essais à plus grande échelle seront réalisés afin d'obtenir les données nécessaires à l'établissement des bilans matière et énergie et à l'estimation du coût induit.

#### **Action 1 : prétraitement par explosion à la vapeur :**

L'explosion à la vapeur, notamment en conditions acides, de matériaux comme la paille de blé et le bois de peuplier a été abondamment expérimentée par le passé. Elle conduit à une hydrolyse partielle et une solubilisation des hémicelluloses et à une déstructuration facilitant l'accessibilité des cellulases à la cellulose.

Un réacteur de 20 L permet d'appliquer différentes conditions de sévérité afin de juger de l'intérêt de certaines étapes (délignifications) et de préparer à façon des échantillons de matériaux prêts à être hydrolyser. Les bilans matière et énergie pourront être réalisés à ce stade.

#### **Action 2 : Délignification chimique, par voie acide :**

- Etude des types d'acide et des conditions opératoires (concentration, température, temps de séjour) pour séparer lignine de cellulose et hémicelluloses ;
- Etude de la teneur en produits de dégradation (furfural, alcool furfuralique et HMF) et optimisation des conditions laboratoire pour les ramener à des valeurs minimales.
- Transfert d'échantillons de laboratoire au groupe de la «TACHE 2» production d'enzyme pour vérifier la compatibilité du substrat avec l'enzyme avant essai par le groupe de la «TACHE 3» Hydrolyse enzymatique (incidence sur la qualité et la quantité d'enzymes) puis par le groupe de la «TACHE 4» Fermentation (incidence des teneurs en toxiques).
- Après définition des paramètres opératoires au laboratoire, validation sur une unité pilote (taille 1 T/jour environ de matière première) et tests d'unités de séparation représentatives (décantation centrifuge, filtre presse,...)

#### **Délivrables actions 1 et 2 :**

- Réalisation des bilans matières, énergies et rejets.
- Relations conditions prétraitement – efficacités d'hydrolyse enzymatique et de la fermentation,
- Teneurs en inhibiteurs en fonction du type et des conditions du prétraitement,
- Echantillons pour hydrolyse.
- Schéma de procédé,
- Evaluation du coût.

#### **Action 3 : Extraction de la lignine par des solvants**

L'extraction de la lignine par des solvants organiques tels que l'éthanol est une technique qui reste à évaluer, surtout lorsqu'on cherche à avoir une vue précise de l'intégration des différentes étapes du procédé global, particulièrement dans l'évaluation de l'influence de ce type de traitement sur l'hydrolyse enzymatique de la biomasse.

#### **Sous-tâche1.4. Délignification par voie enzymatique**

##### **Action 1. Recherche à « haut débit » d'enzymes de délignification**

Les changements de la composition et de la nature des lignines des substrats à saccharifier (plantes annuelles ou bois) nous obligent à rechercher à haut débit de nouvelles métalloenzymes aux propriétés complémentaires de celles présentes chez le basidiomycète lignolytique *Pycnoporus cinnabarinus*. La biodiversité des basidiomycètes sera explorée (TACHE 2). Nous ciblerons principalement des métalloenzymes à fer et à cuivre. Outre les enzymes de dépolymérisation de la lignine, d'autres enzymes dégradant les monomères libérés ou des enzymes prévenant leur repolymérisation seront particulièrement recherchées. Cette approche sera réalisée grâce à la plate-forme automatisée Génésis (TACHE 2).

**Délivrables : Souches productrices d'enzymes lignolytiques spécialisées.**

**Étape :** Sélection d'enzymes de dépolymérisation, de dégradation des monomères phénoliques et de prévention de la repolymérisation.

**Action 2. Expression homologue et hétérologue de métalloenzymes chez la souche industrielle lignolytique *Pycnoporus cinnabarinus***

Le développement (brevet FR 04/00 366) d'un système de surexpression homologue et hétérologue spécifique sera utilisé lors de cette étude pour la production des métalloenzymes sélectionnées dans l'action 1.

Le système d'expression chez cet hôte sera également amélioré, deux voies seront privilégiées : la recherche de nouvelles séquences promotrices et l'étude du phénomène de RNAi (inactivation de gènes par interférence d'ARN).

**Délivrables : Vecteurs d'expression des enzymes ciblées.**

**Étape :** Recherche de nouveaux promoteurs et étude du phénomène de « gene silencing ».

**Action 3. Optimisation du traitement enzymatique de délignification**

Cette phase sera conduite en parallèle avec la tâche 3 afin de déterminer la meilleure séquence combinant pré-traitement physico-chimique et enzymatique. Le traitement enzymatique sera effectué à l'aide de micro-tests à l'échelle laboratoire et visera à améliorer l'accessibilité de la cellulose et des hémicelluloses aux enzymes d'hydrolyse, à diminuer les pré-traitements physico-chimiques nécessaires et la teneur en composés phénoliques inhibiteurs résiduels. Le traitement sera optimisé pour chaque type de substrat. Un accent particulier sera mis sur la recherche de médiateurs d'oxydo-réduction pour les métalloenzymes à cuivre, à faible coût et biodégradables.

**Délivrables : Définition des meilleures conditions de traitement enzymatique des matériaux lignocellulosiques.**

**Étape :** Compréhension des mécanismes enzymatiques de délignification et de dégradation des monomères phénoliques.

**Sous-tâche 1.5 : bilan et comparaisons**

- Au cours des études laboratoire et pilote, un échange d'information sera effectué de manière régulière entre les responsables des différentes sous-tâches.
- Un bilan comparatif des différentes voies de procédé sera alors établi,
- Le bilan débouchera sur la sélection du procédé le plus adapté, et/ou la mise en évidence de synergies entre les voies étudiées tant en terme d'adéquation du produit qu'en terme de coût.
- Les synergies seront alors démontrées au laboratoire et au pilote pour bâtir le procédé définitif.

**Tâche 2 : Conception et production d'enzymes de saccharification**

**ETAT DE L'ART :** L'hydrolyse enzymatique constitue le principal frein à l'utilisation des matériaux ligno-cellulosiques pour la production de biocarburants. Cette étape clé, représente actuellement environ 50% du prix de revient de l'éthanol issu de cette biomasse. Les champignons filamenteux représentent la première source d'enzymes performantes du monde microbien pour l'hydrolyse des lignocelluloses. Le coût de production industrielle des cellulases par le champignon *Trichoderma reesei* a été réduit de façon significative ces dernières années par l'utilisation combinées de technologies de fermentation originales (fed-batch) et l'amélioration génétique des souches par des approches non-OGM (mutagénèse) et OGM (intégration multi-copies dans le génôme des gènes d'intérêt). Les meilleures productions citées ont été obtenues avec la souche mutante *T. reesei* CL847 qui permet d'atteindre des concentrations d'enzymes de 35 g.L<sup>-1</sup>. Au stade industriel, des productions

de 45 g.L<sup>-1</sup> sont obtenues avec cette souche (communication de la société SAF-ISIS qui a commercialisé 50 tonnes de cellulases en 2002). Cette souche de référence est citée actuellement par des auteurs appartenant à des "majors" de la production d'enzymes comme Genencor International. A notre connaissance, aucun brevet et aucune publication référencés ne font état d'aussi fortes productions de cellulases. Cependant, l'attaque de la cellulose, associée dans les parois végétales à la lignine et aux hémicelluloses, peut être fortement facilitée par l'utilisation d'enzymes auxiliaires permettant ainsi une meilleure accessibilité de la cellulose aux cellulases. Ces enzymes auxiliaires fongiques représentent un enjeu émergent stratégique ; nous pouvons citer principalement des métalloenzymes à fer et à cuivre, des cinnamoyl estérases et des hémicellulases.

**OBJECTIFS ET FINALITES DU PROJET :** Ce projet vise à diminuer le coût de l'hydrolyse des ligno-celluloses en sucres fermentescibles en éthanol qui est actuellement la principale étape limitante pour la production de biocarburants. La recherche à haut débit (HTS) d'enzymes auxiliaires performantes aux propriétés de saccharification complémentaires du système cellulolytique de la souche industrielle *Trichoderma reesei* sera réalisée.

Ces travaux couplés à l'amélioration des performances des enzymes ciblées faisant appel à des approches structurales, aux nanotechnologies et à l'évolution dirigée, permettra de réaliser le modelage du génome de *T. reesei* pour la construction de souches spécialisées en fonction des plantes d'application à traiter (plantes annuelles ou bois) et des contraintes techno-fonctionnelles du procédé.

Ce programme passe par des phases expérimentales de production de ces enzymes fongiques qui seront réalisées à l'échelle laboratoire (quelques litres), puis validées industriellement (bioréacteurs de l'ordre du m<sup>3</sup>). L'approche proposée est originale et concurrentielle internationalement et ne figure pas par exemple dans les programmes actuels du Department of Energy (DOE) des USA dans le cadre de son programme sur l'hydrolyse enzymatique des matériaux ligno-cellulosiques. Les mélanges enzymatiques obtenus seront évalués et validés sur les substrats d'application ciblés (Tâche 3).

#### **Sous-tâche 2.1. : Synthèse bibliographique sur l'état de l'art**

La multiplicité des travaux récents dans le domaine nécessite un suivi bibliographique constant. Une étude bibliographique détaillée sera effectuée avec un effort particulier sur les brevets publiés dans le domaine pour apprécier au mieux les contraintes et possibilités en propriété industrielle.

#### **Sous-tâche 2.2.: Recherche à « haut débit » d'enzymes auxiliaires au sein du Centre Français de Ressources Fongiques**

Les besoins indispensables en enzymes auxiliaires absentes chez *Trichoderma* afin d'améliorer les rendements de saccharification nécessitent l'exploration des potentialités des ressources génétiques fongiques. Cette approche nécessite la mise en place de procédés robotisés adaptés à l'étude à « haut débit » des champignons filamenteux (prélèvements automatisés des lignées, analyses génotypiques et transcriptomiques) qui sera réalisée à l'aide d'une plate-forme automatisée Génésis. Dans le cadre de ce projet, nous avons sélectionné un groupe d'enzymes auxiliaires clés les cinnamoyl estérases responsables de l'attaque des composés cinnamylés liés aux xylanes. La sélection d'enzymes auxiliaires ayant une activité à 50°C compatible avec les cellulases de *Trichoderma* sera privilégiée.

**Délivrable : Enzymes auxiliaires stables à la température.**

**Etape :** Sélection de souches thermophiles produisant des cinnamoyl esterases.

#### **Sous-tâche 2.3. : Amélioration des performances des enzymes ciblées**

##### **Action 1. Etude structurale et fonctionnelle des enzymes ciblées**

Cette étude a pour objectif de déterminer la structure tridimensionnelle de certaines enzymes de dégradation des pailles de blé. L'élucidation du mécanisme d'action de ces enzymes nous permettra de réaliser des modifications au niveau moléculaire afin d'améliorer leurs performances. Compte tenu des contraintes technologiques identifiées, nous avons ciblé essentiellement une modification du potentiel redox pour les métalloenzymes à cuivre qui devrait permettre d'oxyder une gamme plus large de composés aromatiques. Concernant les cinnamoyl estérases nous ciblerons en particulier une amélioration de la stabilité au pH.

### **Action 2. Nanotechnologies : construction d'enzymes bifonctionnelles avec et sans module de fixation à la cellulose**

*L'objectif est de concevoir ex-situ des assemblages pluri-enzymatiques par l'intermédiaire de linker peptidique flexible associant des enzymes aux propriétés techno-fonctionnelles complémentaires (par exemple enzymes cellulolytiques de *Trichoderma* avec des enzymes auxiliaires sélectionnées dans la Tache 1). Ces enzymes bi-fonctionnelles pourront être fusionnées à un module de fixation à la cellulose (CBM). L'action du CBM devrait permettre une défibrillation des fibres de paille, due à la mobilité du CBM sur la cellulose (ancrage réversible) qui provoque un «relâchement» de ces fibres facilitant ainsi l'action des enzymes associées à cette structure. De plus, il permet également d'augmenter localement la concentration des enzymes au sein du substrat et ainsi l'efficacité catalytique de ces enzymes. L'effet synergique généré par le rapprochement physique de ces enzymes devrait permettre d'améliorer efficacement l'hydrolyse des pailles. Nous comparerons l'expression de ces complexes chez deux hôtes *Trichoderma reesei* et *Aspergillus niger*.*

### **Action 3. Evolution dirigée des enzymes**

L'objet de cette partie porte sur l'optimisation d'enzymes de dégradation des ligno-celluloses par ingénierie combinatoire. L'objectif est d'associer l'expertise en enzymologie des équipes disposant des enzymes adaptées. La stratégie consiste à générer, à partir des gènes codant pour les enzymes d'intérêt, une large diversité génétique par mutagenèse aléatoire et recombinaison *in vitro*. Les réactions d'amplification des gènes seront réalisées par PCR à erreur en utilisant des ADN-polymérase non fidèles (Taq polymérase ou Mutazyme<sup>®</sup>) ou par réplication infidèle (MutaGen<sup>®</sup>). Les produits d'amplification obtenus sont ensuite brassés, après fragmentation, afin d'élargir l'espace des variants. Ces techniques générant un très grand nombre de variants à cribler ( $10^6$  à  $10^{13}$  par banque), il sera nécessaire de développer et miniaturiser des protocoles de sélection et/ou de criblage rapides et performants adaptés à chacune des 3 enzymes ciblées, afin d'isoler facilement des variants améliorés, en terme d'efficacité et/ou de stabilité. Les meilleurs variants obtenus seront soumis à de nouveaux cycles de mutagenèse aléatoire et recombinaison pour obtenir une évolution dirigée de ces enzymes vers des variants de plus en plus performants. Les cribles de sélection seront définis en fonction de contraintes ou de performances d'application.

**Délivrable: Structure tridimensionnelle des enzymes ciblées, construction d'enzymes bifonctionnelles avec et sans CBM, enzymes améliorées par évolution dirigée.**

**Etape :** Relation structure-fonction des enzymes ciblées, recherche de cribles de sélection pour les variants obtenus par mutagenèse aléatoire et évolution dirigée.

### **Sous-tâche 2.4. Analyse des « protéomes » de *Trichoderma reesei***

Cette partie vise à identifier le rôle des protéines majeures présentes dans le complexe enzymatique sécrété par *T. reesei*. En effet, si les neuf enzymes cellulolytiques prépondérantes dans ce mélange ont été caractérisées, leur rôle dans le processus d'hydrolyse de substrats d'application n'est pas toujours bien élucidé. De plus, la composition du cocktail enzymatique sera modifiée par l'expression d'enzymes auxiliaires améliorées (Taches 1 et 2).

Nous réaliserons l'analyse protéomique différentielle des protéines sécrétées de *Trichoderma* cultivé sur hydrolysats de paille de blé par exemple et dont l'action sur le substrat de saccharification aura été déterminée, afin de cibler les activités les plus intéressantes. Les protéines, mises en évidence par analyse protéomique différenciée en gel 2-D, seront digérées par la trypsine afin de les identifier par comparaison des profils issus de spectrométrie de masse MALDI-TOF. Les protéines non identifiées par cette méthode seront systématiquement microséquencées par spectrométrie de masse en mode

tandem (MS/MS) et identifiées par comparaison (Blast-P) aux séquences protéiques des bases de données (GeneBank, CAZy).

**Fourniture : Identification des protéines impliquées dans la cellulolyse.**

**Etape :** Etude des mécanismes d'induction de la production d'enzymes cellulolytiques.

### **Sous-tâche 2.5. : Modelage du génome de *T. reesei* pour la construction de souches spécialisées pour la saccharification de paille de blé en sucres fermentescibles en éthanol**

L'étude des protéomes de *Trichoderma* fera apparaître les enzymes « clé » pour la biotransformation du substrat d'application (Tache 3). Ces résultats, couplés aux travaux réalisés dans les phases 1 et 2 permettront de déterminer les enzymes auxiliaires qui devront être incorporées au génome de *Trichoderma* pour la saccharification efficace de la paille de blé et les activités cellulolytiques qu'il conviendra de surexprimer. Afin de mener à bien ce « modelage génomique » de la souche, nous exprimerons les gènes impliqués pour la production de ces enzymes auxiliaires à l'aide de vecteurs d'expression sous le contrôle du promoteur fort et constitutif du gène codant pour la glyceraldéhyde-3 phosphate-déshydrogénase d'*Aspergillus nidulans*. En effet, ce promoteur a été utilisé avec succès dans le cadre d'une étude effectuée par la société Cayla en association avec l'IFP pour la surproduction de  $\beta$ -glucosidase. Les transformants seront sélectionnés sur la base de la résistance à un antibiotique (phléomycine) ou de l'auxotrophie (souche Lys C). L'expression des gènes d'intérêt sera analysée par Northern blot et la production des protéines correspondantes par gel SDS-PAGE et Western blot à l'aide d'anti-corps spécifiques. Eventuellement, le nombre de copies intégrées dans le génome de *Trichoderma* sera déterminé par Southern Blot.

**Délivrable : Transformants de *Trichoderma* exprimant les gènes d'intérêt.**

**Etape :** Mise au point du système d'expression des enzymes auxiliaires dans *Trichoderma*.

### **Sous-tâche 2.6. : Production des enzymes fongiques à l'échelle laboratoire et pilote**

Les meilleures souches de *Trichoderma* obtenues seront testées sur les plans quantitatif (concentration de protéines sécrétées) et qualitatif (activités cellulases, enzymes auxiliaires). Les conditions de culture seront ensuite optimisées avec la (ou les) souche(s) la (les) plus intéressante(s) en mode fed-batch à l'échelle laboratoire et pilote. L'accent sera mis sur les conditions d'agitation et d'aération ainsi que sur les critères de changement d'échelle. L'utilisation des techniques d'analyse protéomique mises au point dans la Tache 3 permettra de suivre le comportement physiologique des souches d'intérêt durant le fed-batch et de valider les critères de changement d'échelle. Les enzymes de délignification (Tâche 1) seront également produites et les conditions de culture optimisées de la même façon que précédemment.

**Délivrable : Conditions de culture en fermenteur des meilleures souches recombinantes et critères de changement d'échelle.**

**Etape :** Etude de la physiologie des souches cultivées en fermenteur.

### **Sous-tâche 2.7 : Génomique dynamique appliquée à *Trichoderma reesei* (recherche de base venant en appui des autres sous-tâches )**

**OBJECTIFS ET FINALITES DU PROJET :** Dans cette étude, nous avons pour objectif de mettre en évidence les différents réseaux de gènes chez *T. reesei* (souche CL847, TACHE 2) et *P. cinnabarinus* (souche industrielle clé pour la production d'enzymes de délignification, TACHE 1). Il s'agit de très grands génomes ayant une taille d'environ 35-40 Mpb, c'est-à-dire 10 fois plus important que ceux d'une bactérie comme *E. coli*. Ces données compléteront les données déjà accessibles (banque EST de *T. reesei* QM6A non annotée financé aux USA). D'autres travaux de génomique chez *Trichoderma* ont été effectués mais sont inaccessibles aux chercheurs du secteur public, ce qui constitue un frein majeur pour l'ensemble des actions de la TACHE 2.

Les nouveaux réseaux de gènes que nous ciblerons grâce à ces travaux seront utilisés pour le modelage du génome de *T. reesei* et pour l'analyse de leur expression que ce soit dans la souche d'origine ou dans les souches modelées génétiquement, afin d'optimiser les paramètres finaux d'hydrolyse des

substrats végétaux. Ces travaux sont essentiels pour avoir une *vision globale et intégrée* du métabolisme original des champignons filamenteux.

En outre, ils permettront à la recherche française d'avoir une position de leader international tant sur le plan cognitif qu'appliqué.

#### **Action 1. Création d'une base de données génomiques pour l'analyse fonctionnelle du génome de *Trichoderma reesei*.**

Les différentes séquences disponibles seront rapatriées (utilisation d'une station LINUX dédiée à la génomique pour le stockage des données et l'annotation et de logiciels de bioinformatique installés en local) et les différents ORF identifiés plus de 8600 (GenMark) pour chaque souche afin de réaliser l'annotation complète du génome de *T. reesei*. Nous pourrions ainsi identifier les gènes (BLAST) codant pour les protéines mises en évidence lors de l'étude des protéomes de *T. reesei* (Sous-Tâche 3) et des principaux réseaux de gènes.

#### **Action 2. Séquençage et annotation du génome de *Pycnoporus cinnabarinus*.**

Plusieurs banques devront être réalisées (banques de petits et de grands fragments) afin d'obtenir un niveau de couverture important (10x). L'ensemble des fragments seront alors séquencés, assemblés et annotés comme pour *T. reesei*.

#### **Action 3. Programme de génomique comparative pour l'étude des conditions de saccharification.**

Nous effectuerons une étude comparative des deux génomes afin de comprendre comment ces deux souches reconnues pour leur activité de dégradation des parois végétales ont développé des capacités enzymatiques différentes, l'une vers la cellulolyse et l'autre pour la ligninolyse. Cette étude nous amènera des informations supplémentaires sur les réseaux de gènes impliqués dans la production des enzymes clés utilisées pour la dégradation des ligno-celluloses.

### **Tâche 3 – Hydrolyse enzymatique**

L'objectif de cette tâche est de valider les enzymes définies dans la tâche 2 et ainsi d'optimiser la production des sucres potentiellement fermentescibles en éthanol, principalement le glucose issu de la cellulose, mais aussi les sucres provenant des hémicelluloses comme les pentoses (xylose et arabinose) et certains hexoses (galactose et mannose). L'incidence de certaines options au niveau du process comme la délignification sera également estimée à ce niveau.

Plusieurs sous-tâches sont envisagées :

- Synthèse de l'état de l'art,
- Définition des méthodes de caractérisation des hydrolysats (sucres et inhibiteurs de la fermentation éthanolique, rhéologie,...),
- Mise en œuvre des enzymes issues de la tâche 2,
- Optimisation des paramètres d'hydrolyse enzymatique (concentration de substrat, température, pH, co-facteurs éventuels, temps de séjour...). Le degré d'hydrolyse requis sera validé avec les acteurs de la tâche 4,
- Préparation d'échantillons pour la tâche 4.

Une grande partie des essais sera réalisée en réacteurs de laboratoire. La validation ultime et les bilans seront effectués sur unité pilote (cuves disponibles 7m<sup>3</sup> et 13m<sup>3</sup>)

**DELIVRABLES : Sélection du meilleur mélange enzymatique, définition des paramètres procédés, les cinétiques d'hydrolyse, les données nécessaires à l'estimation du coût de l'hydrolyse, le schéma du procédé et la matière première pour la fermentation.**

## **Tâche 4 : Fermentation éthanolique des hydrolysats de lignocellulose**

### **Sous -Tâche 4.1. Etat de l'art**

L'objet de cette étude est l'analyse bibliographique détaillée des travaux scientifiques concernant les stratégies visant à convertir, par voie microbienne, les substrats - pentoses et hexoses - des hydrolysats de lignocellulose en éthanol. Il s'agit de focaliser la synthèse des connaissances acquises sur :

- La caractérisation physico-chimique du milieu dont l'existence d'inhibiteurs et de carences vis à vis des réactions microbiennes et enzymatiques,
- les souches natives ou génétiquement modifiées capables de fermenter les C5 et C6, leurs performances fermentaires (cinétiques microbiennes) , leurs limitations de mise en oeuvre (tolérance à l'éthanol, aux inhibiteurs présents dans les hydrolysats, thermo-tolérance...)
- les différentes stratégies de fermentation mises en oeuvre en comparant les principes, les performances, les contraintes, les limites microbiologiques et technologiques.

Délivrable : rapport de synthèse bibliographique

### **Sous -Tâche 4.2. : Sélection d'une souche de *Saccharomyces cerevisiae* et détermination de ses capacités fermentaires**

#### **Action 1. Sélection de souches**

L'objectif est de sélectionner une souche de *Saccharomyces cerevisiae* ayant les meilleures performances en regard de ces exigences de résistance aux inhibiteurs, à l'alcool et à la température en prenant en compte les exigences nutritionnelles de la souche. A cet effet, les travaux consisteront en :

1. Définition du test de screening,
2. Evaluation de différentes souches de levures de collection selon le test défini,
3. Comparaison des performances atteintes par les souches sur le milieu test et sur un milieu sans inhibiteur à différentes températures,
4. Au besoin, amélioration de la meilleure souche capable de se développer sur milieu fortement inhibiteur en la soumettant par exemple à des phases de culture en présence de pressions de sélection alternant avec des phases de régénération ou en ayant recours à d'autres techniques de sélection.

**Délivrable : Une souche de levure résistante aux inhibiteurs HMF et furfural présentant des performances classiques de production d'éthanol proches de celles obtenues sur substrat type amidon hydrolysé**

**Durée: 12 mois**

#### **Action 2. Détermination des capacités fermentaires de la souche sélectionnée**

Ces travaux visent, dans un premier temps, à optimiser le milieu de fermentation –fourni par la tache 3- vis à vis des exigences nutritionnelles de la levure –issue de la tache 4.2.1-ar complémentation pour éviter toute limitation ou par détoxification pour réduire voire éliminer les effets inhibiteurs de certains composés des hydrolysats.

Dans une seconde partie, l'étude consistera en l'établissement des capacités fermentaires extrêmes de la souche sélectionnée, sur milieu synthétique et milieux réels, dans des conditions comparables à celles qui positionnent, au meilleur niveau international, les performances fermentaires obtenues au Laboratoire de Biotechnologies et Bioprocédés, à savoir 19°GL. en 45 heures.

**Délivrables : définition de la composition du milieu satisfaisant aux exigences nutritionnelles du micro-organisme, méthode(s) de complémentation du milieu, performances de la souche sur milieu synthétique et milieu industriel: cinétiques de croissance et production, rendements, tolérance éthanol, performances limites.**

### **Sous-tâche 4.3. Production de la souche de *Saccharomyces cerevisiae* sélectionnée sous forme sèche et active**

Une des demandes du marché de la production d'éthanol dans différents pays est de fournir une souche de levure sous forme sèche et active dont la mise en œuvre soit simple et immédiate. Cette demande trouve son origine dans :

- ✓ la maîtrise des coûts de la production d'alcool en supprimant la phase de propagation des levures qui nécessite des investissements spécifiques difficilement amortissables pour une usine de production d'alcool
- ✓ la maîtrise du procédé en évitant toute dérive de la souche et en s'affranchissant du problème du recyclage des contaminations bactériennes qui engendrent des pertes de rendement.

L'objectif de ces travaux consiste donc en l'étude de la possibilité de produire la souche de *Saccharomyces cerevisiae* sélectionnée sous forme sèche et active

**Délivrables Un produit commercialisable contenant une levure sèche, active, adaptée à la production d'éthanol ex biomasse et pouvant se conserver à température ambiante**

### **Sous-tâche 4.4. Construction d'une souche capable de fermenter les C5**

A partir d'une souche de laboratoire ayant la capacité de fermenter le xylose selon une des voies actuellement à l'étude par différentes équipes en Europe, des outils seront mis en œuvre pour réaliser la transposition de la construction stable dans une souche industrielle.

Cela sous-entend l'intégration des gènes d'intérêt dans le génome de la levure en s'affranchissant de tout ADN autre que les gènes d'intérêt (absence de marqueurs, fragments de plasmides,...).

Le programme de cette étude sera fonction de la voie métabolique choisie et des interférences de cette voie avec le métabolisme basal de la levure. Il est difficile de prévoir les difficultés qui seront rencontrées.

Par ailleurs, le nombre de copies à intégrer dans une souche de levure peut se révéler être un facteur limitant de l'étude. En effet, ce nombre de copies peut se révéler primordial dans la maîtrise des flux métaboliques.

Dans le cas de **la voie xylose isomérase**, en disposant de tout le matériel génétique transmis par une équipe universitaire qui reste à déterminer :

- ✓ Travail sur l'intégration d'une xylose isomérase dans une souche industrielle
- ✓ Renforcement de la voie xylulose kinase

Pour **la voie de la xylose réductase** :

- ✓ Travail sur l'intégration des 2 gènes XR et XD dans une souche industrielle
- ✓ Renforcement de la voie xylulose kinase (cf. plus haut)

Pour **la voie arabinose via le ribulose** :

- ✓ Travail sur l'intégration des 3 gènes AI, RK et RE dans une souche industrielle

Ce programme tient compte d'un déroulement simultané des études décrites ci-dessus des trois voies. Il ne prend pas en compte les difficultés qui seront rencontrées, notamment pour :

- ✓ Le maintien de la balance rédox de la levure recombinée
- ✓ L'équilibre des flux des différentes voies métaboliques de base en coordination avec les nouvelles voies métaboliques introduites
- ✓ L'ajustement de l'expression de différentes voies métaboliques permettant le fonctionnement adéquat du microorganisme génétiquement modifié

De plus, compte tenu des connaissances accumulées par plusieurs équipes universitaires européennes et de l'état la propriété intellectuelle, un partenariat avec une ou plusieurs de ces équipes nous paraît indispensable. Il sera alors possible de modifier programme de recherche prenant en compte les écueils rencontrés à ce jour.

**Délivrables : Des souches de levures industrielles, stables, génétiquement modifiées selon les trois voies de fermentation des sucres C<sub>5</sub>, dont la fonctionnalité aura été précisée et pour lesquelles, si nécessaire, des pistes d'amélioration de leur comportement auront été identifiées.**

#### **Sous-tâche 4.5. Définition et étude d'une stratégie de fermentation pertinente. Echelle Laboratoire**

Cette étude a pour objectif la définition et la mise en œuvre d'une stratégie de fermentation pertinente selon des critères de productivité en éthanol et/ou de concentration et de rendements éthanol/substrat ; les différents modes de conduite (fed-batch, continu, recyclage cellulaire...), combinant de façon optimale réactions enzymatiques et microbiennes, seront envisagés pour sélectionner le bioprocédé. Un pilote sera élaboré afin de valider expérimentalement la stratégie sélectionnée.

Des cultures de la souche *Saccharomyces cerevisiae* retenue dans les tâches précédentes seront réalisées sur milieu industriel. Les performances fermentaires seront caractérisées en termes de cinétiques de consommation et de production, de productivité, de concentration en éthanol et co-produits, et de rendements. La modélisation du procédé fermentaire sera proposée par un modèle non structuré, à partir des bilans matières et des cinétiques des réactions microbiennes et enzymatiques.

**Délivrable : Définition d'un bioprocédé, performances productivité/titre/rendements sur pilote laboratoire, bilans matière, modélisation.**

#### **Sous-Tâche 4.6 : Extrapolation à l'échelle pilote**

Sur les levures et le procédé retenu dans les sous-tâches précédentes, l'extrapolation sera faite à l'échelle de fermenteurs de 50 l et de 5000 l sur substrat produit à l'échelle pilote, incluant la mise en place d'un procédé continu avec recyclage des crèmes de levure par séparation centrifuge incluant la mise en place d'un procédé continu avec recyclage.

**Délivrables :**

- **paramètres de fermentation industriels,**
- **degré d'alcool avant distillation,**
- **analyse de vinasses après distillation au laboratoire,**
- **Cinétique et rendements.**

#### **Sous-tâche 4.7: Etude de la pertinence des co-cultures. Echelle laboratoire.**

Ces travaux visent à étudier la pertinence de la mise en œuvre d'une co-culture pour la fermentation des sucres en C5 et C6. Le principe est l'association de deux micro-organismes fermentant successivement et préférentiellement les sucres en C5 et C6. Selon ce principe, au sein d'un même procédé, il s'agit d'étudier les possibilités d'agencer,

1. la fermentation des sucres en C5 fortement inhibée par l'éthanol produit d'une façon générale,
2. la fermentation des C6 réalisée par un micro-organisme plus tolérant à l'éthanol.

Les attendus sont l'optimisation de la conversion des substrats C5 et C6 en éthanol, l'obtention d'une productivité en éthanol, et/ou titre compatible avec la viabilité économique du procédé.

Les efforts devront être focalisés sur le choix des micro-organismes et du mode de conduite du bioprocédé dans le respect des effets inhibiteurs potentiels d'un micro-organisme sur l'autre et les compatibilités de conditions opératoires de culture (température, pH, aération...). Des essais sur un pilote élaboré à l'échelle du laboratoire seront réalisés et caractérisés en termes de productivité en éthanol, titre et rendements.

**Délivrable : Définition d'un bioprocédé co-culture, performances productivité / titre / rendements sur pilote échelle laboratoire**

#### **Tâche 5 – Distillation – Traitement des effluents – Vinasses – Co-produits**

L'objectif de cette tâche concernera l'adaptation des connaissances actuelles à ce nouveau type de procédé de production d'éthanol. Un gros effort sera entrepris, visant à réduire les volumes d'eau utilisés. En étroite liaison avec la tâche 6, l'influence de certaines options comme la délignification

initiale de la matière première sur la nature et la quantité des effluents, vinasses et autres produits ainsi que certaines possibilités de recyclage des vinasses seront évaluées.

#### **Sous-tâche 5.1 : distillation et déshydratation**

- Définition des méthodes utilisées sur l'existant
- Adaptation des technologies en fonction des produits entrant attendus et des normes produits sortants et effluent envisagées.
- Distillation Facteurs sensibles
  - . Concentration de l'éthanol
  - .eneur en sels minéraux
  - . Extraction des co-produits (alcools secondaires, aldéhydes, ...) en fonction des normes admises
  - . Encrassement des plateaux
- Déshydratation
  - . Taux
  - . Rendement / Pertes Alcool

#### **Sous-tâche 5.2 : Traitement des effluents**

- Méthodes actuelles : Bassin de décantation, méthanisation, CO<sub>2</sub>
- Adaptation à la nouvelle filière de production d'éthanol

#### **Sous-tâche 5.3 : Vinasses**

- Concentration, utilisation

#### **Sous-tâche 5.4 : Coproduits – DDGS – autres**

- Utilisation / valorisation

### **Tâche 6 – Intégration du procédé (Process Integration)**

L'intégration de procédé consiste à associer et à faire fonctionner ensemble les différentes opérations unitaires constitutives du procédé mis au point (préparation des substrats, traitements enzymatiques, fermentation, distillation, valorisation des co-produits...). Basé sur l'établissement d'un diagramme général et des bilans de flux, au moyen de logiciels spécialisés de type ASPEN ou PROSIM, elle prend en compte les données provenant des capteurs équipant l'atelier et conduit à la mise au point d'outils de simulation et de changement d'échelle.

L'objectif de cette tâche est de développer un modèle de flow-sheet du procédé dans son ensemble en y intégrant les données des bilans matière et énergie. Le modèle sera développé principalement pour évaluer plusieurs configurations de process et l'intérêt de certaines options envisagées.

Il sera utile pour orienter les travaux de recherche et visera à minimiser la demande en énergie ainsi que les consommations d'eau, notamment en optimisant les recyclages. Une fois les meilleures options validées, les données seront intégrées dans la tâche 7.

Les différentes sous-tâches sont les suivantes :

#### **Sous-tâche 6.1.**

- Instrumentation des équipements pilote (capteurs, systèmes de mesure, outil de supervision)

#### **Sous-tâche 6.2.**

- Traitement des données – Etablissement des bilans de flux et des cinétiques réactionnelles – développement des capteurs logiciels et de fonctions de diagnostic et d’alarme.

### **Sous -tâche 6.3.**

- Mise en place des diagrammes de flux (flow sheeting) et intégration du procédé.

La tâche 6, d’une durée de 12 mois, se situe pendant les 18 derniers mois du programme, au moment où les équipements pilotes sont fonctionnels. Toutefois, la « SOUS-TACHE 6.1 ». (instrumentation) sera réalisée au fur et à mesure de la mise en place des équipements pilotes et la « SOUS-TACHE 6.2. » sera entreprise dès que les données recueillies à échelle pilote seront disponibles.

### **Délivrables: flow-sheet optimisé du procédé**

## **Tâche 7 : Bilans ACV : massique et énergétique et effet de serre**

### **Objectifs :**

L’objectif de l’étude est de faire d’abord un inventaire des données existantes, puis de l’actualiser et de préciser par des compléments obtenus auprès des acteurs : Centre de Recherche, Centres Techniques, Industriels et Filières professionnelles concernés, l’analyse du bilan massique, énergétique et des émissions de gaz à effet de serre, des produits obtenus :

- de la production jusqu’au dépôt de distribution (du puits au réservoir)
- de la production jusqu’à l’utilisation finale (du puits à la roue) (si possible).

La méthode d’analyse sera rigoureusement présentée et validée, et notamment dans le cas d’une production de plusieurs co-produits, elle devra permettre, par une clé de répartition (pondérale, énergétique ou autre) de déterminer les dépenses énergétiques des filières.

Les filières suivantes seront analysées :

\*1-Ethanol : à partir de betteraves et de blé obtenu à partir des unités nouvelles à installer de grandes capacités;

\*2-Ethanol : à partir de ligno-cellulose avec les différentes options possibles mises en évidence au cours des phases d’étude des procédés;

\*3-Essence SP 95 (spécifications 2005 et prévisions 2010), filière de référence.

### **Méthode :**

La même méthode sera appliquée à l’ensemble des filières afin de permettre une véritable comparaison. Tous les détails de l’analyse des flux de matière ou d’énergie entrants ou sortants par étape seront indiqués avec les valeurs massiques, les contenus énergétiques utilisés, les valeurs énergétiques obtenues, brutes et éventuellement pondérées, pour les entrants et les produits, phase par phase et étape par étape, ainsi que leurs références. Il sera fait mention particulière des entrants en énergies fossiles qui seront comptabilisés séparément. Les résultats agrégés par étape, phase et filière seront calculés et présentés avec une marge d’incertitude déterminée dans chaque cas. Toute l’analyse et les résultats seront conformes aux définitions, à la méthodologie, à la déontologie et à la présentation indiquées dans la norme ISO 14040 de septembre 1997 relative au management environnemental et à l’analyse du cycle de vie.

Les options ou variantes significatives de procédés ou de technologies seront également prises en compte ; les clés de répartition d’une production d’énergie commune pour plusieurs utilisateurs ou plusieurs usages et les cas éventuels de cogénération d’énergie seront précisés, avec mention des rendements et de l’énergie produite à chaque étape, en fonction des critères technologiques envisageables.

On distinguera, en ce qui concerne la production des deux types (1 et 2 ci dessus) de biocarburants :

- les installations de production existantes ou en projet (y compris à l'étranger), en s'attachant à distinguer les différents procédés performants suivant leur efficacité énergétique ;
- les voies d'amélioration possible et donc les gains prévisibles de productivité et l'impact sur le bilan énergétique, envisageables à court et moyen termes. Les ordres de grandeur des investissements nécessaires, des gains escomptés en terme de coût de revient et des temps de retour de l'investissement seront évalués.

Il sera tenu compte de l'influence de la taille de l'installation, notamment par référence aux meilleures unités industrielles comparables et existantes à l'étranger.

Les données relatives à la production agricole et forestière seront fournies entre autres par le Module « Ressources »

L'évaluation des filières de carburants fossiles fera l'objet d'un rassemblement des données disponibles avec une évaluation des facteurs d'évolution notamment liés à la sévèrisation du raffinage et des dispositions définies par les directives sur la spécification des carburants.

A partir de ce bilan énergétique, une analyse des gaz à effet de serre, sera également effectuée selon les données disponibles, avec indication des références utilisées.

Un prestataire spécialisé pourra être choisi pour effectuer le recueil normalisé des données, leur traitement et leur présentation. L'analyse du bilan énergétique et de ses impacts donnera lieu à la rédaction d'un rapport final et d'un document de synthèse, conformément à la norme ISO 14040, ce dernier document, d'une trentaine de pages environ, étant destiné à être rendu public.

Le prestataire fournira également, sous format de type tableur, les données utilisées, détaillées par étape et par produit : ces données devront permettre la réalisation ultérieure de simulations et la construction de différents scénarii.

#### **Sous-tâche 7.1 :Description de la méthode retenue en commun :**

L'élaboration des bilans est conforme à la méthodologie normalisée des Analyses de Cycles de Vie (ACV)<sup>3</sup>, limitée cependant au suivi de certains indicateurs énergétiques, de flux de gaz à effet de serre et de certains effluents à définir.

Dans le cas des biocarburants, une modélisation des différentes étapes de production : agricoles, transports et transformations industrielles sera effectuée. Les frontières du système seront définies, les sources des données seront indiquées et les règles d'allocation des produits et des co-produits seront arrêtées.

#### **Sous-tâche 7.2 :Recueil de la description des procédés avec toutes les options possibles retenues à explorer (en liaison avec les autres tâches) :**

Il s'agit de décrire de façon détaillée chacune des filières étudiées avec un schéma des frontières du système et la description des étapes ou procédés de la filière avec mention des produits entrants et sortants.

#### **Sous-tâche 7.3 :Recueil des données massiques de chaque produit entrant ou sortant et de chaque rejet solide, liquide ou gazeux, pour chaque étape du procédé :**

Le schéma précédent est complété par les masses des produits concernés et des effluents.

#### **Sous-tâche 7.4 : Recueil des données de consommations énergétiques primaires pour chaque étape du procédé :**

---

<sup>3</sup> Série de normes ISO 14040 à 43.

Chaque étape fera l'objet d'un inventaire des contenus énergétiques de chaque produit utilisé entrant et de leur consommation énergétique primaire non renouvelable correspondante.

**Sous-tâche 7.5 :Imputation des consommations énergétiques primaires aux produits intermédiaires et finaux obtenus :**

Selon les règles d'allocation retenues à la sous-tâche 1, les consommations énergétiques primaires seront imputées à chaque produit ou co-produit obtenu, intermédiaire ou final, par kg et/ou MJ.

**Sous-tâche 7.6 :Etablissement des bilans énergétiques : énergie renouvelable produite/énergie fossile consommée par carburant, biocarburant ou produit obtenu :**

Selon les indicateurs de bilans énergétiques définis et choisis, la performance énergétique de chaque filière sera exprimée, avec le détail pour chaque étape ou procédé. Les résultats seront exprimés en terme d'énergie renouvelable obtenue par rapport à l'énergie fossile consommée par carburant, biocarburant ou produit obtenu, par kg et/ou MJ.

**Sous-tâche 7.7 :Indication et recueil des émissions de gaz à effet de serre pour chaque étape du procédé ou de la filière :**

Selon les indicateurs de gaz à effet de serre définis et retenus, les valeurs des émissions seront réunies, mises en forme et agrégées pour chaque étape du procédé ou de la filière.

Selon les règles d'allocation retenues ,les émissions de gaz à effet de serre seront imputées à chaque produit ou co-produit obtenu ,intermédiaire ou final ,par kg et/ou Mj.

**Sous-tâche 7.8 :Etablissement des bilans des émissions de gaz à effet de serre et des gains obtenus :**

Selon les résultats obtenus avec les tâches 7 et 8, les bilans des émissions de gaz à effet de serre et les gains obtenus par comparaison de plusieurs filières, étapes ou procédés seront présentés par kg et/ou Mj .

#### 4.4. Module 4 "évaluation"

##### **Evaluation socio-technico-économique et environnementale - Descriptif**

Le PNRB s'inscrit dans le cadre du développement durable. Il intègre donc une évaluation des filières de production de biocarburants explorées par le programme selon des critères technico-économiques, environnementaux et sociaux. Schématiquement, le module «évaluation» a pour tâche de fournir un cadre méthodologique commun aux données fournies par chaque module technique (ressource, voie thermochimique, voie biologique), de les agréger et d'établir un bilan comparé afin d'orienter les choix techniques au cours du programme et à son terme. On entend par filière la combinaison d'une ressource, d'un type de procédé et d'un biocarburant.

##### **Tâche 1 : définir le cadre méthodologique permettant l'évaluation et la comparaison des filières.**

Afin d'assurer la cohérence entre les évaluations microéconomiques et environnementales par filière, établies par les modules techniques (ressources, voie thermochimique, voie biologique), on définira un cadre méthodologique commun. Cette tâche comprendra :

- un inventaire préalable des normes de description d'activités et des méthodes de comparaison relatives aux filières étudiées à partir des études technico-économiques et ACV existantes;
- la définition de cahier des charges de la méthodologie d'évaluation à établir; notamment:
  - o la détermination des filières (avec variantes techniques, à analyser) ;
  - o le choix des limites de l'étude ;
  - o la définition des paramètres à retenir pour les critères technico-économiques, environnementaux (méthode analyse de Cycle de vie au sens des normes ISO 14040 à 14043) et sociaux (classes d'impacts et pondération, cadre temporel, scénarii de référence, paramètres techniques et économiques ...)
- l'élaboration d'un cadre méthodologique d'évaluation multicritères et de comparaison intra filière énergétique, définissant les bases de ces bilans comparés (filières de référence, ...)

##### **Tâche 2 : établir les bilans intra-filière énergétique et leur comparaison**

A partir de l'analyse des données fournies par les modules techniques (ressources, voie thermochimique, voie biologique) et des outils définis en tâche 1, établir :

- les bilans globaux des filières biocarburants étudiées et de leurs variantes ;
- la comparaison des bilans des variantes d'une même filière biocarburant et des filières biocarburants entre elles ;
- des recommandations pour orienter les choix entre variantes technologiques selon les objectifs poursuivis (ex: maximisation de la production de biocarburants ou de la réduction des gaz à effet de serre, ou compromis,...)

##### **Suite des tâches 1 & 2 : comparaison macro-économique entre usages énergétiques concurrents de la biomasse**

Les résultats des tâches 1 et 2 pourront servir ultérieurement à une comparaison macro-économique entre usages énergétiques concurrents de la biomasse (carburants, chaleur, électricité, hydrogène). Une telle évaluation comparative reposera sur l'utilisation de modèles d'analyse (multicritères et / ou monétaire) à sélectionner.

L'analyse fournira des éléments pour orienter les choix selon l'objectif retenu (politique énergétique, coût public, optimisation de l'usage de la biomasse ...) et les hypothèses prospectives retenues.