



Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie
CVT - Consortium de Valorisation Thématique

Production et usages de bio-huiles : état des lieux et perspectives

Rapport final

Novembre 2017

AVERTISSEMENT

La méthodologie utilisée, ainsi que les résultats obtenus, relèvent de la seule responsabilité des rédacteurs qui ont réalisé l'étude. Ils n'engagent ni l'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Energie (ANCRE), ni l'ensemble des organismes membres de l'Alliance. Les parties intéressées sont invitées, le cas échéant, à faire part de leurs commentaires au CVT Ancre.

Membres du comité de pilotage

- François BROUST, CIRAD
- Anthony DUFOUR, Université de Lorraine – LRGP Nancy
- Jean-Luc DUPLAN, co-animateur du GP1 « Biomasse » de l'Alliance ANCRE
- Capucine DUPONT, CEA
- Nadine ESSAYEM, IRCE-Lyon
- Dorothee LAURENTI, IRCE-Lyon
- Elisabeth Le Net, co-animatrice du GP1 « Biomasse » de l'Alliance ANCRE
- Jack LEGRAND, co-animateur du GP1 « Biomasse » de l'Alliance ANCRE
- Daphné LORNE, IFPEN
- Béatrice PERRIER, PSA
- Alain QUIGNARD, IFPEN

Équipe projet et Rédacteurs

CEA-Liten Grenoble (Laboratoire de Thermo-Conversion des Bio-ressources) et Service Bibliométrie-Etudes-Marketing (SBEM) : Anne ROUBAUD, Isabelle CHAPUIS et Véronique CHARREYRON

CNRS-Université de Lorraine – LRGP Nancy : Vivian HOUZELOT, Guillain MAUVIEL

Avec la contribution de TECKNOWMETRIX SAS (TKM)

La reproduction ou la présentation publique à des fins professionnelles, même partielle par quelque procédé que ce soit, est strictement interdite sans l'autorisation du directeur du CVT Ancre.

La reproduction de cette étude et/ou le transfert de fichier à des tiers sont interdits en respect du code de la propriété intellectuelle. Cette étude est strictement réservée au signataire de l'accord de confidentialité.

Adossé à l'Alliance, le **Consortium de Valorisation Thématique de l'Ancre** a pour objectif d'améliorer l'efficacité et le flux de transfert de technologies de la sphère publique vers les entreprises. Constituées de cartographies de brevets et de publications, d'enquêtes terrain auprès d'industriels français et étrangers et d'analyses de marché, **les études stratégiques mutualisées du CVT Ancre** ont pour but d'identifier des opportunités et de formuler des recommandations sur les filières à promouvoir. La synergie entre experts scientifiques de l'Ancre et analystes en intelligence économique et stratégie apporte une inégalable valeur ajoutée.

ÉTUDES STRATÉGIQUES DU CVT ANCRE PUBLIÉES EN 2017 ET À VENIR EN 2018

- **Enjeux et technologies de refroidissement des Data Centers**
- **Potentiel technologique et économique des filières PV à haut rendement**
- **Analyse des scénarios de pénétrations fortes des EnR variables sur les réseaux électriques : méthodologies et conséquences industrielles**
- **Analyse de la prise en compte des sciences de base dans les politiques de recherche sur l'Énergie**
- **Transformations biologiques alternatives à la méthanisation : Hydrogène et produits fermentaires**
- **Raccordement au réseau et connectique sous-marine des parcs de convertisseurs d'EMR**

- **Les Combustibles Solides de Récupération (CSR) (Juin 2018)**
- **Quel potentiel du sous-sol dans le stockage d'énergie dans le cadre de la loi de transition énergétique ? (2^{ème} semestre 2018)**

Pour en savoir plus :

<https://www.allianceenergie.fr/cvt/etudes/>



Table des matières

Résumé	4
Avant-propos, contexte et objectifs de l'étude	5
I. Panorama des offres technologiques, de leur développement et des principaux acteurs ...	7
a. La pyrolyse rapide	7
i. Description du procédé et des principales technologies développées	7
ii. Développement et maturité des technologies.....	8
iii. Etat des verrous technologiques.....	8
iv. Principaux acteurs industriels	8
b. La pyrolyse rapide catalytique	11
i. Description du procédé et des principales technologies	11
ii. Développement et maturité des technologies.....	11
iii. Etat des verrous technologiques.....	11
iv. Principaux acteurs industriels	11
c. La liquéfaction hydrothermale	14
i. Description du procédé et des principales technologies développées	14
ii. Développement et maturité des technologies.....	14
iii. Etat des verrous technologiques.....	14
iv. Principaux acteurs industriels	15
d. Comparaison des procédés et des propriétés physico-chimiques des huiles.....	16
e. Les procédés de traitement des huiles de pyrolyse et de liquéfaction.....	18
i. Description des procédés	18
ii. Développement et maturité des technologies.....	18
iii. Etat des verrous technologiques.....	19
iv. Principaux acteurs industriels	19
II. Application d'intérêt, maturité des technologies et perception des acteurs	20
a. Application pour des procédés de combustion/chaleur/cogénération	20
i. Etat des lieux	20
ii. Contexte économique et réglementaire.....	22
iii. Perception des acteurs industriels	23
b. Application pour la chimie de spécialité	23
i. Etat des lieux	23
ii. Contexte économique et réglementaire.....	23
iii. Perception des acteurs industriels	24

c.	Application aux biocarburants.....	24
i.	Etat des lieux	24
ii.	Contexte économique et réglementaire.....	24
iii.	Perception des acteurs industriels	25
d.	Application environnementale par la valorisation de déchets.....	25
e.	Synthèse des enjeux technico-économiques	26
III.	Les bio-huiles dans le paysage français : constat et recommandations.....	27
a.	Les freins et les menaces	27
b.	Les atouts et les faiblesses.....	27
c.	Recommandations pour la recherche et le développement en France.....	28
IV.	Annexe : Présentation des résultats de l'étude	29

Résumé

La production de bio-huiles peut être réalisée par trois principales technologies : la pyrolyse rapide, la pyrolyse rapide catalytique et la liquéfaction hydrothermale. Toutefois, le développement et la maturité de ces technologies ne sont pas les mêmes.

La pyrolyse rapide présente un TRL entre 7 et 9 et quelques unités commerciales sont actuellement exploitées par trois acteurs industriels qui sont Ensyn (Canada), VALMET/FORTUM (Finlande), et BTG-BTL (Pays-Bas). L'huile produite est instable thermiquement, présente un taux d'oxygène élevé et un PCS faible (15 MJ/kg). Cette technologie ne présente pas de verrou technologique majeur qui freine son développement.

La pyrolyse catalytique présente un TRL entre 5 et 6 et plusieurs démonstrateurs sont actuellement exploités par RTI (Etats-Unis), Anellotech (Etats-Unis), CRI/SHELL (Etats-Unis), et VALMET/FORTUM. Des unités commerciales sont attendues à moyen terme. Par le traitement catalytique, l'huile produite présente un taux d'oxygène plus faible ce qui améliore sa stabilité thermique. Des verrous technologiques persistent cependant, notamment sur la robustesse et la régénération des catalyseurs, et font encore l'objet d'études et de recherche.

Le TRL de la liquéfaction se situe quant à lui entre 3 et 5 et les acteurs industriels identifiés sont Genifuel (Etats-Unis), Steeper Energy (Danemark), Muradel (Australie), Licella Fibre Fuel (Australie). Le passage de l'échelle pilote à l'échelle du démonstrateur s'effectuera également à moyen terme. L'huile produite est très visqueuse, présente un PCS moyen de 30 MJ/kg et n'a pas la même composition chimique que les huiles pyrolytiques.

L'utilisation d'huiles pyrolytiques brutes dans des moteurs et des turbines à gaz a été étudiée. Bien que prometteur, des problèmes ont été rapportés, notamment sur la résistance des matériaux à la corrosion et à l'abrasion ainsi que sur la stabilité thermique des huiles. Le prix moyen de ces huiles brutes est estimé entre 56 et 105 \$/baril. Que ce soit sur le plan physico-chimique ou bien énergétique, les bio-huiles produites par ces trois technologies ne sont pas comparables aux carburants fossiles classiques. Des procédés d'*upgrading* sont donc nécessaires pour améliorer les propriétés de ces huiles et les utiliser en tant que carburants avancés. Deux voies principales sont envisagées pour convertir ces bio-huiles brutes en biocarburants avancés (dits de seconde génération) : l'hydrotraitement et le craquage catalytique. Pour réduire les coûts (CAPEX et OPEX), ces étapes peuvent être réalisées en co-processing sur des installations de raffinerie existantes. Le TRL de ces technologies se situe entre 4 et 5 pour l'hydrotraitement et entre 6 et 7 pour le craquage catalytique. L'estimation du prix moyen de ces biocarburants avancés de seconde génération oscille entre 96 et 150\$/baril.

Les marchés consommateurs de bio-huiles (brutes ou non) et la filière de production de bio-huile sont peu développés à ce jour car dépendant non seulement du prix du baril de pétrole fossile mais également de la volonté de mener une véritable incitation politique et réglementaire dans ce domaine.

En conclusion, dans le contexte français, les recommandations pour la recherche dans le domaine des bio-huiles sont les suivantes :

- renforcer le développement de la recherche sur la combustion des huiles (application chaleur/combustible), notamment dans les moteurs stationnaires (application la plus directe),
- soutenir le développement et la recherche sur la liquéfaction hydrothermale pour atteindre un TRL de 7,
- renforcer les efforts de recherche sur des catalyseurs les plus adaptés dans le cadre de l'hydrotraitement et du craquage des huiles (en post-process ou co-process) pour produire des biocarburants compétitifs.

Avant-propos, contexte et objectifs de l'étude

Le Laboratoire de Thermo-Conversion des Bioressources du CEA Liten à Grenoble et le Laboratoire Réactions et Génie des Procédés (CNRS / Univ. de Lorraine) à Nancy, membres de l'ANCRE (Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Energie) ont été mandatés par l'Alliance pour réaliser ensemble cette étude stratégique sur les procédés de pyrolyse et de liquéfaction hydrothermale de bio-ressources. L'un des objectifs est d'apporter une vision et un panorama actualisé des acteurs de la recherche au niveau international, des innovations protégées et potentiellement exploitées au niveau industriel, ainsi que des marchés impliqués dans cette filière dans le but d'orienter les efforts et les futurs travaux de recherche dans le domaine de la pyrolyse/liquéfaction de biomasse.

Différents projets de recherche ont été menés en France sur les procédés de pyrolyse d'une part, et sur la liquéfaction hydrothermale d'autre part, en particulier avec le soutien de l'ANR. On peut citer, par exemple, PRECOND (2005-2008), PYROPLASM (2006-2009), PYRAIM (2011-2015) BIOMAP (2007-2009), GALACSY (2006-2009), ECOHDOC (2008-2010) CATAPULT (2014-2017), DIESALG (2012-2015) et LIQHYD (2012-2016). A l'échelle internationale, quelques industriels construisent des unités commerciales, tandis que des discussions sur la standardisation des bio-huiles s'engagent à l'échelle européenne.

Le cadre de l'étude se borne à tous les procédés de production de bio-huiles par conversion thermo-chimique avec ou sans solvants (eau, solvants organiques), avec ou sans catalyseurs, en présence ou non d'hydrogène. Ceux-ci comprennent donc la pyrolyse rapide, la liquéfaction hydrothermale mais aussi la pyrolyse catalytique et l'hydro-liquéfaction. Par ailleurs, les bio-huiles produites peuvent être utilisées directement en tant que biocombustible ou peuvent être raffinées en biocarburant. D'autres types de valorisation chimique sont actuellement étudiés en R&D. Toutefois, l'étude portera principalement sur la production de bio-huiles et de bio-carburants dérivés pour des applications énergétiques.

Ce présent rapport a pour but de réaliser une photographie sur la production de bio-huiles pour rendre compte non seulement du contexte et des enjeux mondiaux, mais également de l'état des connaissances et du développement industriel dans ce domaine. Sa rédaction se base sur une étude de marché réalisée par le Service Bibliométrie-Etudes-Marketing (SBEM) du CEA de Grenoble et sur une étude bibliométrique produite par TECKNOWMETRIX SAS (TKM), pour le compte du Consortium de valorisation thématique - Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (CVT - ANCRE).

Ce document veut répondre à plusieurs besoins :

- réaliser un panorama récent des acteurs de la recherche dans le domaine des bio-huiles,
- rendre compte des connaissances des innovations protégées et potentiellement exploitées au niveau industriel,
- donner une description du marché actuel et des marchés à venir,
- définir des orientations stratégiques dans un contexte français.

Cette étude a été coordonnée par Anne Roubaud du CEA Liten et Guillain Mauviel du LRGP et a mobilisé le concours de plusieurs experts et intervenants : Capucine Dupont, Elisabeth Le Net, Isabelle Chapuis et Véronique Charreyron (CEA), Anthony Dufour (LRGP), François Broust (CIRAD), Dorothee Laurenti et Nadine Essayem (IRCE-Lyon), Daphné Lorne, Alain Quignard et Jean-Luc Duplan (IFPEN), Jack Legrand (GEPEA), Béatrice Perrier (PSA).

Trois procédés de conversion thermochimiques prépondérants ont été identifiés :

- la pyrolyse rapide (PR),
- la pyrolyse catalytique (PC),
- la liquéfaction hydrothermale (HTL).

Les ressources considérées sont des biomasses herbacées ou ligneuses, les micro-algues, et les résidus de l'industrie agroalimentaire.

Il conviendra, au lecteur du présent document, d'avoir conscience qu'une partie des informations rassemblées dans le cadre de cette étude a été collectée auprès des acteurs industriels et académiques qui ont bien voulu répondre aux sollicitations. Par conséquent, une part des informations recueillies reposent sur un panel représentatif restreint des acteurs et portent un biais issu de leur perception personnelle de la situation. Elles doivent donc être considérées comme des tendances.

Enfin, les activités menées en Chine sur la bio-huile seront partiellement développées dans ce document en raison d'un manque d'informations tant du point de vue bibliographique qu'au niveau des entretiens menés auprès des acteurs du domaine, R&D et industriels confondus.

I. Panorama des offres technologiques, de leur développement et des principaux acteurs

a. La pyrolyse rapide

i. Description du procédé et des principales technologies développées

La pyrolyse est un procédé de conversion thermo-chimique de matière organique en l'absence de dioxygène pour produire trois phases : une phase solide (ou charbon), une phase gazeuse (CO , H_2 , CH_4 , C_2H_2 ,...), et une phase vapeur condensable (bio-huile ou huile pyrolytique).

Les conditions requises pour se placer dans le cas d'une pyrolyse rapide sont une température de travail relativement faible (entre 450 et 600°C), un dispositif de transfert thermique très efficace entre le réacteur et la biomasse, ainsi qu'un temps de séjour très court pour éviter non seulement le craquage des molécules qui constituent la phase condensable, mais également leur recombinaison. Il est également nécessaire d'utiliser une biomasse très peu humide (taux d'humidité inférieur à 10 %) et finement broyée pour limiter non seulement les pertes thermiques par évaporation d'eau résiduelle, mais aussi les résistances au transfert thermique. En effet, si la température de la biomasse n'atteint pas rapidement la température de la réaction, la formation de biochar est favorisée au détriment de la bio-huile.

Différentes technologies ont été développées et étudiées à ce jour. Le tableau 1 en donne une description et en énumère leurs avantages et inconvénients.

technologie	Descriptif	Avantage/inconvénient	Fabricants/développeurs
Lit fluidisé bouillonnant	<ul style="list-style-type: none"> • Transfert de chaleur via sable préchauffé • Temps de résidence des gaz de pyrolyse et de la biomasse contrôlés par le gaz de fluidisation • Transfert thermique important avec rendement massique entre 70% et 75%, 	+ : Biohuile de qualité Conception simple, facilité d'utilisation, bon contrôle de la température de pyrolyse - : Particules fines (2-3 mm) en entrée, apport de chaleur difficile dans réacteur	RTI, Dynamotive, Aston, Hamburg, Fortum
Lit fluidisé circulant	<ul style="list-style-type: none"> • Très similaire à lit bouillonnant mais temps de résidence des gaz de pyrolyse et du biochar égaux • Sable chaud circulant entre la chambre de combustion et de pyrolyse • Chaleur fournie par la combustion des résidus carbonneux (char) 	+ : Débits élevés, déjà utilisée pour de gros volumes dans l'industrie pétrochimique - : Transfert de chaleur moins efficace que pour un lit bouillonnant, usure liée à l'abrasion, présence de particules fines	Ensyn, VVT, Fortum, Metso
Cône rotatif	<ul style="list-style-type: none"> • Sable préchauffé et biomasse mis en contacts avec cône rotatif 	+ : Système compact et ne nécessite pas de gaz de fluidisation - : Procédé complexe qui nécessite particules très fines et mise à l'échelle (industrialisation) difficile	université de Twente et BTG
Pyrolyse ablative	<ul style="list-style-type: none"> • Transfert thermique par contact direct des particules sur la paroi chaude du réacteur via l'application d'une pression exercée par une force mécanique ou centrifuge • Les produits de pyrolyse forment d'abord un film huileux sur la paroi puis s'évaporent par la suite. • Rendements massiques compris entre 60 % et 75 % 	+ : Granulométrie importante possible et ne nécessite pas de gaz de fluidisation. - : Complexes, limités par la puissance thermique délivrée (apport d'énergie problématique) et mise à l'échelle difficile	NREL (Vortex), CNRS Nancy, Aston
Pyrolyse sous vide	<ul style="list-style-type: none"> • Biomasse déplacée par gravité et par des racleurs rotatifs à travers des pyrolyseurs à foyers multiples avec une température passant de 200 à 400 °C • Implique une décomposition thermique de la biomasse sous pression réduite • Rendement massique entre 35 % et 40 % atteint pour une température de 450 °C et une pression de 15 kPa 	+ : Granulométrie importante possible, pas de gaz porteur et peu de fines dans l'huile - : Faible transfert thermique, rendement plus faible, coût élevé pompe à vide, mise à l'échelle difficile	Pyrovac (Canada), Université Laval
A vis (Auger)	<ul style="list-style-type: none"> • Sable chaud et biomasse mélangés par une vis sans fin (n'utilise pas de gaz de fluidisation), • La biomasse se déplace à l'intérieur du réacteur Auger au moyen d'une hélice/vis 	+ : Technologie compacte et transportable sur les sites de production, simplification de la chaîne transport/stockage/utilisation de la biomasse, diminution des coûts - : Transfert thermique moins efficace	Rewenable Oil International® (ROI), ABRI Tech, KIT

Tableau 1 : Déclinaison des principales technologies utilisées en pyrolyse rapide, d'après E. Leroux, Université de Laval 2015.

ii. Développement et maturité des technologies

La pyrolyse rapide est un procédé éprouvé et parfaitement maîtrisé. Selon la technologie considérée, les TRL (Technology Readiness Levels) observés s'échelonnent de 7 à 9. Le Tableau 2 fournit une synthèse détaillée de l'état de développement des principales technologies rencontrées. Des unités de pyrolyse rapide mobile ont également été développées pour minimiser le coût du transport de la biomasse et augmenter la flexibilité du procédé. Cependant, le coût relatif de la main d'œuvre est alors augmenté étant donné la faible capacité de production de ces unités mobiles.

Type de réacteur	Stade	Rendement/bio masse sèche (wt%)	Complexité	Spec/ Taille intrants	Besoin en gaz inertes	Taille réacteur	Scale up	Concentration du gaz (sortie)
Lit fluidisé bouillonnant	TRL 9	75	Moyenne	Forte	Fort	Moyenne	Facile	Faible
CFB (lit circulant)	TRL 9	75	Forte	Forte	Fort	Fort	Facile	Faible
Cône rotatif	TRL 8	70	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyen	Bonne
Ablatif	TRL 7	75	Forte	Faible	Faible	Faible	Difficile	Faible
A vis	TRL 8	60	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Bonne

Tableau 2 : D'après Pyne IEA Bioenergy task 39.

A ce jour, une quarantaine d'acteurs industriels ont été identifiés sur le plan mondial et les principales technologies rencontrées sont les lits fluidisés bouillonnants, les lits circulants, ainsi que les systèmes à vis (Auger).

iii. Etat des verrous technologiques

La pyrolyse rapide ne présente pas de verrou technologique majeur qui freine son développement. Le procédé se confronte essentiellement à des problèmes de transport de solides divisés (au niveau de l'alimentation des réacteurs) et à des problèmes de contrôle de la température et du transfert thermique, notamment lors de la montée en échelle.

iv. Principaux acteurs industriels

Les acteurs industriels mondiaux qui présentent la plus grande maîtrise du procédé de pyrolyse rapide sont Ensyn (Canada), le consortium VTT/VALMET/FORTUM/UPM (Finlande), et BTG-BTL (Pays-Bas).

VTT, centre de recherche finlandais, a déposé un brevet en 2006 sur une technologie de pyrolyse rapide intégrée. Ce concept permet l'intégration totale d'une unité de pyrolyse rapide à des centrales existantes de cogénération industrielles ou de chauffage urbain. La chaleur nécessaire à la pyrolyse est fournie par du sable chaud préalablement chauffé par une chaudière à lit fluidisé de l'usine de cogénération. Cette intégration permet de réduire les coûts d'investissement et opérationnels. Dès 2007, Metso (désormais Valmet), UPM, Fortum et VTT se sont regroupés pour développer et concrétiser ce concept en construisant une unité à échelle pilote d'une capacité de 7 t/j (intran) à Tampere (Finlande). Plus de 140 tonnes de bio-huile ont été produites par ce pilote. Fort de cette expérience, un démonstrateur commercial a été construit à Joensuu (Finlande) en 2013. Intégré à la centrale électrique de Joensuu pour y produire de la chaleur et de l'électricité, ce démonstrateur offre une capacité de production de 50000 t/an de bio-huile en substitution du mazout lourd.

Integrated bio oil production concept

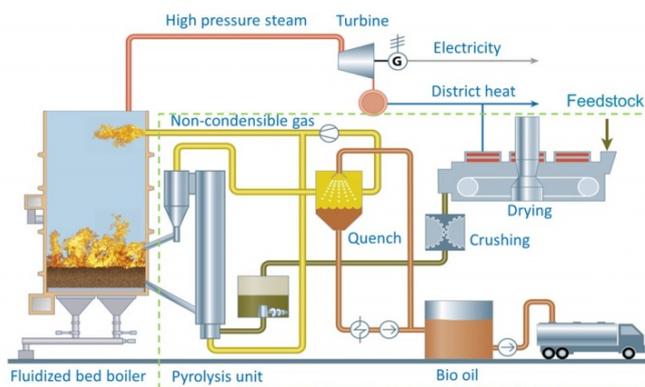


Figure 1 : Procédé de pyrolyse rapide intégrée développé par Valmet-Metso (source : Valmet)

L'entreprise canadienne Ensyn[®], forte de plus de 25 années d'expérience, a développé une technologie de pyrolyse rapide appelée « traitement thermique rapide » ou RTP[®]. La biomasse utilisée dans RTP[®] est issue de résidus non alimentaires des secteurs forestiers et agricoles. A ce jour, Ensyn[®] a construit 16 unités allant de l'échelle pilote à l'échelle commerciale, notamment pour Red Arrow Products Company LLC, entreprise basée au Wisconsin (Etat-Unis), et qui exploite ces unités pour produire de la « fumée liquide » pour l'industrie alimentaire (arôme BBQ). En 2014, Ensyn et Honeywell UOP, leader mondial du raffinage par craquage catalytique (FCC), ont établi une alliance stratégique liée au déploiement commercial des biocarburants celluloseux avancés, dénommés « RFO[®] ».

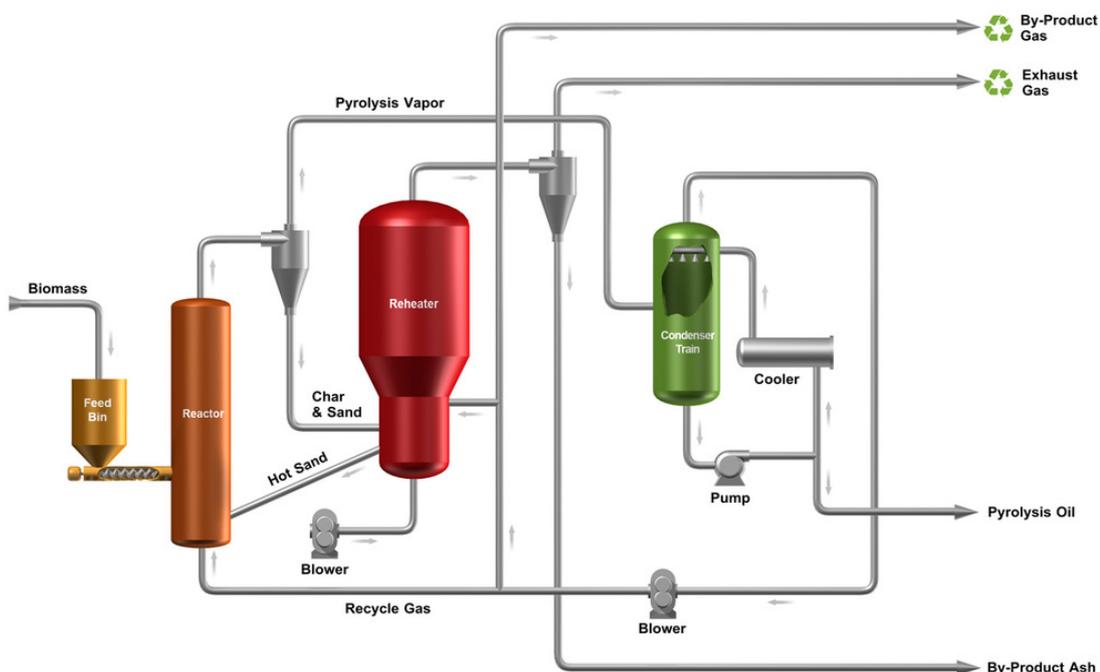


Figure 2 : Procédé de pyrolyse rapide RTP développé par Ensyn (source : Ensyn)

De cette union est née l'entité Envergent Technologies afin d'exploiter pleinement le potentiel de la bio-huile produite par Ensyn[®] pour produire des carburants (transport) et des combustibles (chauffage) ; le domaine d'activités est double :

- vente de licences, soutien logistique (ingénierie) et fourniture d'équipements RTP® pour produire des bio-huiles,
- développement à l'échelle commerciale et mise en œuvre d'un procédé de co-raffinage des bio-huiles dans des unités type FCC.

Cette joint-venture est encore au stade de développement de leur technologie de co-raffinage.

Le procédé développé par BTG exploite la technologie du cône rotatif de l'Université de Twente (Pays-Bas). La biomasse broyée et les particules de sable chaud sont introduites par le haut du réacteur et tombent au fond du cône pour y être mélangées (zone de transfert thermique). L'ensemble des particules est alors transporté vers le haut sous l'action de rotation du cône. Cette technologie permet un transfert thermique très rapide et un temps de séjour des vapeurs condensables et gaz très court, ce qui limite les réactions secondaires de craquage nuisibles au rendement carbone de la bio-huile. BTG possède dans ces propres locaux deux installations de pyrolyse rapide ; la première présente une capacité de 5 kg/h (intrait) et la seconde une capacité de 200 kg/h (intrait). A ce jour, plus de 70 tonnes de bio-huiles ont été produites par ce dernier pilote. La biomasse consommée est majoritairement du bois (et résidus forestiers), des boues séchées, de la paille (résidus agricoles) et de la bagasse. En 2007, BTG Bioliquids (BTG-BTL) a été fondée pour commercialiser la technologie de pyrolyse en cône rotatif : une première unité de pyrolyse rapide de 2 t/h (intrait) a été livrée à Genting Bio-Oil, (filiale du Groupe Genting) en Malaisie suivie d'une seconde, d'une capacité de 5 t/h, livrée pour le consortium EMPYRO à Hengelo (Pays-Bas). BTG-BTL propose non seulement un service de vente de sa production bio-huile issue de l'usine EMPYRO sous différents packaging - allant de 2L à des containers de plusieurs milliers de litres - mais également un service de traitement destiné aux producteurs de déchets de biomasse pour ainsi produire sa propre huile de pyrolyse¹.

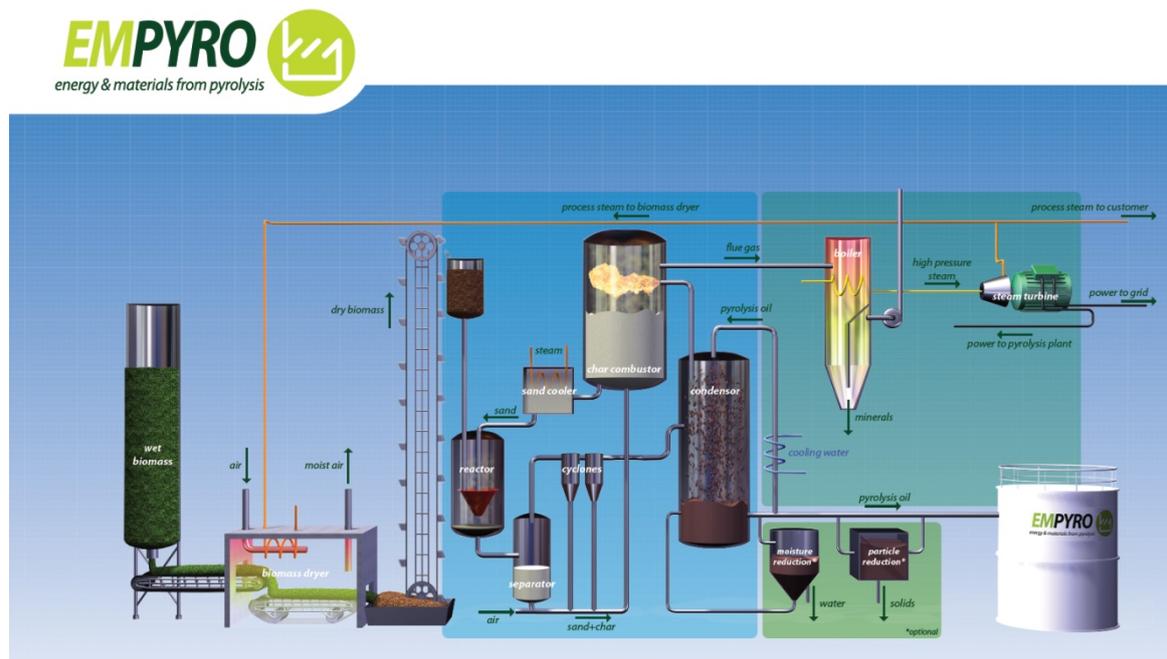


Figure 3 : Procédé de pyrolyse rapide et technologie du cône rotatif développé par BTG – BTL (source : BTG)

¹ <https://www.btg-btl.com/en/company/services/shop>

b. La pyrolyse rapide catalytique

i. Description du procédé et des principales technologies

A la différence de la pyrolyse rapide simple, la pyrolyse catalytique emploie des catalyseurs pour diminuer la quantité d'oxygène présente dans la bio-huile. Elle est alors plus stable thermiquement et peut être plus facilement transformée en biocarburant ou en BTX. Différentes stratégies sont envisagées :

- ajout du catalyseur par mélange mécanique à la biomasse dans le réacteur,
- ajout du catalyseur par imprégnation de la biomasse,
- par reformage et/ou craquage des vapeurs sur lit fixe en sortie du pyrolyseur.

ii. Développement et maturité des technologies

La technologie est en cours de développement et progresse assez rapidement, tant sur le plan scientifique que technique. Différents projets ont été lancés (Bio-TCat™, lignoCat, Battelle, IH²,...), allant du stade recherche au démonstrateur. Le TRL se situe donc entre 5 et 6 et l'arrivée sur le marché de cette technologie est envisagée à moyen terme.

iii. Etat des verrous technologiques

Des verrous technologiques persistent dans ce procédé. Ils sont nombreux et font l'objet d'études et de recherche. Les principaux verrous identifiés sont :

- l'empoisonnement du catalyseur par la présence inéluctable de minéraux dans la biomasse,
- des rendements faibles,
- la formation trop importante de coke sur le catalyseur,
- la régénération du catalyseur,
- la difficulté d'assurer une qualité constante de la bio-huile.

iv. Principaux acteurs industriels

La technologie de la pyrolyse rapide catalytique est moins avancée que la pyrolyse rapide. Elle est étroitement liée au développement de la filière de production de biocarburants avancés. En conséquence, aucune unité commerciale n'est actuellement construite dans le monde. Cependant, suivant les acteurs et l'avancée de leur technologie, des unités pilotes/démonstrateurs sont en cours de développement, de construction, ou de validation. Les principaux acteurs sont RTI (Etats-Unis), Anellotech (Etats-Unis), CRI/SHELL (Etats-Unis), le groupement FORTUM/UPM/VALMET (Finlande).

KiOR fut l'un des premiers acteurs à construire une unité commerciale de pyrolyse catalytique. KiOR a été fondée en 2007 en tant que coentreprise de Khosla Ventures (KV) et BIOeCON. Dans ce contexte, BIOeCON a contribué à la propriété intellectuelle et au savoir-faire technologique dans le domaine du craquage catalytique de la biomasse ; plusieurs brevets ont été déposés et qui concernent notamment :

- le craquage catalytique des liquides de pyrolyse avec ou sans matières premières dérivées d'un pétrole brut dans des procédés FCC standards ou modifiés,
- l'utilisation d'additifs à la biomasse pour améliorer la composition des bio-huiles produites par pyrolyse catalytique.

En 2010, KiOR a construit un démonstrateur pour étudier la faisabilité du procédé appelé BFCC (Biomass Fluid Catalytic Cracking). Cette unité avait une capacité de traitement 400 fois supérieure à leur pilote. En 2011, KiOR entreprend la construction d'une première unité de production à échelle commerciale qui fut exploitée en 2013 et arrêtée en 2014, date à laquelle KiOR fit faillite et déposa son bilan. Les raisons de cette faillite sont diverses et nombreuses mais résultent surtout d'une mauvaise gestion de l'entreprise renforcée par une course effrénée dans la réalisation de leur unité commerciale sans résoudre durablement certains problèmes de conceptions déjà présents sur leur pilote. En effet, d'après les déclarations d'un ancien cadre de KiOR, Paul O'Connor, le retour expérimental des essais sur le pilote n'a pas été suffisamment pris en compte pour assurer sereinement un up-scaling du procédé. Ce ne serait pas lié au choix du procédé mais à un problème structurel du réacteur car les carences rencontrées sur le démonstrateur (rendement faible en bio-huile) avaient déjà été notées à l'époque sur le pilote et rien n'avait été mis en œuvre pour corriger ce biais.

Cette faillite a été très préjudiciable car elle a suscité beaucoup de doutes de la part des investisseurs sur le succès potentiel de la pyrolyse catalytique.

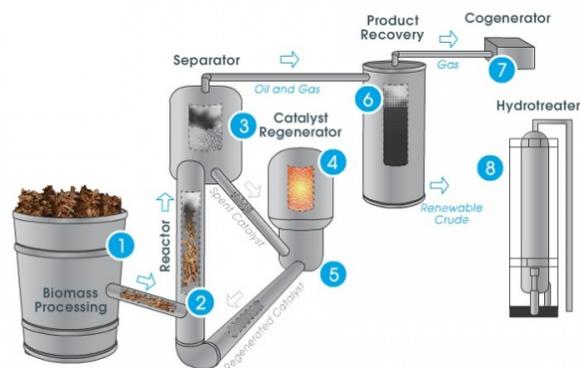


Figure 4 : Procédé BFCC de pyrolyse rapide catalytique développée par KiOR (source : BiofuelsDigest)

En 2014, Fortum, UPM, et Valmet ont poursuivi leur collaboration pour développer et commercialiser une technologie de pyrolyse rapide catalytique pour produire un biocarburant avancé (projet LignoCat). Ce projet, inscrit dans la continuité de la technologie de pyrolyse rapide non catalytique intégrée (dite CHP), est financé par le Tekes - l'agence finlandaise de financement pour la technologie et l'innovation.

RTI cherche à produire une solution de carburants avancés en intégrant un procédé de pyrolyse catalytique (lit fluidisé bouillonnant) à un procédé d'hydrotraitement. La technologie retenue pour la pyrolyse rapide catalytique est la suivante : la biomasse est introduite par le côté du réacteur et se mélange avec le catalyseur chaud. L'azote est utilisé comme agent de fluidisation et introduit dans la zone de mélange. Les vapeurs de bio-huile, les gaz légers et les charbons sont entraînés par le flux d'azote vers la sortie en haut du réacteur. Les solides (catalyseur et charbon) sont alors séparés dans un cyclone puis dirigés vers un régénérateur. Ce dernier fonctionne comme un lit fluidisé bouillonnant, où l'air injecté est utilisé pour brûler le charbon et du coke déposé sur le catalyseur. Les catalyseurs recyclés sont alors renvoyés dans le réacteur de pyrolyse avec un rapport massique catalyseur/biomasse d'environ 10 pour 1. Les points sensibles identifiés et induits par leur technologie sont les suivants :

- réduire au minimum le taux d'oxygène dans les huiles produites,
- maximiser le rendement carbone du procédé de pyrolyse,
- améliorer la stabilité thermique de l'huile produite,

- évaluer l'impact de la qualité de la bio-huile produite dans l'étape d'hydrotraitement,
- minimiser la consommation d'hydrogène dans l'étape d'hydrotraitement,
- maximiser le rendement en biocarburants avancés.

Un pilote pouvant traiter jusqu'à 1 t/j de biomasse a été construit pour étudier les trois premiers points. A ce jour, 4 catalyseurs et 5 types de biomasse ont été testés dans leur pilote. Le taux minimal d'oxygène mesuré dans leurs huiles est de l'ordre de 20 % et le rendement énergétique maximal est de 42 %. Une étude paramétrique leur a permis de déterminer les conditions optimales d'exploitation de leur pilote (température, temps de séjour, température du régénérateur, débit de circulation du catalyseur, etc...). Une étude technico-économique de leur procédé est en cours d'élaboration ainsi que des tests de production en continu (30h). Une unité d'hydrotraitement a été commissionnée en 2015 pour étudier les autres points.

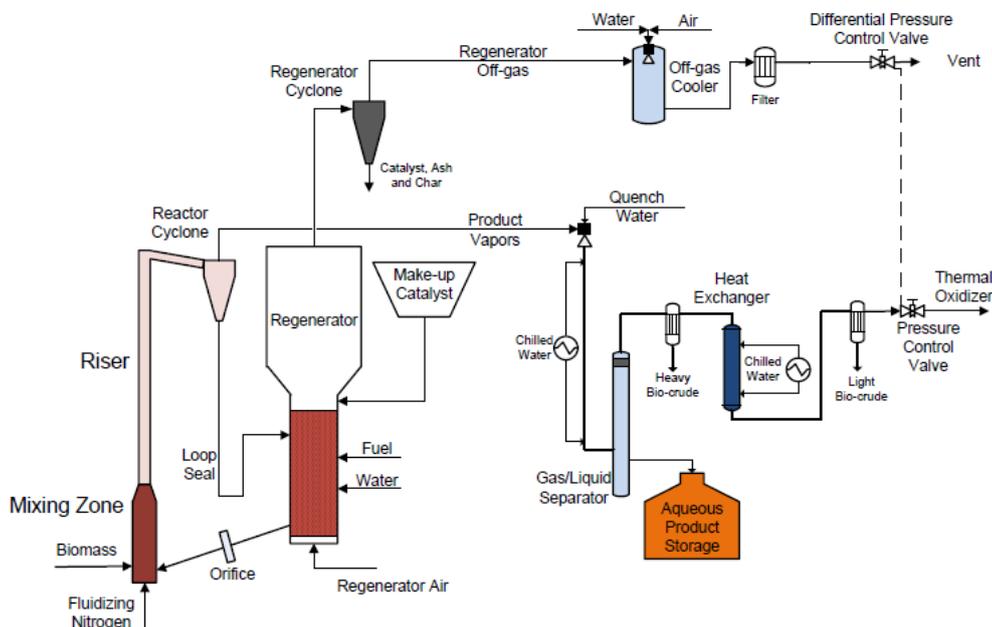


Figure 5 : Procédé de pyrolyse catalytique avec lit fluidisé bouillonnant développé par RTI (source : RTI)

CRI, fabricant de catalyseurs, filiale de Shell, exploite la technologie IH2 (hydrolyse), développée par GTI en 2009 (Gas Technology Institute). Cette technologie convertit directement la biomasse en biocarburant par un processus thermo-chimique à deux étapes (hydrolyse puis hydroconversion + hydrotraitement). Les matières premières utilisées dans cette technologie sont des résidus forestiers (sciure, écorce, copeaux) et des résidus agricoles. Selon le CRI, les hydrocarbures produits couvrent la gamme essence, jet et diesel et répondraient aux spécifications de l'ASTM pour le transport routier. Selon leur déclaration, le procédé IH2 pourrait produire entre 250 et 650 litres de carburant par tonne de matière première. La composition de leur carburant serait de 70 % d'essence pour 30 % de diesel, le taux d'oxygène serait inférieur aux limites détectables et le nombre total d'acide (TAN) serait inférieur à 0,03. Leur coût de fabrication est estimé à 2,50\$/gallon pour une unité de traitement de 2000t/j de matière sèche. Courant 2015, Synsel Energi AS a conclu un accord de licence avec CRI pour construire un démonstrateur de 5t/j (intraité) à Grenland (Norvège) qui sera intégré dans un site de production de produits pétrochimiques existant pour réduire les CAPEX et OPEX. En 2016, Shell India Markets Pvt Ltd (SIMPL) a annoncé la construction d'une autre unité de démonstration de 5t/j (intraité) sur le site de son centre technologique à Bangalore (Inde).

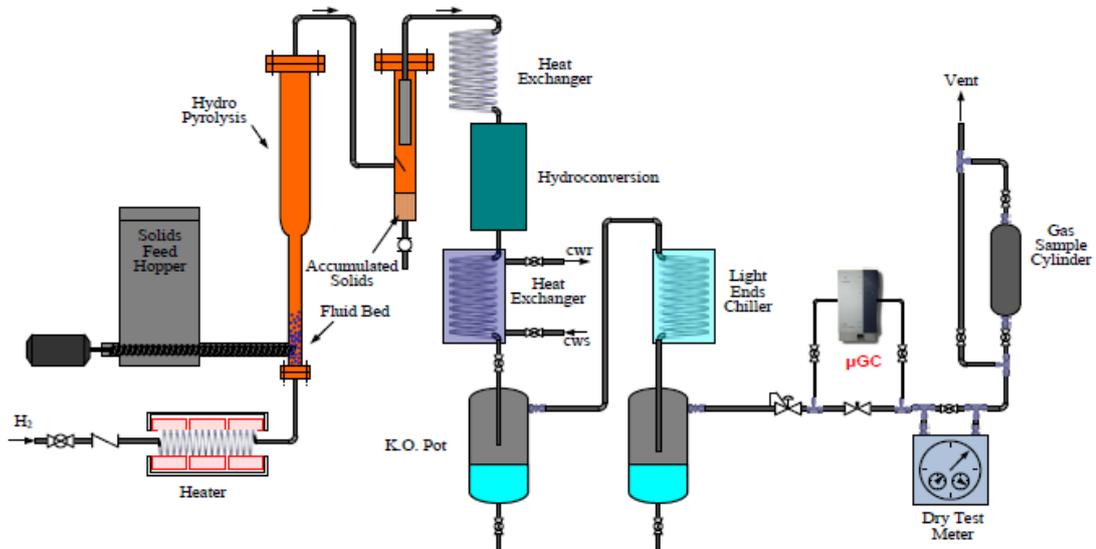


Figure 6 : Procédé IH2 développé par GTI pour RTI (source : RTI)

Anellotech développe également une technologie de pyrolyse catalytique en partenariat avec Johnson Matthey, IFPEN, Axens. Toutefois, leur technologie ne s'oriente pas vers la production de bio-carburants car la sélectivité des réactions catalytiques *in situ* (procédé BioTCat™) est orientée vers la production de BTX (benzène, toluène, xylène) sans passer par une étape intermédiaire de production de bio-huile. Un pilote a été construit au Texas et est en cours d'utilisation à ce jour pour des résultats encourageants selon IFPEN.

c. La liquéfaction hydrothermale

i. Description du procédé et des principales technologies développées

Les premiers développements remontent aux années 70 et se poursuivent depuis plus de 15 années après un abandon dans les années 90. La liquéfaction hydrothermale (HTL) est un procédé de conversion de la biomasse en phase aqueuse, sous haute pression (100-250 bar), à température modérée (300 à 400°C). La transformation de la matière organique est régie par des réactions d'hydrolyse suivies de réactions de décarboxylation et de déshydratation. Contrairement aux procédés de pyrolyse rapide, la liquéfaction hydrothermale accepte de la biomasse très humide ce qui évite le surcoût d'une étape de séchage. Des catalyseurs peuvent être ajoutés dans le réacteur de liquéfaction pour améliorer le rendement en carbone et la qualité des huiles produites.

ii. Développement et maturité des technologies

Le procédé de liquéfaction hydrothermale présente un TRL situé entre 3 et 5. Des essais ont été réalisés à l'échelle pilote (CatLiq®, BTE-Titan project, Steeper, BioValue,...), mais aucun démonstrateur semi-industriel n'a été exploité à ce jour.

iii. Etat des verrous technologiques

Le procédé de liquéfaction hydrothermale nécessite des conditions opératoires contraignantes en raison des hautes pressions et peuvent poser des problèmes en raison des risques de corrosion, en particulier pour les procédés en conditions supercritiques ($P > 221$ bar et $T > 374$ °C).

L'alimentation des installations en biomasse et la récupération des produits en fonctionnement continu est problématique du fait d'un risque élevé de colmatage des

installations (alimentation d'une charge multiphasique hétérogène sous haute pression et viscosité des produits).

Le traitement et le recyclage des effluents aqueux en fin de procédé est une étape à prévoir et peut s'avérer onéreuse si elle est sous-estimée. En effet, une fraction organique résiduelle reste dans la phase aqueuse en fin de procédé. Des solutions telles que le recyclage de la phase aqueuse dans le procédé ou l'ajout d'un procédé de traitement supercritique sont envisagées et développées par certains acteurs (par exemple le Pacific Northwest National Laboratory, PNNL). La fraction minérale peut être également valorisée.

iv. Principaux acteurs industriels

Il y a très peu d'acteurs industriels, ce qui reflète le niveau de maturité de la technologie (TRL entre 3 et 5). Les acteurs industriels identifiés sont Geniefuel (Etats-Unis), Steeper Energy (Danemark), Muradel (Australie), Licella Fibre Fuel (Australie).

Geniefuel, fondée en 2006, exploite un procédé de liquéfaction hydrothermale en utilisant comme intrant diverses matières organiques humides, (biomasse, algues, déchets alimentaires, et déchets domestiques organiques). Ce procédé, développé par le PNNL, est continu, en conditions sous-critiques (175 à 207 bar, 325 à 350°C) et présente un rendement de conversion de 85 % en 45 min. Il offre deux modes de fonctionnement, l'un en utilisation HTL, et l'autre en utilisation CHG (gazéification hydrothermale catalytique). Une unité pilote de 2 t/j a été livrée en 2016 chez Reliance Industries (Inde), appelée HPPS (Hydrothermal Processing Pilot System). Un projet de construction d'une unité de 10 t/j pour le centre de traitement des boues de station d'épuration de Vancouver Metro (Canada) est actuellement en développement.

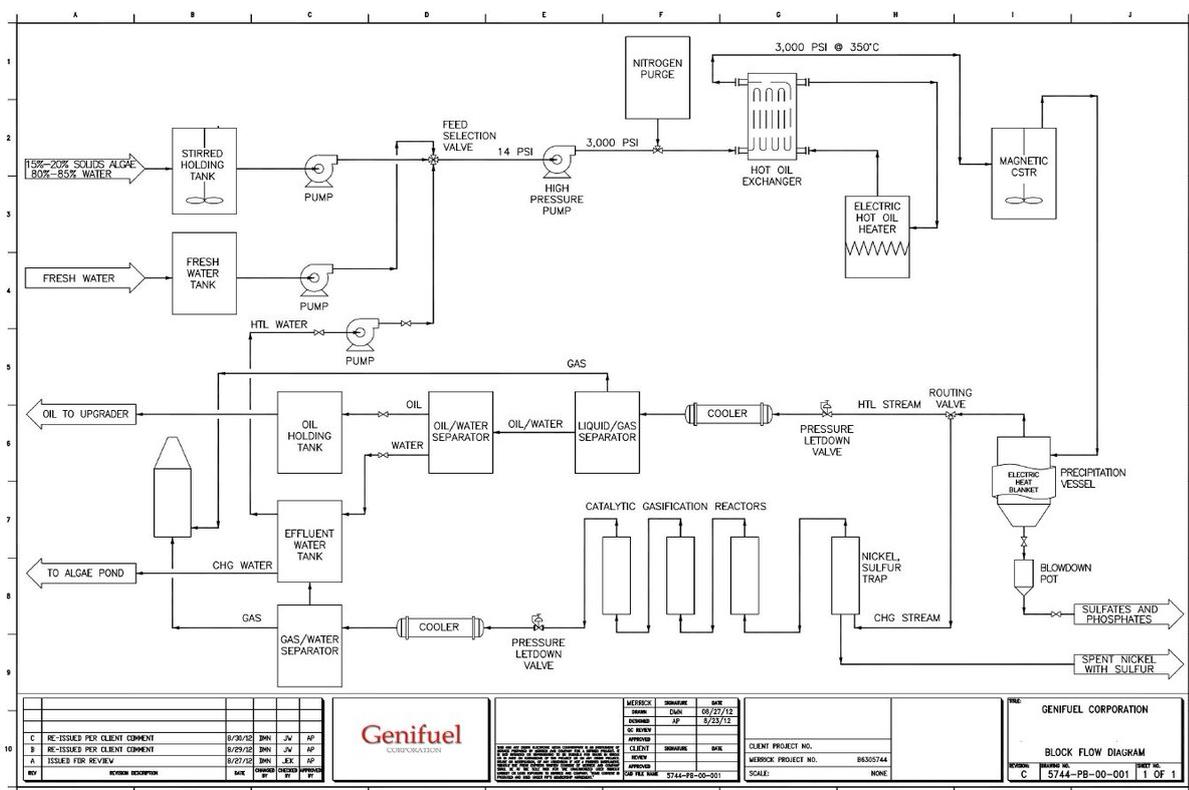


Figure 7 : Schéma PFD du procédé de liquéfaction hydrothermale développé par le PNNL (source : Geniefuel)

Steeper Energy a installé une unité pilote à l'Université d'Aalborg (Danemark) d'une capacité de production d'environ 80 L/j (procédé supercritique). Leur procédé, appelé

Hydrofaction™, utilise comme matières premières de la biomasse, de la tourbe, des résidus de papeterie et des résidus forestiers. L'huile ainsi produite présente un PCS compris en 36 et 40 MJ/kg, une faible teneur en oxygène (5 à 12 % en masse) et une faible viscosité. Les rendements énergétique et carbone annoncés sont respectivement de 80 % et 60 %. Steeper Energy envisage de développer non seulement un démonstrateur d'ici 2018 pour produire jusqu'à 4800 L/j d'huile, mais aussi une unité de post-traitement des huiles d'une capacité de 1600 L/j.

Muradel a initialement développé son procédé (sous-critique) en utilisant des micro-algues. La société élargit désormais son procédé de liquéfaction à d'autres intrants tels que des pneumatiques ou bien des déchets solides organiques (procédé SCWR, plateforme Green2black™). Le procédé SCWR comporte trois principales étapes : le prétraitement (épaississement), la conversion (liquéfaction hydrothermale), et le post-traitement (fractionnement et extraction). Le prétraitement uniformise la taille des particules et produit une suspension de solide de 30 % en masse. Le processus de conversion se déroule dans des conditions sous-critique (350°C et 200 bar). Le produit issu de la liquéfaction hydrothermale est composé d'hydrocarbures, d'inorganiques et d'eau qui sont ensuite séparés. Par cette technologie, 60 % de la fraction organique est converti en bio-huile qui présente un PCS d'environ 30 MJ/kg.

Licella a développé un procédé de liquéfaction hydrothermale catalytique (Cat-HTR) pour traiter des résidus de biomasse non comestible, des plastiques, et des lubrifiants usagés. Licella cherche à vendre et intégrer sa technologie auprès des industries papetières pour en valoriser les résidus. Une unité pilote a été construite à Somersby (Australie) ainsi qu'un démonstrateur commercial de petite taille.

d. Comparaison des procédés et des propriétés physico-chimiques des huiles

Un rapide aperçu des procédés de pyrolyse et de liquéfaction hydrothermale est donné dans le tableau comparatif suivant (Tableau 3).

Procédé	Pyrolyse rapide	Liquéfaction
Humidité de la biomasse	Très faible	faible à très forte
Température	450-500°C	300-400°C
Pression	1 bar	100-250 bar
Temps de séjour	< 1 min	5 à 15 min
Rendement massique huile	60 – 70 %	30 – 50 %
Rendement carbone	60 – 70 %	60 %

Tableau 3 : Conditions expérimentales des différents procédés de conversion thermo-chimique.

Les huiles issues de ces procédés de conversion thermo-chimique présentent de grandes différences :

- les huiles pyrolytiques sont très instables thermiquement et possèdent un pouvoir calorifique plus faible que celui des huiles de liquéfaction. Elles sont également acides et peuvent contenir jusqu'à 25 % d'eau. Elles sont totalement immiscibles dans les hydrocarbures et présentent une teneur en oxygène relativement élevée (35 %) ;
- les huiles de liquéfaction ont une teneur en oxygène plus faible mais leur viscosité est très élevée. Elles sont stables et présentent un pouvoir calorifique pouvant se rapprocher de celui des hydrocarbures.

La composition chimique des huiles (pyrolytique ou de liquéfaction) et leurs propriétés physico-chimiques sont étroitement liées à la nature de la biomasse utilisée. Elles restent cependant différentes de celles des hydrocarbures. Un résumé des propriétés des huiles est présenté dans le Tableau 4.

Nature huile	Pyrolytique	Liquéfaction
Teneur en H ₂ O (%)	15 à 30	5
Teneur en oxygène (%/matière sèche)	35 à 45	10 à 15
Teneur en azote (%/matière sèche)	<0.3	0.1 à 10
Rapport H/C	0.1 à 0.2	0.1
Masse volumique (g/l - 22°C)	1.1	1.1
Viscosité (cP - 50°C)	10 à 100	>1500
Stabilité thermique	Non	Oui
Miscibilité hydrocarbures	Immiscible	Immiscible à miscible
Pouvoir calorifique (MJ/kg)	10 à 19	23 à 37

Tableau 4 : Propriétés des huiles de pyrolytique et de liquéfaction, d'après INERIS, Douglas et al (2015), Steeper Energy, VTT.

Le CAPEX estimé pour construire une unité de pyrolyse rapide, d'une capacité de 2000 t/j, serait équivalent à celui d'une unité de liquéfaction hydrothermale (Tableau 5)². Il faut cependant considérer qu'une unité de 2000 t/j est énorme et pas très réaliste.

Les coûts estimés de production des huiles calculés par ces mêmes auteurs varieraient peu sur le plan énergétique (entre 14 et 16\$/Gj), tandis qu'il serait bien différent sur le plan matière (entre 230 à 450\$/t) (cf. Tableau 5). Le coût de production (en \$/t) d'huile pyrolytique est inférieur à celui d'huile de liquéfaction car le rendement massique des procédés de pyrolyse est supérieur à celui des procédés de liquéfaction. En revanche, puisque le pouvoir calorifique des huiles de liquéfaction est supérieur à celui des huiles de pyrolyse rapide, les coûts de production (en \$/GJ) des procédés de pyrolyse et de liquéfaction sont similaires.

	CAPEX (million \$)	Coût de production (\$/GJ)	Coût de production (\$/t)
Pyrolyse	231	16	231
Liquéfaction	195	14,5	449

Tableau 5 : Estimation du CAPEX et des coûts de production pour une unité traitant 2000 t/j de biomasse sèche, d'après Tews et al. 2014.

Ces estimations sont assez proches des coûts annoncés par les principaux producteurs mondiaux d'huile de pyrolyse et de liquéfaction puisque ENSYN (pyrolyse), Licella (HTL) et Steeper Energy (HTL) annoncent, respectivement, des coûts de revient

² d'après Tews et al. "Biomass direct liquefaction options: technic-economic and life cycle assessment. PNNL-23579," Pacific Northwest National Laboratory, Tech. Rep., 2014

de 22\$/GJ, 14-20\$/GJ et 13\$/GJ. Pour donner quelques ordres de grandeurs, et bien que les bio-huiles ne soient pas directement comparables au pétrole, ces coûts de revient sont supérieurs à celui du pétrole lorsque ce dernier est à 50\$/baril (soit environ 8 \$/GJ).

e. Les procédés de traitement des huiles de pyrolyse et de liquéfaction

i. Description des procédés

Les huiles ne peuvent pas être directement utilisées en tant que biocarburants tant leurs propriétés physico-chimiques diffèrent des carburants fossiles. En outre, suivant la nature de la biomasse utilisée, la teneur en azote et en soufre dans les huiles peut être à l'origine d'émissions polluantes lors de la combustion (NO_x, SO_x). Les molécules oxygénées engendrent, quant à elles, des problèmes de corrosion (acidité) et de stabilité thermique. Le post-traitement des huiles est donc une étape nécessaire pour augmenter leur stabilité et leur pouvoir calorifique, ce qui passe par la réduction de leur teneur en eau, en oxygène, en soufre, en azote, en particules solides. Différents types de traitements sont possibles selon l'usage envisagé et les propriétés de l'huile. Ils peuvent être :

- la filtration sur membranes céramiques pour extraire les particules solides,
- l'addition de solvant alcoolique pour réduire la viscosité,
- l'estérification des acides contenus dans les huiles,
- l'hydrotraitement des huiles pour retirer le soufre, l'oxygène et l'azote,
- le craquage catalytique des huiles.

De nouvelles méthodes et de nouveaux catalyseurs ont été étudiés et développés ces dernières années pour améliorer le post-traitement des huiles. Wolter Prins, (Université de Ghent) cite en particulier :

- le craquage acide avec éthanol supercritique,
- le réformage en phase aqueuse suivi d'une déshydratation et d'une hydrogénation,
- l'estérification des bio-huiles pyrolytiques en phase liquide ou gaz,
- la distillation réactive,
- le développement de catalyseurs acides et basiques solides,
- le réformage à la vapeur.

ii. Développement et maturité des technologies

A ce jour, les deux voies principales pour traiter les huiles pyrolytiques et de liquéfaction sont l'hydrotraitement et le craquage catalytique (FCC).

Dans le cas de l'hydrotraitement, deux types de catalyseurs sont utilisés :

- des métaux nobles (Pt, Pd ou Ru, supportés sur charbon ou alumine),
- des métaux sulfurés (CoMo, NiMo, supportés sur alumine) utilisés dans les procédés d'hydrodésoxygénation (HDO), hydrodénitrogénéation (HDN) et hydrodésulfuration (HDS).

Ces catalyseurs permettent de réduire efficacement les teneurs en oxygène (jusqu'à 96 %), en azote (jusqu'à 99,5 %), et la viscosité. L'hydrotraitement permet

également d'augmenter le pouvoir calorifique des bio-huiles (jusqu'à 30 %) et leur stabilité³.

Dans le cas du craquage catalytique, des zéolithes (ZSM-5 par exemple) sont utilisées et des stratégies de co-processing sur des installations existantes de raffineries sont étudiées et développées.

Les huiles de liquéfaction hydrothermale, du fait de leur teneur plus faible en oxygène, sont plus faciles à traiter que les huiles pyrolytiques qui sont difficiles à injecter dans les réacteurs du fait de leur instabilité thermique.

Le TRL de ces technologies est entre 4 et 5 pour l'hydrotraitement et 6 et 7 pour le craquage catalytique.

iii. Etat des verrous technologiques

Le principal problème rencontré au niveau du traitement des huiles de liquéfaction hydrothermale concerne leur forte viscosité (problèmes de pompage et d'injection).

L'instabilité thermique des huiles pyrolytiques qui induit un risque de polymérisation de ces dernières dès 80°C est également ressenti comme un verrou technologique. Pour ces huiles, il est donc nécessaire de prévoir différents étages d'hydrotraitement avec un premier niveau à basse température.

Pour le craquage catalytique, les phénomènes de désactivation et de cokage observés (du fait d'un CCR⁴ élevé pour les huiles de pyrolyse et de liquéfaction) ne sont pas perçus comme des verrous technologiques ; ils entraînent une hausse du prix de production due à l'augmentation de la consommation en catalyseurs. Des efforts de recherche s'orientent donc sur le développement de catalyseurs spécifiques et robustes qui permettent de répondre à cet inconvénient.

Le sodium potentiellement présent dans les huiles est également problématique car il empoisonne les catalyseurs utilisés dans le craquage catalytique ; toutefois, ce cas de figure n'est pas vu comme un verrou technologique car un prétraitement des huiles (ou de la biomasse) peut résoudre ce problème.

iv. Principaux acteurs industriels

Il existe peu d'acteurs industriels dont la seule activité repose sur le traitement des huiles pyrolytiques et/ou de liquéfaction. En effet, le post-traitement des huiles est une problématique abordée directement par les producteurs d'huile et le TRL des procédés d'hydrotraitement est trop faible à ce jour pour commercialiser une quelconque technologie. Jusqu'à présent, les industriels qui présentent de telles solutions sont ceux-là mêmes qui produisent les huiles, tels que Steeper Energy (hydrotraitement), RTI, Ensyn-Petrobras ou UOP (craquage).

³ Etude de la production de bio-huile par liquéfaction hydrothermale de résidus agroalimentaires et de leurs molécules modèles, thèse de Doctorat, Maxime Déniel, 2016

⁴ CCR : Carbone Conradson, caractéristique d'un combustible liquide à former un résidu solide carboné lorsqu'il est porté à haute température

II. Application d'intérêt, maturité des technologies et perception des acteurs

Les huiles pyrolytiques et de liquéfaction hydrothermale peuvent être valorisées comme combustibles de substitution dans des chaudières ou, après un post-traitement adapté mais complexe et coûteux, comme biocarburant ou molécules d'intérêt pour des synthèses de chimie de spécialité. Les procédés utilisés pour générer ces huiles peuvent également être vus comme des procédés de traitement en eux-mêmes, notamment dans un contexte écologique et économique de traitement et de valorisation de déchets.

a. Application pour des procédés de combustion/chaleur/cogénération

i. Etat des lieux

Sans post-traitement, les huiles peuvent être valorisées en tant qu'alternative au fioul lourd pour produire de la chaleur dans l'industrie ou pour le chauffage collectif. Les besoins énergétiques dans ce secteur sont conséquents (30Mtep/an pour l'Europe) et, selon le cours du baril de pétrole, le marché potentiel européen est estimé, a minima, entre 14 et 19 millions de tonnes de bio-huile⁵.

Une autre valorisation possible est d'utiliser ces huiles pour alimenter des moteurs à combustion interne stationnaires (ICE) ou des turbines pour de la cogénération. Toutefois, cette application est encore au stade de recherche et développement et l'adaptation des moteurs stationnaires à ces huiles n'est pas triviale. Un premier retour d'expérience est apporté par VTT en collaboration avec le motoriste Wärtsilä (projet Bioliquids-CHP).

Le travail réalisé avait pour but d'étudier l'utilisation d'huiles pyrolytiques non post-traitées dans un moteur à combustion interne puis dans une turbine, dans le cadre d'une production combinée de chaleur et d'électricité, en suivant notamment les rendements thermiques, les émissions et la tenue mécanique des composants. Pour utiliser des huiles pyrolytiques comme combustible, VTT a utilisé un moteur standard (monocylindre de marque JIANGDONG). D'autres essais ont été réalisés sur un moteur 4 cylindres (Valmet 420DS-engine) et sur un moteur 18 cylindres (Vasa 18V32)⁶. Les conclusions principales de ces tests sont les suivantes :

- une injection préliminaire de diesel est nécessaire en phase de démarrage,
- l'efficacité thermique mesurée est encourageante (45 %),
- des problèmes de stabilité des huiles dans le système d'injection liés à la température ont été observés,
- la teneur en eau dans l'huile de pyrolyse réduit la montée en température dans la chambre de combustion ce qui est bénéfique pour la réduction des NOx,
- la teneur en solides dans les huiles pyrolytiques doit être à un niveau très bas pour limiter les phénomènes d'abrasion,
- une usure importante des matériaux se produit (corrosion et abrasion),
- les joints standards utilisés dans le dispositif d'alimentation ne résistent pas au pH faible des huiles.

Suite à ces tests préliminaires, une évaluation énergétique plus globale a été menée sur un générateur diesel Wärtsilä de 1,5 MWe. Des modifications ont été menées au

⁵ Doug Bredley, Climate change solutions, markets for pyrolysis oil, 2015, présentation FAO

⁶ The use of biomass derived fast pyrolysis liquids in power generation: Engines and turbines, Publication No. 561

niveau du réservoir d'alimentation et de l'injection du générateur pour être compatible avec des bio-huiles. Les principaux résultats observés étaient les suivants :

- un préchauffage très léger (<90°C) est préconisé pour réduire la viscosité des huiles et leur transport dans les dispositifs d'alimentation et d'injection,
- des dépôts conséquents de calamine sur les parois des cylindres et sur les injecteurs sont observés,
- une pollution des huiles de lubrification par de l'huile pyrolytique a été notée - due au défaut d'étanchéité au niveau des segmentations - ce qui augmente le risque de rupture des films lubrifiants, donc une casse moteur.

L'utilisation d'huiles pyrolytiques mélangées avec d'autres carburants (diethyl glycol dimethyl ether, et diesel) a aussi été étudiée. Avec le DGDE, quelle que soit la composition du mélange (15,8-30-44,1-56,8 % en masse d'huiles pyrolytiques), des dépôts de calamines ont été observés. Des problèmes notables de corrosion ont été remarqués uniquement pour des mélanges supérieurs à 44,1 %. Les tests réalisés avec une émulsion diesel/huiles pyrolytiques (96/4 vol.) sur un générateur 12 cylindres Mercedes-Benz n'ont révélé, en revanche, aucun problème majeur.

Les conclusions principales de tous ces tests sur générateur/moteur diesel sont donc les suivantes :

- nécessité de micro-filtrer les huiles pyrolytiques, de les hydro-traiter pour améliorer leur stabilité thermique et retirer les composés à l'origine des dépôts de calamine,
- utiliser des matériaux et des joints résistants à la corrosion chimique des huiles pyrolytiques,
- préchauffer légèrement les huiles pyrolytiques pour réduire leur viscosité (idéalement à 50°C et pas au-delà de 90°C),
- l'eau présente dans les huiles pyrolytiques a un impact positif car elle limite la montée en température de la réaction de combustion, donc réduit la formation de NOx,
- le mélange des huiles pyrolytiques avec des composés oxygénés d'indice de cétane élevé et la formation d'émulsions avec du diesel sont deux voies possibles de valorisation des huiles pyrolytiques.

Des tests⁷ ont également été menés par Orenda Aerospace en alimentant des turbines à gaz modifiées avec des huiles pyrolytiques. La turbine étudiée était une GT2500 de 2,5 MWe (15000tr/min), conçue et construite par Zoeya-Mashproekt. Les principaux résultats observés sont les suivants :

- un préchauffage des huiles pyrolytiques (70-90°C) avant injection est nécessaire pour réduire la viscosité (<10 cSt),
- les cendres et autres contenus solides dans les huiles pyrolytiques doivent être retirés par filtration pour limiter l'abrasion des pièces en contact avec l'huile,
- les matériaux qui composent la turbine et les dispositifs d'alimentation doivent résister à l'acidité (utilisation d'aciers inoxydables austénitiques),
- les joints d'étanchéité utilisés doivent être en polyéthylène haute densité et fluoré,

⁷ The use of biomass derived fast pyrolysis liquids in power generation: Engines and turbines, Publication No. 561

- il est nécessaire de modifier la chambre de combustion de la turbine à gaz selon la nature des huiles pyrolytiques utilisées ; une chambre de combustion "type silo" est la mieux adaptée pour ce type d'application,
- les buses d'injection doivent être adaptées aux huiles pyrolytiques car des problèmes d'alimentation en pleine charge peuvent être observés (sprays de mauvaise qualité), ce qui engendre une diminution de puissance considérable,
- un encrassement prononcé de la chambre de combustion et des pales des turbines a été relevé et seul un nettoyage mécanique permet son élimination,
- un carburant classique (diesel) doit être utilisé lors des phases de démarrage et d'arrêt de la turbine pour faciliter la montée en température de la chambre de combustion et faciliter le nettoyage des dépôts laissés par la combustion des huiles pyrolytiques sur les pales des turbines.

L'utilisation des bio-huiles dans ces turbines et autres générateurs est potentiellement en concurrence avec l'utilisation de biogaz ou de syngaz, issus respectivement de méthanisation de biomasses fermentescibles et de gazéification de biomasses ligno-cellulosiques. Toutefois, l'utilisation des bio-huiles dans ce domaine présente un réel avantage car la production d'électricité est plus flexible qu'avec un procédé de gazéification qui requiert un temps de démarrage plus important (plusieurs heures) ; cette flexibilité est particulièrement intéressante pour produire de l'électricité dans un contexte insulaire ou pour répondre rapidement à des pics de consommation qui nécessitent des démarrages et arrêts rapides et successifs de turbines (ou générateurs).

Ceci étant, l'utilisation des bio-huiles pour la simple production de chaleur reste, à ce jour, l'application la plus immédiate car c'est la plus simple à mettre en œuvre (pas de post-traitement de l'huile ni de modification importante des brûleurs).

ii. Contexte économique et réglementaire

Au niveau de la réglementation, les Etats-Unis ont émis 5 standards ASTM sur l'huile de pyrolyse. Concernant l'application combustible/chaleur, deux standards ont été approuvés (ASTM D7544) (cf. Tableau 6).

Property	Grade G	Grade D
Gross heat of combustion, min (MJ/kg)	15	15
Water content, max (mass %)	30	30
Pyrolysis solids content, max (mass %)	2.5	0.25
Kinematic viscosity at 40 °C, max (mm ² /s)	125	125
Density at 20 °C (kg/dm ³)	1.1 - 1.3	1.1 - 1.3
Sulfur content, max (mass %)	0.05	0.05
Ash content, max (mass %)	0.25	0.15
pH	Report	Report
Flash point, min (°C)	45	45
Pour point, max (°C)	-9	-9

Source : <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.energyfuels.5b00026>

Tableau 6 : Standards fixés par l'ASTM pour l'utilisation des bio-huiles en tant que combustible.

Au niveau européen, une première norme (EN16900) sur les bio-huiles pour les brûleurs industriels (> 1MWth) est en cours d'approbation et devrait être publiée.

Dans le cadre de l'utilisation de bio-huiles pour des applications de chauffage, la législation européenne, suivant la directive 2010/75/UE, dite IED, encadre les émissions

industrielles. Toutefois, dans le cas du traitement de déchets par pyrolyse, une exemption a été introduite dans le texte de loi par la condition suivante :

«[une exemption au présent texte est autorisée pour le traitement de déchets par pyrolyse] si les gaz issus de ce traitement thermique des déchets sont purifiés au point de n'être plus des déchets avant leur incinération et s'ils ne peuvent donner lieu à des émissions supérieures à celles résultant de l'utilisation de gaz naturel ».

iii. Perception des acteurs industriels

Selon les acteurs industriels, l'utilisation des bio-huiles dans cette application est la plus facile à mettre en œuvre dans les prochaines années. Toutefois, ils ont conscience que cette application peut être mise en difficulté face à la concurrence du gaz naturel, du méthane issu des procédés de méthanisation et des gaz combustibles issus des procédés de gazéification. La méthanisation est aussi ressentie comme étant un procédé concurrentiel qui peut freiner l'utilisation des bio-huiles, même si les ressources en biomasse ne sont pas les mêmes. Le problème d'accès aux ressources est aussi soulevé comme étant un frein au développement de cette application car les ressources peuvent être éloignées des endroits où le besoin en chauffage est le plus important. La capacité à stocker et transporter la bio-huile n'est pas perçue comme un avantage décisif.

b. Application pour la chimie de spécialité

i. Etat des lieux

Les produits d'intérêts contenus dans les huiles sont principalement les phénols, les acides organiques et les molécules aromatiques.

Les utilisations des huiles dans le domaine de la chimie de spécialité présentent beaucoup de restrictions et de limites :

- elles sont coûteuses car un traitement des huiles est nécessaire (soit par pyrolyse catalytique, soit par post-traitement) afin d'orienter la sélectivité vers les produits voulus,
- elles nécessitent des procédés d'extraction, de séparation et de purification pour valoriser une petite fraction de l'huile,
- elles ne permettent pas de valoriser l'intégralité des fractions des huiles,
- elles sont moins souples que celles décrites dans la section II.a car elles requièrent une qualité constante de la biomasse utilisée pour assurer une composition constante des huiles.

De telles applications ne sont pas encore développées aujourd'hui et font l'objet de recherche et développement. Deux principaux acteurs ont été identifiés dans ce domaine :

- Anellotech, grâce à un procédé de pyrolyse catalytique, est un exemple de valorisation de la biomasse dans l'application de la chimie de grands intermédiaires (production de BTX). Toutefois, leur technologie n'est pas basée sur l'exploitation directe de bio-huiles,
- ENSYN/Red Arrow commercialise un arôme alimentaire, connu sous l'appellation de « fumée liquide ».

ii. Contexte économique et réglementaire

Le marché de la chimie de spécialité est un marché de niche à haute valeur ajoutée, sensible au prix et à l'innovation. Malgré la volonté des pays industrialisés à développer

une chimie raisonnée et bio-sourcée, l'utilisation des bio-huiles dans ce secteur ne semble cependant pas très étudiée.

Aujourd'hui, à notre connaissance, il n'existe aucune réglementation spécifique qui régisse et encadre l'utilisation des huiles comme matière première bio-sourcée ; il n'y a donc pas de contexte économique ou réglementaire favorisant (ou défavorisant) le développement de ce secteur d'application.

iii. Perception des acteurs industriels

Il semblerait que l'intérêt des acteurs industriels ne soit pas très développé. En effet, il est assez difficile de séparer et valoriser des fractions des bio-huiles à un coût compétitif. Toutefois, les bio-huiles issues de la lignine semblent être perçues avec intérêt pour produire des aromatiques et des phénols.

La valorisation chimique des bio-huiles peut être très vite concurrencée par des procédés par voies enzymatiques ou biochimiques qui sont plus sélectives.

c. Application aux biocarburants

i. Etat des lieux

L'utilisation des bio-huiles en tant que bio-carburant représente un marché mondial de gros tonnage (entre 20 et 45 millions de litres / an d'ici 2030). Le but de cette application est de se substituer partiellement aux carburants fossiles non renouvelables dans le transport terrestre, maritime et aérien. C'est un secteur peu sensible à l'innovation mais très sensible au prix. L'utilisation des huiles ne peut être envisageable directement car elles ont des caractéristiques physico-chimiques très éloignées des carburants d'origine fossile (c.f. section I.d). En outre, le marché des carburants est soumis à des spécifications sévères à très sévères, notamment sur les taux de soufre, d'azote, et d'eau ; il est donc nécessaire de post-traiter les huiles (voies d'hydrotraitement) et de les convertir en molécules plus légères (hydrocraquage/FCC).

Cette application est encore au stade de recherche et de développement car le post-traitement des huiles n'est pas encore mature et aucune unité commerciale n'existe à ce jour. Des études sont menées sur la possibilité de co-traitement par FCC dans des raffineries conventionnelles pour réduire le coût d'investissement ; des tests de faisabilité sont en cours d'étude, notamment sur la proportion exacte de bio-huile à incorporer pour préserver les rendements et le bilan sur le carbone. Les résultats obtenus par ENSYN-PETROBRAS semblent encourageants.

Cette application soulève en outre d'autres questions sur :

- la compatibilité des biocarburants obtenus avec les lubrifiants,
- l'encrassement possible des chambres de combustion et des systèmes de purification des émissions (échappement),
- la compatibilité des systèmes d'injection actuels (directe ou indirecte).

ii. Contexte économique et réglementaire

Dans un contexte européen, pour lequel la consommation de carburant est en constante augmentation, les objectifs d'incorporation de biocarburants dits avancés ont été portés de 0,5 à 3,6 % d'ici 2030, au détriment des biocarburants de première génération (qui passent de 7 à 3,8 %). En France, la loi de transition énergétique est plus optimiste et fixe pour objectifs d'incorporer 15 % de biocarburants d'ici 2030, avec une large part de biocarburants de première génération.

Aujourd'hui, à l'heure de la rédaction de ce rapport (été 2017), le coût du baril et la politique de taxation du CO₂ des énergies fossiles en Europe ne favorisent pas le développement des biocarburants dont le prix de production reste relativement élevé.

Les estimations du coût de production de biocarburant à partir des huiles de pyrolyse et de liquéfaction hydrothermale, pour une unité de traitement de 2000t/j de biomasse sèche, varient entre 17 et 30\$/GJ (Tableau 7). Dans l'hypothèse d'un PCS de 42MJ/kg et d'une masse volumique de 0,85kg/L, le coût de revient du biocarburant se situerait donc entre 0,60 et 0,94\$/L, ce qui représente un prix du baril entre 96 et 150\$.

	CAPEX (en million de \$)	Coût de production (\$/GJ)	Coût de production (\$/t)
Pyrolyse + traitement	358	26,3	1103
HTL + traitement	244	16,9	712

Tableau 7 : Estimation des coûts de production pour une unité traitant 2000 t/j de biomasse sèche

D'après cette étude, le carburant issu d'huiles de liquéfaction hydrothermale présenterait un coût de production moins important que celui issu du traitement des huiles de pyrolyse. Les auteurs avancent deux explications :

- le traitement des huiles de liquéfaction hydrothermale est plus facile que celui des huiles de pyrolyse donc moins onéreux (c.f. section I.e.ii),
- le traitement des huiles de liquéfaction hydrothermale est réalisé en co-processing ou par la réutilisation et le réaménagement d'installations type FCC déjà existantes (revamp).

Il faut cependant souligner les fortes incertitudes qui pèsent sur ces chiffres et le faible nombre d'études comparatives existantes.

iii. Perception des acteurs industriels

Les acteurs industriels ont conscience que les technologies développées pour produire des biocarburants à partir des huiles de pyrolyse ou de liquéfaction hydrothermale présentent des niveaux de maturité différents. Les procédés de gazéification pour produire des biocarburants sont ressentis comme étant très concurrentiels car ils sont technologiquement plus avancés (stade démonstrateur tel que BioTfuel). La valorisation des bio-huiles issues de la liquéfaction hydrothermale en biocarburant pourrait être plus facile que celle des huiles de pyrolyse, mais cela reste à prouver à une échelle significative.

L'étendue du marché accessible par ces huiles est ressenti comme ayant des débouchés locaux en s'inscrivant dans un contexte où plusieurs technologies pourraient exister (gazéification, bio-diesel HVO/HEVA).

d. Application environnementale par la valorisation de déchets

Cette application est particulière car elle a pour objectif principal le traitement de la matière première, considérée comme « déchets » (boues de station d'épuration, déchets alimentaires, combustibles solides de récupération, ...). La production de bio-huiles et de charbon permet de densifier et d'uniformiser les déchets, tandis qu'un gaz combustible peut être co-produit. Ce marché est en croissance en raison du développement des activités anthropologiques et de la croissance de la population mondiale. Ce secteur est étroitement lié aux appels d'offres publics et aux réglementations locales sur le

traitement et la valorisation des déchets. Il est en outre peu sensible à l'innovation. Les freins au développement de cette application sont variés : la diversité des intrants et les contaminants qu'ils peuvent contenir peuvent être problématiques suivant le procédé de valorisation utilisé et la maturité de la technologie est relativement faible car à l'étape de recherche et développement. En outre, le traitement des déchets, suivant leur composition, peut entraîner des problèmes de traitement si des produits toxiques sont formés. Enfin, cette application est directement concurrencée par les procédés d'incinération, de gazéification et de méthanisation.

Un revenu pour le traitement d'un déchet permettrait d'améliorer la rentabilité économique du procédé de liquéfaction hydrothermale. C'est dans cet objectif que Genifuel, en collaboration avec le PNNL, a monté un projet de valorisation des eaux usées du métro de Vancouver. Ce modèle économique serait donc à explorer davantage pour réduire les coûts de revient de la production et améliorer la compétitivité des bio-huiles face à d'autres combustibles. Néanmoins la qualité des huiles obtenues pose évidemment beaucoup d'interrogations.

e. Synthèse des enjeux technico-économiques

Quatre principaux défis technico-économiques ont été identifiés ; quelles que soient les applications et technologies considérées, ces défis sont, par ordre décroissant d'importance :

- la montée en échelle des installations qui atteint l'optimum également avec la disponibilité de la ressource,
- la réduction des coûts (CAPEX, OPEX),
- l'amélioration de la qualité des bio-huiles,
- convaincre des investisseurs.

L'enjeu majeur des années à venir sera de renforcer la compétitivité de ces filières (combustible, carburant) par rapport à d'autres solutions techniques alternatives telle que la gazéification + Fischer-Tropsch. Plusieurs pistes sont étudiées pour réduire les coûts de production :

- développer de nouveaux processus d'hydrotraitement qui réduisent la consommation d'hydrogène,
- rechercher et développer des nouveaux catalyseurs qui soient actifs à plus faible température et plus faible pression d'hydrogène,
- poursuivre les efforts de recherche et de développement sur le co-processing (dans le cas des hydrotraitements des bio-huiles) dans les raffineries existantes,
- améliorer l'efficacité énergétique des procédés,
- améliorer la flexibilité des procédés par rapport à la variabilité des intrants,
- améliorer la durée de vie des composants (notamment lutter contre la corrosion),
- améliorer la stabilité thermique des huiles de pyrolyse pour des raisons de stockage, transport et manutention.

III. Les bio-huiles dans le paysage français : constat et recommandations

La France n'a pas de secteur industriel assez développé pour rattraper son retard technologique (dans le cadre de la production d'huile par pyrolyse). Toutefois, il existe un certain nombre d'opportunités de développement dans la valorisation et l'utilisation de ces huiles. La force de ses laboratoires, de ses chercheurs, et de ses centres de recherche sont des atouts majeurs qu'il est nécessaire de soutenir dans cette perspective. Les opportunités de développement détectées sont variées. Les applications potentiellement intéressantes sont la production de chaleur (chaudières industrielles et résidentielles) et électricité par cogénération, ainsi que la production de biocarburant (à plus long terme).

a. Les freins et les menaces

Les industriels français ne semblent pas montrer un intérêt majeur au développement de la filière des biocarburants à partir de bio-huiles. Un frein majeur au développement de cette valorisation est avant tout le retard technologique accusé dans le domaine de la pyrolyse rapide et vouloir le rattraper semble peu convaincant tant le retour sur investissement serait faible.

Les énergies fossiles sont aujourd'hui très bon marché ce qui limite également le développement des biocarburants. De plus, l'usage du méthane semble privilégié, qu'il provienne du gaz naturel ou du biogaz.

b. Les atouts et les faiblesses

Les recherches scientifiques sur la pyrolyse rapide remontent aux années 80 pour se développer de manière exponentielle ces dix dernières années. Entre 2010 et 2015, sur le plan mondial, une augmentation de 97 % du nombre de publications scientifiques est notée, ce qui représente un cumul d'environ 4400 documents ; la thématique de la pyrolyse rapide (catalytique ou non) représente 61 % de la production scientifique liée au mot-clef « bio-huile ». La France, via le CNRS, est le premier acteur européen dans le domaine de la recherche et du développement dans cette thématique. D'autres instituts de recherche et de développement français viennent renforcer la position de la France dans le domaine : ce sont le CEA, l'IFPEN, le CIRAD. Sur le plan mondial, la France occupe la sixième place, toutes thématiques confondues. L'activité sur ce segment est largement dominée par la Chine (premier acteur mondial) et les Etats-Unis (second acteur mondial). Toutefois, les productions scientifiques et techniques américaines ne sont guère plus importantes qu'en Europe. Sur la pyrolyse rapide, la France occupe le 9^{ème} rang mondial ; sur la liquéfaction hydrothermale, la France occupe le 4^{ème} rang mondial ; sur le post-traitement des huiles, la France occupe le 4^{ème} rang mondial. Les laboratoires français et leurs chercheurs sont donc un atout majeur pour la France dans le paysage mondial.

Les industriels, en revanche, sont moins impliqués (directement) sur cette thématique bio-huiles. Total, Engie, Avril, Axens, Tereos, entre autres, ont privilégié depuis 2008 la gazéification (projets BioTfuel, GAYA) ou la conversion biochimique (projet FUTUROL) pour produire des biocarburants 2G. Si la Chine est le pays qui publie le plus dans ce domaine, ses acteurs industriels sont en revanche peu visibles, excepté Sinopec. Seuls les acteurs nord-américains et finlandais bénéficient d'un appui fort de leurs industries.

c. Recommandations pour la recherche et le développement en France

Dans le contexte français, les recommandations proposées pour la R&D sont les suivantes :

- pas de développement sur les procédés de pyrolyse rapide en raison du retard accumulé,
- recherche sur la combustion des bio-huiles (application chaleur/combustible), notamment dans les moteurs stationnaires,
- développement de la technologie de production d'huile par liquéfaction hydrothermale pour atteindre un TRL de 7,
- renforcement de la recherche sur des catalyseurs les plus adaptés dans le cadre de l'hydrotraitement et du craquage des bio-huiles (en post-process ou co-process) pour produire des biocarburants compétitifs,

Les acteurs industriels français pouvant être associés à ces développements sont, entre autres : Axens, Engie, Tereos, Total, TOPindustries, Veolia.

IV. Annexe : Présentation des résultats de l'étude

Production et usages de biohuiles : État des lieux et perspectives

GP1 – Energies issues de la biomasse

Consortium de Valorisation Thématique ANCRE



Alliance Nationale de coordination de la Recherche pour l'Énergie
CVT - Consortium de Valorisation Thématique

Objectifs

Cette étude stratégique du Consortium de Valorisation Thématique (CVT) de l'Ancre, vise à répondre aux besoins du Groupe Programmatique 1 (Energies issues de la biomasse). Besoins des membres du GP1 Ancre :

- **Panorama** actualisé des acteurs de la recherche dans ce domaine
- **Connaissance des innovations** protégées et potentiellement exploitées au niveau industriel
- Etude de **marché**

➔ **Finalité** : définir des orientations stratégiques pour la recherche en France

Etude réalisée et coordonnée par le **CEA Liten** et le **LRGP** (UMR 7274 CNRS – Université de Lorraine)

Tâche 1 : Cartographie des principaux acteurs et positionnement R&D

> Prestataire = TKM

Tâche 2 : Panorama du marché actuel et des tendances

> Tâche confiée au SBEM (Service Bibliométrie, Etudes et Marketing du CEA)

Tâche 3 : Synthèse finale et recommandations

> Tâche réalisée par le LRGP et le CEA Liten (soutien du CVT pour l'embauche de Vivian Houzelot au LRGP durant 4 mois)

Plan de la présentation

- 1. Contexte et applications potentielles**
- 2. Caractéristiques des huiles**
- 3. Bio-huiles en tant que combustible**
- 4. Bio-huiles pour bio-carburants**
- 5. Positionnement R&D française**
- 6. Synthèse des recommandations**

1-Contexte

Deux grandes voies pour biocarburants de deuxième génération :

- Gazéification + synthèse catalytique → biodiesel, SNG, méthanol, H₂...
- **Pyrolyse/liquéfaction → bio-huiles + up-grading → biocarburants**

De nombreuses technologies explorées depuis les années 1970 :

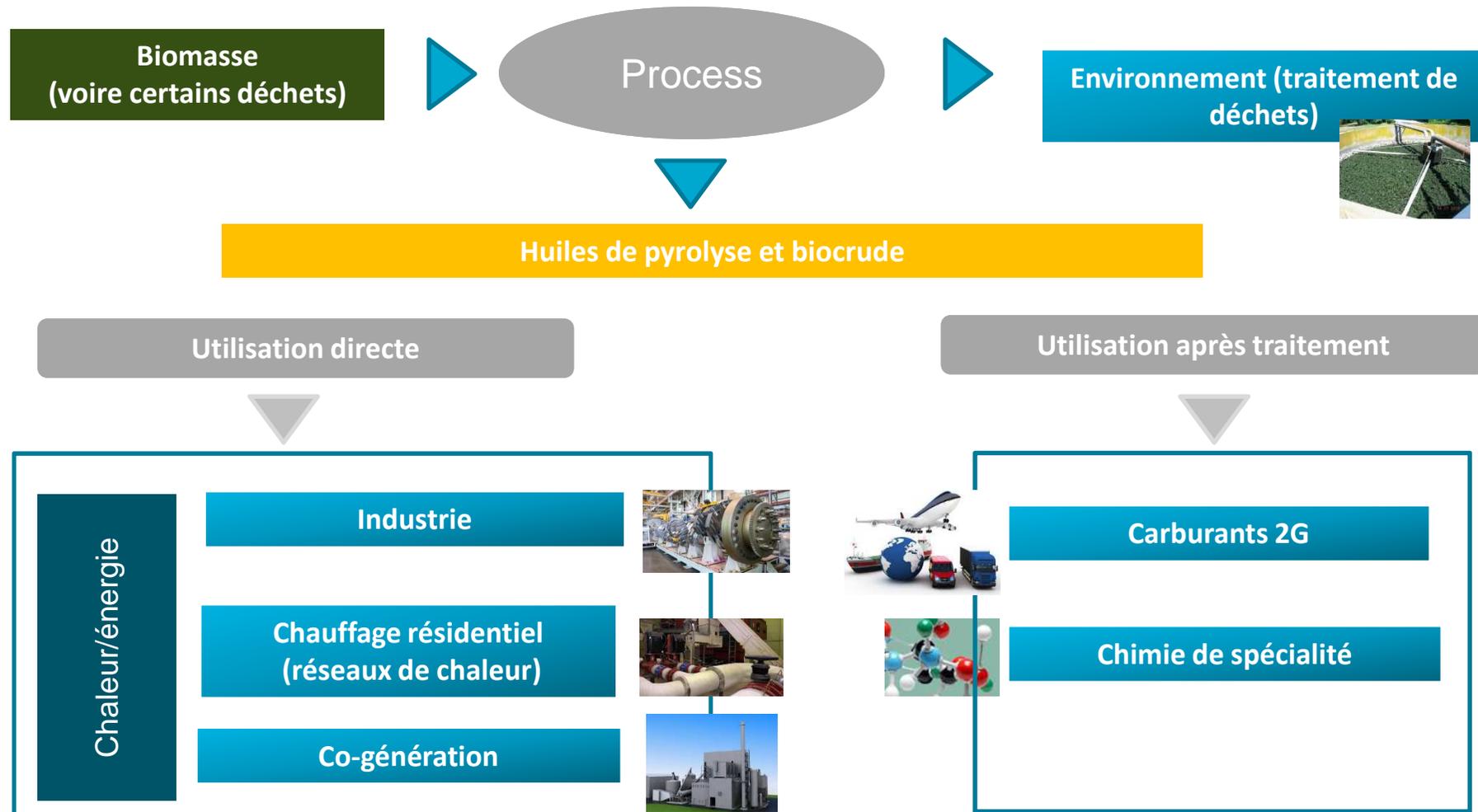
- Bio-huiles par voie sèche : **Pyrolyse rapide**, Pyrolyse catalytique, Hydro-pyrolyse
- Bio-huiles par voie humide : **Liquéfaction hydrothermale**
- Up-grading des bio-huiles par **Hydrotraitement** et/ou **Craquage catalytique**



Fortum Joensuu

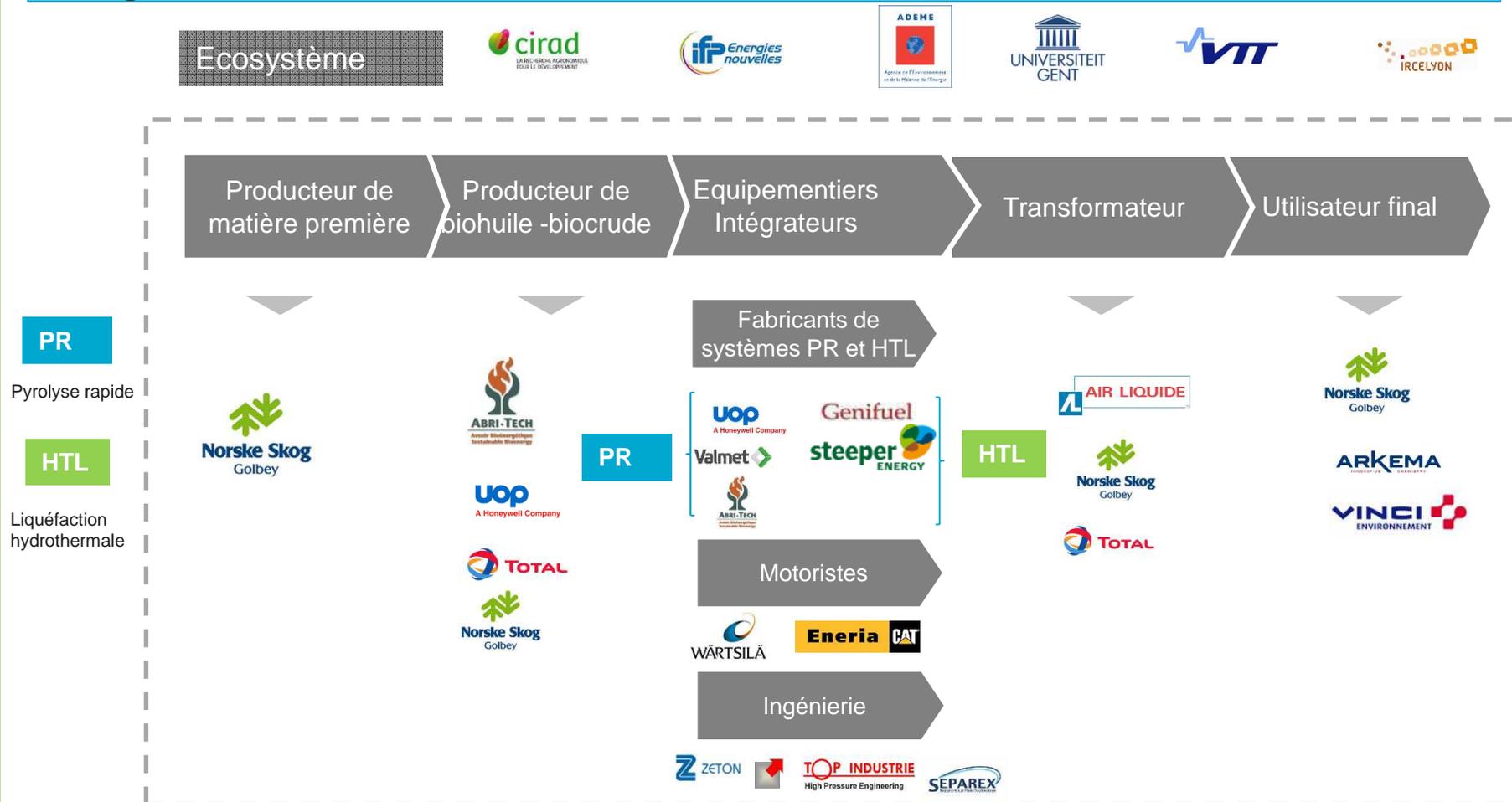
- Bio-oil capacity: 30 MW
- Annual production : 50 000 t/an de biooil (210 GWh), soit l'équivalent des besoins en chauffage de 10.000 ménages

1-Panorama des applications potentielles



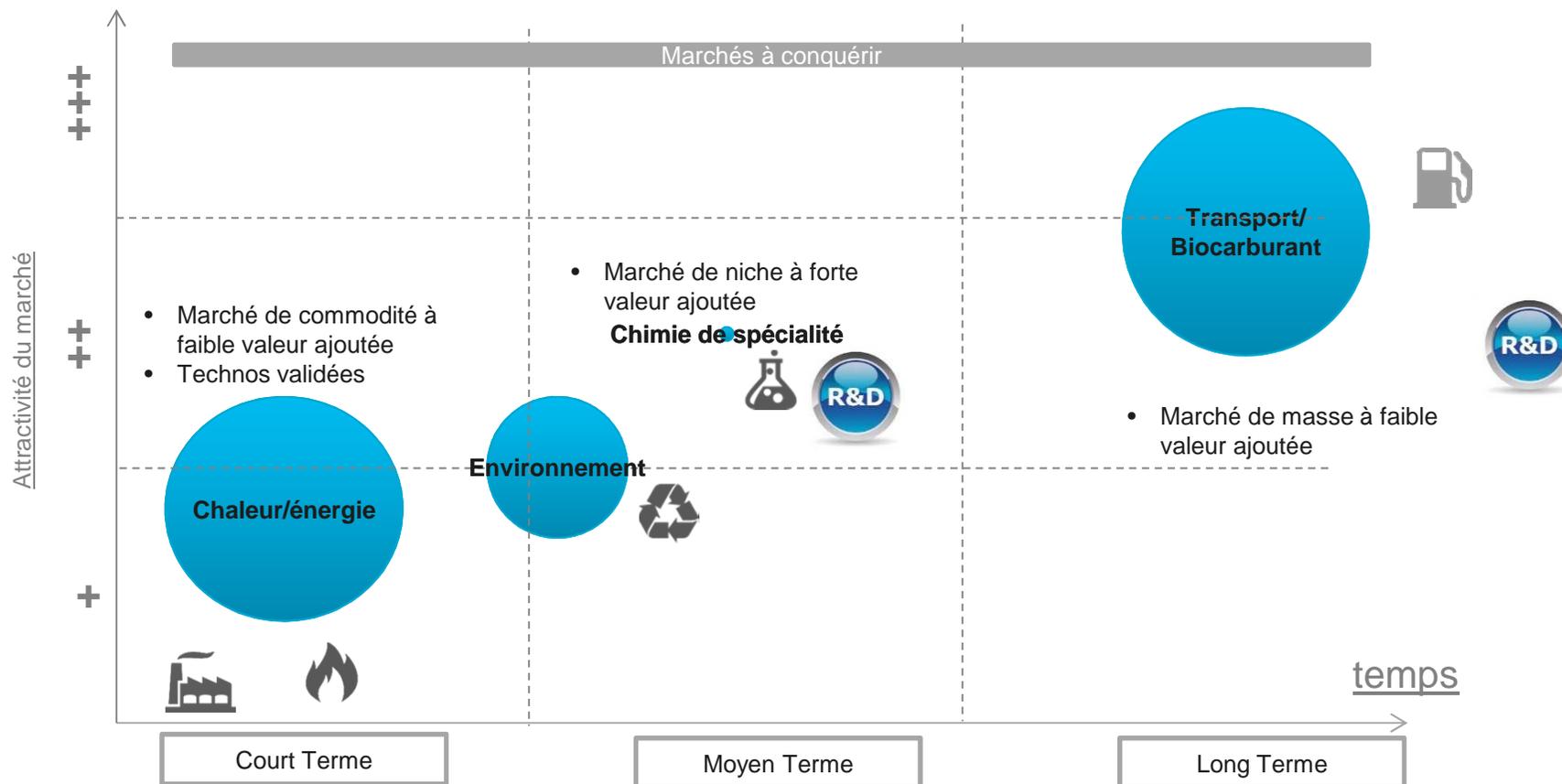
1-Chaine de la valeur bio huile et biocrude entretiens réalisés

- La majorité des acteurs interrogés sont des équipementiers ou des intégrateurs
- Un focus particulier a été effectué sur les fournisseurs de solutions de PR et HTL ainsi que sur les sociétés d'ingénierie



Certains industriels, peuvent intégrer plusieurs étapes de la chaîne de la valeur

1-Attractivité des Marchés /temps



- **La taille des bulles** reflète la taille de marché potentiel adressable estimée lors des entretiens (marché de masse, intermédiaire, marché de niche). Attention, il diffère du marché accessible
- **L'attractivité du marché** tient compte du poids de la réglementation, de la capacité à innover du secteur et de sa réceptivité (besoins exprimés, maturité des solutions) ainsi que de la facilité à identifier les clients

1-Marchés/acteurs

• Chaleur/énergie

Caractéristiques du marché	Les acteurs du marché
<ul style="list-style-type: none">• Remplacement du fioul lourd ou du gaz naturel pour production de chaleur dans l'industrie et dans le tertiaire, voire pour le chauffage urbain ; Alimentation moteur et turbines non mature (cogénération) .• Besoins importants (environ 30 Mtep/an pour le chauffage en Europe) mais projets dispersés et de petite taille –marchés locaux• Secteur peu sensible à l'innovation	<ul style="list-style-type: none">• Energéticiens/ producteurs de chaleur : Engie (Cofely), EDF (Dalkia), Industriels• Tertiaire (hôpitaux etc.)

• Transport/ Carburants

Caractéristiques du marché	Les acteurs du marché
<ul style="list-style-type: none">• Remplacement des carburants fossiles pour le transport (automobiles, bateaux, avions)• Marché mondial, gros volumes : 20-45 millions de litres pour les biocarburants 2G d'ici 2020.• Secteur peu sensible à l'innovation mais très sensible au prix	<ul style="list-style-type: none">• Entreprises pétrolières : ExxonMobil, Shell, Total, Sinopec, etc.

Plan de la présentation

1. Contexte et applications potentielles
2. Caractéristiques des huiles
3. Bio-huiles en tant que combustible
4. Bio-huiles pour bio-carburants
5. Positionnement R&D française
6. Synthèse des recommandations

2-Caractéristiques des huiles de pyrolyse

- En raison d'une forte proportion de composés oxygénés, les bio-huiles sont instables thermiquement, elles possèdent un pouvoir calorifique beaucoup plus faible que les carburants pétroliers et sont totalement immiscibles dans les hydrocarbures
- La dégradation de la biomasse produit des acides carboxyliques responsables de leur caractère acide
- Les huiles forment avec l'eau une phase homogène stable jusqu'à 30% à 40 % d'eau. Elles en contiennent généralement de 15 à 25%.
- L'huile de pyrolyse regroupe plus de 300 composés oxygénés d'intérêt tels que furane, cétones, phénols et les esters mais ils sont très dilués

Paramètres	Bio-oil	Fioul lourd
Aspect	Liquide marron foncé à noir selon les conditions de pyrolyse, la composition et la quantité de particules de charbon présente. Liquide instable qui ne peut pas être distillé	Liquide noir visqueux à température ambiante
Composition élémentaire (%/masse sèche)	C : 54 -58 H : 5,5-7,0 O: 35-40 N: 0-0,2 S: < 0,05 Inorganiques : 0-0,2	C : 85 H : 11 O: 0 N: 0,3 S: 2,5 Inorganiques : 0,03
PCS	16 à 19 MJ/kg	40 MJ/kg
Masse volumique	1220 kg/m ³ à 15 °C	960
Miscibilité	Partielle dans l'eau, séparation de phase Non miscible dans les huiles fossiles	
Densité	1,2 kg/l	0,94 kg/l
pH	2,5	-
Eau (% en masse)	15-25	0,1
Viscosité	40 à 100 cP à 40 °C selon la composition	-



Caractéristiques physico-chimiques moyennes comparées entre l'huile de pyrolyse et le fuel lourd (d'après Daniel Ballerini)

2-Characterisation des huiles de liquéfaction

- les huiles de liquéfaction (biocrude) ressemblent à des résidus pétroliers visqueux. Elles sont beaucoup plus stables que les huiles de pyrolyse car peu oxygénées et présentent une valeur énergétique supérieure (jusqu'à 37 MJ/kg. Leur principal inconvénient est leur viscosité.
- Leur conversion **en biocarburants est** plus facile qu'avec le bio-oil via des hydrotraitements catalytiques proches de ceux utilisés pour le pétrole

Caractéristiques physico-chimiques moyennes du biocrude produit à partir de différentes matières premières

Feedstock (dry basis)	Lignocellulosics	Macroalgae	Microalgae	Manures	Sewage sludge
Ash	3-8	15-35	7-26	10-20	20-50
H/C	1.2	1.2	1.6	1.5	1.6
O%	35-45	25-40	25-30	35-45	50
N%	0.5-3	3-7	5-9	3-6	3-8
HHV, MJ/kg	12-20	10-20	25-30	10-20	14
Size	1-100,000 mm	1-10,000 mm	1-100 µm	1-10,000 µm	1-100,000 µm
Feed formatting required	Yes	Not all strains	No	No	Depending on source
Reference	Umeki et al. (2010), Wang et al. (2011)	Ross et al. (2008)	Biller and Ross (2011)	Vardon et al. (2011), Wang et al. (2011)	Fonts et al. (2012)
Biocrude			Continuous HTL results		
Yield, % daf	35	27	38-64	-	-
Energy Recovery %	64	52	60-78	-	-
N%	0.3	3-4	4-8	-	-
O%	12	6-8	5-18	-	-
Reference	Jews et al. (2014), NABC (2014)	Elliott et al. (2013a)	Jazrawi et al. (2013), Elliott et al. (2013b)	NA	NA

daf = dry, ash free.

NA means no reference available on the subject.



Source : Hydrothermal liquefaction of biomass: Developments from batch to continuous process , 2015, Douglas C. Elliott^a, Patrick Biller^b, Andrew B. Ross^b, Andrew J. Schmidt^a, Susanne B. Jones^a.

2-Comparatif des huiles de pyrolyse et du biocrude

- Le biocrude est beaucoup plus stable que l'huile de pyrolyse car peu oxygéné et présente une valeur énergétique supérieure mais il présente une forte viscosité
- Le biocrude pourrait se contenter d'un up grading plus doux.

	Biocrude	Huile de Pyrolyse
Matière première	<u>Humide/sèche</u>	<u>sèche</u>
Teneur en eau de l'huile	<u>5 %</u>	<u>15-30 %</u>
Teneur en oxygène de l'huile	<u>10-15 wt%</u>	<u>35-45 wt %</u>
Teneur énergétique	<u>Jusqu'à 37 MJ/kg</u>	<u>10-19 MJ/kg</u>
Viscosité	<u>Jusqu'à 1500 cP à 50° C</u>	<u>40-100 cP à 50 °C</u>
Miscibilité avec produits pétroliers	✓	✗
Stabilité thermique pour stockage	✓	✗
Upgrading pour production de diesel/essence		
Hydrotraitement nécessaires	<u>HDO « doux »</u>	<u>HDO sévère + Hydrocraquage</u>

VALEURS MOYENNES

2-Normalisation/combustible

- Des spécifications et guide-lines sont nécessaires pour que le marché puisse se développer au niveau industriel
- Un premier standard européen bio-huile pour les chaudières industriels (> 1 MWth) est sorti en mars 2017.

Au sein du comité européen de normalisation (CEN), Le groupe de travail CEN/TC 19/WG 41 a pour mission de déterminer des standards pour le FPBO* et des méthodes des tests permettant de valider la conformité à ces standards

- Un rapport technique va être édité pour l'utilisation avec des turbines et des moteurs diesel stationnaires qui recommandera de faire des études avec des constructeurs et des tests longs sur des moteurs adaptés (essais de courte durée jusqu'à présent sur turbines modifiées)
- Ultérieurement deux autres spécifications techniques sont prévues pour un usage de l'huile pyrolyse en tant que matière première pour la gazéification et pour le co-traitement (co-processing) avec des huiles minérales
- A terme 3 standards pourraient être proposés pour le remplacement du fuel lourd, du fuel léger et pour un usage dans les moteurs stationnaires de combustion.

Standard "Fast pyrolysis bio-oils for industrial boilers —. Requirements and test methods"



EN 16900

Source : https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0:::FSP_PROJECT,FSP_LANG_ID:60400,25&cs=17DB65304BEA226CA1F17B38B56F24788

Property	Grade G	Grade D
Gross heat of combustion, min (MJ/kg)	15	15
Water content, max (mass %)	30	30
Pyrolysis solids content, max (mass %)	2.5	0.25
Kinematic viscosity at 40 °C, max (mm ² /s)	125	125
Density at 20 °C (kg/dm ³)	1.1 - 1.3	1.1 - 1.3
Sulfur content, max (mass %)	0.05	0.05
Ash content, max (mass %)	0.25	0.15
pH	Report	Report
Flash point, min (°C)	45	45
Pour point, max (°C)	-9	-9



ASTM D7544

Source : <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.energyfuels.5b00026>

Plan de la présentation

1. Contexte et applications potentielles
2. Caractéristiques des huiles
3. Bio-huiles en tant que combustible
4. Bio-huiles pour bio-carburants
5. Positionnement R&D française
6. Synthèse des recommandations

3-Bio-huiles pour chaleur

Pyrolyse rapide (TRL 8-9)

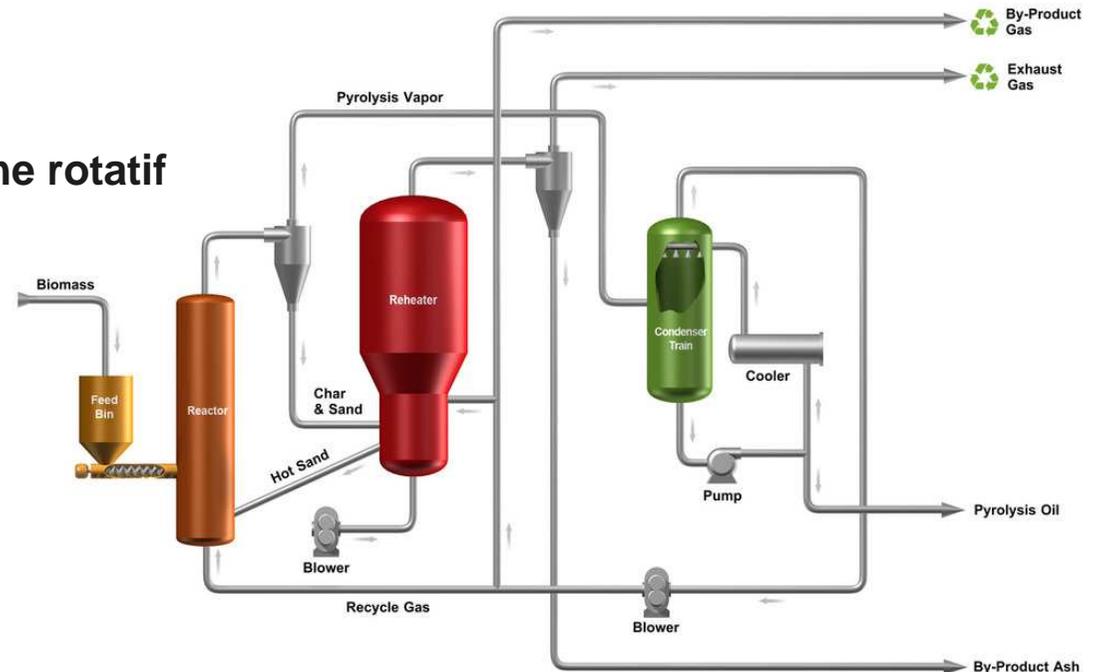
Procédé :

Lit fluidisé dense ou circulant, cône rotatif

T=450-550°C

Acteurs industriels dominants :

- 1) ENSYN (Canada)
- 2) FORTUM (Finlande)
- 3) BTG (Pays-Bas)

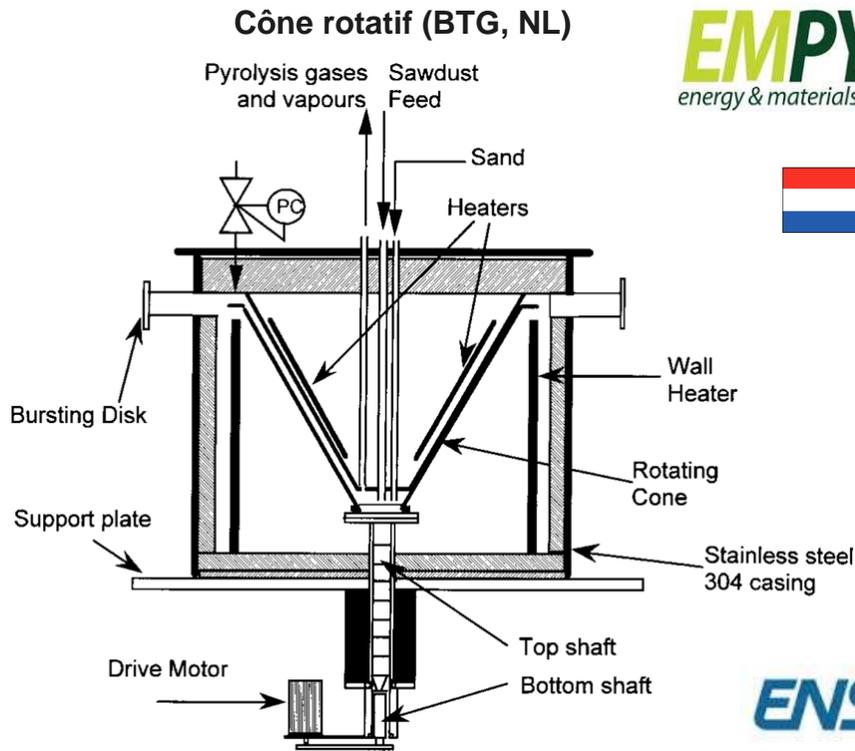


Marché à venir : à court terme, changement de combustible de chaudières

Verrous techniques : Stockage, transport & utilisation des bio-huiles

Recommandations pour la R&D française : Recherche sur combustion des bio-huiles pour développer leur utilisation. Pas de recherche sur les technos de production étant donné l'avance technologique de l'Amérique du Nord et de l'Europe du Nord.

3- Exemples d'acteurs



Empyro : 5 t/h de bois

Huile de pyrolyse RFO destinée au chauffage ou à des générateurs diesel pour la production d'électricité

Mais aussi : Produits alimentaires (sauce BBQ, Red Arrow), résines, remplacement des phénols dans les résines de bois...



1984



1989
Commercial
Deployment



1998-2005
Heavy Oil



2006
Ontario Facility &
return
to Bio-energy



Ongoing
Bioenergy
Expansion



3-Pyrolyse mobile

- Des pyrolyseurs mobiles de petite capacité (1-5 tpd) sont d'ores et déjà développés par des constructeurs et font l'objet de projets de R&D.
- Ces unités mobiles au plus près du gisement de matière première permettent de réduire le coût de transport de la biomasse mais augmentent ceux de main d'oeuvre
- Selon de nombreux industriels, leur business model n'est pas viable



- Le système de pyrolyse mobile testé dans le cadre du projet USDA-ARS FarmBio3 US va de ferme en ferme et simule un système de collecte pour une raffinerie régionale.
- Un projet de l'université de Western Ontario (Canada) porte également sur la pyrolyse mobile
- Et société Abritech

Points positifs :

- traitement à la source → coût du transport de la biomasse divisé par 2
- souplesse/fournisseur de biomasse
- réduction des coûts → pas de gaz de transport

Points négatifs :

- Frais de main d'oeuvre et de mise en place accrus (liés aux déplacements)
« Les unités mobiles n'ont pas le bon business plan »
« Il faut au moins 50 t/j de biomasse sèche pour assurer un profit. Sinon la main-d'oeuvre coûte trop cher. »

Viabilité?

3-Bio-huiles pour chaleur

**Liquéfaction hydrothermale (TRL 4),
stade de développement plus amont que
pyrolyse rapide**

Procédé :

**Température 300-400°C, pression 100-250 bar
Avec ou sans catalyseur**

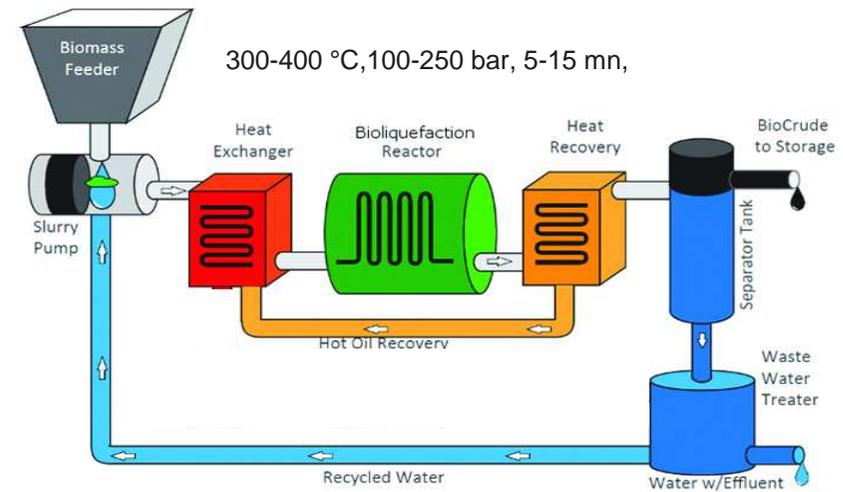
Acteurs industriels dominants :

**Genifuel (USA), Steeper Energy (DK), Muradel,
Licella (Au), Biofuel B.V. (brevet HTU, Shell),
Renmatix (USA, production de sucres)**

**Usages possible comme combustible,
biohuile seule ou en mélange**

Verrous techniques : Passage à l'échelle procédé, viscosité des huiles, teneur en azote

**Recommandations pour la R&D française : Poursuite de la R&D pour passage à TRL 7
Amélioration des propriétés des huiles, relation entre la charge et la qualité de l'huile**



Matières premières

- résidus de l'industrie agro alimentaire
- bio déchets
- micro algues
- Boues de station d'épuration
- ...

- Un procédé hydrothermal subcritique amélioré depuis 35 ans au sein du PNNL qui combine HTL et gazéification catalytique hydrothermale
- Un virage stratégique des micro-algues vers le marché du traitement des boues de station d'épuration

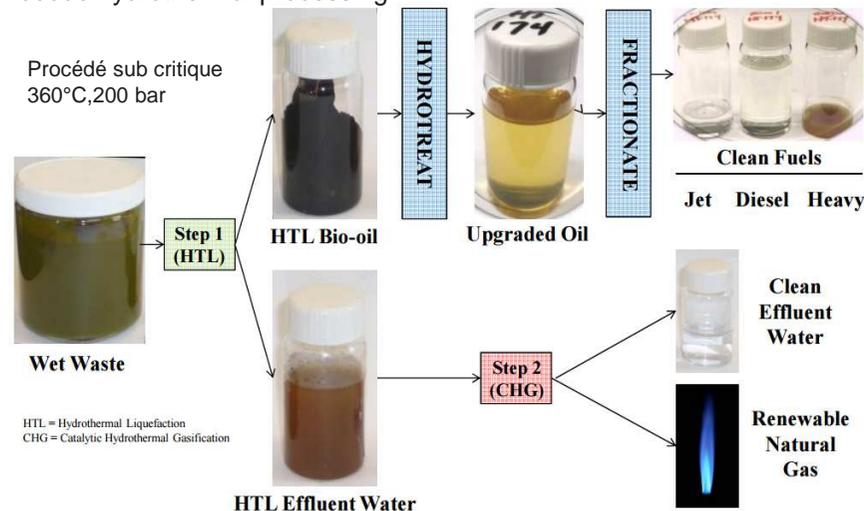
Identité

- Genifuel Corporation
- Création : 2006 à Salt Lake City
- Fondateur : James R.Oyler
- 5 personnes
- 2015 : Première usine fonctionnant 24h/24h 7j/7
- Chiffre d'affaire estimé : 180 000\$ (<http://www.buzzfile.com/business/Genifuel-Corporation-801-467-9976>)



Procédé Hydrothermal pour la production de biocrude et gaz méthane :
 Combinaison du mode liquéfaction hydrothermale (HTL) avec une gazéification catalytique hydrothermale (CHG) : rendement de conversion de 85%.

Procédé hydrothermal processing



85 % de l'énergie fournie par le process

Plus de 100 types de déchets testés, jusqu'à 85% de teneur en eau



Système de production de biocrude et gaz méthane

- Genifuel utilise une licence issue du Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) + Développement de brevets communs
- 2016 : installation d'une unité pilote de 2t/j en Inde chez Reliance Industries à partir de micro-algues. Production : 1000 à 2000 l biocrude/j
- Validation de la technologie par le WE&RF (Water environment & reuse foundation); Projet DOE, PNNL,...
- 2017 : Projet d'unité de 10t/j pour le centre de traitement des eaux usées de Vancouver Metro (Canada). Commissionnement fin 2017 coût : 7-8 M\$.
- Deux autres démonstrateurs prévus

- Un procédé supercritique développé avec l'université d'Aalborg centré sur les résidus forestiers
- Un projet de démonstrateur avec un énergéticien scandinave en cours de financement

Identité

- Steeper Energy
- Création : 2011 à Copenhague
- 2 sociétés sœur au Danemark et au Canada (Calgary)
- Fondateur : Perry Toms et Steen Iversen
- 16 personnes dont 6 au Canada
- CA: ND



Clients/marchés

- Secteur forestier : scierie, usine pâte à papier
- Vise la production de biocrude pour les transports longue distance
- Projet de démonstrateur en Scandinavie avec énergéticien « vert » – commissionnement prévu en 2018 (30 bpd de biocrude avec une unité de 10 barils/jour pour l'upgrading). Investissement : 28 M\$ (50% industriel, 50% investisseurs (tour de table en cours))

Technologie

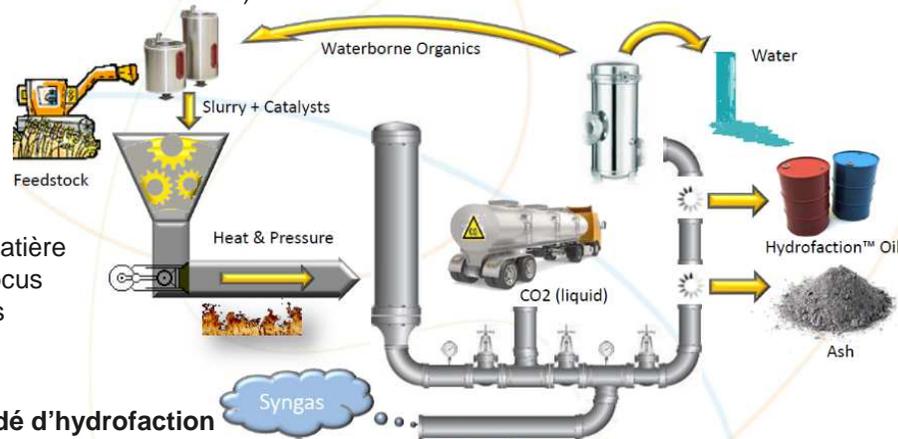
- 4 brevets délivrés (dont 2 au Canada) et 60 brevets en attente
- Techno développée par Steen Iversen
- Partenariats de R&D avec l'université d'Aalborg (DK) et les universités de Calgary et de l'Alberta (Canada)

Procédé super critique
400°C, 300 bar

85 % de l'énergie fournie par le process
Rendement : 45% m (par rapport à biomasse sèche en entrée)

40 types de matière
1ere testés, focus
sur les résidus
forestiers

Procédé d'hydrofaction



Système pilote installé à l'université d'Aalborg une capacité de 20 Kg/h et tiens dans 2 containers de 40 pieds. Il a fonctionné plus de 1200 heures en continu



Figure 10: CBS #1 set-up at Aalborg University Campus, Denmark. Container in the front contains the pretreatment unit, the 2 containers in the back contain the process plant in the bottom and the control and utility system in the top.

Plan de la présentation

1. Contexte et applications potentielles
2. Caractéristiques des huiles
3. Bio-huiles en tant que combustible
4. Bio-huiles pour bio-carburants
5. Positionnement R&D française
6. Synthèse des recommandations



4-Contexte biocarburants



- **Un contexte fluctuant : prix du pétrole et stratégies Européennes / nationales**
 - **Europe : changements de stratégie européenne concernant les biocarburants .**
 - **A ce jour les objectifs sont de respectivement de 0,5 % et 3.6 % pour les carburants avancés en 2020 et 2030**
-
- **Reviement récent de la politique européenne sur les biocarburants de première génération au profit des carburants « avancés » dans le domaine des transports d'ici 2030**
 - Révisions de la directive sur l'énergie renouvelable fixant les objectifs à 2030, la Commission a annoncé fin 2016 que la part **des biocarburants « avancés »** devrait atteindre **3,6% en 2030**. A contrario, celle des biocarburants de première génération serait réduite à 3,8% entre 2021 et 2030. réduction par rapport aux objectifs de 2020 **7% pour les biocarburants de première génération** avec un objectif complémentaire de 0,5% pour les biocarburants dits avancés (qui comprennent également les carburants renouvelables non biologiques)

En France, dans le cadre de la loi de transition énergétique les objectifs sont de 15% de biocarburants renouvelables d'ici 2030 avec une large part de biocarburants de première génération.
Pas de précisions sur la 2G et rien à attendre pour la 3G (à partir de micro algues) avant 2030

La filière biocarburant comprend aussi les biocarburants gazeux qui se développent : bioGNV (biométhane produit à partir de biogaz épuré) et bio-GPL (produit à partir de biopropane).

4-Pourquoi traiter les biohuiles

Les bio-huiles de pyrolyse rapide sont instables thermiquement, possèdent un faible PCI et sont immiscibles avec les hydrocarbures (car forte proportion de composés oxygénés: 35-45% d'oxygène). Les bio-huiles de liquéfaction, moins oxygénées (10-15% d'oxygène), sont de meilleure qualité, mais très visqueuses.

Caractéristique	Problèmes rencontrés
Acidité	Corrosion
Forte teneur en eau et oxygène	séparation de phases dans l'huile, pouvoir calorifique réduit (eau). pouvoir calorifique de réduit de moitié par rapport à celui des carburants conventionnels + immiscibilité avec eux (oxygène) .
Forte viscosité	Manutention, pompage, pulvérisation
Instabilité physico-chimique	Stockage, séparation de phases, polymérisation, augmentation de la viscosité
Teneur en particules solides (essentiellement cendres)	Problèmes de combustion (allumage plus difficile), encrassement des équipements, bouchons ou un blocage dans les tuyauteries, l'érosion des buses d'injection
Métaux alcalins	Dépôts solides dans les brûleurs, moteurs et turbines ; obstruction des injecteurs
Teneur en eau	Effets complexes sur la valeur de chauffage, viscosité, pH, homogénéité, etc.
variabilité selon biomasse et procédés	Manque de standards et de spécifications

4-Bio-huiles pour carburant

Upgrading catalytique des bio-huiles

Deux technos concurrentes ou complémentaires (TRL 6):

- Craquage sur zéolithe (FCC en co-traitement de coupe pétrolière)
- Hydrotraitement sur CoMo, NiMo, Ru ou Pd (apport d'H₂ pour désoxygéner l'huile)

Acteurs industriels dominants : ENSYN-Petrobras (Canada-Brasil), UOP (USA), PNNL (USA), Steeper Energy (DK)

Evolutions récentes : Réorientation du projet CLHUB d'hydrotraitement de l'IFPEN

Marché à venir : à long terme, production de biocarburants si compétitif par rapport aux voies concurrentes (gazéification + Fischer-Tropsch)

Verrous : catalyseurs performants et robustes, réduction conso H₂, augmentation rdt.

Recommandations pour la R&D française : développement de catalyseurs up-grading avec essais en conditions réelles

4-Bio-huiles pour carburant

Pyrolyse catalytique

Techno dominante :

Lit fluidisé circulant (TRL 6)

Acteurs industriels dominants :

KIOR (USA)

RTI (pyrolyse catalytique)

CRI (Shell) / GTI (USA) = hydrolyse →

Anellotech (USA) pour BTX



Evolutions récentes :

Faillite de KIOR en 2014 pour des raisons techniques et économiques
mais développement pilote pour CRI/GTI et Anellotech (en association avec IFPEN)

Marché à venir : à long terme, production de biocarburant de type essence ou BTX

Verrous techniques : catalyseurs performants et robustes, procédés adaptés

Recommandations pour la R&D française : développement de catalyseurs jusqu'à des essais en conditions réelles sur de longue durée, procédés innovants

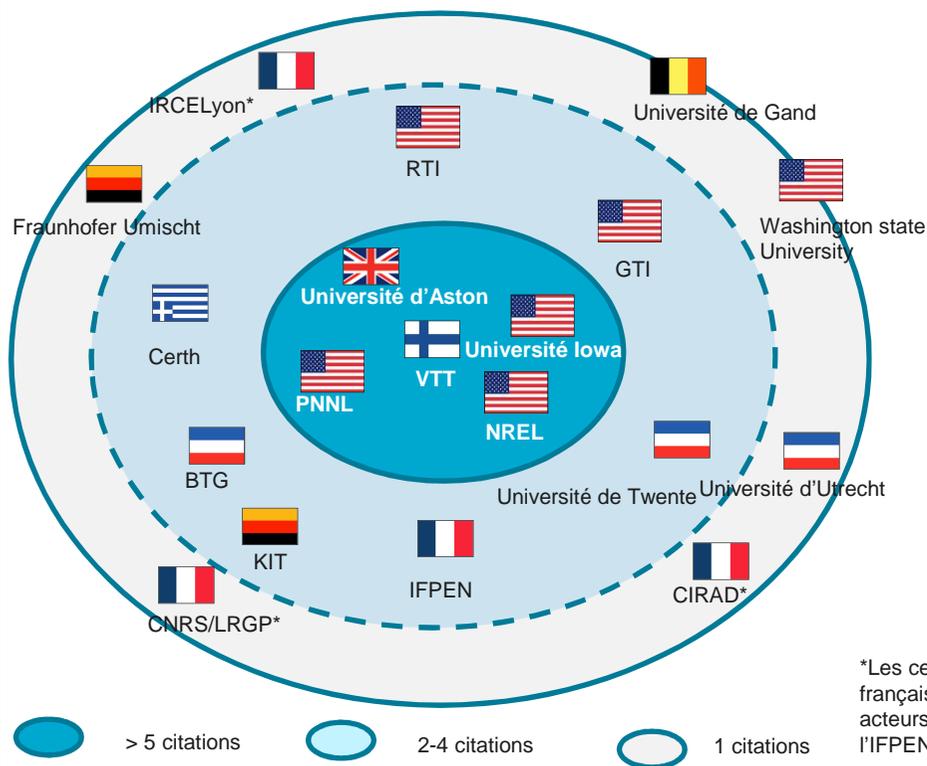
Plan de la présentation

1. Contexte et applications potentielles
2. Caractéristiques des huiles
3. Bio-huiles en tant que combustible
4. Bio-huiles pour bio-carburants
5. Positionnement R&D française
6. Synthèse des recommandations

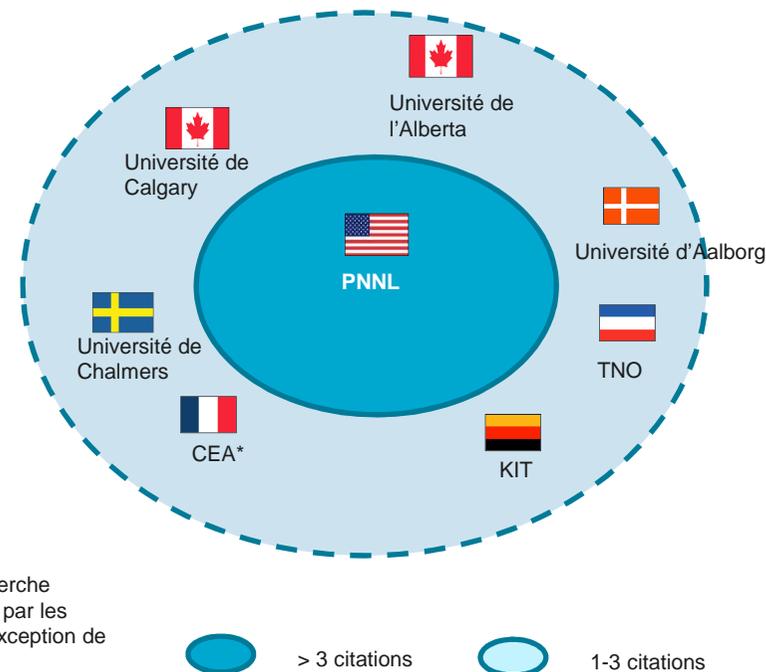
5- positionnement R&D – Notoriété Acteurs

- Les acteurs les plus connus sont tous américains à l'exception des finlandais du VTT et des britanniques de l'université d'Aston
- Mis à part l'IFPEN, les acteurs français sont peu connus hors de nos frontières

Nombre de citations pyrolyse rapide et HDO



Nombre de citations HTL



*Les centres de recherche français ont été cités par les acteurs français à l'exception de l'IFPEN

« Beaucoup de labos académiques travaillent sur le sujet en Chine qui publie plus que tous les autres pays cumulés mais il est difficile d'avoir des informations ». Y. Saulentausta, VTT

5- positionnement R&D : France

- La R&D est peu impliquée sur ces thématiques en France et génère peu de projets, l'effort de recherche semble plus porter sur la gazéification côté voie de transformation thermochimique.
- La plupart des labos français impliqués travaillent sur la pyrolyse rapide et l'HDO, l'HTL est le parent pauvre avec de la R&D principalement par le CEA



Organisation	Nombre de documents	Age moyen des documents (ans)	Pays
CNRS	172	6,03	FRANCE
UNIV ASTON	97	8,03	UK
UNIV TWENTE	82	4,85	NETHERLANDS
KIT	80	5,58	GERMANY
UNIV LEEDS	74	7,76	UK
VTT	69	11,10	FINLAND
UNIV TECH DENMARK	60	3,67	DENMARK
UNIV ARISTOTLE THESSALONIKI	56	6,77	GREECE
UNIV GHENT	53	3,66	BELGIUM
UNIV ZARAGOZA	51	7,29	SPAIN
UNIV BASQUE COUNTRY	50	2,66	SPAIN
CTR FOR RESEARCH TECH HELLAS	47	4,74	GREECE
UNIV NOTTINGHAM	42	3,67	UK
UNIV BOLOGNA	35	3,86	ITALY
COLL IMPERIAL LONDON	34	4,76	UK
UNIV YORK	34	3,24	UK
UNIV ABO AKADEMI	33	6,27	FINLAND
CNR	32	3,88	ITALY
CEA	32	4,22	FRANCE
SINTEF	31	3,55	NORWAY

CNRS premier acteur concernant les publications dans le domaine en Europe

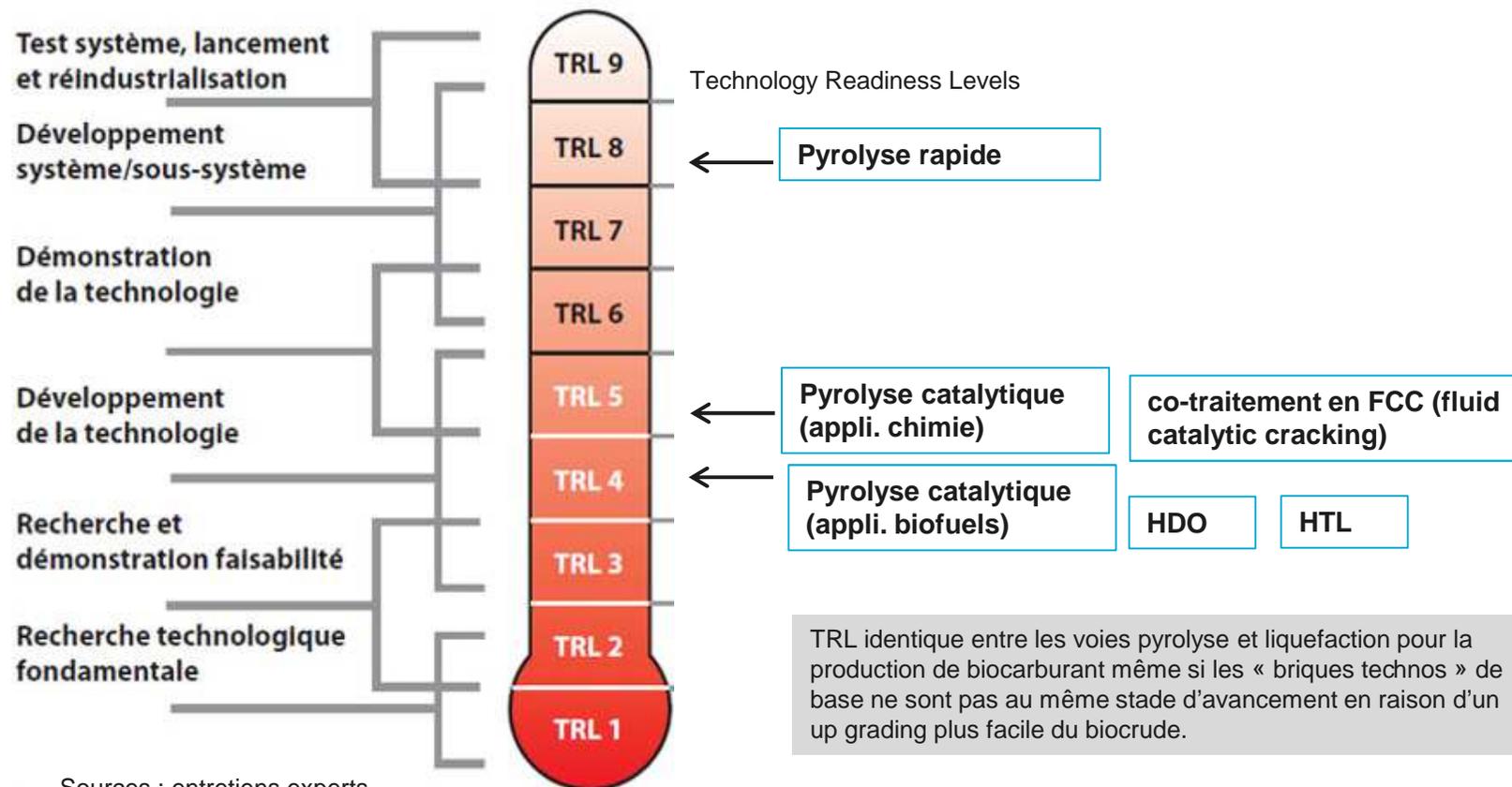
- Peu de projets sur ces thématiques dans les programme de recherche BIP (Bioressources, Industries et Performance) et Vasco (captage, stockage du CO2) de l'Ademe
- Peu de FUI
- pas de fonds pour des démonstrateurs biocarburant 2G

Plan de la présentation

1. Contexte et applications potentielles
2. Caractéristiques des huiles
3. Bio-huiles en tant que combustible
4. Bio-huiles pour bio-carburants
5. Positionnement R&D française
6. Synthèse des recommandations

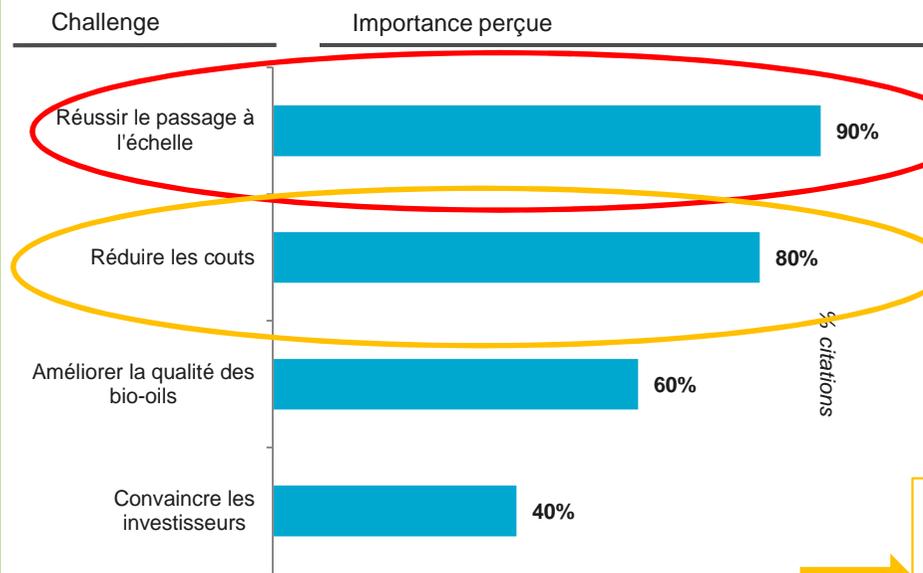
6- Maturité des technologies (TRL)

- Si la pyrolyse est au stade démonstrateur industriel, les process d'HDO et la pyrolyse rapide catalytique sont encore en développement.
- La liquéfaction hydrothermale affiche une faible maturité technologique avec peu d'installations pilotes en continu
- En revanche, le TRL est identique entre les 2 technologies pour la production de biocarburant en raison d'un upgrading moins poussé pour le biocrude et le niveau de développement de la pyrolyse catalytique



6- Challenges à relever –généralités

- Les retours terrain montrent que les principaux challenges à relever sont la réduction des coûts et la montée en échelle des installations quelles que soient les technos concernées
- L'amélioration de la qualité des bio-huiles et le besoin de trouver des capitaux concernent principalement la pyrolyse rapide/HDO



- Amélioration efficacité énergétique et simplification des procédés opératoires
- Augmentation des rendements
- **Développement de nouveaux processus d'hydrotraitement** alternatifs viables économiquement :
 - Réduction de la consommation d'H2 par des catalyseurs fonctionnant à des températures et des pressions d'H2 plus faibles
 - Segmentation du process et/ou prétraitement partiel
- **Poursuite des travaux sur le co-processing** dans raffinerie classique (niveau de mélange)
- Diminution du Capex : installations plus grandes pour optimiser les coûts fixes
- Amélioration de la courbe d'apprentissage

- Amélioration du système d'alimentation et manutention de la biomasse y compris biochar + de l'injection de la biomasse (slurry) sous pression en continu (pumping)
 - Amélioration de la flexibilité des process par rapport à la variabilité de la biomasse
 - Amélioration de la durée de vie des composants : renforcement de l'étanchéité et lutte contre la corrosion (uniquement sur biomasse ligneuse)
 - Séparation des différentes phases de façon sécurisée en sortie de réacteur
 - **Amélioration résistance et sélectivité des catalyseurs**
 - Sécurisation transport et stockage bio oil – (problème de stabilité thermique des huiles)
- Challenge spécifique HTL

Etant donné les différents niveaux de maturité des technologies, le passage à l'échelle s'entend de manière différentes :

- Unité commerciale pour la pyrolyse rapide
- Unité pilote pour l'HTL pour démontrer l'intérêt et la faisabilité du process

Synthèse

La R&D française s'intéresse à cette filière « bio-huiles » de longue date : travaux du CIRAD, IFPEN, CNRS (Lyon, Nancy, Nantes), CEA,... Certaines activités sont en pointe à l'échelle internationale : IFPEN = référence sur analyse des bio-huiles; CNRS = 1^{er} acteur R&D en Europe, 6^e mondial

Cependant les AAP des agences de l'Etat ne sont pas incitatifs sur la thématique « bio-huiles ». Cela s'explique entre autres par les choix stratégiques des groupes industriels français (Total, Engie, Avril, Axens, Tereos...) qui ont privilégié depuis 2008 la gazéification (BioTFuel, GAYA) ou la conversion biochimique (Futurol).

Faut-il augmenter les financements R&D pour la filière « bio-huiles »?

- Non pour la production de bio-huiles par pyrolyse rapide
- **Oui pour la valorisation des bio-huiles pour des applications chaleur / cogénération (court terme)**
- **OUI pour la production de bio-huiles par liquéfaction hydrothermale**
- **OUI pour l'hydrotraitement et le craquage catalytique pour des applications bio-carburants (long terme)**



Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie
CVT - Consortium de Valorisation Thématique