

FORUM RECHERCHE & INDUSTRIE



BIOENERGIES

Paris - 12 mars 2019



Sponsors & Partenaires



Sommaire

Introduction	1
Le Carnot 3BCAR	2
Session 1 : Adapter et prétraiter la biomasse pour optimiser la production de bioénergies.....	6
• Nouvelle technologie pour un déploiement durable d'usines de production de biocarburants de deuxième génération en zones rurales.....	8
• La domestication de Miscanthus pour optimiser la production de bioénergie. 10	
• Symbiose industrielle autour des microalgues	12
• Modélisation du prétraitement par explosion à la vapeur	14
Session 2 : Durabilité des approvisionnements des filières bioénergies... 16	
• Création d'une base de données spatialisée relative à la valorisation énergétique par méthanisation des résidus et coproduits organiques des agro-industries.....	18
• La logistique, pivot d'un approvisionnement en biomasse durable.....	20
• Ecoconception et durabilité des filières bioénergies	22
Session 3 : Procédés innovants de production.....	24
• Ingénierie des microalgues oléagineuses pour la chimie verte et les biocarburants.....	26
• Transformations biologiques complémentaires à la filière de méthanisation pour la production de biohydrogène : fermentation et électrolyse microbienne	28
• Méthanation biologique : nouvelle brique technologique dans des filières de production de gaz renouvelable	30
• Utilisation de poudres lignocellulosiques en moteur à combustion interne	32
Session 4 : Procédés innovants de production.....	34
• Production de molécules chimiques d'intérêt à partir des résidus condensables de la torréfaction de biomasse.....	36
• Multi-valorisation éco-efficace des sous-produits de l'industrie agro-alimentaire : Intégration de l'extraction de biomolécules à la production de bioénergie	38
• Production de biocarburants de 2 ^{ème} génération à partir d'acides gras volatils	40
Session 5 : Accompagner l'innovation pour les filières existantes de bioénergies.....	42
• Le CTBM: un centre technique pour concrétiser le potentiel en développement de la filière biogaz.....	44
• Des outils pour accompagner l'innovation en thermochimie	46
• Développement d'un procédé intégré continu de fermentation/extraction <i>in-situ</i> pour la production anaérobie de n-butanol à hauts titre, rendement et productivité.....	48
Partenaires et Sponsors	50

Introduction

par Jean Tayeb, Directeur du Carnot 3BCAR

En fin d'année 2018 le Gouvernement présentait la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE), trajectoire que se fixe l'Etat pour les 10 prochaines années en matière de politique de l'énergie. Les principaux objectifs sont de réduire de 40% la consommation d'énergie fossile à horizon 2030 et assurer une transition énergétique compréhensible. La valorisation des biomasses se trouve au cœur de ces enjeux en favorisant l'émergence de nouvelles voies de production de l'énergie. Ce sont ces dernières que nous allons présenter lors de ce Forum Recherche et Industrie 2019 qui leur est dédié.

Les bioénergies sont un vaste domaine qui s'inscrit pleinement dans le processus de transition énergétique. En 2013 le Forum Recherche Industrie 3BCAR leur avait déjà été consacré et on peut noter qu'en 6 ans les bioénergies se sont développées et que la volonté politique pousse à accélérer leur mise en œuvre. La recherche menée dans le Carnot 3BCAR a pour but d'améliorer les procédés, en diversifiant les biomasses et en développant les technologies de demain dans une logique de développement durable et de valorisation de la plante entière.

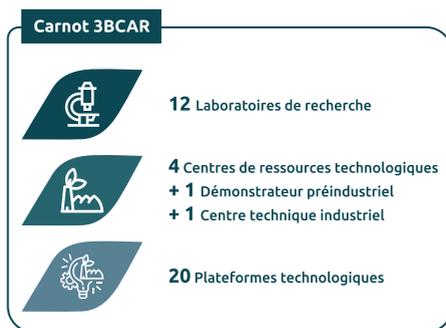
La production des bioénergies repose sur deux grands types de technologies : la (thermo)chimie et les biotechnologies, qui peuvent être appliquées aux différentes biomasses forestières, agricoles, microbiennes et aux déchets. Le but est de déconstruire la biomasse pour valoriser, les molécules qui la composent sous forme de biocarburants, de biogaz, de syngaz ou d'électricité. Au-delà des aspects liés à la production de l'énergie, il est primordial de prendre en compte l'amont (la production et la disponibilité de la biomasse ainsi que la logistique), et l'aval (voies de valorisation des coproduits).

C'est dans cet esprit qu'a été pensé le programme de cette journée. Des sessions permettront de faire le point sur la production de biomasses à vocation énergétique ou la valorisation de co-produits agricoles ainsi que sur la sécurisation de l'approvisionnement. Des procédés innovants faisant appel à de nouvelles technologies seront présentés. Enfin, une session dédiée à la rentabilité des bioénergies par une démarche de bioraffinerie permettra de présenter des voies de valorisation de molécules produites lors des procédés bioénergétiques.

Le Carnot 3BCAR

L'institut Carnot 3BCAR est un réseau structuré de 18 entités de recherche publique autour des enjeux de valorisations de la biomasse pour des applications en bioénergies, biomolécules et matériaux biosourcés.

Pour développer l'innovation et l'émergence d'une bioéconomie durable, le Carnot 3BCAR a pour objectif de répondre aux besoins en R&D des entreprises en leurs proposant de la recherche contractuelle. Ce réseau est labellisé institut Carnot depuis 2011, ce qui garantit aux entreprises l'excellence scientifique de sa recherche et son professionnalisme.



2

Nos engagements pour faciliter le partenariat

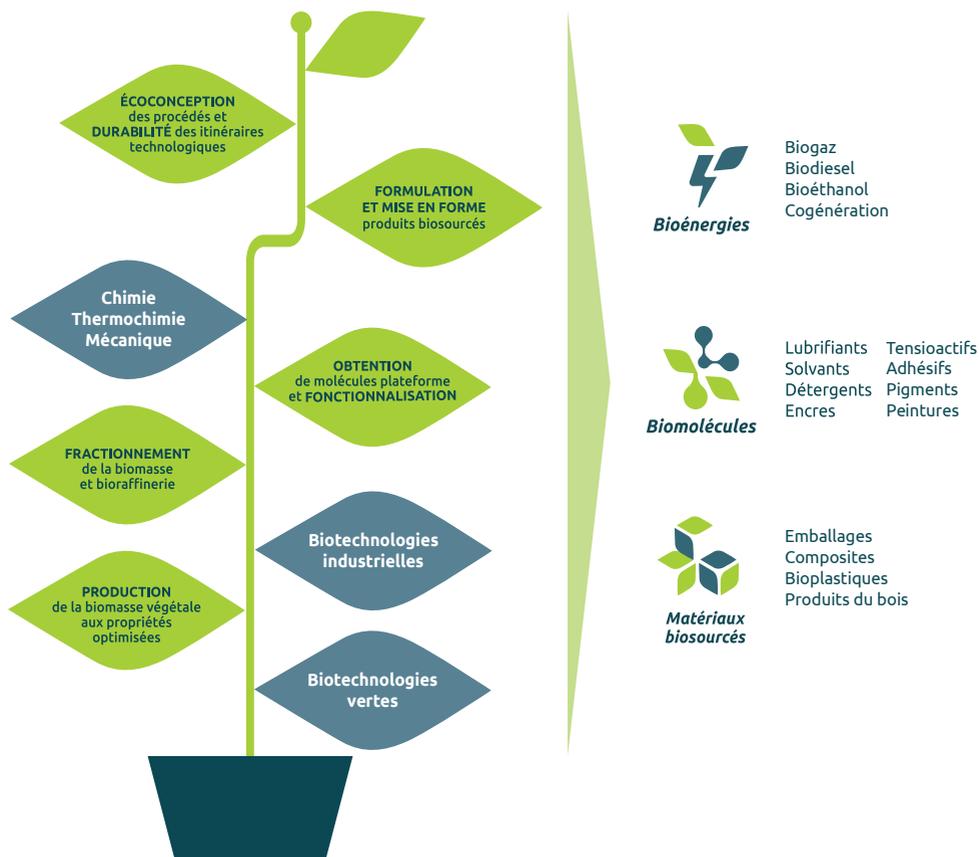
- Guichet d'entrée unique à l'écoute de vos besoins pour vous diriger vers les compétences d'un ensemble de plus de 500 chercheurs
- Qualité de la contractualisation, outils et procédures de pilotage de la relation contractuelle. Démarche certifiée ISO9001
- Bonnes pratiques de propriété intellectuelle et de transfert de technologie, pour assurer la traçabilité et protection des résultats



La recherche
pour l'innovation
des entreprises

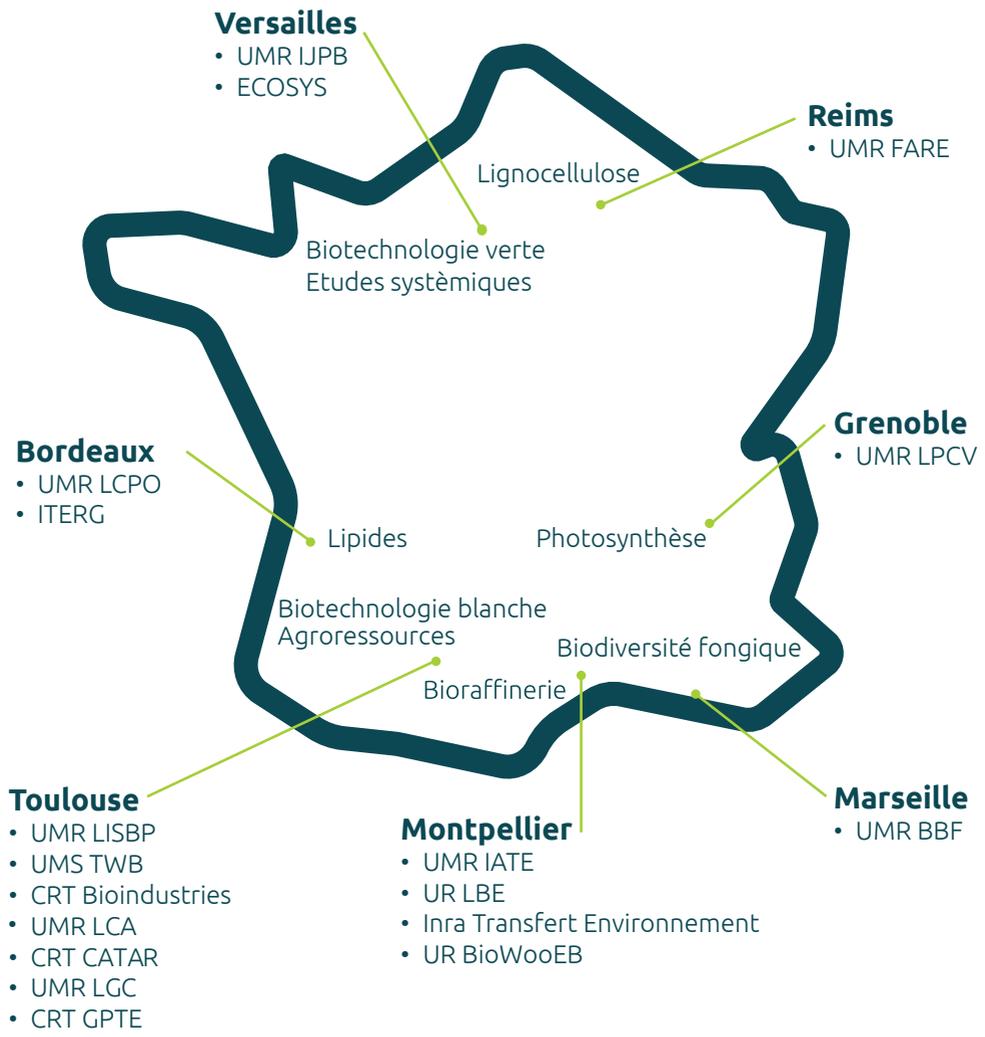
Le Carnot 3BCAR mobilise deux leviers essentiels à l'émergence de la bioéconomie : les biotechnologies et la chimie verte, rassemblant des approches multidisciplinaires depuis les biomasses végétales, et la bioraffinerie, jusqu'aux propriétés fonctionnelles.

L'économie circulaire est appréhendée par la valorisation des coproduits et déchets, les usages en cascade et l'écoconception.



3BCAR : une offre de compétences multidisciplinaire :

- Production de la biomasse végétale aux propriétés optimisées
- Fractionnement de la biomasse et bioraffinerie
- Fonctionnalisation pour l'obtention de molécules plateformes et synthons
- Formulation et mise en forme de bioproducts
- Ecoconception des procédés & Durabilité des filières intégrées



Session 1 : Adapter et prétraiter la biomasse pour optimiser la production de bioénergies

Le développement des bioénergies nécessite la mobilisation d'une grande diversité de biomasses afin d'assurer l'approvisionnement constant des sites de production et de répondre à des attentes sociétales notamment la non concurrence avec des usages alimentaires. Ce besoin peut conduire à un changement dans la gestion des terres agricoles et des forêts et doit être piloté afin de ne pas entraîner de manière l'augmentation de l'émission de gaz à effet de serre (GES)¹. Les cultures à vocation énergétique peuvent être une solution de valorisation de terres non utilisables et ainsi atteindre un bilan de GES positif².

Cette problématique est particulièrement vraie pour les biocarburants de première génération qui mobilisent des huiles issues des oléagineux (colza, tournesol, palme...) ou des sucres provenant des cultures sucrières (betteraves, céréales, canne...). La transformation des huiles et des sucres en biocarburants met en œuvre des procédés chimiques de transestérification des huiles pour le biodiesel et des procédés de fermentation et de distillation pour l'essence. Les molécules d'intérêt, esters méthyliques ou éthyliques et éthanol, peuvent aussi être obtenues à partir d'autres ressources dites de "plantes entières". On parlera alors de biocarburant de seconde génération pour les procédés qui font appel à des biomasses spécifiques tel le miscanthus ou à des coproduits agricoles et forestiers. Les biocarburants de troisième génération sont également en cours de développement et font appel aux microorganismes et plus particulièrement aux microalgues.

Pour les carburants de seconde génération, si les molécules finales ne diffèrent pas nécessairement en fonction de la biomasse, les procédés pour y parvenir sont différents et notamment l'étape de prétraitement. Cette étape est primordiale car elle conditionne les choix de technologies de transformation aval. Le développement de procédés de prétraitement multi-biomasse est au cœur du développement des nouvelles générations de biocarburants. Les biocarburants ligno-cellulosiques qui cherchent à obtenir les molécules d'intérêt à partir de coproduits ou de cultures énergétiques ont nécessité le développement de procédés de prétraitement important, mais qui aujourd'hui en sont au stade préindustriel

1. Grabielle et al., 2014. Environmental assessment of biofuel pathway in Ile de France based on ecosystem modelin. Bioresour Technol, 152

2. Gelfand et al., 2013. Sustainable bioenergy production from marginal lands in the US Midwest. Natur, 493

notamment sur des pilotes comme Futurol, BioTfuel ou la bioraffinerie de Pomacle-Bazancourt. Les biocarburants de troisième génération sont plus éloignées de la réalisation industrielle. La culture des microorganismes lipidiques est déjà utilisée pour des produits à haute valeur ajoutée comme les cosmétiques ou les additifs alimentaires, mais doit être optimisée en vue d'une valorisation énergétique.

Par ailleurs, l'intégration des procédés de prétraitement dans une approche globale de bioraffinerie permet d'anticiper la problématique de valorisation des co-produits dès les premières étapes de transformation. Cet aspect est traité dans la session 4 : Rentabiliser les filières bioénergies par une démarche de bioraffinerie.

Le développement de cultures énergétiques couplées à des procédés de prétraitement adaptés permet d'optimiser la chaîne d'approvisionnement et ainsi le développement de filières économiquement viables et respectueuses de l'environnement.



- **Nouvelle technologie pour un déploiement durable d'usines de production de biocarburants de deuxième génération en zones rurales** - Gérard Vilarem, LCA (INRA, INP-ENSIACET)
- **La domestication de Miscanthus pour optimiser la production de bioénergie** - Herman Höfte, IJPB (INRA, AgroParisTech, CNRS)
- **Symbiose industrielle autour des microalgues** - Christine Raynaud, CRT CATAR
- **Modélisation du prétraitement par explosion à la vapeur** - Giana Almeida & Denis Flick, UMR GENIAL (INRA, AgroParisTech) ; Patrick Perre, LGPM (CentraleSupélec)



BABET REAL 5 : Nouvelle technologie pour un déploiement durable d'usines de production de biocarburants de deuxième génération en zones rurales

Gérard VILAREM, LCA (INRA, INP-ENSIACET - Toulouse)
gerard.vilarem@ensiacet.fr

• Objectif

Proposer une alternative pour la production de bioéthanol de 2^{ème} génération à partir de biomasse ligno cellulosique, compétitive pour de petites unités industrielles (30'000 t/an), applicable à une grande variété de coproduits agricoles et déployable dans les zones rurales des régions d'Europe ou dans le monde.

• Contexte

Issu d'une collaboration entre l'UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México) et le Laboratoire de Chimie Agro-industrielle, le projet se décline en 2 volets successifs dans les cadres FP7 (2009-2014) et H2020 (2016-2020). Il associe 16 partenaires d'Europe et Amérique Latine (dont 6 partenaires industriels)

• Approche et mise en oeuvre

Un nouveau procédé de déstructuration des coproduits agricoles avec une étape de "Bioextrusion" a été développé et breveté. Il offre une solution compacte et intégrée pour la conversion de biomasses ligno cellulosiques pour la production de bioéthanol, reproductible dans diverses régions du monde, avec des investissements, coûts d'exploitation et impacts environnementaux réduits. La faisabilité, démontrée jusqu'au niveau TRL 4, doit être amenée jusqu'aux TRL 5-6.

• Résultats publiés et perspectives de valorisation

Un brevet avec extension PCT a été déposé en Europe et outre Atlantique qui couvre le procédé de base. Le procédé lors du passage aux TRL 5-6, doit aboutir à la conception de 3 business cases dans 3 régions différentes. Ces business cases serviront de base pour le développement des futures unités industrielles.

Le projet fait l'objet de : 1 poster, 5 publications et 1 vidéo disponibles sur le site internet du projet.

Site web : www.babet-real5.eu

BFF & GRACE : La domestication de Miscanthus pour optimiser la production de bioénergie

*Herman HÖFTE, IJPB (INRA, AgroParisTech, CNRS - Versailles)
hermanus.hofte@inra.fr*

• Objectif

Améliorer la production de biomasse lignocellulosique impliquant de faibles niveaux d'intrants sur des terres marginales par la domestication accélérée de la graminée pérenne Miscanthus.

• Contexte

Miscanthus est une graminée pérenne qui présente déjà des avantages pour la production de biomasse lignocellulosique (rendement important et une faible empreinte environnementale). En revanche cette graminée n'a pas encore été domestiquée et donc des gains importants en performances agricoles et en qualité de biomasse produite sont envisageables.

• Approche et mise en oeuvre

Les projets "Biomass For the Future" (Investissements d'Avenir) et "GRACE" (EU) ont en partie pour objectif d'accélérer la domestication de miscanthus en s'appuyant sur des connaissances écophysiologiques, anatomiques et génomiques sur les espèces apparentées le maïs et le sorgho.

• Résultats publiés et perspectives de valorisation

Ce projet a fait l'objet de publications :

- El Hage, F., Legland, D., Borrega, N., Jacquemot, M.P., Griveau, Y., Coursol, S., Mechin, V., and Reymond, M. (2018). **Tissue Lignification, Cell Wall p-Coumaroylation and Degradability of Maize Stems Depend on Water Status.** Journal of agricultural and food chemistry 66, 4800-4808.
- Brancourt-Hulmel M., Ferchaud F., Hofte H., Bastien J.-C., Pilate G., 2016. **Intérêt des ressources agricoles et forestières pour la bioénergie.** Innovations Agronomiques 54, 13-21 dx.doi.org/10.15454/1.513772739642838E12

Site Web : www6.inra.fr/biomassforthefutur/

CYCLALG : Symbiose industrielle autour des microalgues

Christine RAYNAUD, CRT CATAR (Toulouse)

chrsitine.raynaud@ensiacet.fr

• Objectif

Développer une bioraffinerie de microalgues.

• Contexte

Si la production de biodiesel à partir de microalgues est une possibilité scientifique dont la faisabilité a été démontrée, la mise en œuvre de ce procédé est limitée car la productivité de ce processus reste faible et son coût élevé. De surcroît, le processus génère des déchets qui gagneraient à être utilisés. Dans ce contexte, l'Union Européenne a soutenu le projet CYCLALG dans le cadre du programme Interreg V Espagne-France-Andorre (2014-2020).

• Approche et mise en oeuvre

Le projet CYCLALG propose un schéma basé sur un principe d'économie circulaire, dans lequel des coproduits agroindustriels seront valorisés comme éléments nutritifs dans un procédé de culture de microalgues dont l'intégralité de la biomasse sera en outre utilisée dans diverses filières de l'industrie chimique, la cosmétique, l'énergie ou l'agriculture. L'enjeu de ce projet est d'augmenter la productivité des microalgues grâce à des espèces oléagineuses hétérotrophes. Cette approche impose une ressource de carbone et d'azote qui sera puisée dans des biomasses résiduelles.

• Résultats publiés et perspectives de valorisation

Chlorella protothecoides a été cultivée en réacteur hétérotrophe. Une série de fractionnements de la biomasse a permis d'obtenir (i) les acides gras par hydrolyse alcaline convertis par la suite en biodiesel de haute qualité et (ii) la biomasse dégraissée soumise dans une seconde étape à une hydrolyse enzymatique afin d'obtenir un milieu riche en acides aminés et sucres, dont les résidus solides ont été utilisés pour générer du biogaz par digestion anaérobie. Le co-digestat, quant à lui, a été évalué comme engrais agricole. Deux fractions supplémentaires ont été récupérées au cours de l'extraction des acides gras : une fraction riche en carbone, recyclée en tant que source de carbone dans la culture de microalgues et une fraction riche en métabolites secondaires, valorisée pour la formulation de cosmétiques.

Site web : www.cyclalg.com

A series of 20 horizontal lines for writing, spaced evenly down the page.

FUTUROL : Modélisation du prétraitement par explosion à la vapeur

Giana ALMEIDA & Denis FLICK, UMR GENIAL (INRA, AgroParisTech Massy) ; Patrick PERRE, LGPM (CentraleSupélec - Paris Saclay)
giana.almeida@agroparistech.fr ; denis.flick@agroparistech.fr
patrick.perre@centralesupelec.fr

• Objectif

Cette action du projet Futurol avait comme objectif principal l'étude multi-échelle du prétraitement de la biomasse par explosion à la vapeur.

• Contexte

Le procédé de prétraitement de la biomasse a comme objectif principal d'augmenter l'accessibilité des polysaccharides à l'action des enzymes. Son efficacité dépend des paramètres procédés et des propriétés de la biomasse. Connaître l'influence de ces paramètres sur la qualité du produit traité est primordial pour augmenter le rendement de la chaîne de production de carburant de deuxième génération.

• Approche et mise en oeuvre

Echelle Pilote : afin de connaître l'évolution temporelle des conditions subies par la biomasse lors du prétraitement, les travaux menés ont été multiples : des essais de caractérisation au laboratoire, des essais sur le pilote et la modélisation mécanistique du procédé de prétraitement. *Echelle Particule* : Un système inédit d'essais rhéologiques sous pression a été construit. Il permet de suivre la transformation de la biomasse pendant la cuisson et d'en déduire des paramètres cinétiques. De plus, la phase d'explosion a été modélisée. L'objectif ultime est de prédire, au moins en tendance, les propriétés du produit obtenu : intensité de l'attaque chimique et granulométrie.

• Résultats publiés et perspectives de valorisation

Les résultats de cette action ont fait l'objet de 3 articles scientifiques :

- Youssef, Z., Ducept, F., Bennaceur, H., Malinowska, B., Almeida, G., Perré, P., Flick, D. 2017. **Residence time distribution in a biomass pretreatment reactor: Experimentation and modelling.** Chemical Engineering Research and Design, 125: 233–244
- Mokdad, SA., Casalinho, J., Almeida, G., Perré, P. 2018. **Assessment of biomass alterations during hydrothermal pretreatment by in-situ dynamic mechanical analysis.** Biomass and Bioenergy, 108: 330-337
- Auxenfans, T., Crônier, D., Chabbert, B., Paës, G. 2017. **Understanding the structural and chemical changes of plant biomass following steam explosion pretreatment.** Biotechnology for Biofuels, 2017, 10-36

Site web : www.projetfuturol.com

Session 2 : Durabilité des approvisionnements des filières bioénergies

Afin d'atteindre l'objectif de réduction des énergies fossiles de 40% en 2030, la PPE (Programmation Pluriannuelle de l'Energie) prévoit : (i) d'augmenter de 70% la capacité installée des énergies renouvelables électriques, (ii) d'augmenter de plus de 50% la production de chaleur renouvelable et (iii) d'atteindre une quantité de chaleur et de froid renouvelable livrés par les réseaux de l'ordre de 1.9 à 2.3 Mtep dès 2023. Il est crucial de prendre en compte la sécurisation des approvisionnements et la logistique qui en découle afin d'optimiser les coûts et de développer des chaînes logistiques plus respectueuses de l'environnement.

Le recensement des sources de biomasse et leur valeur énergétique doit être couplé avec les besoins en énergie à l'échelle d'un territoire afin d'estimer la quantité et la qualité de biomasse nécessaires pour répondre aux besoins et adapter le nombre d'unité de stockage et de transformation. La prise en compte et l'amélioration des aspects agronomiques (culture et récolte), du stockage et du transport permettent d'optimiser la quantité de biomasse disponible tout en réduisant les coûts et l'impact environnemental.

Il existe de nombreuses pistes d'amélioration de la chaîne de logistique, mais on peut mettre l'accent plus particulièrement sur :

- Une efficacité accrue des étapes de récolte et de transport,
- La densification de la biomasse après récolte, avec ou sans pré-traitement thermique, pour réduire les coûts de transport,
- La réduction des distances de transport ou le recours à des moyens peu polluants,
- Le recours à des systèmes de production de biomasse permettant l'échelonnement de la fourniture sur l'année, en vue de limiter le stockage, et possédant une productivité par hectare élevé¹.

Les projets portant sur l'approvisionnement et la logistique montrent qu'il est possible d'améliorer ce volet soit par des innovations sur un ou plusieurs maillons de la chaîne, soit en optimisant globalement le système pour prendre en compte la demande finale et les contraintes de production. Ils mettent également en évidence que les bioénergies sont jeunes et en cours de construction, il est donc nécessaire de développer des modèles capables d'évoluer. De plus la décision de produire de la biomasse est une problématique multi-critères qu'il faut éclairer par des disciplines scientifiques de type sciences humaines et sociales.

1. Gold et Seuring, 2011. Supply Chain and logistics issues of bio-energy production. Journal of Cleaner Production, 19



- **Création d'une base de données spatialisée relative à la valorisation énergétique par méthanisation des résidus et coproduits organiques des agro-industries** - Michel Torrijos, LBE (INRA)
- **La logistique, pivot d'un approvisionnement en biomasse durable** - Benoît Gabrielle & Sylvestre Njakou Djomo, EcoSys (INRA, AgroParisTech)
- **Ecoconception et durabilité des filières bioénergies** - Ludovic Montastruc, LGC (INPT, CNRS, Université de Toulouse III)



VALORMAP : Création d'une base de données spatialisée relative à la valorisation énergétique par méthanisation des résidus et coproduits organiques des agro-industries

Michel TORRIJOS, LBE (INRA - Narbonne)

michel.torrijos@inra.fr

• Objectif

Création d'une base de données spatialisée relative à la valorisation énergétique par méthanisation des résidus et coproduits organiques des agro-industries.

• Contexte

La méthanisation est une solution de traitement et de valorisation de la matière organique en pleine croissance en France. Les agro-industries génèrent un tonnage important de résidus et coproduits organiques disposant parfois d'un rendement méthane intéressant et permettant d'envisager leur valorisation en codigestion anaérobie.

• Approche et mise en oeuvre

Le projet ValorMap avait pour objectif de créer une base de données spatialisée relative à la valorisation énergétique par méthanisation des résidus et coproduits organiques des agro-industries. Ce projet a rassemblé les Instituts Techniques et les Centres régionaux, par leur connaissance du secteur agro-industriel et des caractéristiques des résidus et coproduits générés. Le LBE de l'INRA Narbonne a procédé aux analyses (BMP et chimiométrie) et l'IRSTEA de Rennes a réalisé la base de données spatialisée.

• Résultats publiés et perspectives de valorisation

Les travaux réalisés ont porté sur :

- Une étude de gisement des co-produits potentiellement intéressants pour la méthanisation au sein des différentes filières,
- L'analyse physio-chimique et la mesure du potentiel méthanogène de plus de 110 déchets des industries agro-alimentaires,
- Le développement d'un outil public web permettant de géolocaliser les gisements de déchets qui donne accès aux masses des grandes catégories de déchets à l'échelle départementale et les quantités d'énergie correspondantes, sous forme de KWh et de $m^3 CH_4$, à l'échelle cantonale.

Les données individuelles sont téléchargeables sur le site du projet ainsi que plus d'une vingtaine de fiches "co-produits" où figurent les procédés d'obtention, les ratios de production, les résultats d'analyses et les perspectives de valorisation en filière méthanisation.

Site web : www.valormap.fr

A series of 20 horizontal lines spaced evenly down the page, providing a template for writing or drawing.

LOGIST'EC : La logistique, pivot d'un approvisionnement en biomasse durable

Benoît GABRIELLE & Sylvestre NJAKOU DJOMO, EcoSys (INRA, AgroParis Tech - Versailles)

benoit.gabrielle@agroparistech.fr ; sylvestre.njakou-djomo@inra.fr

• Objectif

Montrer quels leviers de la chaîne logistique permettent d'améliorer la durabilité des projets biomasse.

• Contexte

Cette présentation résume les résultats principaux du projet Logist'EC (EU FP7) sur l'optimisation des chaînes d'approvisionnement en biomasse issues de cultures lignocellulosiques. Elle aborde également la question de l'usage des terres, centrale pour la durabilité, et l'intérêt du recours à des terres marginales.

• Approche et mise en oeuvre

- Modélisation et optimisation de la chaîne logistique
- Tests et démonstration des différentes composantes : densification (briquettes, granulés, balles, traitements thermiques), stockage, transport
- Comparaison et benchmark d'espèces lignocellulosiques et d'associations avec des légumineuses
- Evaluation de la durabilité dans ses différentes composantes (analyses en cycle de vie, impact social, viabilité économique) pour deux études de cas de filières existantes (France et Espagne).

• Résultats publiés et perspectives de valorisation

Le projet Logist'EC a produit environ 80 documents sous forme de livrables, fiches de synthèse, bases de données (sur le rendement des cultures énergétiques ou les caractéristiques techniques des maillons de la chaîne logistique) et une vingtaine d'articles scientifiques dans des revues à comité de lecture. Ils sont disponibles sur le site du projet.

La valorisation finale pourrait concerner (i) un modèle mathématique d'optimisation de la logistique (incluant l'effet d'aléas sur la demande en produits finis), (ii) des équipements améliorés (têtes de récolte) ou (iii) des bases de données pour l'évaluation de la durabilité des chaînes d'approvisionnement, incluant la partie production de biomasse.

Site web : www.logistecproject.eu

Ecoconception et durabilité des filières bioénergies

Ludovic MONTRASTRUC, LGC (INPT, CNRS, Université de Toulouse III - Toulouse)

ludovic.montrastruc@ensiacet.fr

• Objectif

Proposer un outil pour la gestion d'une filière bio énergie en utilisant une approche systémique.

• Contexte

Pour développer une filière bio énergie durable, il est impératif d'utiliser les ressources de façon optimale. Dans le contexte d'une agriculture soutenable, la biomasse doit être disponible localement, produite dans des conditions économiques acceptables et avoir un impact sur l'environnement neutre ou positif. Il est primordial dans ce contexte de "déconstruire" le traitement de la biomasse tel que pensé actuellement en ayant une approche systémique allant du territoire au produit.

• Approche et mise en oeuvre

Le développement des bioraffineries reste freiné par de nombreux obstacles tels que les variabilités d'approvisionnement et de demande. L'apport d'agilité aux bioraffineries permet de répondre à cette problématique en proposant la déduction et la mise en œuvre de procédés de traitement décentralisés et collaboratifs, adaptés au contexte local d'approvisionnement et de demande. Cette vision, à l'échelle du procédé et du réseau, favorise également la réutilisation d'équipements existants tout en soutenant la dynamique du territoire concerné et de son écosystème.

• Résultats publiés et perspectives de valorisation

- C. Miret, P. Chazara, L. Montastruc, S. Negny, S. Domenech, 2016. **Design of bioethanol green supply chain: Comparison between first and second generation biomass concerning economic, environmental and social criteria.** Computers & Chemical Engineering, 85, 16-35
- S Belletante, L Montastruc, S Negny, S Domenech, 2016. **Optimal design of an efficient, profitable and sustainable biorefinery producing acetone, butanol and ethanol: influence of the in-situ separation on the purification structure,** Biochemical Engineering Journal, 116, 195-209
- G. Valenzuela Venegas, F. Henriquez- Henriquez, M. Boix, L. Montastruc, F. Arenas-Araya, J. Miranda Perez, F.A. Diaz-Alvarado, 2018. **A Resilience indicator for Eco Industrial Parks.** Journal of Cleaner Production, 174, 807-820
- M. Hougbe, A. Barthe-Delanoë, S. Négy, 2018. **Towards Virtual Biorefineries.** In Working Conference on Virtual Enterprises, 571-580, Springer, Cham
- M. Hougbe, A.M. Barthe-Delanoë, S. Négy, 2018. **Apport d'agilité aux bioraffineries : vers une démarche collaborative et une servicisation des procédés.** In MOSIM 2018 Conference Proceedings

Session 3 : Procédés innovants de production

L'innovation est un processus constant qui permet soit d'améliorer des produits ou des procédés existants soit de créer de nouvelles technologies. Ces deux types d'innovation sont nécessaires et permettent l'émergence de nouvelles filières et leur développement. L'utilisation énergétique de la biomasse sont à des niveaux de maturités technologiques différents, mais il est important de continuer la recherche afin de leur permettre d'arriver à une rentabilité économique tout en ayant un impact environnemental faible.

L'innovation incrémentale vise à améliorer des technologies existantes et l'innovation de rupture aboutit au remplacement de la solution dominante sur un marché. Ces deux types d'innovation ne sont pas antagonistes et peuvent se compléter surtout si le développement de nouveaux procédés nécessite plusieurs dizaines d'années avant d'être industrialisable. Cette session présente des innovations de ruptures tandis que la session 5 : accompagner l'innovation pour les filières existantes de bioénergie sera axée sur les innovations incrémentales.

L'innovation peut porter sur l'exploitation de certains microorganismes capables de produire naturellement des molécules d'intérêt. Parmi la multitude de microorganismes, les microalgues présentent de nombreux intérêts car elles peuvent être utilisées dans de nombreux domaines dont les bioénergies et fixent le CO₂ via la photosynthèse. Bien qu'elle soient déjà utilisées pour fournir des produits à haute valeur ajoutée, il est nécessaire de proposer de nouveaux procédés de culture en vue d'une utilisation sur des marchés plus larges. Le processus d'innovation porte sur la capacité de cultiver ces microorganismes à très grande échelle, à de faibles coûts ainsi que sur la sélection et l'optimisation des souches d'intérêt. L'autre enjeu concerne les équipements de fermentation permettant la culture de ces souches dans des conditions optimisées en termes de rendement et de coût.

L'innovation peut également porter sur la valorisation de co-produits qui ont des propriétés non encore exploitées. La recherche porte sur leurs caractérisations et leur potentiel économique ainsi que sur la structuration de la filière qui en découle. Cette voie d'innovation est en adéquation avec le concept de bioraffinerie et la volonté de valoriser au maximum la biomasse. La création de nouvelles filières peut aboutir à des changements d'usages globaux et à développer de nouveaux appareils, métiers et modes de consommation.



- **Ingénierie des microalgues oléagineuses pour la chimie verte et les biocarburants** - Eric Maréchal, LPCV (CEA, CNRS, Université de Grenoble Alpes, INRA)
- **Transformations biologiques complémentaires à la filière de méthanisation pour la production de biohydrogène : fermentation et électrolyse microbienne** - Eric Trably & Nicolas Bernet, LBE (INRA)
- **Méthanation biologique : nouvelle brique technologique dans des filières de production de gaz renouvelable** - Claire Dumas, LISBP (INRA, INSA Toulouse) ; Renaud Escudié, LBE (INRA)
- **Utilisation de poudres lignocellulosiques en moteur à combustion interne** - Gilles Vaitilingom, BioWooEB (CIRAD)



Ingénierie des microalgues oléagineuses pour la chimie verte et les biocarburants

Eric MARECHAL, LPCV (CEA, CNRS, Université de Grenoble Alpes, INRA - Grenoble)

eric.marechal@cea.fr

• Objectif

Mise en place d'une plateforme de recherche pour l'optimisation de microalgues pour la chimie verte et les biocarburants par ingénierie génétique.

• Contexte

L'exploitation des microalgues, capturant le CO₂ atmosphérique par la photosynthèse, pour la production de biomolécules pour les marchés de commodité, nécessite la levée de plusieurs verrous. Ceux-ci incluent la production de biomasse algale et la productivité en biomolécules.

• Approche et mise en oeuvre

Pour mener à bien ce projet, nous avons procédé en 6 étapes :

- Sélection de microalgues issues de la biodiversité
- Domestication des microalgues
- Identification de cibles génétiques
- Ingénierie génétique
- Qualité de la biomasse (profils lipidomiques compatibles avec les applications)

• Résultats publiés et perspectives de valorisation

Les résultats du laboratoire portent tout d'abord sur les conditions de culture permettant la maîtrise de la teneur en certains lipides par des variations du milieu de culture ou des traitements chimiques. Plusieurs études de microalgues modifiées par des méthodes d'ingénierie génétique ont aussi été publiées.

Transformations biologiques complémentaires à la filière de méthanisation pour la production de biohydrogène : fermentation et électrolyse microbienne

*Nicolas BERNET & Eric TRABLY, LBE (INRA - Narbonne)
nicolas.bernet@inra.fr ; eric.trably@inra.fr*

• Objectif

L'objectif est de présenter une synthèse des travaux du LBE sur la production d'hydrogène par fermentation et électrolyse microbienne en lien avec la méthanisation.

• Contexte

La méthanisation connaît actuellement un fort développement industriel dans le secteur des énergies renouvelables.

De nombreux produits intermédiaires sont observés lors de la méthanisation, dont l'hydrogène qui possède une plus forte valeur ajoutée que le biogaz. Certaines méthodes permettent d'orienter la production de gaz vers cette molécule.

• Approche et mise en oeuvre

Les travaux menés au LBE portent sur la production d'hydrogène par fermentation et le couplage avec d'autres procédés. En effet, la production d'hydrogène par fermentation est associée à celle de coproduits métaboliques qu'il est possible de valoriser sous la forme de méthane par méthanisation ou d'hydrogène par un procédé bio-électrochimique : l'électrolyse microbienne. Des expérimentations ont été menées de l'échelle laboratoire à l'échelle pilote.

• Résultats publiés et perspectives de valorisation

- Bernet N & E Trably, 2017. **New generation conversion technologies: combining fermentation and bio-electrochemistry for the production of hydrogen and platform molecules.** 1st International ABWET Conference : Waste-to-bioenergy, Applications in Urban areas. January 19th – 20th. Paris, France

Méthanation biologique : nouvelle brique technologique dans des filières de production de gaz renouvelable

Claire DUMAS, LISBP (INRA, INSA Toulouse - Toulouse) ; Renaud ESCUDIE, LBE (INRA - Narbonne)
claire.dumas@inra.fr ; renaud.escudie@inra.fr

• Objectif

La méthanation est la conversion de l'hydrogène (H_2), du monoxyde de carbone (CO) et du dioxyde de carbone (CO_2) en méthane (CH_4). Au cours des dernières années, la méthanation biologique a été proposée comme une technologie plus respectueuse de l'environnement pour la production de biométhane comparée à la thermochimie catalytique utilisée historiquement.

• Contexte

Le gaz de synthèse produit par gazéification peut être purifié grâce à un procédé de biométhanation afin d'augmenter sa teneur en méthane. Par ailleurs, dans le cadre du concept de Power-to-Gaz, un procédé de biométhanation peut également être envisagé en utilisant le biogaz, riche en CH_4 et CO_2 , pour stocker l'énergie électrique en surplus. La méthanation par voie biologique présente des avantages environnementaux et économiques par rapport à la méthanation par voie thermochimique/catalytique dans le traitement et/ou l'épuration du syngaz.

• Approche et mise en oeuvre

Plusieurs verrous à la fois scientifiques et technologiques doivent être levés afin d'améliorer la compréhension des mécanismes physiques et biologiques mis en oeuvre, mais également de proposer des voies d'optimisation des procédés de biométhanation. Une démarche expérimentale est en particulier en cours pour :

- la sélection et le contrôle du consortium de microorganismes anaérobies
- l'optimisation des taux de transfert de gaz vers le liquide (siège des réactions biologiques)
- l'analyse des inhibitions potentielles de certains composés gazeux (H_2 et CO) et des goudrons contenus dans le syngaz.

• Résultats publiés et perspectives de valorisation

Le LBE de l'INRA à Narbonne a engagé deux doctorats sur l'optimisation de la biométhanation *in-situ* par des leviers abiotiques et biotiques. Le LISBP à travers 3 programmes de recherche (HYCABIOME, BIOSYP, HYDROMET) a développé et optimisé un procédé *ex-situ* de méthanation du biogaz et travaille sur l'impact sur les microorganismes de certains composés mineurs contenus dans le syngaz.

Utilisation de poudres lignocellulosiques en moteur à combustion interne

*Gilles VAITILINGOM, BioWooEB (CIRAD - Montpellier)
gilles.vaitilingom@cirad.fr*

• Objectif

Valoriser directement en moteur thermique le comportement explosif des poudres de biomasse finement broyée.

• Contexte

Le développement d'alternatives aux carburants pétroliers est une nécessité stratégique pour accompagner la transition énergétique. Mais les biocarburants liquides et gazeux sont complexes et coûteux à produire.

• Approche et mise en oeuvre

Les carburants issus de la biomasse sont généralement considérés comme l'approche la plus pertinente en raison de la disponibilité de la ressource, de son caractère renouvelable et de son faible impact environnemental. Les chercheurs de l'INRA et du CIRAD ont mis au point une technologie capable de faire fonctionner un moteur avec des poudres de biomasses d'origines variées (résidus agricoles, forestiers, papier/carton).

• Résultats publiés et perspectives de valorisation

Un groupe industriel, qui développe les énergies renouvelables sur le territoire français et produit de l'électricité éolienne et solaire, s'intéresse à cette solution. Sa filiale étudie des carburants poudreux pour moteurs et brûleurs et souhaite développer un groupe électrogène à poudre de biomasse.

Publications :

- B. Piriou., G. Vaitilingom, B. Veyssières, B. Cuq., X. Rouau, 2013. **Potential direct use of solid biomass in internal combustion engines.** Progress in Energy and Combustion Science, 39, 169-188.
- Stover L., Piriou B., Vaitilingom G., Rouau X., 2018. **The Biomass Dust-Fueled Engine.** Proceedings of the 26th European Biomass Conference (EUCBE). Florence : ETA, 618-621.

Session 4 : Procédés innovants de production

La bioraffinerie est définie par l'Agence Internationale de l'Energie comme un processus durable de traitement de la biomasse en un éventail de produits biosourcés (produits chimiques, matériaux, alimentation humaine et animale...) et de bioénergies (combustibles, électricité, chaleur...). Plus largement le concept de bioraffinerie s'inscrit dans le vaste domaine de la bioéconomie circulaire qui vise à développer un modèle économique basé sur la valorisation des biomasses et à générer le moins de déchets non compostables ou non recyclables possible¹.

Bien que le concept de bioraffinerie soit général, il est possible d'en distinguer plusieurs types en fonction des matières premières traitées, des procédés mis en œuvre ou des produits finaux. De par leur rôle de transformation de la biomasse en molécules d'intérêts, les bioraffineries jouent un rôle central dans le cadre de la transition écologique.

Intégrer le concept de bioraffinerie dans les filières bioénergies permet de tendre vers une filière zéro déchet et de chercher des débouchés pour les co-produits générés par ces filières. La possibilité pour les bioénergies d'être multi-entrant comme il a été vu dans les sessions précédentes permet de sécuriser l'approvisionnement tandis que leur capacité à générer des co-produits valorisables avec une forte valeur ajoutée permet d'assurer la viabilité économique globale.

Dans cette démarche, l'innovation incrémentale est déclinée à plusieurs niveaux. Tout d'abord pour accroître au maximum le rendement global pour le produit principal, afin d'en baisser le coût unitaire. Ensuite, une fois que le procédé principal est optimisé et stabilisé et que les co-produits sont identifiés (en quantité et qualité), il est possible d'imaginer et d'optimiser de leur valorisation. Dans certains cas cette diversification des débouchés peut conduire à réinterroger le procédé principal, ce qui est une nouvelle source d'innovation incrémentale.

1. Carus et Dammer, 2018. The "Circular Bioeconomy" - COnccepts, Opportunities and Limitation, Hürth 2018-01



- **Production de molécules chimiques d'intérêt à partir des résidus condensables de la torréfaction de biomasse** - Jean-Michel Commandré, BioWooEB (CIRAD) ; Jean-Stéphane Condoret, LGC (INPT, CNRS, Université de Toulouse III)
- **Multi-valorisation éco-efficiente des sous-produits de l'industrie agro-alimentaire : Intégration de l'extraction de biomolécules à la production de bioénergie** - Diana Garcia-Bernet, LBE (INRA) ; Craig Faulds, BBF (INRA, AMU)
- **Production de biocarburants de 2^{ème} génération à partir d'acides gras volatils** - Elise Blanchet, CRITT Bio-Industries (INSA Toulouse)



TORGENOL : Production de molécules chimiques d'intérêt à partir des résidus condensables de la torréfaction de biomasse

*Jean-Michel COMMANDRE, BioWooEB (CIRAD - Montpellier)
Jean-Stéphane CONDORET, LGC (INPT, CNRS, Université de
Toulouse III - Toulouse)*

jean-michel.commandre@cirad.fr ; jean-stephane.condoret@ensiacet.fr

• Objectif

Valider expérimentalement un procédé de récupération-séparation de l'effluent gazeux issu de la torréfaction de biomasse.

• Contexte

En plus d'un solide à un usage de combustible, la torréfaction de biomasse produit des gaz, condensables et incondensables. Ces gaz sont généralement considérés comme des effluents à traiter pour apporter l'énergie nécessaire au procédé. Toutefois, la quantité d'énergie disponible dépasse généralement les besoins. Proposer une nouvelle valorisation « matière » de la partie condensable de ces gaz est donc une option pour contribuer à la viabilité économique des procédés de torréfaction.

• Approche et mise en oeuvre

Le procédé de récupération et de séparation des espèces condensables est basé sur une cascade d'étages de condensation (condensation fractionnée). Les conditions opératoires ont été établies sur la base d'une modélisation thermodynamique de la condensation du mélange complexe des gaz de torréfaction. Le réacteur de torréfaction échelle pilote, disponible au CIRAD (réacteur continu, jusqu'à 10 kg/h), a été modifié pour permettre la mise en œuvre expérimentale de la condensation fractionnée pour valider la configuration optimale de la cascade initialement modélisée.

• Résultats publiés et perspectives de valorisation

Les résultats ont montré qu'il est possible d'isoler, des polysaccharides et des gäiacols, dans le premier étage de la cascade. Ces molécules présentent de nombreuses applications dans les domaines pharmaceutiques ou alimentaires. La séparation de ces composés, dont l'étude en cours, devrait être relativement aisée étant données les différences de propriétés thermodynamique.

Les résultats obtenus feront l'objet d'une étude de brevetabilité et une application originale des molécules obtenues est en cours de validation

VALEORIS : Multi-valorisation éco-efficiente des sous-produits de l'industrie agro-alimentaire : Intégration de l'extraction de biomolécules à la production de bioénergie

Diana GARCIA-BERNET, LBE (INRA - Narbonne) ; Craig FAULDS, BBF (INRA, AMU - Marseille)

diana.garcia@inra.fr ; craig.faulds@univ.amu.fr

• Objectif

Validation d'un schéma de valorisation éco-efficient matière + énergie de coproduits des IAA, basé sur le couplage d'un prétraitement physico-chimique utilisant peu de réactifs chimiques et d'une hydrolyse enzymatique performante.

• Contexte

En France, la production de déchets et coproduits des IAA est estimée à 3,4M de tonnes, dont 37% d'origine végétale¹. Ces résidus ont un important impact environnemental en cas de non-traitement (odeurs, dégradation de l'environnement, problèmes sanitaires), mais possèdent un fort potentiel de valorisation pour répondre à la demande du marché en produits biosourcés.

• Approche et mise en oeuvre

Couplage d'un prétraitement physico-chimique de déconstruction mettant en œuvre peu de réactifs chimiques, les micro-ondes, et un traitement enzymatique performant. Ce traitement enzymatique est effectué avec des cocktails spécifiques développés par BBF, pour obtenir un maximum d'acides phénoliques à partir de 2 coproduits des IAA (sons de blé et pailles de maïs), tout en augmentant le potentiel de valorisation des résidus par méthanisation.

• Résultats publiés et perspectives de valorisation

Après caractérisation approfondie des deux biomasses étudiées, les premiers tests de traitement aux micro-ondes ont permis de déterminer les conditions optimales de prétraitement. Le pilote a été modifié pour découpler l'effet thermique de l'effet micro-ondes et travailler sous-pression. 7 gènes codant pour des féruloyl estérases de type A & C ont été synthétisés et insérés dans le génome de *P. pastoris*. Ces enzymes, une fois exprimées de façon hétérologue, seront caractérisées et testées. Après validation de la preuve de concept, ce schéma de valorisation intégré pourra être appliqué à d'autres biomasses afin de développer de nouvelles filières industrielles durables et viables.

1. MAAF (2016)

BIOTHINK : Production de biocarburants de 2^{ème} génération à partir d'acides gras volatils

Elise BLANCHET, CRITT Bio-Industries (INSA Toulouse - Toulouse)
elise.blanchet@insa-toulouse.fr

• Objectif

L'objectif est le développement d'un procédé de bioraffinerie basée sur les acides gras volatils (AGVs), issus de biodéchets et de toutes les matières premières servant à produire du biogaz (sous-produits des IAA, CIVE, effluents d'élevage,...), et leur transformation en biocarburants.

• Contexte

L'objectif d'incorporation de biocarburant 2G de la loi sur la transition énergétique est de 3,4% pour l'essence et de 2.3% pour le gazole, soit un total de 1 Mtep. Des études de marché ont confirmé l'intérêt des collectivités locales et des acheteurs de carburant pour produire (notamment à partir de biodéchets) et consommer de nouveaux biocarburants 2G.

• Approche et mise en oeuvre

Biothink est une jeune entreprise de recherche et développement qui s'attache pour le moment à lever les verrous techniques liés (i) à la production d'AGVs par fermentation (ii) à leur élongation, et (iii) à la transformation de ces AGVs en alcanes (procédé électrochimique) ou en esters (catalyse enzymatique).

Les essais relatifs aux biotechnologies (fermentation et estérification enzymatique) sont menés au CRITT Bio-Industries de Toulouse.

• Résultats publiés et perspectives de valorisation

Le programme de R&D soutenu par BPI et par la Région Occitanie (de mi 2016 à fin 2018) a permis de poser les bases techniques du procédé Biothink, avec encore des marges d'amélioration. Des discussions sont en cours avec une société industrielle et un fonds d'investissement pour poursuivre la R&D et pour l'implantation d'un pilote de quelques kilos de biocarburants/jour sur un site à définir.

Un financement à hauteur de quelques millions d'euros sera nécessaire pour structurer la société et monter un démonstrateur.

Session 5 : Accompagner l'innovation pour les filières existantes de bioénergies

Les bioénergies sont à des stades de développement inégaux, certaines sont déjà à des échelles industrielles tandis que d'autres sont au stade laboratoire. Cependant le développement de ces filières est relativement jeune et il existe de nombreuses voies d'amélioration à explorer. Il est donc important de soutenir l'innovation pour ces filières afin de leur permettre de tendre vers un rendement optimal tout en maîtrisant les coûts.

La filière biocarburant en est une bonne illustration en devenir : la mise sur le marché des biocarburants de première génération a conforté l'intérêt des industriels et permis les investissements nécessaires à l'émergence des biocarburants de deuxième génération faisant appel à d'autres sources de biomasse plus pertinentes qui sont d'ores et déjà au stade pilote. Les travaux actuellement en cours sur les biocarburants de troisièmes générations devraient aboutir à une production de nouvelles molécules à partir de microorganismes adaptés dans des procédés conçus pour lever les verrous comme celui de l'inhibition par les molécules produites ou celui de la récolte pour les micro-algues.

La filière biogaz retrouve une nouvelle jeunesse grâce à une demande des consommateurs favorisant les énergies renouvelables et la possibilité d'injection dans le réseau. C'est pourquoi les professionnels de la filière s'organisent pour répondre aux différentes composantes de ce défi quantitatif.

Bien que le cœur de métier de 3BCAR soit les transformations basées sur des systèmes biologique, quelques équipes maîtrissent les traitements thermochimiques, ce qui permet d'envisager avec sérénité ces nouveaux schémas de procédé couplant gazéification et traitements biologiques.



- **CTBM : un centre technique pour concrétiser le potentiel en développement de la filière biogaz** - Alice L'Hostis, CTBM
- **Des outils pour accompagner l'innovation en thermochimie** - Jean-Michel Commandré, BioWooEB (CIRAD) ; Jean-Stéphane Condoret, LGC (INPT, CNRS, Université de Toulouse III)
- **Développement d'un procédé intégré continu de fermentation/extraction *in situ* pour la production anaérobie de n-butanol à hauts titre, rendement et productivité** - Isabelle Meynial-Salles, LISBP (INRA, INSA Toulouse) ; Marwen Moussa, GMPA (INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay)



Le CTBM : un centre technique pour concrétiser le potentiel en développement de la filière biogaz

Alice L'Hostis, CTBM (Arcueil)
a.l'hostis@atee.fr

• Objectif

Créer un réseau regroupant les principaux acteurs (économiques, R&D, pouvoirs publics et société civile) de la filière bio-méthane en France, afin de contribuer à la consolidation de cette filière émergente, qui présente de fortes perspectives de croissance à l'échelle du territoire national.

• Contexte

Avec un gisement mobilisable en 2030 de l'ordre de 90TWh d'énergie primaire, la méthanisation a un rôle essentiel à jouer dans l'atteinte des objectifs de développement des énergies renouvelables de la France. La filière compte déjà plus de 600 installations et ce parc devrait tripler pour être en phase avec les ambitions nationales. Pour y parvenir, elle doit trouver des solutions pour lever certains verrous technologiques majeurs.

• Approche et mise en oeuvre

Créé à l'initiative de l'INRA et des acteurs majeurs de la recherche française, le CTBM a reçu le soutien du club Biogaz de l'association technique énergie environnement (ATEE). Il a pour vocation :

- D'animer et coordonner un réseau regroupant les acteurs de la filière
- De répondre aux enjeux technologiques liés notamment à des spécificités nationales, comme la gestion des matières premières de type "fibreuse" (fumiers, résidus de culture) ou résiduaire
- De conforter les financeurs en identifiant des solutions technologiques fiables et rentables
- De construire et conduire une feuille de route industrielle en lien avec les pouvoirs publics
- De contribuer à la professionnalisation de la filière biogaz.

LE CTBM a aussi pour mission de synthétiser et diffuser les connaissances auprès de la filière professionnelle, de fédérer l'expertise scientifique en réalisant des études sur des sujets fédérateurs.

Des outils pour accompagner l'innovation en thermochimie

Jean-Michel COMMANDRE, BioWooEB (CIRAD - Montpellier)

Jean-Stéphane CONDORET, LGC (INPT, CNRS, Université de Toulouse III - Toulouse)

jean-michel.commandre@cirad.fr ; jean-stephane.condoret@ensiacet.fr

• Objectif

Proposer des outils pilotes permettant de démontrer la faisabilité de procédés innovants en thermochimie.

• Approche et mise en œuvre

Le Cirad (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement), développe dans son unité Biomasse Bois Energie Bioproduits (BioWooEB) des activités de recherche, formation et expertise sur les procédés de conversion thermochimique de la biomasse ligno-cellulosique. Il participe au développement de technologies novatrices non polluantes et performantes aptes à répondre aux besoins énergétiques et aux enjeux environnementaux des pays du Nord et du Sud. Il dispose de plusieurs installations opérationnelles de torréfaction, pyrolyse lente, pyrolyse flash, gazéification de petites puissances (<100 kWth, env. 20 kW électrique) et combustion dans des moteurs, développées dans le cadre de partenariats européens, et possède une expérience et un savoir-faire internationalement reconnu dans les domaines de l'analyse et la caractérisation physico-chimique de biocombustibles solides et liquides. Il mène également des activités de recherche sur l'évaluation des impacts environnementaux liés à la valorisation énergétique de ces biomasses.

Le LGC développe des technologies innovantes pour la conception de réacteurs chimiques et d'opération de séparation. En particulier il dispose des compétences scientifiques pour concevoir et mettre en œuvre des procédés multi-étapes de séparations d'effluents gazeux ou liquides (bio-huile) issus de la conversion chimique de la biomasse. On peut citer des installations pilote (de l'ordre de la dizaine de kg/h) en distillation, extraction par solvant, extraction au CO₂ supercritique...

• Résultats publiés et perspectives de valorisation

De nombreux articles scientifiques ont été publiés par les équipes des deux laboratoires dans ce domaine, les principaux sont référencés sur leurs sites web.

Sites Web : <https://ur-biwooeb.cirad.fr> ; <https://lgc.cnrs.fr>

Développement d'un procédé intégré continu de fermentation/extraction *in-situ* pour la production anaérobie de n-butanol à hauts titre, rendement et productivité

Isabelle MEYNIAL-SALLES, LISBP (INRA, INSA Toulouse - Toulouse)
Marwen MOUSSA, GMPA (INRA, AgroParisTech, Université de Paris Saclay - Grignon)
meynial@insa-toulouse.fr ; marwen.moussa@agroparistech.fr

• Objectif

Développement d'un procédé intégré continu de fermentation/extraction *in situ* pour la production anaérobie de n-butanol à hauts titre, rendement et productivité

• Contexte

Le n-butanol est une molécule d'intérêt de par son usage possible pour de nombreuses applications : biocarburant, formulation, chimie de spécialité. Son coût de production actuel reste cependant élevé. Une souche d'*E. coli* produisant du n-butanol comme produit principal de fermentation de sucre avec un rendement de conversion de 0.28 g/g, soit 73% du rendement théorique maximal, a été développée au LISBP.

• Approche et mise en oeuvre

La mise en oeuvre du projet se fait autour de 4 axes :

- La sélection de mutants d'*E. coli* capables de tolérer de plus fortes concentrations en n-butanol
- La conception d'un bioréacteur à membrane pour la fermentation anaérobie d'*E. coli* productrice de n-butanol à hauts rendement et productivité
- L'évaluation d'une sélection de membranes de pervaporation organosélectives pour l'extraction du n-butanol du milieu de fermentation
- Le couplage fermentation continue/extraction pour développer un procédé intégré

• Résultats publiés et perspectives de valorisation

- P. Soucaille , I. Meynial-Salles , C. Foulquier, A. Rivière , 2015. **New polypeptide having ferredoxin NADP+ reductase activity polynucleotide encoding the same and uses thereof.** European Patent application EP15306225.
- M. Moussa, C. Auguste-Dormeuil, L. Galindo Alvarez, M. Pinault, V. Athès-Dutour, I. Meynial-Salles, 2017. **Développement d'un procédé intégré de fermentation anaérobie couplée à la pervaporation pour la production de N-Butanol.** 16^{ème} Congrès de la Société Française de Génie des Procédés, Jul 2017, Nancy, France
- M. Moussa, L. Galindo Alvarez, M. Pinault, I. Meynial-Salles, V. Athes-Dutour, 2017. **Pervaporative fermentation for continuous anaerobic production of n-butanol with high titer, yield and productivity.** 5th International Scientific Conference on Pervaporation, Vapor Permeation, and Membrane Distillation, Torun, Poland
- M. Moussa, P. Berthier, I. Meynial-Salles, V. Athès-Dutour, 2018. **Study of pervaporation membranes on model media and fermentation broth, towards an extractive fermentation process for continuous production of bio-butanol.** Euromembrane 2018. Valencia

Partenaires et Sponsors

Pour vous accompagner dans vos projets innovants



Capenergies®



50



Novachim

Le CRITT Chimie & Matériaux



Bpifrance, est une filiale de la Caisse des Dépôts et de l'Etat, partenaire de confiance des entrepreneurs, qui accompagne les entreprises (PME, ETI et entités de taille plus importante à dimension stratégique pour l'économie française) de l'amorçage jusqu'à la cotation en bourse, en crédit, en garantie et en fonds propres. Bpifrance assure, en outre, des services d'accompagnement et de soutien renforcé à l'innovation, à la croissance externe et à l'export, en partenariat avec Business France et Bpifrance As-surance Export.

Fort de 42 implantations régionales, Bpifrance représente un interlocuteur unique et de proximité des entrepreneurs dans chaque région pour tous les besoins en finance-ment et en investissement. Un seul objectif servir l'avenir avec ses quatre valeurs proximité, simplicité, volonté et optimisme. Le point plus précis de l'accompagne-ment de l'innovation pour la création de produits, procédés ou services se décline notamment dans les outils suivants :

La création d'entreprise technologique avec le concours I-LAB organisé avec le minis-tère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation dont la 20^{ème} édition est lancée avec une clôture le 20 février 2018. Il comprend deux phases :

- La phase émergence pour un projet qui n'est pas mûr pour une création immédiate, qui doit établir la « preuve du concept » et constituer une équipe avec un approfondissement des plans technique, économique et juridique. C'est une subvention d'un maximum 45 000 € au taux de 70 % de l'assiette des dépenses éligibles,
- La phase création-développement pour un projet dont «la preuve du concept» est établie et qui peut donner lieu à une création d'entreprise à court terme. C'est une subvention d'un montant maximal de 450 000 €, finançant jusqu'à 60% de l'assiette des dépenses retenues.

L'aide à l'innovation pour un projet mono partenaire en accompagnement de l'innovation pour la création de produits, procédés ou services innovants. Elle se décline en deux phases :

- L'Aide pour la Faisabilité de l'Innovation (AFI) a pour objectif de soutenir l'émergence et la maturation de projets d'innovation en finançant les études amont destinées à renforcer un projet. C'est une subvention d'un montant maximal de 50 000 € au taux d'aide maximum de PE < 1an: 70 % et PME 50 %,
- L'Aide pour le Développement de l'Innovation (ADI) permet d'aider financièrement une entreprise française jusqu'à 2 000 personnes pour concevoir et développer une innovation, avant son lancement industriel et commercial. Elle peut prendre la forme d'avances récupérables 50 000 € et 3 000 000 € au taux d'aide maximum de PME : 50 % et ETI jusqu'à 2 000 personnes : 40 % de l'assiette des dépenses retenues ou aussi prendre la forme d'un prêt à taux zéro.

Le projet collaboratif Fonds unique interministériel (FUI), il a pour objet le développe-ment de produits ou services à fort contenu innovant, conduisant à une mise sur le marché dans un délai de cinq ans, dont les travaux de R&D sont

réalisés majoritairement sur le territoire du pôle et garantissent des retombées économiques pour le territoire national. C'est un projet collaboratif qui doit être labellisé par au moins un pôle de compétitivité. Il rassemble au moins deux entreprises indépendantes et un organisme de recherche public ou de formation. Les coûts présentés sont entre 2 000 000 € et 5 000 000 €. L'aide prend la forme d'une subvention et met en œuvre des financements nationaux et une participation obligatoire des collectivités territoriales. Les taux sont dépendants de la nature et de la zone géographique des partenaires. Le 25^{ème} appel à projet FUI est lancé avec clôture au 01 février 2018.

Les Projets de recherche et développement Structurants pour la Compétitivité (PSPC), c'est un programme d'investissements d'avenir. Il est ouvert au fil de l'eau aux entreprises de toutes tailles et de tous secteurs économiques. Il est obligatoirement collaboratif et accompagne des projets de recherche et développement destinés à structurer les filières industrielles existantes en relation avec la recherche publique et à faire émerger de nouvelles filières. Les coûts présentés sont entre 5 000 000 € et 50 000 000 €. L'aide prend la forme d'un mix subventions et avances récupérables avec bonus et des taux d'aide fonction de la taille et de la forme juridique des partenaires. Le 7^{ème} appel à projet va sortir fin janvier 2018 avec une clôture au 15 janvier 2019.

Les Concours innovation sont un programme d'investissements d'avenir, ils visent à accompagner l'innovation mono-partenaire portée par une PME dans le cadre de thématiques identifiées et se déclinent en :

- un volet national opéré par Bpifrance sur 4 thématiques : numérique, sécurité, santé et cyber sécurité/French Fab et opéré par l'ADEME sur 4 thématiques : transport et mobilité durable, agriculture innovante, écosystèmes terrestres, aquatiques et marins, énergies renouvelables, stockage et systèmes. Il y aura deux appels par an avec à chaque fois des thématiques différentes pour les deux opérateurs. Les coûts présentés sont entre 600 000 € et 5 000 000 € aidés aux taux de 45 % pour les petites entreprises et de 35 % pour les moyennes entreprises sous forme de 2/3 de subventions et 1/3 d'avances récupérables avec bonus, clôture au 13 mars 2018,
- un volet régional ouvert sur un an et articulé avec les points forts des régions. Il est opéré par Bpifrance et doté à parité par des financements de l'Etat (investissements d'avenir) et des collectivités territoriales. Les coûts présentés sont entre 200 000 € à plus de 1 000 000 €, accompagnés sous forme de subventions ou d'avances récupérables avec des aides comprises entre 100 000 et 500 000 €, clôture selon les régions et la date de lancement.

L'accompagnement et la transformation des filières est un programme d'investissements d'avenir, il vise à renforcer la compétitivité des filières stratégiques. Les projets soutenus devront démontrer un apport concret et déterminant à une filière industrielle et à sa structuration, en bénéficiant notamment à plusieurs petites et moyennes entreprises (PME) ou entreprises de taille intermédiaire indépendantes (ETI) issues de cette filière. L'objectif de ce projet est de renforcer la

compétitivité des filières stratégiques en permettant le recours à des moyens de production ou des infrastructures de recherche partagés, l'échange de données et d'informations, le partage des visions technologiques et de marché ainsi que l'initiation de démarches commerciales partagées. Il se décline en :

- un volet national opéré par Bpifrance sur 4 thématiques : numérique, sécurité, santé et cyber sécurité/French Fab et opéré par l'ADEME sur 4 thématiques : transport et mobilité durable, agriculture innovante, écosystèmes terrestres, aquatiques et marins, énergies renouvelables, stockage et systèmes. Il y aura deux appels par an avec à chaque fois des thématiques différentes pour les deux opérateurs. Les coûts présentés sont entre 600 000 € et 5 000 000 € aidés aux taux de 45 % pour les petites entreprises et de 35 % pour les moyennes entreprises sous forme de 2/3 de subventions et 1/3 d'avances récupérables avec bonus, clôture au 14 mai 2019,
- un volet régional ouvert sur un an et articulé avec les points forts des régions. Il est opéré par Bpifrance et doté à parité par des financements de l'Etat (investissements d'avenir) et des collectivités territoriales. Les coûts présentés sont entre 200 000 € à plus de 1 000 000 €, accompagnés sous forme de subventions ou d'avances récupérables avec des aides comprises entre 100 000 et 500 000 €, clôture selon les régions et la date de lancement.

L'accompagnement et la transformation des filières est un programme d'investissements d'avenir, il vise à renforcer la compétitivité des filières stratégiques. Les projets soutenus devront démontrer un apport concret et déterminant à une filière indus-trielle et à sa structuration, en bénéficiant notamment à plusieurs petites et moyennes entreprises (PME) ou entreprises de taille intermédiaire indépendantes (ETI) issues de cette filière L'objectif de ce projet est de renforcer la compétitivité des filières stratégiques en permettant le recours à des moyens de production ou des infrastructures de recherche partagés, l'échange de données et d'informations, le partage des visions technologiques et de marché ainsi que l'initiation de démarches commerciales partagées. Il se décline en :

- Un volet national qui s'adresse aux projets à vocation nationale ou multirégionale, présentant une assiette de dépenses supérieure à 3 millions d'euros ; ou à vocation régionale, sollicitant une aide publique supérieure à 2 millions d'euros sous forme d'un mix subventions et avances récupérables avec bonus, clôture au 13 juin 2018,
- Un volet régional opéré par Bpifrance doté à parité par financements de l'Etat (investissements d'avenir) et des collectivités territoriales pour des filières d'avenir limitées aux projets dont l'assiette est supérieure à 1 000 000 € et pour lesquels le montant d'aides sollicité est inférieur à 2 000 000 €. Le montant de l'aide attribuée aux porteurs de projet s'élèvera entre 500 000 € et 2 000 000 € sous forme d'un mix subventions et avances récupérables, clôture selon les régions et la date de lancement.

Mission et stratégie du pôle



Le pôle de compétitivité Capenergies fédère un réseau de 530 adhérents et près de 1600

partenaires spécialistes de l'énergie, intégrant des grands groupes industriels, des entreprises, des organismes de recherche et d'enseignement ainsi que des financiers.

Le réseau Capenergies constitue un écosystème solide, vecteur du développement économique et de la compétitivité des filières énergétiques bas carbone en Provence-Alpes-Côte d'Azur, Corse, Guadeloupe, Île de la Réunion ainsi qu'en Principauté de Monaco.

Il porte son action sur 3 axes stratégiques :

- Economiser l'énergie,
- Gérer l'énergie,
- Produire de l'énergie décarbonée

et s'adresse à trois catégories de territoires :

- urbains et métropolitains,
- ruraux et de montagne,
- insulaires et isolés.

54

Depuis sa création, 703 projets innovants ont été labellisés par CAPENERGIES et plus de 388 projets financés représentant un montant d'aides de 486 millions d'euros.

www.capenergies.fr

Le pôle de compétitivité DERBI, dédié à la transition énergétique, a été créé en 2005, et fait partie des 48 pôles nationaux labellisés par l'Etat pour la période 2019/2022.



Il déploie son action en région Occitanie/Pyrénées Méditerranée à partir de son siège situé à Perpignan et d'antennes localisées à Toulouse et Montpellier.

Il a pour mission de développer, au niveau régional, national et international, l'innovation, la formation, le transfert de technologie, le développement et la création d'entreprises. Son objectif majeur est d'accélérer l'émergence et la commercialisation de produits et de services innovants sur des marchés en fort développement portés par la demande internationale, les directives européennes sur l'énergie et la Transition Energétique en France.

Il contribue en tant qu'acteur de référence, à l'objectif stratégique de la région Occitanie de devenir Région à Energie Positive, c'est-à-dire de couvrir 100% des besoins d'énergie par la production d'énergies renouvelables locales d'ici 2050.

Le pôle de compétitivité DERBI décline sa stratégie autour de cinq thématiques :

- la production d'énergie renouvelable adaptée aux territoires ;
- les réseaux énergétiques intelligents ;
- l'efficacité énergétique et les nouveaux usages ;
- le numérique et le digital ;
- les enjeux sociétaux et la formation.

Fort à ce jour de 170 membres, le pôle DERBI regroupe l'ensemble des acteurs clés de la filière des énergies renouvelables : entreprises, laboratoires, universités, centres de formation, fédérations professionnelles, organismes financiers et collectivités territoriales partenaires.

Depuis sa création, le pôle de compétitivité DERBI a labellisé 308 projets réunissant plus de 680 partenaires. 177 de ces projets ont été financés, représentant un investissement de 402,8 M€ et soutenus par des fonds publics à hauteur de 174 M€.

www.pole-derbi.com

FIBRES ENERGIVIE rassemble environ 180 membres dans le secteur des matériaux et du bâtiment durables : fournisseurs et transformateurs de matériaux, industriels, bureaux d'études, architectes, fournisseurs d'énergie, centres techniques, laboratoires privés, universités,...

Le soutien à l'innovation et au développement de ses membres est au cœur de ses missions : mise en relation de partenaires, recherche de financements et accompagnement au montage de projets collaboratifs dans des domaines divers, tels les outils de conception ou de gestion des bâtiments, les systèmes et matériaux constructifs notamment issus du bois et de la chimie du végétal, l'efficacité énergétique ou les énergies renouvelables.

Il propose aussi des services d'accompagnement à l'évaluation technique du CSTB ou à la mise en oeuvre d'une démarche d'économie circulaire, et travaille à favoriser les collaborations à l'international en organisant des manifestations telles WOODCHEM, Conférence Internationale sur la Chimie du Bois.

www.fibres-energivie.eu



IAR est le Pôle de compétitivité dédié à la bioéconomie. Fort de plus de 360 membres qui représentent l'ensemble de la chaîne de valeur de la bioéconomie, IAR couvre tous les champs de la production et de la valorisation des bioressources (agricole, forestière, marine, co-produits des filières de transformation, déchets organiques) pour des applications dans les domaines de l'alimentaire, de l'énergie et de l'industrie (notamment chimie et matériaux biosourcés).



De l'idée à la mise sur le marché, en passant par le développement et la recherche de financements, IAR soutient les porteurs de projets, quelle que soit leur taille, par de nombreux services (IAR Projets, IAR International, IAR BBI, IAR Invest, IAR Academy, IAR Network, IAR Intelligence Economique, IAR Tremplin et l'Agrobiobase).

Depuis 2005, IAR a accompagné plus de 220 projets représentant un investissement total de plus d'1,6 milliard d'euros.

www.iar-pole.com

Labellisé "Cellule de Diffusion Technologique", **Novachim, le CRITT Chimie & Matériaux de la Région**



Novachim

Le CRITT Chimie & Matériaux

Provence-Alpes-Côte d'Azur, est le réseau des entreprises et des laboratoires de recherche de la filière. Il fédère aujourd'hui plus de 190 entreprises et près de 50 équipes de recherche. Novachim s'investit dans l'animation du réseau, le pilotage de groupes de travail et d'échange, la réalisation de colloques scientifiques, mais également dans un rôle d'interface entre acteurs du monde socio-économique, qu'ils soient publics ou privés.

Enjeux :

Dans sa Feuille de Route 2017-2020, Novachim a inscrit comme « stratégiques » :

Le développement de l'Industrie Chimique du futur et la symbiose Industrielle ;

La réduction des déchets et le recyclage ;

La bio économie ;

L'écoconception ;

Les matériaux avancés et actifs ;

ainsi que le développement des compétences, la RSE et l'évolution des modèles économiques.

Objectifs et moyens :

Au coeur de l'éco-système régional de l'innovation et du développement économique, depuis plus de trente ans, Novachim apporte aux entreprises et aux laboratoires ses compétences dans la conception et la mise en oeuvre de projets innovants, qu'ils soient technologiques, d'organisation ou de modèle économique.

Chaque année une soixantaine de projets sont suivis par une équipe de docteurs, d'ingénieurs ayant une expérience significative en entreprise, soutenus par un groupe de chargés de mission bénévoles (professeurs d'université, cadres de grands groupes, cadre de l'administration), tous engagés pour une filière Chimie & Matériaux toujours plus performante!

www.novachim.fr

Parmi les Pôles de Compétitivité français, Xylofutur est **le seul Pôle dédié à la filière Forêt Bois Papier Chimie. Son objectif est développer la compétitivité de la filière nationale par l'innovation et la R&D.** Sa mission est de créer des liens durables entre les acteurs de la filière de l'amont à l'aval et de faire émerger des projets innovants, créateurs de valeur ajoutée et d'activités industrielles vers les marchés cibles actuels et futurs : Bâtiment durable, Amélioration de l'habitat, Aménagement/ Ameublement, Chimie fine et de commodité, Emballage, Énergie...

En complète adéquation avec les forces économiques en présence et leurs marchés, XYLOFUTUR se positionne sur les 3 Domaines d'Applications Stratégiques (DAS) suivants :

- **La gestion et la mobilisation de la ressource** : accroître la production et la récolte de bois et de biomasse et la compétitivité des systèmes sylvicoles et des approvisionnements en bois.
- **La transformation et l'utilisation du bois en matériau avec pour marchés privilégiés** : le bâtiment, les parquets/lambris, l'agencement et l'ameublement, l'emballage (bois, papier, carton),
- **Le développement du bois source de fibres, matière première de la chimie bio-sourcée et énergie avec pour marchés privilégiés** : les bioénergies et les bio synthons, les nanos celluloses, les matériaux composites...

58

En ce qui concerne les produits issus de la fibre et de la chimie du bois, Xylofutur s'appuie sur des partenaires puissants : Industries des composants cellulosiques, de la pâte et du papier, ainsi que sur des PME innovantes dans le domaine de la chimie verte et des bioénergies. Aujourd'hui encore, l'une des deux premières utilisations du bois dans le monde, est destinée à la production d'énergie. De plus, les co-produits du bois sont déjà largement positionnés sur le secteur de l'énergie : les papetiers brûlent leur lignine et certains dérivés de la cellulose et des hémicelluloses sont transformés et intégrés dans les biocarburants de 2ème génération.

Les membres de Xylofutur (l'INRA en partenariat avec les Universités, les EPST et Institut Technologique...) ont créé un Equipement d'Excellence XYLOFOREST dont deux des 6 plateaux Xylochem et Xylomat dédiés respectivement au traitement de la biomasse forestière, à la production de fibres cellulosiques, à la valorisation complète de la matière première des biomolécules aux énergies vertes.

La plateforme d'innovation XYLOFOREST a obtenu un financement "Investissements d'Avenir".

<http://xylofutur.fr>



 3bcar@instituts-carnots.fr
 01 42 75 93 82
 www.3bcar.fr
 @_3BCAR
 Institut Carnot 3BCAR

