



HAL
open science

SYLVABIOM: Nouveaux concepts de cultures ligneuses durables pour la production de biomasse à des fins énergétiques

Jean-Charles Bastien

► **To cite this version:**

Jean-Charles Bastien. SYLVABIOM: Nouveaux concepts de cultures ligneuses durables pour la production de biomasse à des fins énergétiques. Quelle recherche pour les Énergies du futur? Colloque Bilan Énergie ANR, Jan 2012, Lyon, France. 1 p. hal-01267761

HAL Id: hal-01267761

<https://hal.science/hal-01267761>

Submitted on 6 Jun 2020

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

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

SYLVABIOM

Nouveaux concepts de cultures ligneuses durables pour la production de biomasse à des fins énergétiques
Programme Bioénergies Edition 2008



Coordonné par l'**INRA d'Orléans**, ce projet associe des chercheurs concernés par l'amélioration génétique et la physiologie d'espèces forestières de l'**INRA de Nancy**, de **FCBA**, de l'**Université d'Orléans**, et de l'**IDF**

Contexte et Objectifs

La pérennité économique des filières de production de bioénergie, nécessite de mobiliser durablement de très grands volumes de biomasse sur des territoires restreints. L'utilisation de cultures d'arbres à croissance rapide, dédiées à la production de biomasse est une des voies envisageables pour contribuer aux objectifs fixés par l'union européenne en matière de développement des énergies renouvelables. Toutefois, l'extension de ces cultures, installées sur des territoires en général moins fertiles qu'en exploitation agricole, suppose en premier lieu une bonne adéquation entre la station, l'espèce et les méthodes de culture.

Dans ce contexte, le projet SYLVABIOM vise à estimer, pour diverses espèces ligneuses, l'influence des facteurs génétiques et environnementaux (dont le traitement sylvicole) ainsi que leur interaction sur les paramètres du fonctionnement de l'arbre qui déterminent sa production de biomasse.



▲ Vues de taillis à courte ou très courte rotation de peuplier, saule et robinier dans les sites atelier d'Echigey (21) et de Guéméné Penfao (44).

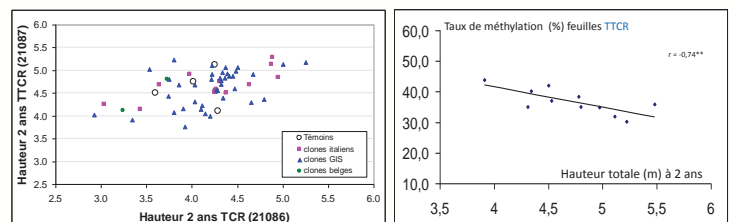
Méthodologie et Résultats

Dans le cadre d'un traitement en taillis à courte et très courte rotation (TCR et TTCR), et pour trois espèces (peuplier, robinier et saule), le projet s'appuie sur le suivi de la croissance et de l'efficacité avec laquelle les arbres utilisent l'eau et l'azote dans un réseau de sites ateliers, situés dans des stations contrastées et dans lesquels sont suivis les paramètres environnementaux (climat, humidité et température du sol, le rayonnement incident, fertilité du sol), l'espacement initial et la diversité génétique de chaque espèce.

Au plan fondamental, un objectif est aussi d'évaluer la pertinence du taux de méthylation de l'ADN en tant que marqueur précoce du niveau de productivité. Enfin, dans le cadre d'un traitement en futaie à courte rotation (FCR), le projet repose sur la collecte de données de croissance dans les réseaux expérimentaux des programmes de sélection génétique de l'INRA et de FCBA, en vue de construire des tarifs de biomasse et de minéralomasse compartimentées pour des essences peu documentées (séquoia, thuya, douglas, mélèze, etc.).

Conclusions et Perspectives

La mise en place d'un réseau expérimental couvrant 7 ha de plantations à vocation énergétique dans quatre sites contrastés en France est maintenant achevée. Après deux années de végétation, des différences significatives apparaissent, tant en TCR qu'en TTCR, entre les trois espèces, et entre clones intra-espèce, pour la croissance en hauteur, la production en biomasse, la phénologie, l'architecture et l'efficacité d'utilisation des ressources. Des résultats préliminaires laissent penser que la mesure du taux de méthylation de l'ADN d'apex ou de feuilles pourrait constituer un bon prédicteur du potentiel de croissance chez le peuplier.



▲ Echigey : variabilité clonale pour la hauteur totale à 2 ans (60 clones) et pour la liaison "croissance - taux de méthylation de l'ADN" (10 clones).

Enfin dans le domaine des FCR, les résultats montrent que des productions comprises entre 7 et 13 m³/ha/an peuvent être espérées à 20 ans avec des conifères à croissance rapide, susceptibles de couvrir d'autres gammes de stations que les espèces cultivées en TCR ou TTCR.

CONTACT :

Jean-Charles Bastien - INRA Centre d'Orléans
2163 Avenue de la Pomme de Pin
CS 40001 ARDON - 45075 ORLEANS Cedex 2
Jean-Charles.bastien@orleans.inra.fr

EMERGE

Élaboration de Modèles pour une Estimation Robuste et Générique du bois Énergie

Programme Bioénergies Edition 2008



Coordonné par l'Office National des Forêts, ce projet réunit l'ensemble des partenaires forestiers intéressés par la *quantification de la ressource* : les chercheurs de l'INRA, du Cemagref, de FCBA et du CIRAD, l'Inventaire Forestier National, et les propriétaires forestiers, la forêt privée étant représentée par le CNPF

Des évaluations compatibles de volumes, biomasses et minéralomasses

Si les forestiers savent depuis longtemps estimer le **volume commercial** de leurs arbres à l'aide des « tarifs de cubage », le premier objectif de ce projet est de pouvoir estimer le **volume** complémentaire de bois énergie que l'on trouve principalement dans le houpier (les branches), et d'en déduire des **prédictions fiables de biomasse de bois énergie** compatibles avec les estimations de volumes de bois d'industrie et de bois d'œuvre. À ces modèles seront associés des estimations de **minéralomasse** et de **pouvoir calorifique** afin d'étudier plus finement les **bilans de fertilité et d'énergie**.

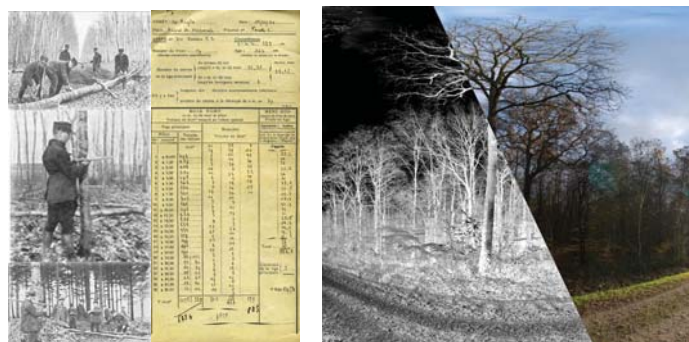


▲ Toute la variabilité architecturale des essences forestières doit être prise en compte, des résineux cylindriques à gauche aux feuillus les plus foisonnants à droite.

Ces tarifs doivent être assez **robustes** pour être utilisés dans **différentes régions** et pour les **principales essences forestières**. Les gestionnaires ont besoin de ces outils partagés pour mobiliser le bois énergie, mais ces mêmes outils seront utilisés à l'échelle nationale pour les estimations de biomasse et de carbone.

Une modélisation générique et robuste

L'enjeu du projet étant une modélisation générique des volumes, biomasses, minéralomasses des principales essences forestières, la première étape a été la création d'un **entrepôt de données** d'une ampleur nouvelle, **croisant les échelles de détail** (volumes de tige aux minéralomasses de menus-bois) **et de représentativité** (des données recherche à l'échelle ressource de l'IFN). Les modèles sont en cours de construction et une démarche générique assure leur **robustesse** et la **compatibilité** entre variables.



▲ Dans ce projet se côtoient des mesures longuement acquises dans les années 30 à 50 (80 000 fiches papier à gauche numérisées grâce au projet) et des données issues des dernières méthodes de mesure par laser terrestre (41% du financement du scanner Faro Photon 120 assuré par l'ANR).

En parallèle **des innovations** sont attendues en **dendrométrie**, c'est-à-dire en métrologie appliquée à l'arbre : le **laser terrestre** pour appréhender les mesures externes de l'arbre en forêt et le **scanner tomographique** pour évaluer la distribution de densité interne de l'arbre. La complexité des houppiers explique la difficulté à reproduire beaucoup de mesures sur arbres abattus et l'intérêt de pouvoir accéder à ces informations par de nouveaux outils rapides et non destructifs.

Des résultats attendus fin 2012

Les résultats de modélisation seront **mis en perspective** courant 2012 à **l'échelle de la ressource** pour les évaluations de carbone des forêts, tandis que des bilans énergie/fertilité seront établis à **l'échelle du peuplement** pour comparer différents modes de récolte du bois énergie.

Si les résultats sont par ailleurs publiés dans des revues scientifiques par les partenaires de la recherche, les deux partenaires gestionnaires se sont engagés à publier les résultats techniques dans les deux revues destinées aux gestionnaires : les **Rendez-Vous Techniques** de l'ONF et **Forêt Entreprise** du CNPF.

CONTACT :

Christine DELEUZE – R&D ONF
21 rue du Muguet
21100 DOLE
Christine.deleuze@onf.fr



INVENTAIRE FORESTIER
NATIONAL



Coordinateur : FCBA

Partenaires : CEA, CIRAD, EMAC, GDF Suez, GIE Arvalis-Onidol, RAGT

Contexte et Objectifs

L'objectif du projet AMAZON est d'optimiser l'utilisation du potentiel de biomasses lignocellulosiques diversifiées (France - Brésil) dans les procédés de transformation par voie thermochimique, en particulier la gazéification pour les voies BtL et SNG. Pour cela, il s'agit de :

- Etudier l'adéquation entre les ressources lignocellulosiques en France et au Brésil (disponibles ou à développer) et les procédés de gazéification,
- Vérifier dans quelle mesure les biomasses considérées sont bien adaptées à production de biocarburants de 2^{ème} génération par la voie thermochimique
- Tester l'influence de la variabilité des biomasses testées sur les performances du procédé.
- Développer des séquences de pré-traitements permettant une concentration énergétique avant la gazéification
- Etudier le comportement de différentes biomasses en mélange vis-à-vis de la gazéification

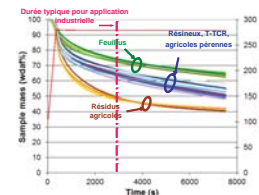


Méthodologie et Résultats

Des lots conséquents des biomasses suivantes ont été récoltées, séchées lorsque nécessaire, et broyées en juin 2010 à la Plateforme expérimentale de broyage du GIE ARVALIS/ONIDOL à Tullins (38) :

- Triticale
- Féтуque
- Paille de blé
- Miscanthus
- Switchgrass
- TTCR peuplier
- TCR peuplier
- TCR eucalyptus
- PF feuillus (hêtre)
- PF résineux (épicéa)

- Caractérisation des biomasses approvisionnées (CHONS, PCI, éléments minoritaires, analyse immédiate, granulométrie, densité, analyse des sucres) et mise en place de la base de données caractérisation par FCBA et autres partenaires.
- Essais de torréfaction en ATG au CEA afin d'étudier la cinétique de perte de masse du solide. 17 biomasses brutes testées dans des conditions identiques. 3 types de comportement mis en évidence: celui des bois durs, celui des bois tendres, taillis et cultures pérennes, et enfin celui des autres biomasses agricoles.



- Essais de vapogazéification de char en ATG menés au CEA sur plusieurs des biomasses sélectionnées (miscanthus, triticale, paille de blé, féтуque, TCR peuplier, TCR eucalyptus). Des différences de réactivité de plus d'un facteur 20 observées ainsi que deux types d'évolution de la vitesse avec la conversion.
- Essais de torréfaction effectués au CIRAD dans le dispositif de laboratoire ALIGATOR afin d'obtenir des bilans matières complets. La nature de la biomasse influence fortement la perte de masse, mais aussi la nature des espèces condensables produites durant la réaction.

Conclusions et Perspectives

- Différences importantes de comportement « procédés » observées pour les différentes biomasses agricoles et forestières
- Poursuite du programme en particulier sur les mélanges de biomasse.

CONTACT :

denilson.dasilvaperez@fcba.fr



Coordinateur: FCBA.

Partenaires: UCFF (CAFSA, COFOGAR, COFORET, F&BE), Cemagref, SKCDP, FIBRE EXCELLENCE R&D KRAFT.

Contexte et Objectifs

La demande en biomasse d'origine ligno-cellulosique s'accroît pour une valorisation énergétique (bioénergie) ou pour la production de bio-produits industriels (chimie verte). La création de nouveaux gisements à partir de périmètres spécialisés devient un enjeu stratégique.

Outre les cultures annuelles ou bisannuelles, les cultures dédiées d'espèces forestières (Taillis à Courte ou Très Courte Rotation, plantations semi-dédiées) vont également contribuer à l'apport de matière première ligno-cellulosique.



Photo: R. Spinelli

L'objectif principal est de développer la mécanisation pour mieux contrôler les coûts lors des trois phases principales de culture de cette biomasse ligno-cellulosique : plantation, entretien et récoltes des peuplements.

Méthodologie et Résultats

Ce projet d'une durée de 36 mois débuté en janvier 2011, s'articule sur plusieurs tâches :

1) Optimisation des techniques/méthodes de plantation, d'entretien et de récolte et associant les praticiens terrains, les scientifiques et également les constructeurs de machines. A partir d'une veille technologique menée en France et à l'étranger, le but est de définir les cahiers des charges jusqu'à la conception et test de prototypes en passant par un avant projet détaillé .

2) Synthèse économique et environnementale à travers une analyse de cycle de vie reprenant les résultats de la première tâche. Celle-ci doit apporter une vision technique globale sur des itinéraires culturels développés et les machines mises au point.

3) Communication permettant le transfert des résultats auprès des professionnels (articles de presse spécialisée, démonstrations sur le terrain...) mais également auprès des scientifiques (colloques...).

Durant cette première année, les veilles technologiques et les cahiers des charges concernant les étapes d'entretien, de récolte et de plantation sont en cours de finition. L'ensemble des protocoles est élaboré, les premiers tests pilotes de machines ont débuté et des plans d'ensemble d'une machine de plantation est en cours de modification.

Conclusions et Perspectives

En 2012, les tests de machines vont se multiplier et alimenter la base de données afin de montrer une vision technico-économique sur l'ensemble des itinéraires. Les cahiers des charges transmis d'une part aux constructeurs intéressés par ce projet et d'autre part aux partenaires, donneront les orientations de développement et/ou d'amélioration de machines. Quant aux modifications de machines, elles continueront dans le but d'être testées sur les terrains afin de les valider.

CONTACT:

EMMANUEL CACOT / GUILLAUME GARESTIER

Institut Technologique FCBA
Station Centre-Ouest

Les Vaseix - (F)87430 VERNEUIL/VIENNE

Tél : +33 (0)5 55 48 48 10 - email : centreouest@fcba.fr



Coordinateur : FCBA

Partenaires : ONF, IRSTEA (Cemagref), INRA, IFN, IGN, UCFF, Sintégra

Contexte et Objectifs

Une bonne connaissance de la localisation de la biomasse, de ses caractéristiques (quantités et qualités) et de ses conditions de mobilisation (exploitabilité, desserte, coûts de mobilisation) est indispensable au développement d'une filière biomasse forestière. Mais cette connaissance est actuellement insuffisante pour apporter des garanties sur la disponibilité en bois et la pérennité de l'approvisionnement à des coûts raisonnables alors que les projets vont nécessiter des volumes de plus en plus importants.

Le projet FORESEE vise à développer les outils d'évaluation des caractéristiques, de la dynamique de la ressource forestière en biomasse, et des conditions de sa mobilisation à l'échelle de bassins d'approvisionnement, notamment celle destinée à une valorisation énergétique.

Méthodologie

Ce projet d'une durée de 42 mois débuté en décembre 2010 s'articule autour de trois axes principaux :

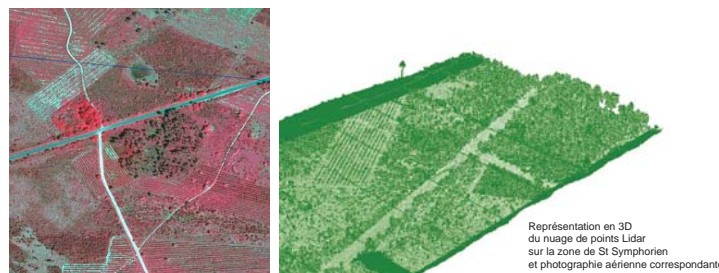
- L'axe de « caractérisation de la ressource » est dédié à la description de la ressource forestière en quantité et en qualité. Différentes méthodes de télédétection dont le Lidar seront testées avec différents types de stratification.
- L'axe de « dynamique de la ressource » s'attache à prévoir la disponibilité dans le temps en utilisant notamment des séries temporelles de Modèles Numériques d'Élévation obtenus par photogrammétrie et calibrés avec des données LiDAR.
- L'axe de « conditions de mobilisation » apporte des éléments sur les deux principaux paramètres qui déterminent l'exploitabilité des peuplements : la topographie et la desserte forestière en exploitant les possibilités des MNT issus du LiDAR.

Les trois axes thématiques sont développés simultanément dans trois zones représentatives des forêts françaises : massif résineux des Landes de Gascogne, Forêts feuillues de l'Est et forêts mixtes de montagne. En outre un cas d'étude est prévu dans le Massif Vosgien pour le déploiement des méthodes les plus opérationnelles.

Une tâche spécifique prévoit une caractérisation des enjeux technico-économiques du bois énergie en lien avec les professionnels de la filière, et un benchmarking international. Elle comprend aussi une évaluation technico-économique continue des acquis du projet.

Premiers résultats et perspectives

La première année a porté sur la constitution/complément des bases de données (acquisition Lidar sur les sites de Bure (55), St Symphorien (33) et dans les Vosges (68), et données terrain).



L'enjeu de la spatialisation de la ressource forestière reposera certainement sur l'articulation de plusieurs méthodologies ou approches. Celles-ci pourront être différentes selon les objectifs et les zones concernées.

L'analyse des enjeux et le recueil des attentes des utilisateurs potentiels qui ont été réalisés permettront de hiérarchiser les variables d'intérêt et d'affiner les objectifs de précision en lien avec les différentes échelles de travail.

CONTACT:

Institut Technologique FCBA
Délégation Sud-Est
Domaine universitaire
BP 251 38 044 Grenoble Cedex 9
Tél : +33 (0)4 76 15 40 70 - email : sudest@fcba.fr



Coordinateur: C. Rémond, UMR FARE 614 INRA-Université Reims Champagne-Ardenne

Partenaires: Equipe Biocapteurs, UMR 7242 CNRS - Université de Strasbourg, Illkirch

UMR 792 INSA-INRA Toulouse

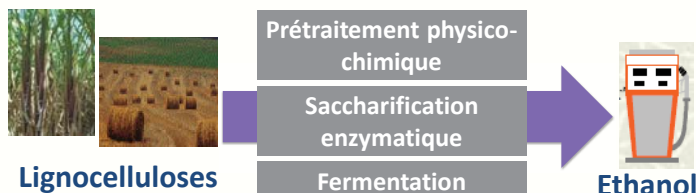
UMR 5546 CNRS-UPS, Castanet Tolosan - INRA UGAPF 86600 Lusignan

Contexte et Objectifs

La production d'éthanol de deuxième génération à partir de la biomasse lignocellulosique requiert l'intervention d'enzymes hautement efficaces pour l'hydrolyse des polysaccharides végétaux. L'utilisation de xylanases permettrait de diminuer la sévérité des prétraitements physicochimiques de la lignocellulose et de valoriser les pentoses. Afin d'améliorer les performances des biocatalyseurs dont l'action est entravée par la présence de lignine, il est indispensable de comprendre le rôle de la lignine dans la perte d'efficacité des enzymes et notamment l'impact de leur fixation non productive sur la lignine.

Les objectifs du projet sont:

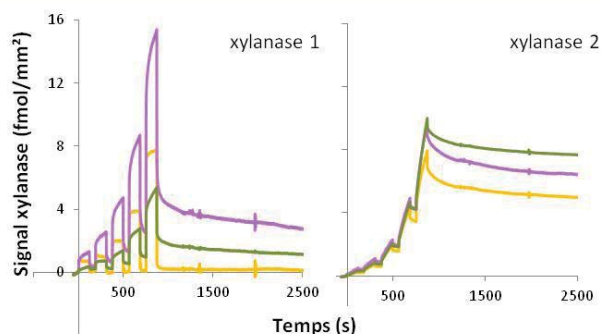
- d'évaluer les interactions entre diverses lignines et xylanases
- de diminuer les interactions xylanases-lignines par l'ajout d'additifs et d'évaluer l'impact sur le fractionnement de la lignocellulose par des cellulases.



Méthodologie et Résultats

Des lignines contrastées ont été isolées à partir de diverses espèces végétales (maïs, blé, peuplier, épicéa). Par ailleurs des lignines modèles ont été synthétisées *in vitro*. Des xylanases de structures variées ont été produites. Du fait de la forte hydrophobicité des lignines, le développement de méthodologies adaptées à l'étude de ces interactions constitue un défi technologique majeur. Les approches développées sont basées sur la Résonance Plasmonique de Surface (SPR).

Parmi les diverses approches testées, la physisorption des lignines sur des surfaces d'or fonctionnalisées est la plus adaptée pour mesurer des interactions entre les xylanases et les lignines. Des couches stables et homogènes de lignines ont été obtenues. Cette méthodologie a permis de montrer que les forces d'interaction diffèrent selon : (1) le type de xylanases, (2) la composition et la structure des lignines, (3) la composition du milieu.



Profils d'interaction de 2 xylanases avec 3 lignines isolées de diverses espèces végétales

Conclusions et Perspectives

Les résultats obtenus indiquent que de multiples paramètres impactent les interactions entre les xylanases et les lignines. Des xylanases de structure variées présentent des forces d'interaction différentes pour une même lignine. De même la stabilité des complexes xylanases-lignines varie en fonction de la structure des xylanases. Les résultats obtenus montrent également le rôle de la composition du milieu réactionnel sur les interactions xylanases-lignines.

Les expériences en cours de finalisation visent à étudier s'il existe une corrélation entre l'adsorption des xylanases sur les lignines et leur efficacité hydrolytique sur les lignocelluloses.

CONTACT :

caroline.remond@univ-reims.fr

BioButaFuel

Bioconversion d'hydrolysats de lignocellulose en Butanol, biocarburant de nouvelle génération de haute efficacité, à haut titre et rendement
Programme Bioénergies Edition 2008

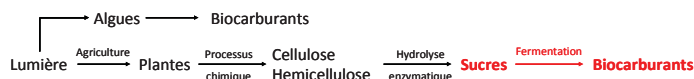


Coordinateur Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Biologiques et des Procédés – Toulouse
(contact : Isabelle MEYNIAL-SALLES - meynial@insa-toulouse.fr)

Partenaire METabolic EXplorer – Clermont Ferrand
(contact : Philippe Soucaille - psoucaille@metabolic-explorer.com)

Contexte et Objectifs

Depuis plusieurs années, le développement de procédés de production efficaces de biocarburants suscitent l'intérêt croissant des politiques, des industriels et des chercheurs. Parmi les biocarburants de nouvelle génération, le bio-butanol présente de nombreuses propriétés avantageuses.



Le butanol peut-être produit à partir d'un matériau de base : la cellulose, extraite des déchets de biomasse (tiges, paille, résidus agricoles...). Il est de plus considéré comme un biocarburant plus performant que l'éthanol car moins volatile, moins corrosif et il dispose d'une meilleure valeur calorifique lui permettant de restituer davantage d'énergie. En outre, à l'instar de l'éthanol, il peut être utilisé directement comme un additif à l'essence.

L'objectif du projet BioButaFuel est de construire et développer une nouvelle souche d'*Escherichia Coli* capable de produire du butanol comme unique produit de fermentation des sucres en C6 ou C5, à un rendement proche du rendement théorique maximal (1 mol/mol) et à une concentration finale élevée, en utilisant une nouvelle voie métabolique jamais décrite jusqu'à présent.

Méthodologie et Résultats

Le projet BioButaFuel développe une méthodologie innovante d'ingénierie d'une souche d'*E. coli* pour la production de butanol comme unique produit de fermentation à partir de glucose ou de pentoses. La stratégie choisie est basée sur l'expression hétérologue des gènes codant les enzymes impliquées dans la voie de production du butanol de *Clostridium acetobutylicum*, dans une souche rationnellement modifiée d'*E. coli*.

La méthodologie consiste à :

(i) modifier rationnellement le métabolisme central d'*E. coli* afin de ré-orienter les flux de carbone vers la production de pyruvate et de NADH en condition d'anaérobiose

(ii) Identifier certaines enzymes clés du métabolisme de *C. acetobutylicum* impliquées dans la voie de production du butanol.

(iii) Introduire et exprimer dans la souche modifiée d'*E. coli* (cf i) les gènes connus et identifiés (cf ii) codant les enzymes impliquées dans la voie de production du butanol

(iv) Evoluer *in vivo* la souche rationnellement modifiée d'*E. coli* obtenue (Meynial-salles I. et Soucaille P. 2011 sous presse) (cf iii) afin de sélectionner une souche plus efficace en terme de taux de croissance et de production en butanol

(v) Sélectionner des clones évolués, les analyser d'un point de vue génétique afin d'identifier les cibles responsables du phénomène d'évolution, valider expérimentalement ces cibles et proposer un mécanisme expliquant le phénomène d'évolution adaptative observé.

La construction d'une souche d'*E.coli* génétiquement modifiée a été réalisée. En parallèle, un protocole d'extraction/purification a été mis au point et a permis d'identifier certaines enzymes clés de la voie de production du butanol chez *C. acetobutylicum* (en collaboration avec le projet AcetoH2 PNRB2006). L'introduction des gènes codant les enzymes de la voie de synthèse du butanol dans la souche modifiée d'*E. coli* est en cours de réalisation et sera poursuivie par l'évolution *in vivo* de cette souche.

Un procédé continu de production de butanol sera ensuite développé afin d'évaluer les performances de la souche évoluée la plus efficace en culture continue 2 litres.

Conclusions et Perspectives

Le projet BioButaFuel développe donc un nouveau procédé de production de butanol à partir de ressources renouvelables, qui constituera une alternative économique et écologique, à la production de butanol par voie pétro-chimique.

CONTACT :

Isabelle Meynial-Salles (LISBP)
meynial@insa-toulouse.fr



Coordinateur: IFP Energies nouvelles

Partenaires: Protéus SA, CNRS CERMAV UPR5301

Contexte et Objectifs

La mise en place d'une filière de production d'éthanol à partir de biomasse végétale non alimentaire (éthanol dit de seconde génération, ou 2G) est un enjeu important pour le secteur des transports. Dans ce procédé, la biomasse végétale subit une hydrolyse par des enzymes produites par un champignon filamenteux, *Trichoderma reesei*. Celles-ci vont couper la cellulose en monomères de glucose. Ensuite, la levure *Saccharomyces cerevisiae* fermente ce glucose en éthanol.

L'étape d'hydrolyse enzymatique reste de loin la plus coûteuse du procédé, car une grande quantité d'enzymes doit être utilisée, notamment parce que le glucose inhibe l'action des enzymes. Un élément de solution possible est de réaliser la fermentation en même temps que l'hydrolyse afin que le glucose soit consommé au fur et à mesure de sa libération par les enzymes, mais les deux réactions requièrent des conditions opératoires différentes. Cela limite aujourd'hui les avantages de ce procédé de "SSF" (Simultaneous Saccharification and Fermentation). Le projet ACTIFE vise à adapter les enzymes de *T. reesei* aux contraintes de la fermentation afin d'en diminuer les quantités à mettre en œuvre et de renforcer les avantages de ce schéma de procédé.

Méthodologie et Résultats

ACTIFE fait appel à des techniques de biochimie utilisées pour identifier, parmi le mélange d'enzymes produit par *T. reesei*, celles qui limitent l'hydrolyse dans les conditions de SSF (*tâche IFPEN*).

Les enzymes limitantes sont ensuite améliorées par évolution dirigée (*tâche Protéus*). Ces technologies d'ingénierie génétique permettent de créer des "super-enzymes" adaptées aux conditions industrielles, et aux performances bien supérieures à celles des enzymes naturelles. Elle nécessitent la mise au point de systèmes d'expression et de criblage à haut voire très haut débit (*tâches Protéus et CERMAV*).

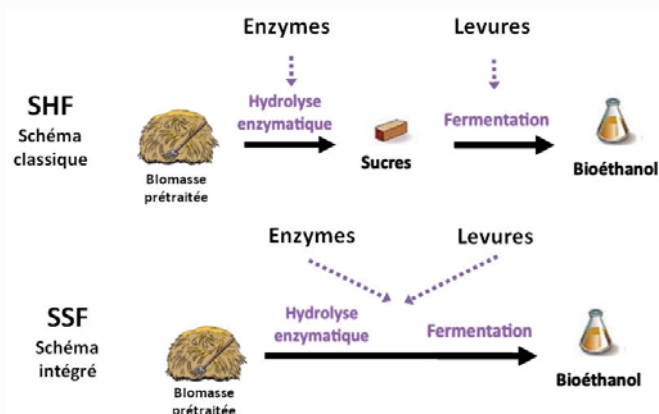
Les gènes améliorés sont ensuite réintroduits par génie génétique dans la souche de *T. reesei* (*tâche IFPEN*) ou dans la levure *S. cerevisiae* (*tâche CERMAV*).

Enfin, l'efficacité des nouveaux mélanges d'enzymes et souches de levure est évaluée en SSF et comparée à un cas de base déterminé en début de projet. L'impact sur le coût de production de l'éthanol est évalué par simulation du procédé de production complet (*tâches IFPEN*).

Conclusions et Perspectives

Le rôle de chacune des enzymes principales du mélange d'enzymes de *T. reesei* en conditions de SSF a été étudié, permettant d'établir les cibles prioritaires pour l'évolution dirigée. Cette technologie a également fait l'objet de développements spécifiques, et des verrous importants ont pu être levés au niveau des systèmes d'expression des enzymes à améliorer et des méthodes de criblage haut débit de celles-ci. Des tests standards SSF ont été mis au point et ont permis une première évaluation du procédé et la définition de cibles en termes de coût et de performance.

Plusieurs enzymes ont été développées et sont actuellement en cours de clonage dans les hôtes microbiens du projet *T. reesei* et *S. cerevisiae*, pour une évaluation des nouvelles performances courant 2013. Les résultats seront valorisés par publications et prises de propriété industrielle.



Principe des procédés de SHF (Separate Hydrolysis and Fermentation) et de SSF (Simultaneous Saccharification and Fermentation). C'est ce dernier procédé d'ACTIFE se propose de rendre compétitif par ingénierie enzymatique.

CONTACTS

antoine.margeot@ifpen.fr
gravot@proteus.fr
sebastien.fort@cermav.cnrs.fr



Coordinateur : Christian Larroche – LGCB

Partenaires : LGCB, LMGE, Biobasic Environnement, ADIV

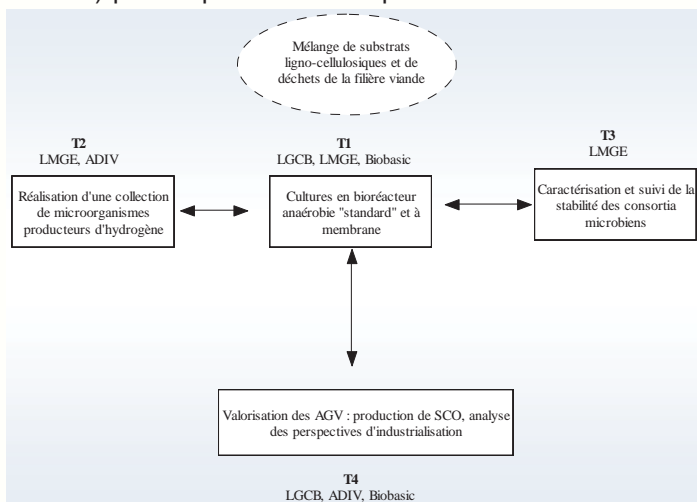
Contexte et Objectifs

Ce projet vise à produire du biohydrogène à partir de déchets lignocellulosiques et co-produits de la filière viande en utilisant des consortia microbiens anaérobies mésophiles présents naturellement dans certains écosystèmes. Ce projet s'articule en quatre tâches étroitement liées les une aux autres. Les objectifs sont la production d'hydrogène, la caractérisation, l'identification et le suivi des consortia isolés (biopuces à ADN et à ARN) et l'utilisation des co-produits carbonés (acides gras volatils) pour la production de lipides microbiens.

Cependant, des productions d'acides gras volatils (AGVs), de lactate, d'éthanol et d'azote sont observées. La valorisation de ces déchets passe donc par la production d'AGVs et pourrait permettre la dépollution de milieux riches en composés azotés.

Durant les cultures sur les substrats étudiés, le suivi de la composition, de la dynamique de la communauté microbienne et des voies métaboliques d'intérêt a été effectué par l'utilisation de biopuces à ADN et à ARN.

La valorisation des AGVs repose sur l'utilisation de souches oléagineuses, notamment *Yarrowia lipolytica* capables d'accumuler jusqu'à 40% en masse de lipides avec l'acétate comme source de carbone via des cultures en haute densité cellulaire. Ces lipides microbiens ont une composition proche de celle rapportée lors de cultures sur glucose.



Conclusions et Perspectives

Les essais conduits dans le cadre de ce projet ont permis de montrer qu'un traitement anaérobie des déchets lignocellulosiques à l'aide des consortia microbiens anaérobies mésophiles sélectionnés permet une production d'hydrogène performante et que celui des déchets carnés permet d'atteindre un taux de solubilisation de ces composés très élevé (95%). Il s'agit là d'un résultat extrêmement prometteur en termes de traitement des déchets.

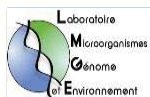
Par ailleurs, les études menées sur le suivi de la composition et de la dynamique microbiennes et des voies métaboliques d'intérêt par l'utilisation de biopuces à ADN et à ARN montrent une bonne stabilité métabolique des consortia sur de longues durées (plus de 1200 heures), ceci constitue l'une des innovations de ce projet. Enfin, les résultats obtenus avec les levures oléagineuses cultivées sur AGVs permettent d'envisager une valorisation énergétique de ces composés.

Méthodologie et Résultats

La démarche utilisée repose sur un criblage de souches présentes dans l'environnement et produisant de l'hydrogène naturellement. Deux consortia ont été sélectionnés selon le substrat utilisé. Une production d'hydrogène pouvant aller jusqu'à 35% du gaz produit est observée sur les déchets lignocellulosiques associée une accumulation majoritaire d'acétate. Les cultures sur déchets de viande seuls ne mettent pas en évidence de production significative d'hydrogène.

CONTACT :

Christian Larroche - LGCB
Christian.Larroche@univ-bpclermont.fr
<http://anabioh2.univ-bp.clermont>



Coordinateur: Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement – Narbonne

(contact: Eric TRABLY – eric.trably@supagro.inra.fr)

Partenaires: Laboratoire de Bioénergétique et Ingénierie des Protéines – Marseille

(contact: Marie-Thérèse GIUDICI-ORTICONI - giudici@ifr88.cnrs-mrs.fr)

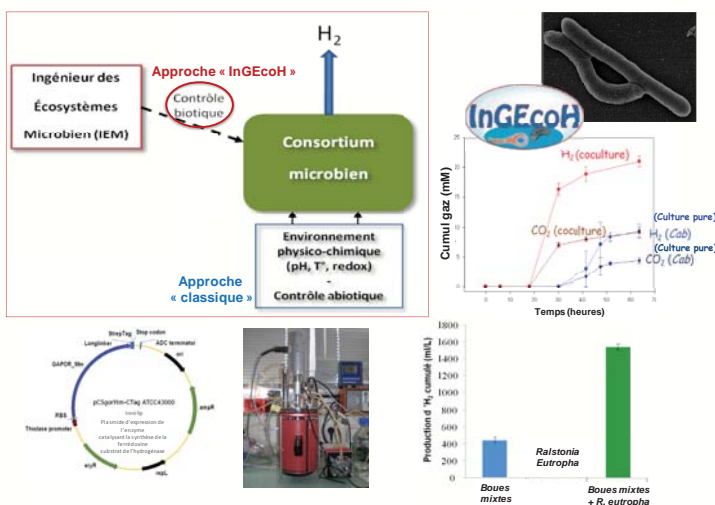
Laboratoire d'Ingénierie de Systèmes Biologique et des Procédés – Toulouse

(contact: Isabelle MEYNIAL-SALLES - meynial@insa-toulouse.fr)

Contexte et Objectifs

Un grand nombre d'espèces microbiennes issues d'environnements variés peuvent produire du **biohydrogène par voie fermentaire**. Le potentiel des **cultures mixtes** microbiennes est particulièrement intéressant pour valoriser des ressources organiques complexes issues du traitement de la biomasse. Le projet InGEcoH s'intéresse à identifier et à utiliser des **espèces-clés** situées au cœur des **réseaux métaboliques microbiens**, sans être forcément les plus abondantes, en tant que **contrôleur biologique** de ces écosystèmes.

à partir de glucose, (2) à **construire des consortia microbiens « synthétiques »** comportant des souches de *Clostridium acetobutylicum* associées à des espèces-clés retrouvées dans les consortia naturels, pour en déterminer les mécanismes d'interactions et développer des modèles métaboliques de production d'hydrogène, et (3) à **sélectionner des consortia bactériens issus du milieu naturel** et d'en identifier les espèces-clés pouvant être utilisées comme « **Ingénieurs des Ecosystèmes Microbiens (IEM)** ». Cette approche permet de proposer des solutions de contrôle biologique de ces écosystèmes.



Les résultats ont permis de développer des **outils moléculaires innovants** permettant un suivi fin des populations et des métabolismes bactériens liés à la production d'hydrogène en cultures mixtes. **Des espèces bactériennes « clés »** ont été identifiées au sein d'écosystèmes naturels, et correspondent à des espèces minoritaires en abondance sans lien direct avec la production d'hydrogène. L'addition de certaines de ces espèces en consortium synthétique a permis **d'améliorer les rendements en hydrogène de près de 2,5 fois la valeur nominale** obtenue en culture pure en réorientant spécifiquement le métabolisme de *Clostridium acetobutylicum*.

Méthodologie et Résultats

Le projet InGEcoH développe une méthodologie innovante **d'ingénierie des écosystèmes microbiens** qui consiste en la conception, la construction et la maintenance de consortiums pour mieux en contrôler les réseaux d'interactions métaboliques produisant de l'hydrogène. La méthodologie consiste (1) à **développer par ingénierie métabolique des souches surproductrices d'hydrogène** à un rendement proche du rendement théorique maximal de 4 moles H₂/mole glucose. La stratégie est de construire une souche de *C. acetobutylicum* productrice uniquement d'acétate et d'H₂

Conclusions et Perspectives

L'importance des **interactions non trophiques dans le contrôle du métabolisme microbien** a été particulièrement mise en évidence dans le projet InGEcoH et ouvre de **nouveaux champs d'exploration en cultures mixtes**. En effet, il est attendu que cette approche puisse s'étendre à d'autres **applications biotechnologiques et environnementales** à travers l'utilisation de co-cultures microbiennes contrôlées.

A ce jour, le projet InGEcoH a financé deux thèses et un contrat post-doctoral pour quatre articles publiés, 6 en préparation finale et une vingtaine de communications en congrès

CONTACT :

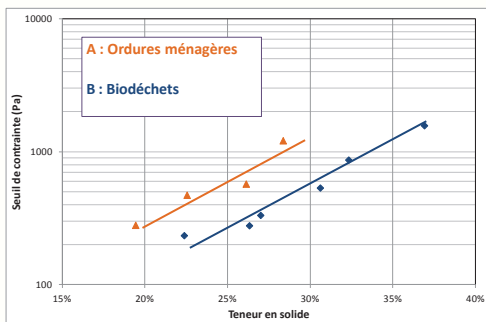
Eric TRABLY (LBE)
Avenue des Etangs 11100 Narbonne
Tel: 04 68 42 51 72
eric.trably@supagro.inra.fr



Coordinateur : INSA de Lyon, Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale
Partenaires : Valorga International, INRA Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement

Contexte et Objectifs

La méthanisation a permis une production d'énergie équivalente à plus de 6 millions de tonnes de Pétrole en 2010 en Europe. Aujourd'hui, la majorité des systèmes utilisés pour les déchets urbains sont des procédés de digestion sèche : ils sont plus efficaces et consomment peu d'eau par rapport aux procédés classiques, mais la structure mécanique de ces milieux de digestion est encore mal connue et difficile à contrôler à l'échelle industrielle. L'objectif de ce projet est d'acquérir des connaissances sur le fonctionnement de ces procédés afin de pérenniser la technologie et de contribuer à son développement. Les déchets étudiés sont les ordures ménagères résiduelles et les biodéchets.



Le seuil de contrainte augmente avec la teneur en solide. Il est moindre pour les digestats issus de biodéchets.

Méthodologie et Résultats

La **teneur en eau** est le paramètre clé pour le procédé de digestion par voie sèche. Elle peut varier de 65 à 85% de la masse totale selon les procédés concernés ou le type de déchets traités. Nous avons étudié son influence sur :

- le transfert diffusionnel des espèces dissoutes;
- la cinétique de méthanisation;
- la microbiologie;
- la rhéologie des milieux de digestion;
- les lois de mélanges dans les réacteurs.

Teneur en eau et diffusion

Bien que saturés, les milieux sont pâteux et présentent des propriétés surprenantes, la diffusivité est réduite d'un facteur 100 au moins par rapport à sa valeur en eau.

Cinétique de méthanisation et microbiologie

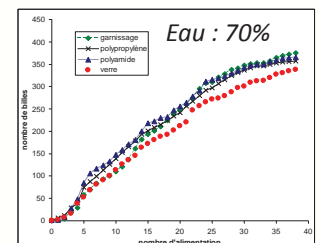
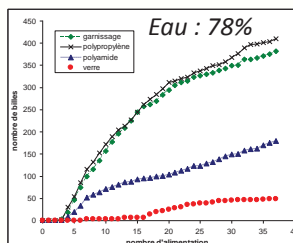
La diminution de la teneur en eau entraîne une baisse de la cinétique de méthanisation (vitesse ramenée à la quantité de biomasse). Un shift de population microbienne est observé en deçà de 70% d'eau.

Rhéologie

Les milieux sont viscoélastiques et nécessitent une contrainte minimale pour leur mise en mouvement. Ce seuil dépend de la teneur en eau mais également de la nature du déchet (voir ci-contre).

Mélange du solide

A l'échelle pilote, la teneur en eau a un impact fort sur la stratification : lorsque la teneur en eau est trop élevée, les particules lourdes sédimentent au fond du réacteur (voir ci-dessous).



Particules récupérées en sortie de réacteur selon leur densité lors d'un traçage.

Conclusions et Perspectives

- Une teneur en eau élevée favorise la fluidité du milieu, ainsi que la cinétique et le transfert de masse.
- Cependant, un milieu concentré est plus homogène du point de vue du mélange et permet de conserver une forte concentration en biomasse méthanogène.

Un modèle cinétique de simulation montre l'existence d'un optimum pour la teneur en eau; des critères plus mécaniques doivent également rentrer en ligne de compte pour un meilleur dimensionnement des installations.

CONTACT :
pierre.buffiere@insa-lyon.fr

Coordinateur : Jean-Jacques Godon, INRA, LBE, Narbonne

Partenaires : HBAN, Antony, Cemagref; BioBac; PAPPSO Jouy en Josas, INRA; BIOEMCO IBIOS, Créteil, IRD; CIRCEE Suez environnement

Contexte et Objectifs

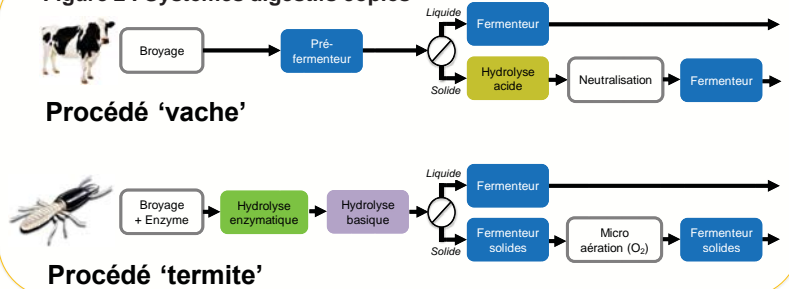
Aujourd'hui, les technologies industrielles consistent à mettre en œuvre au sein d'un même réacteur les différents processus biochimiques de la digestion anaérobie. Cependant, aucune de ces technologies à ce jour n'est capable de dépasser le seuil de 60 % de dégradation de la matière organique. Par ailleurs, dans les systèmes digestifs des êtres vivants les performances de digestion peuvent atteindre de 60 à 75 % d'abattement de la matière organique. Ces résultats tendent à montrer que le monde vivant a sélectionné des systèmes capables de lever le verrou de l'accessibilité de la matière organique afin d'en optimiser sa transformation en composés énergétiques. L'objectif du projet DANAC est ainsi d'analyser l'ensemble des processus de digestion des êtres vivants, et par mimétisme de développer de nouveaux procédés de production de biogaz.

Méthodologie et Résultats

L'inventaire de plus d'une centaine de systèmes digestifs animaux a permis d'identifier six grandes structures dans l'organisation des différentes étapes de la digestion (pré-, post-traitement, compartiment microbien etc.)(Figure 1). Les régimes alimentaires (herbivore, carnivore, etc.) et l'évolution (phylogénie) sont contingents dans le 'choix' de ces structures et des proportions relatives des différents organes 'réacteurs'.

Deux structures sont actuellement transposées en termes de procédé, l'une mime la structure digestive de la vache l'autre celle du termite (Figure 2). Les rendements globaux, en production de méthane sont dans un premier temps mesurés à partir d'un inoculum bactérien standard.

Figure 2 : Systèmes digestifs copiés



Procédé 'vache'

Procédé 'termite'

Figure 1 : structures digestives de base

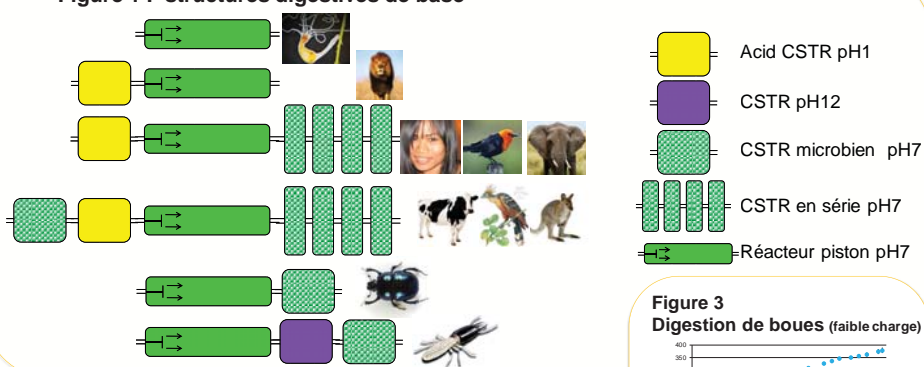
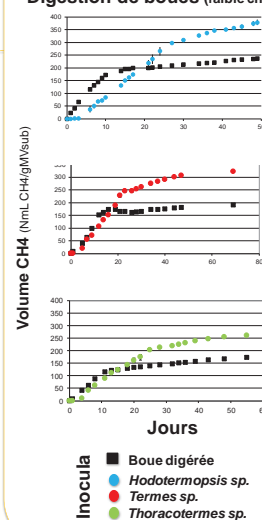


Figure 3 Digestion de boues (faible charge)



En parallèle le potentiel méthane des communautés microbiennes des systèmes digestifs choisis est évalué. L'objectif étant d'associer le procédé (le biotope) aux communautés microbiennes pour mimer au mieux l'écosystème digestif. La figure 3 présente l'amélioration des rendements grâce à trois inocula 'termite' différents.

Conclusions et Perspectives

Les opérations unitaires pour la réalisation de deux procédés 'éco-mimétiques' sont en cours d'assemblage. En lien avec l'efficacité mesurée, la structure des communautés microbiennes (métagénome) et les enzymes produits (métaprotéome) seront caractérisés. Enfin, la faisabilité technico-économique et l'impact environnemental de ces nouveaux concepts de digestion anaérobie seront évalués.

CONTACT :

godon@supagro.inra.fr

SYMBIOSE

Couplage microalgues et méthanisation

Programme Bioénergies Edition 2008

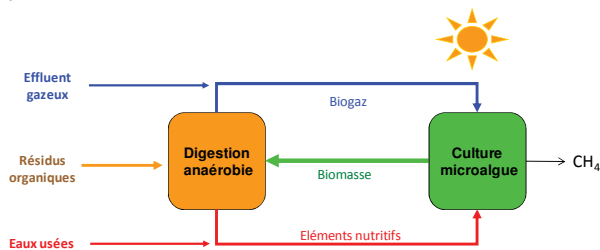
Coordinateur : Naskeo Environnement

Partenaires : ECOSYM, IFREMER LPBA, INRA-LBE, INRIA BIOCORE

Contexte et Objectifs

Parmi les gisements organiques mobilisables pour la production d'énergie, les microalgues constituent une ressource d'intérêt. Pourtant les étapes de culture, récolte et transformation présentent des coûts environnementaux et économiques qui constituent un frein au développement de la filière. La digestion anaérobie en transformant tout ou partie de la biomasse produite, en énergie et en éléments minéralisés peut permettre de soutenir la demande énergétique du système et de fournir des éléments nutritifs aux cultures.

Dans le cadre du projet Symbiose, nous cherchons à déterminer les conditions de faisabilité de cette association et de mettre le concept à l'épreuve d'un procédé pilote dans une perspective industrielle.



La réalisation du projet se décline en 5 tâches majeures :

■ **Tâche 1 : Etude des écosystèmes microalgues/bactéries issus de culture (IFREMER)**

Sur la base d'une variété de cultures de microalgues, une bactériothèque a été constituée ; l'association de certaines des bactéries à la microalgue marine *Dunaliella* a permis d'obtenir des modifications significatives de taux de croissance et de biomasse maximale atteinte dans les cultures de cette microalgue.

■ **Tâche 2 : Etude des écosystèmes microalgues/bactéries issus du milieu naturels (ECOLAG)**

Des consortia marin et d'eau douce (microalgues et bactéries) sélectionnés à partir du milieu naturel ou de traitements des eaux usées par lagunage, ont démontré un potentiel élevé de production de biomasse tout en utilisant des digestats issus de la méthanisation d'effluents urbains ou de biomasse algale.

■ **Tâche 3 : Digestion anaérobie des biomasses (LBE, NASKEO)**

La production de méthane est influencée à la fois par le fractionnement biochimique des microalgues et la nature de leur paroi. Les stratégies de prétraitements appliquées sur d'autres gisements (boues activées,) montrent leur efficacité sur ces organismes.

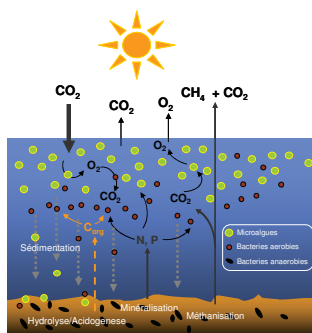
■ **Tâche 4 : Modélisation du processus de couplage (INRA, INRIA)**

Des modèles numériques ont été développés et permettent de prédire les flux de nutriments reminéralisés et de biogaz produits. Ils supportent une stratégie de pilotage automatisée du procédé implémentés sur l'Algotron.

■ **Tâche 5 : Intégration, conception et réalisation d'un pilote (Ensemble des partenaires)**

L'analyse de cycle de vie a permis d'identifier les éléments du procédé les plus impactant sur l'environnement. Un dispositif pilote hautement instrumenté associant une lagune de culture et un méthaniseur a été déployé pour évaluer les performances du système couplé et pour appréhender les questions industrielles.

Méthodologie et Résultats



La relation qui s'établit entre la production de biomasse phytoplanktonique et sa dégradation en conditions anaérobies (conversion de la matière organique en méthane) est un phénomène que l'on peut rencontrer dans les milieux aquatiques naturels.

Le projet Symbiose repose sur une utilisation de ces deux compartiment biologiques, mais séparés dans l'espace et le temps afin d'en optimiser le fonctionnement pour une meilleure réponse globale du système .

Conclusions et Perspectives

- Diminution des intrants azote/phosphore et épuration simultanée d'effluents gazeux et de résidus organiques
- Mobilisation d'une ressource biomasse à proximité du digesteur
- Augmentation du rendement énergétique afin d'envisager un nouveau modèle de production énergétique durable
- Soutien au développement des filières microalgues énergie



Algotron : Démonstrateur pilote Symbiose

CONTACT :

Bruno SIALVE, coordinateur
bruno.sialve@naskeo.com

WinSeaFuel

Production de macroalgues pour une valorisation en biométhane et autres bioproduits

ANR - Programme Bioénergies Edition 2009

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR

Coordinateur



Partenaires



Contexte et Objectifs

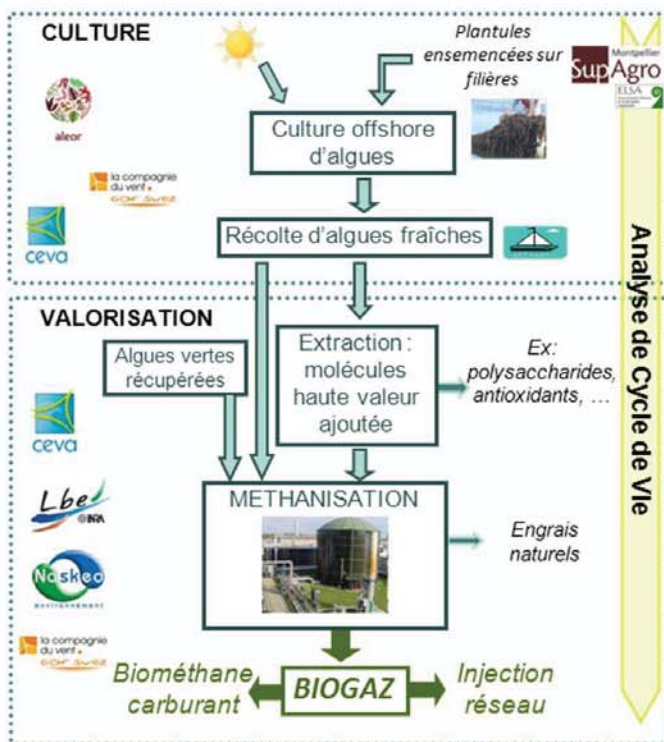
L'objectif du projet WinSeaFuel est d'élargir la palette des matières premières mobilisables pour des applications conjointes bioénergie/produits à haute valeur ajoutée par l'éco-conception d'une filière dont le **potentiel est considérable** (diversité et capacité de développement) : la **biomasse végétale marine** de culture.

Le projet WinSeaFuel étudie trois principaux domaines :

Culture de macroalgues en mer, depuis les études en laboratoires et l'ensemencement de filières jusqu'aux tests en mer sur la concession du partenaire Aléor.

Co-valorisation de la biomasse algale : extraction en tête de **biomolécules** d'intérêts et optimisation de la **méthanisation** jusqu'à la valorisation des digestats.

Synergies avec l'énergie éolienne offshore, WinSeaFuel étant adossé au développement de projets de parc éolien en mer français.



Méthodologie

Les travaux se répartissent en plusieurs tâches :

1. Culture « offshore » et récolte de macroalgues (ALEOR) :

- Mise au point de supports de culture
- Production de plantules en grande quantité
- Etude de la logistique en lien avec l'exploitation éolienne

2. Valorisation intégrée de co-produits d'intérêt (CEVA) :

- Etude des composés à haute valeur ajoutée
- Amélioration des chaînes d'extraction via l'ACV
- Essais d'extraction à différentes échelles

3. Méthanisation des macroalgues (LBE, NASKEO) :

- Etude des conditions optimales de méthanisation
- Caractérisation de la biodégradation
- Codigestion d'algues vertes de récupération
- Essais en réacteurs à échelle pilote

4. Analyse de cycle de vie ou ACV (SUPAGRO) :

- Inventaire des flux de matière et d'énergie de la filière
- ACV pour les différentes étapes et scénarios
- Optimisation de la durabilité de la filière

5. Analyse globale de la filière (La Compagnie du Vent) :

- Etude de la faisabilité technico-économique
- Synergies administratives & logistiques avec l'éolien offshore
- Dimensionnement du projet de démonstration
- Elaboration d'un plan de déploiement industriel

Conclusions et Perspectives



• winseafuel •

- Création d'une nouvelle filière de production innovante.
- Projet pluridisciplinaire à destination du multi-usages de la mer tout en offrant une porte de diversification d'outils de pêche.
- Co-valorisation de la biomasse algale à destination de marchés variés et complémentaires.

CONTACT :

Thomas LASSERRE, coordinateur :
thomas.lasserre@compagnieduvent.com



Durée : 3 ans (2009-2012)

Budget : 2 M€ dont 0,89M€
subventionné par l'ANR - BioE09

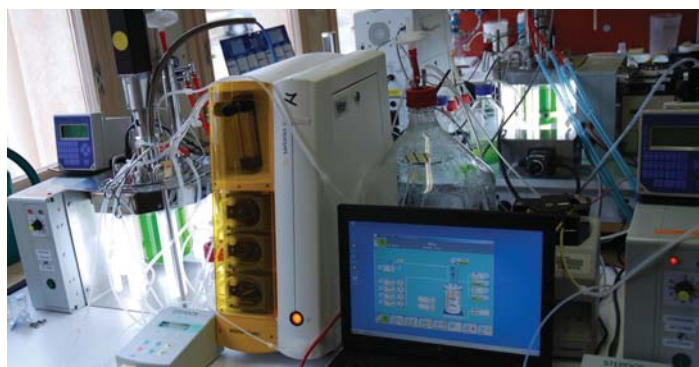
Coordinateur: Gilles Peltier

Partenaires: Guillaume Cogne, Myriam Ferro, Michaël Katinka, Jean-Charles Portais, Olivier Vallon

Contexte et Objectifs

Les microalgues, de par leur forte productivité en biomasse, représentent une alternative prometteuse pour la production de biocarburants.

Certaines espèces produisent directement de l'hydrogène, d'autres accumulent des lipides de réserve (huiles) transformables en biodiesel. Toutefois, la productivité des souches en composés d'intérêt doit être fortement accrue pour envisager des applications dans la production de biocarburants. L'objectif du projet ALGOMICS est de proposer concepts innovants d'amélioration des souches de microalgues basés sur une compréhension approfondie du métabolisme photosynthétique des microalgues et de ses régulations.



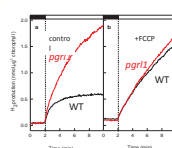
Méthodologie et Résultats

La démarche proposée vise à utiliser les **outils de la biologie à haut débit** (transcriptomique, métabolomique, protéomique, fluxomique) associés à des approches de **génétique et de modélisation** pour identifier les éléments régulateurs-clé impliqués dans la régulation du métabolisme énergétique. Les travaux sont effectués sur l'algue unicellulaire modèle *Chlamydomonas reinhardtii*, espèce pour laquelle de nombreux outils génétiques sont disponibles.

Publications (10): Chochois et al. (2010) *Int J Hydrogen Energy*; Cogne et al. *Biotechnology Progress* Giraudeau et al. (2011) *Plant Mol Biol*; Johnson (2011) *Bioenergetics*; Johnson et al. (2011) *Photosynth Res*; Meslet-Cladière & Vallon (2011) *Eukaryotic Cell*; Peltier et al. (2010) *Photosynth Res*; Siaut et al. (2011) *BMC Biotechnol*; Nguyen et al. (2011) *Proteomics*; Tolleter et al. (2011) *Plant Cell*

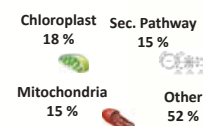
Parmi les principaux résultats obtenus, nous avons:

1-Développé des outils de criblage haut-débit pour rechercher de mutants d'intérêt.



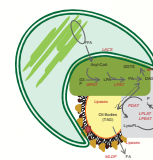
2-Identifié plusieurs gènes régulateurs, dont un contrôlant le gradient de protons et le flux d'électrons vers la production d'hydrogène et un autre contrôlant l'accumulation d'amidon.

3-Développé un logiciel de prédiction – PREDALGO – de la localisation intracellulaire des protéines à partir des données de protéomique.



4-Créé une base de données interactive pour l'intégration des données omiques.

5-Analysé par protéomique les protéines associées aux structures intra-cellulaires d'accumulation des huiles et identifié des gènes candidats pour accroître les capacités d'accumulation.



6-Développé et analysé un modèle des interactions moléculaires intervenant pendant le processus de la photosynthèse.

Conclusions et Perspectives

L'isolement et l'analyse de mutants affectés dans la photosynthèse et le processus de mise en réserve nous a permis d'identifier plusieurs gènes régulateurs clé.

Par ailleurs, les analyses omiques et la modélisation métabolique ont conduit à l'identification de gènes candidats dont les effets sur le métabolisme sont en cours de validation.

Après validation sur différentes souches mutantes, l'approche de modélisation métabolique évoluera vers une modélisation prédictive pour identifier *in silico* de nouveaux gènes d'intérêt.

Ces résultats feront l'objet d'une transposition ultérieure sur des souches adaptées à la production industrielle via le développement d'outils génétiques.

CONTACT :

gilles.peltier@cea.fr



Coordinateur: **John C. Willison**Partenaires: **CEA Grenoble / CNRS-LEPMI Grenoble / IRD Marseille /
BRGM Orléans / ARD Reims**

Contexte et Objectifs

Combustible non carboné et propre, hautement réactif et à forte densité énergétique, l'hydrogène est considéré comme le vecteur énergétique du futur. Sa conversion directe en électricité, via les piles à combustible, constitue un atout, dans la mesure où le rendement énergétique de ces piles est élevé (80%) avec l'eau pour seul rejet. Sur le plan économique, l'hydrogène représente un marché qui croît de 10 % par an au niveau mondial et qui devrait représenter 8 à 10% de l'énergie mondiale en 2025. Aujourd'hui, l'essentiel de l'hydrogène vendu sur le marché est produit industriellement avec des procédés physico-chimiques très énergivores (vaporeformage du méthane, oxydation partielle de combustible fossile ou électrolyse de l'eau). En revanche, les voies de production biologiques offrent des solutions technologiques potentiellement moins coûteuses en termes de bilan énergétique et plus respectueuses pour l'environnement. Parmi ces solutions, les bioprocédés associant fermentation et photofermentation (figure 1) présentent comme avantages, non seulement de produire de l'hydrogène facilement « purifiable » à partir du biogaz produit, mais aussi de dépolluer un effluent riche en hydrates de carbone tout en ne produisant que très peu de déchets solides. Le projet HYCOFOL_BV a pour objectif de proposer un bioprocédé de production d'hydrogène à partir de paille de blé, un sous-produit d'origine agricole.



Figure 1: Couplage des procédés d'hydrolyse enzymatique, fermentation et photofermentation

Méthodologie et Résultats

Le projet s'articule autour de trois approches : recherche fondamentale (protéomique et ingénierie métabolique), génie des procédés (bioréacteurs et plans d'expériences) et microbiologie moléculaire (FISH, SSCP).

1 Les premiers objectifs (livrables à T0+6mois) ont été atteints: caractérisation physico-chimique de la paille de blé prétraitée (ARD) ; définition d'un milieu synthétique représentatif du substrat industriel pour l'optimisation de la fermentation à haute température (IRD) ; caractérisation microbiologique de la paille de blé hydrolysée ou micronisée (BRGM).

2 criblage d'une bibliothèque de souches hyperthermophiles a permis d'identifier 3 souches capables de produire de l'hydrogène à partir de la paille de blé prétraitée. La teneur en hydrogène dans l'espace tête des cultures a atteint un maximum de 16% en 2 jours.

3 Les effluents provenant de la fermentation par une souche de *Thermotoga maritima* de la paille de blé hydrolysée ou micronisée ont été testés comme substrat pour la photoproduction d'hydrogène par *Rhodobacter capsulatus* B10. Le jus de fermentation de la paille hydrolysée s'est avéré un meilleur substrat que le jus de la paille micronisée. Une culture photosynthétique contenant 40% vol/vol de jus a dégradé la totalité de l'acétate présente en 5 jours en produisant 0,1L H₂/L de culture, équivalent à un taux de conversion de 21%. L'ajout d'une faible quantité de lactate (5 mM) a augmenté le taux de production d'hydrogène (0,95L/L) équivalent à un taux de conversion du substrat (lactate+acétate) de 76%.

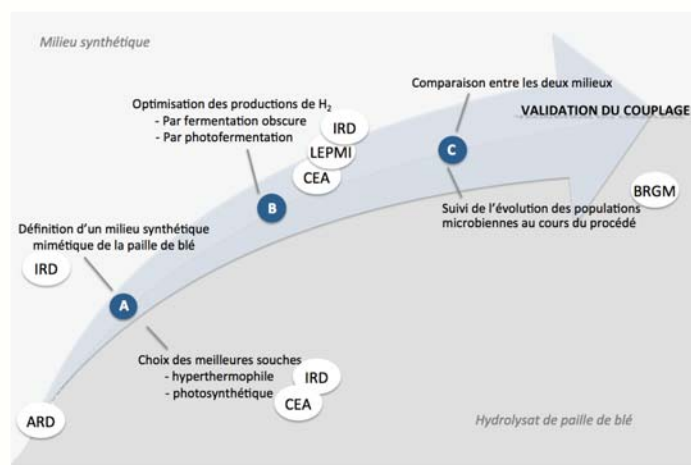


Figure 2: Les trois phases de déroulement du projet et l'implication des partenaires

Conclusions et Perspectives

Les premiers résultats sont prometteurs en ce qui concerne la capacité des bactéries hyperthermophiles à fermenter la paille de blé hydrolysée (glucose+xylose), mais aussi à produire de l'hydrogène à partir de la paille micronisée, c'est-à-dire, à s'attaquer directement à la cellulose. Des études d'optimisation sont en cours, dans des bioréacteurs de 1L, afin de maximiser non seulement la production d'hydrogène mais aussi la concentration d'acides (acétate ou acétate+lactate). Une attention particulière sera portée à la teneur en azote (NH₃) de l'effluent, une concentration trop élevée étant inhibitrice de la photoproduction d'hydrogène.

La souche B10 de *Rhodobacter capsulatus* est capable de convertir l'acétate en H₂ avec une bonne efficacité, que ce soit en milieu synthétique ou dans un jus de fermentation à haute température supplémenté de lactate. Des études d'optimisation seront réalisées en utilisant la méthode des plans d'expériences (LEPMI-CNRS). La souche B10 (souche sauvage) sera comparée avec des souches mutantes capables de surproduire de l'hydrogène à partir de différents substrats et avec d'autres souches de bactéries photosynthétiques décrites dans la littérature (*Rhodobacter sphaeroides*, *Rhodospseudomonas palustris*,...). D'autres études permettront de modéliser le métabolisme de *R. capsulatus* dans des conditions de photoproduction d'hydrogène afin d'améliorer le taux de conversion d'acétate en H₂ par ingénierie métabolique (LCBM-CEA).

L'ensemble de ces travaux, allié au suivi microbiologique de chaque étape, permettra d'optimiser individuellement les deux étapes du procédé (fermentation à l'obscurité et photofermentation) en tenant compte des contraintes posées par la composition du substrat initial et la composition de l'effluent fourni par la première étape. A plus long terme, les deux étages seront intégrés dans un procédé couplé pour la production biologique d'hydrogène à partir d'un déchet agricole.

CONTACTS

john.willison@cea.fr
severine.collin@cea.fr



Défi H12

Production de bio-hydrogène par électrolyse microbienne

Programme Bioénergies Edition 2009



Coordinateur : LGC Laboratoire de Génie Chimique CNRS-Univ. Toulouse,

Partenaires : LBE Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement INRA-Narbonne,

LEMIRE Laboratoire d'écologie microbienne de la rhizosphère et d'environnements extrêmes CEA-CNRS-Univ Aix Marseille II,

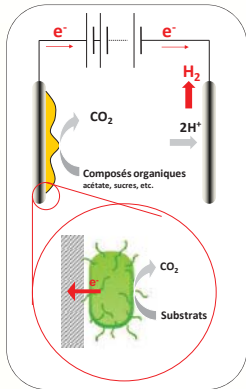
LECA Laboratoire d'Etude de la Corrosion Aqueuse CEA-Saclay,

6TMIC SAS-Toulouse

Contexte et Objectifs

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique présenterait de nombreux avantages à condition de développer des filières de production durables. Le projet Défi H12 propose de convertir en hydrogène les acides organiques issus de la fermentation grâce à la technologie des « Microbial Electrolysis Cells (MEC) ». Une MEC est un électrolyseur avec l'oxydation des acides acétique/butyrique à l'anode, et réduction abiotique de l'eau à la cathode. Un biofilm microbien joue le rôle d'électro-catalyseur à l'anode.

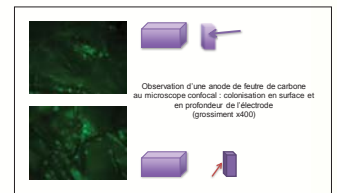
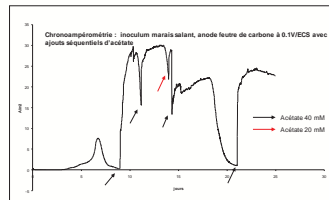
Cette bioproduction de H₂ est réalisable avec une consommation électrique réduite (tension nécessaire 5 à 10 fois plus faible qu'un électrolyseur classique)



Le programme présente un objectif fondamental pour la formation de biofilms microbiens spécifiques pour le développement d'anodes de MEC.

Deux milieux naturels ont été retenus comme sources de consortia : eau de mer + sédiments marins et marais salants. En milieu marin avec sédiments, une forte sélection des espèces est observée. Le stockage des biofilms avec maintien de l'activité reste problématique.

Une colonisation diffuse dans l'électrode pour un support en feutre de carbone



Une densité de courant de 30A/m² a été obtenue.

Les paramètres optimaux n'ont pas encore été définis complètement et sont en cours d'étude.

L'impact de la conductivité du milieu et de la géométrie des électrodes a été évalué par modélisation. En prenant en compte les 1^{ères} données cinétiques, la surface de l'anode est le paramètre limitant à ce stade.

Conclusions et Perspectives

Les milieux retenus favorisent le développement de souches halophiles, soit une caractéristique favorable pour une croissance en milieu conducteur dans le contexte d'une MEC. Cependant la conservation du biofilm et de ses propriétés électro-actives tout en s'affranchissant de l'inoculum constitue encore un verrou et devra être étudiée.

Les performances en terme de densité de courant sont très encourageantes et une marge de progression demeure avec l'optimisation des conditions opératoires.

Les premiers résultats expérimentaux et d'approche en modélisation apportent les bases indispensables à la conception du prototype. Un premier dispositif devrait être disponible pour test dans les prochains mois.

CONTACT :

marieline.delia@ensiacet.fr



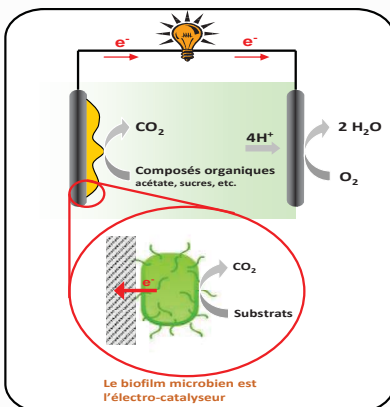
Coordinateur: Laboratoire de Génie Chimique (LGC)

Partenaires: Laboratoire d'écologie microbienne de la rhizosphère et d'environnements extrêmes (LEMIRE), Ecologie des forêts guyanaises (ECOFOG), Laboratoire d'étude de la corrosion aqueuse (LECA), Centre technique du papier (CTP), PaxiTech SAS, Laboratoire de chimie agro-industrielle (LCA)

Contexte et Objectifs

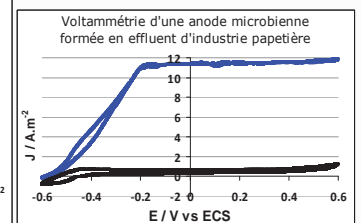
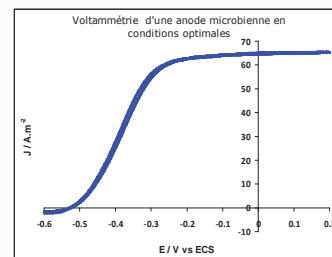
Principe

Un biofilm microbien déposé sur l'anode joue le rôle d'électro-catalyseur. Grâce à cette catalyse, une pile à combustible microbienne peut utiliser de très nombreux composés organiques comme combustible. Le projet Agri-Elec a pour objectif de concevoir des piles microbiennes capables d'oxyder les résidus agricoles et les effluents d'industries papetières pour produire de l'électricité. Lorsqu'elle utilise un effluent la pile, en consommant la matière organique, intensifie le traitement



Un verrou majeur

Les faibles densités de courant assurées par les anodes microbiennes, généralement inférieures à 10 A/m²



- Plusieurs espèces électroactives ont été identifiées à partir de la biodiversité tropicale.
- Des anodes microbiennes assurant 12 A/m² ont été conçues pour le traitement d'effluents papetiers.
- Des densités de courant jusqu'à 30 A/m² sont obtenues en conditions optimales.
- Des densités de courant jusqu'à 65 A/m² ont été atteintes en formant les biofilms électroactifs autour d'ultra microélectrodes (D.Pocaznoi *et al.* Energy & Environmental Science, 2011, DOI: 10.1039 / C1 EE 01 469 B)
- Des cathodes à air abiotiques ont été optimisées pour les conditions de fonctionnement spécifiques aux piles microbiennes.

Conclusions et Perspectives

Les densités de courant obtenues sur les anodes microbiennes sont au-delà des maxima reportés à ce jour dans la bibliographie. Un très large savoir-faire a été développé sur ce point et des avancées significatives ont été réalisées sur la connaissance des mécanismes de formation des biofilms électroactifs.

Le verrou de la cathode est plus difficile à lever mais des pistes prometteuses sont tracées en particulier avec l'identification de souches bactériennes d'intérêt.

Le travail se poursuit avec la conception de prototypes de pile qui intègrent les éléments

Méthodologie et Résultats

Tâche 1: Criblage des environnements pour identifier des souches bactériennes électroactives

Tâche 2: Ingénierie de la surface des électrodes

Tâche 3: Comprendre les mécanismes et concevoir des électrodes microbiennes mono-espèces

Tâche 4: Cathodes à air abiotiques

Tâche 5: Couplage des anodes multi-espèces avec les rhizosphères

Tâche 6: Anodes multi-espèces pour l'industrie papetière et intégration des piles

Tâche 7: Anodes multi-espèces pour les résidus agricoles et intégration des piles

CONTACT :

alain.bergel@ensiacet.fr



VEGAZ Project: towards a green natural gas efficient pathway through biomass gasification and methanation

J. Bamarni, Dr S. Capela, M. Dreillard, A. Jarry, Dr Y. Kara, A. Lautier, F. Legrand, Dr B. Marchand, M. Pale, P. Poli, Dr A. Prieur, Dr C. Villermaux & Dr O. Guerrini - GDF SUEZ, Research & Innovation Division, CRIGEN

Context and Objectives

- ❖ Identify and characterize the key technologies for the development of 2nd generation Biomethane production pathway through biomass gasification and methanation
- ❖ Carry out a technical, economical and environmental assessment of 2G biomethane production technologies and position it with the others 2G Biofuels production pathways
- ❖ Identify the R&D needs and roadmap towards industrialization

French ANR program Sustainable Energy Department

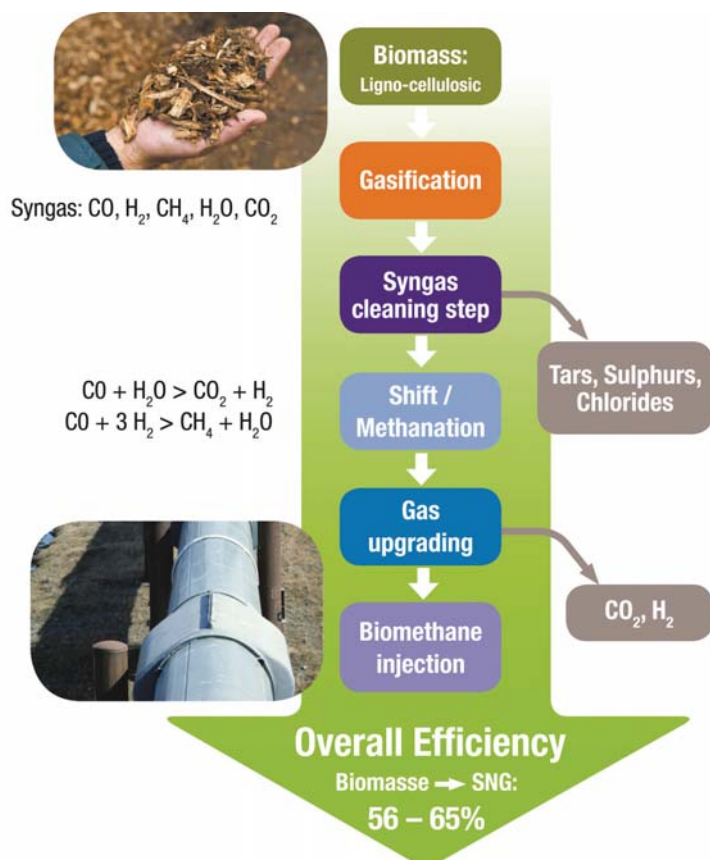
2 years: 2009- 2011

5 Partners - Budget: 1.7 M€

Acknowledgments:

We would specially like to thank the French Research national Agency (ANR) for supporting this work

A 2nd Generation pathway with an very high efficiency



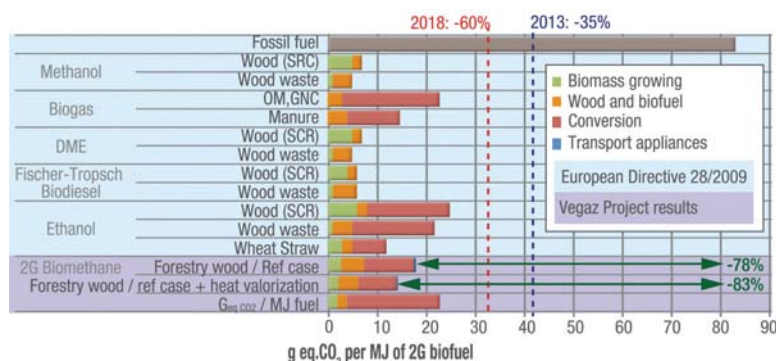
ASPENPLUS MODELIZATION AND OVERALL EFFICIENCY ASSESSMENT

The simulations allowed to identified optimized process chains, and highlighted several possible improvements of its design:

- ❖ 56% (validated) to 65% (target) overall efficiency wood → biomethane
- ❖ 3 to 5% added to efficiency if heat of process is valorized
- ❖ Plant capacities range is expected in the range of 10 to more than 100MW_{in fuel}

LIFE CYCLE ANALYSIS OF THE 2G BIOMETHANE SUPPLY CHAIN

The results show that the bio-SNG French supply chain is compliant with the European directive criteria with respectively 78% and 83% of greenhouse gases emissions reduction for the reference case and the R&D goal.



Life cycle assessment of 2G Biomethane pathway and comparison with other biofuels pathways (datas from VEGAZ project and from Renewables European Directive 28/2009)

Conclusions and Prospects

- ❖ The 2G Biomethane/Heat pathway appears to be a very promising way to valorize lignocellulosic biomass: high energetic yields, local heat covalorization, reasonable biomass supply
- ❖ The results of VEGAZ Project will fill and allow the GAYA pilot platform and commissioning is expected in Q1 2013. These equipments will provide to GDF SUEZ a flexible tool in order to prepare industrialization of the 2G Biomethane pathway towards 2015.



Coordinateur: J.M. Seiler; K. Froment, CEA/DRT/DTBH

Partenaires: TKE (Danemark), Suez-Environnement, Université Orléans, CEA

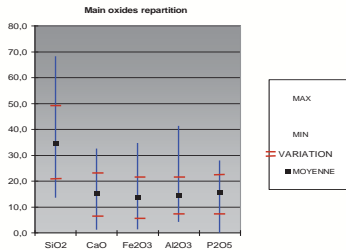
Objectifs:

- Evaluation de la possibilité de valorisation énergétique des boues d'épuration
- Comparaison Incinération / Gazéification
- Faisabilité d'une gazéification en Réacteur à Flux Entraîné

Verrous principaux:

- Séchage des boues
- Volatilisation des inorganiques
- Tenue des parois du réacteur
- Valorisation des sous produits

Composition des cendres (Suez)



Essais réels de gazéification de boues en réacteur à flux entraîné (TKE)



Optimisation des céramiques - tenue aux cendres liquides (CEMTHI)

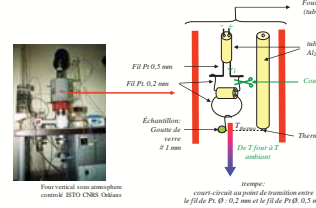
Static crucible test
in isothermal condition
• Corrosion time = 5 hours
• Temp. = 1500°C
• Molten slag: 100 gram of average sludge
• After corrosion test, quench of crucible



Ablation d'une céramique par cendres liquides



Détermination Intervalle de fusion des cendres de boues (CEMTHI / CEA)

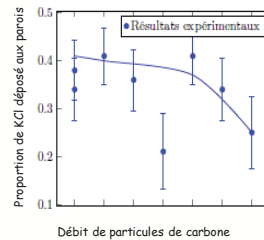
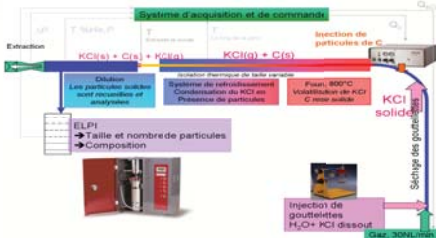


Tliquidus boue type SUEZ ~ 1280°C
Tliquidus boue type TKE: 1350°C
=> Effet limité de P₂O₅ sur la réduction de Tliquidus cendres

Banc de mesure T_{liq}
Validation base données thermodynamiques

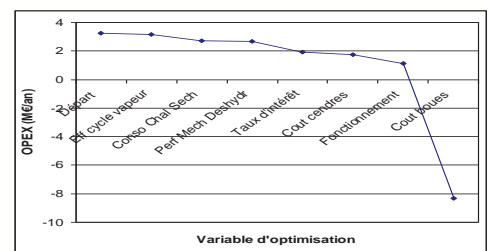
Formation et dépôts d'aérosols: CEA

Partition du dépôt de KCl entre les parois et les suies



Analyses Technico-Economiques

- => Comparaison Gazéification / Incinération
- => Analyse des critères de rentabilité de la gazéification par rapport à l'incinération



Contact:

Jean-marie.seiler@cea.fr

Coordinateur : Europlasma

Partenaires : Floralis, CEMHTI, LaTEP

Contexte et Objectifs

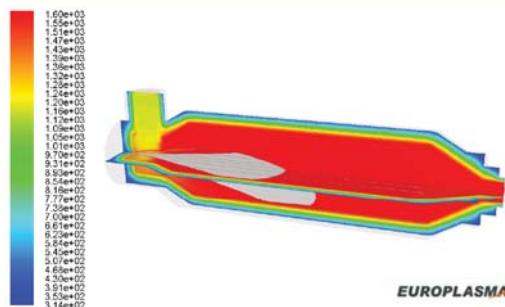
La finalité des procédés de gazéification vise la conversion thermochimique de matière organique solide (biomasse et/ou déchets) en un gaz combustible (gaz de synthèse). Ce gaz combustible, quelque soit son mode de valorisation (électricité, carburant liquide, synthèse chimique), doit respecter des spécifications, en particulier en ce qui concerne la concentration de matériaux condensables : les goudrons.

Le présent programme propose un développement expérimental pour démontrer la maîtrise industrielle de la qualité de gaz de synthèse épuré d'une partie de ces goudrons.

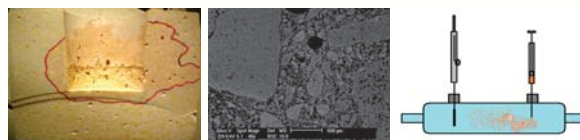


En effet, la brique technologique dont il s'agit a pour fonction de réaliser un craquage thermique des goudrons assisté par torche à plasma. L'objectif du Turboplasma® est de descendre d'au moins 2 décades la concentration de goudrons ensemencant un gaz combustible. La mise en œuvre de ce Turboplasma® à une échelle 1/10 de l'échelle industrielle doit permettre de lever des verrous de réalisation et d'expérimenter des facteurs de forme qui, jusqu'alors, ne pouvaient être mis en œuvre à l'échelle laboratoire.

travaillé dans des thématiques liées aux hautes températures, et contribué au développement de savoirs dans des domaines connexes à la gazéification.



Après deux ans de travail, la collaboration entre Europlasma et le LaTEP a permis de dimensionner le Turboplasma® grâce à la modélisation de fluide numérique couplée à un modèle cinétique. Floralis a mis au point un système de prélèvement de gaz chaud et une méthodologie afin de mesurer les goudrons. Les résultats de la modélisation du Turboplasma® ont permis au CEMHTI de définir les matériaux réfractaires adaptés aux contraintes du milieu (atmosphère, température, vitesse...)



Méthodologie et Résultats

Le programme Turboplasma® proposé dans cet ANR BIOE-09 est d'une certaine manière l'aboutissement d'une réflexion industrielle de 20 années menée sur plusieurs procédés en parallèles. Aujourd'hui, il n'existe pas de technique réellement industrielle permettant de garantir une pureté suffisante du gaz de synthèse issu de la gazéification pour faire fonctionner sans dommage un moteur à gaz pauvre. Un procédé de purification des goudrons (au stade expérimental semi industriel), par laveur à huile, existe mais n'a pas démontré son efficacité.

Le Turboplasma est un équipement qui grâce à la torche à plasma devrait permettre une purification du gaz généré par le gazéifieur notamment en éliminant les goudrons présents, avant de l'envoyer au moteur. Les partenaires scientifiques qui se joignent à ce présent projet démonstratif ont eux-mêmes, dans les 3 dernières années,

Conclusions et Perspectives

A l'heure actuelle le Turboplasma est en construction sur une unité de gazéification de biomasse. Cette unité est issue d'un partenariat avec la société japonaise Kobelco Eco-Solution, il s'agit du projet KIWI. Elle est implantée sur la plateforme de Recherche et Développement d'Europlasma (Morcenx, 40).

La mise en service du procédé complet est prévue pour le premier trimestre de l'année 2012. Les campagnes d'essais pourront alors débuter.

Il s'agit de campagnes d'essais d'une semaine au cours desquelles seront testés plusieurs conditions opératoires. La méthode de prélèvement et d'analyse des goudrons pourra alors être calibrée avec le « tar protocol » et ensuite validée. Entre chaque campagne les réfractaires seront inspectés. Et l'efficacité du Turboplasma à abattre les goudrons sera évaluée.

A la suite de ces essais des pistes d'amélioration pourront être abordées.

EUROPLASMA : Vente et installation des systèmes torche, des fours ou réacteurs et des équipements associés, Développement de procédés d'épuration de gaz combustible pour la production d'énergie renouvelable et de procédés de destruction par fusion plasma de déchets dangereux. www.europlasma.com

CONTACT :

afourcault@europlasma.com
nebbad@europlasma.fr

CEA-Grenoble (Laboratoire des Technologies de la biomasse)

ARMINES-Rapsodee-Albi

EDF-R&D

Systèmes Durables

TUW Vienne (Au)

Contexte et Objectifs

CONTEXTE :

- Concerne le recyclage et la valorisation du CO₂ (effluent de gazéification et WGS) dans un procédé de gazéification de la biomasse lignocellulosique sous vapeur d'eau en lit fluidisé en vue de produire du carburant gazeux (bioSNG) ou liquide (synthèse Fischer-Tropsch).

OBJECTIFS :

- Etudier le recyclage d'une partie de ce CO₂ en le réinjectant dans le gazéifieur :
 - Avec l'alimentation de biomasse,
 - Remplacer en partie la vapeur d'eau dans le gazéifieur, le CO₂ pouvant également jouer le rôle d'agent gazéifiant.
- Etudier et comprendre les phénomènes de pyrolyse-gazéification de particules de biomasse dans un mélange H₂O-CO₂, en comparaison de vapeur d'eau seule.
- Synthétiser et d'exploiter les résultats expérimentaux acquis afin d'évaluer si le recyclage du CO₂ peut présenter un intérêt du point de vue économique ou environnemental pour le procédé global.

Méthodologie

Etude de la pyrolyse et de la gazéification dans un mélange H₂O/CO₂

Evaluations technico-économique et environnementale

Etude pyrolyse sous H₂O + CO₂
 CEA (Echantillons quelques cm) RAPSODEE (particules (mm))

Equipement PYRATES Equipement configuration RFE

Etude gazéification sous H₂O + CO₂
 CEA (ATG quelques mg) (Particules broyées) RAPSODEE (macro ATG quelques g) (particules : cm)

Patm, T ≤ 950°C
 Echantillon : m=0,1g
 longueur max = 5 cm

Etude pyro-gazéification
 CEA
 Gazéifieur à 3kg/h biomasse

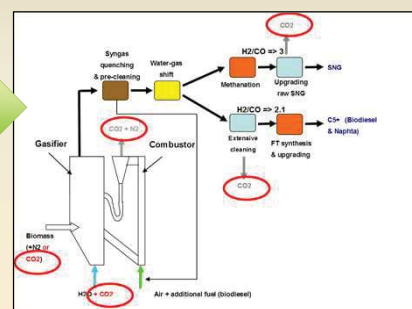
Installation Lit Fluidisé Haute Température
 ⇒ 0.2 to 5 kg/h
 ⇒ Lit fluidisé bouillonnant
 ⇒ T max 1000°C - 15 bars

Injection CO₂ avec l'alimentation de la biomasse et/ou comme agent gazéifiant

Synthèse des résultats et évaluations du recyclage du CO₂

EDF/CEA

Systèmes durables



Evaluations pour FICFB de 100 MWth ou 25t.h⁻¹ de B20

Avancement du projet

- Les études de pyrolyse et de gazéification ont débuté
- Analyses des premières campagnes d'essais en cours
- Le cadre des évaluations technico-économique et environnementale est défini

CONTACT :

laurent.bedel@cea.fr



energie atomique • énergies alternatives



ECOLE DES MINES D'ALBI
C A R M A U X



CHANGER L'ÉNERGIE ENSEMBLE



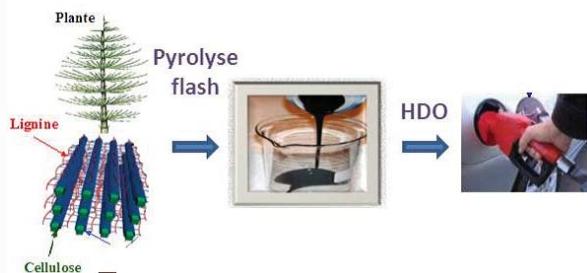
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

Partenaires : LCS (UMR CNRS-ENSICAEN,-Université de Caen) , LACCO (UMR CNRS-Université de Poitiers) , UCCS (UMR CNRS--Université de Lille), TOTAL

Coordinateur: Françoise Maugé (LCS, Caen)

Contexte et Objectifs

Dans le cadre de la diversification des ressources énergétiques et de la réduction des gaz à effet de serre, les biocarburants de 2^{ème} génération sont une source d'énergie renouvelable appelée à se développer car n'entrant pas en compétition avec la production alimentaire. L'une des nouvelles voies possibles dans ce domaine est l'utilisation des huiles issues de la pyrolyse flash de la matière lignocellulosique (résidus agricoles, forestiers, sous produits des industries du bois). Ces huiles ayant une teneur en oxygène très élevée (jusqu'à 45 %), une étape d'hydrodésoxygénation (HDO) est nécessaire pour obtenir des carburants diesel stables. L'objectif du projet est d'atteindre une optimisation rationnelle de l'étape de HDO, en limitant la consommation d'hydrogène et la désactivation du catalyseur.



Méthodologie et Résultats

Les catalyseurs envisagés (molybdène, nickel et cobalt sur alumine) ont été testés en laboratoire pour l'hydrodésoxygénation de molécules modèles (phénol et dérivés) dans des conditions proches de la réaction réelle. L'activité et la sélectivité catalytique ont été optimisées en faisant varier plusieurs paramètres (pression de H₂S, présence d'eau, ...).

La spectroscopie infrarouge a permis parallèlement d'étudier les modes d'adsorption des molécules oxygénées sur les différents catalyseurs et de comprendre l'influence de ces molécules sur la désactivation observée en réactivité. Les résultats observés pour l'influence de la présence d'eau sur la structure du catalyseur ont été confirmés par les clichés obtenus par microscopie électronique.

Les calculs par modélisation DFT (density functional theory) ont permis d'étudier la compétition pour l'adsorption sur les sites catalytiques entre les molécules oxygénées et des molécules inhibitrices comme H₂O, H₂S, CO.

Conclusions et Perspectives

Les catalyseurs à base de sulfures de Mo promus par le Co déposés sur alumine sont des catalyseurs efficaces qui permettent de réaliser l'HDO tout en limitant la consommation d'hydrogène. L'optimisation de l'activité et de la sélectivité de ces catalyseurs sulfures peut être atteinte si: (i) leur taux de promotion en Co est maximisé, (ii) l'acidité de l'alumine est limitée et (iii) la réaction est réalisée en présence de faibles pressions partielles de H₂S (qui pourrait provenir de la biomasse). Un avantage supplémentaire des catalyseurs sulfures est la très bonne connaissance de leur comportement en conditions industriels du fait de leur utilisation à large échelle en hydrodesulfuration (HDS) des coupes pétrolières.

Le projet EcoHdoc a aussi permis de démontrer l'existence de différences entre l'HDO et l'HDS, ce qui ouvre des nouvelles voies pour l'optimisation futures des catalyseurs de HDO. Les briques technologiques acquises dans le cadre de EcoHdoc vont permettre d'optimiser les catalyseurs de demain et de relever le défi des carburants alternatifs.

CONTACT :

Françoise Maugé -
francoise.mauge@ensicaen.fr

