



Juin
2019

État des lieux de la filière des granulés de biomasse torréfiée ou explosée à la vapeur

SYNTHESE

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

REMERCIEMENTS

Alice FAUTRAD, Service Forêt, Alimentation et Bioéconomie – ADEME,
Mathieu Campargue- RAGT Energie,
Christophe Garnier – PRODESA
les "porteurs de projets français".

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME, Hugues de Cherisey, 2019. Etat des lieux de la filière des granulés de biomasse torréfiée ou explosée à la vapeur. Synthèse.17 pages.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 19MAR000367

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : Hugues de Cherisey

Coordination technique - ADEME : Fautrad Alice
Direction/Service : Forêt, Alimentation et Bioéconomie



SOMMAIRE

RÉSUMÉ	4
1. Introduction	5
2. Présentation des deux technologies.....	6
2.1. Généralités.....	6
2.2. La torréfaction (torrefaction)	7
2.3. L'explosion à la vapeur ou vapocraquage suivi d'une décompression explosive (steam explosion).....	7
2.4. Résumé comparatif	8
2.5. Normalisation des biocombustibles traités thermiquement	9
2.6. Matières premières traitées	9
3. Acteurs et projets.....	10
3.1. Torréfaction	10
3.2. Explosion à la vapeur.....	11
3.3. Autres procédés	11
4. Pourquoi une telle absence de réalisations industrielles pérennes ?.....	11
5. Les marchés potentiels	12
6. Les points de vigilance sur les projets en cours ou à venir	14
7. Conclusions/Perspectives.....	15



RÉSUMÉ

Dans la perspective de substituer au charbon des combustibles renouvelables, différents prétraitements thermiques de la biomasse lignocellulosique ont été développés. Parmi ceux-ci, la torréfaction et l'explosion à la vapeur (vapocraquage suivi d'une décompression explosive) font l'objet de travaux depuis plus de quinze ans mais sans encore aucun succès industriel pérenne. La demande potentielle d'un "bio-charbon" renouvelable est importante, dans tous les pays voulant pérenniser leurs centrales thermiques et autres chaufferies au charbon, tout en respectant leurs objectifs "climat".

En dépit de la multitude des pilotes et des démonstrateurs mis en place dans les années 2005-2010, le succès industriel se fait attendre. Les centrales thermiques d'Europe de l'Ouest de d'Asie converties à la biomasse n'ont pas attendu l'émergence des granulés "noirs" de bio-charbon (*black pellets*) et consomment, par millions de tonnes, du granulé industriel "blanc", issu de biomasse non traitée thermiquement.

Les défis techniques de la production des granulés "noirs" sont nombreux et parfois antagonistes. Une biomasse fortement traitée thermiquement verra ses propriétés se rapprocher de celle du charbon mais sera très difficile à conditionner sous forme de granulés. Le succès ne se résume pas à la réussite du traitement thermique lui-même. Une approche intégrée est indispensable, depuis la maîtrise du gisement de biomasse jusqu'à une bonne mise en œuvre du combustible dans les centrales thermiques ou chaufferies clientes. Au-delà de la concentration énergétique et de l'hydrophobie du granulé "noir", le procédé doit apporter un avantage économique marqué dans la chaîne de valeur.

Une liste de facteurs clés de succès et de points de vigilance est proposée. La concurrence établie par le développement très rapide des filières de production de granulé industriel "blanc" renforce les défis que doit relever un granulé "noir". Sa capacité à homogénéiser, à l'échelle d'une usine, un large ensemble de matières premières disponibles, en particulier de déchets, reste à démontrer.

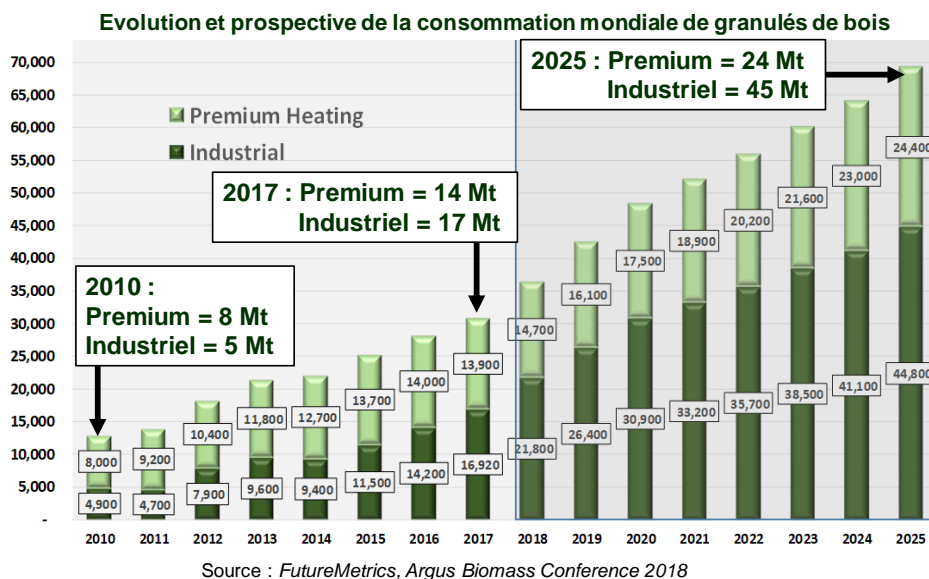
En France, on dénombre deux projets de production de bio-charbon mettant en œuvre la torréfaction (LMK ENERGY, CIBV) et deux l'explosion à la vapeur (EDF CORDEMAIS/ECOCOMBUST et FICA/EUROPEENNE DE BIOMASSE). Ils sont inégalement avancés, seul le dernier étant à l'étape de construction d'une unité industrielle.

1. Introduction

Différentes technologies ont été développées pour déstructurer la biomasse lignocellulosique de façon plus ou moins intense, pour des usages divers, que ce soit pour la production de pâte à papier, celle des panneaux de bois, l'industrie chimique, la production de biocarburants, etc.

Depuis une quinzaine d'années, plusieurs projets visent à mettre en œuvre ces procédés, pour obtenir, à partir de catégories variées de biomasse, des substituts renouvelables du charbon pour ses usages en combustion.

Dans la même période, sans attendre la finalisation maintes fois repoussée de ces technologies, la conversion de centrales thermiques à charbon à la biomasse, s'est initiée puis accélérée, sur la base de systèmes nationaux d'incitations publiques, dans plusieurs pays voulant respecter leurs engagements "climat" (divers Etats membres de l'Union européenne, Corée du Sud, Japon). Le granulé de bois "blanc" utilisé pour la production d'électricité représente, dès maintenant, un marché mondial de 20 millions de tonnes, alors que l'usage de ce combustible est contraignant et implique des aménagements importants pour être utilisé en co-combustion avec le charbon. Le besoin de disposer de bio-charbons reste élevé, en particulier pour la conversion de nouvelles centrales à la biomasse, pour une période de transition d'une à quelques décennies, de façon à pérenniser les centrales thermiques existantes, tout en respectant des objectifs d'émissions de dioxyde de carbone.



Dès cette introduction, on rappellera que les centrales thermiques à charbon mettent principalement en œuvre deux technologies de combustion¹ :

- **Le charbon pulvérisé (CP)** reste la plus commune. Le charbon est réduit en fines poussières, injectées dans la chaudière, à plus de 1400°C. Le procédé est adapté à des charbons de bonne qualité mais pas au lignite. En France, les trois dernières unités charbon d'EDF (2 x 600 MWé à Cordemais et 600 MWé au Havre) et deux de celles d'EPH/ex UNIPER (618 MWé à Saint Avold et 600 MWé de Provence 5 à Gardanne) mettent en œuvre ce procédé classique.
- **Le lit fluidisé circulant (LFC).** Le charbon concassé est brûlé dans un lit de particules solides, maintenues en suspension dans un courant d'air ascendant, à une température de 850°C. Le rendement est élevé, des charbons de moindre qualité peuvent être utilisés et les émissions polluantes sont plus faciles à maîtriser. L'unité Provence 4 d'EPH/ex UNIPER, à Gardanne (250 MWé), en cours de conversion à la biomasse, serait la plus importante au monde à valoriser cette technologie.

Indépendamment de leur technologie de combustion, les centrales électriques au charbon présentent des niveaux des rendements énergétiques très inégaux, avec une moyenne mondiale autour de 30 %. Des progrès importants dans les échanges de chaleur et les turbines permettent d'atteindre plus de 45 % de rendement, en réduisant considérablement les émissions de CO₂ et de polluants (NO_x, SO₂). Plus la température et la pression de la vapeur d'eau produite sont élevées, meilleures sont les performances. Dans une centrale classique, les paramètres de cette vapeur avoisinent 560°C et 180 bars. Quand ils s'élèvent à 565-585°C et plus de 250 bars, on parle de centrales "supercritiques" et lorsqu'ils dépassent 585°C (jusqu'à 600-620°C) et 275-300 bars, la centrale est dite "ultra-supercritique". Lorsqu'elles sont équipées de turbines de dernière génération, leur rendement peut dépasser les 45 % (hors valorisation éventuelle de la chaleur).

¹ Il existe aussi des technologies plus sophistiquées de gazéification.

2. Présentation des deux technologies

2.1. Généralités

Torréfaction et vapocraquage suivi d'une décompression explosive (= explosion à la vapeur) ont en commun de :

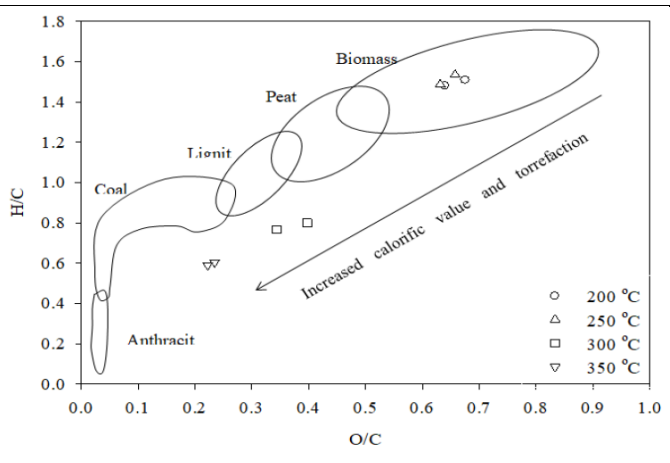
- Réaliser un traitement thermique de la biomasse qui déstructure et modifie la lignocellulose (destruction plus ou moins avancée des hémicelluloses, altération variable de la cellulose et des lignines).
- Nécessiter une présentation de la biomasse fragmentée et homogène, offrant des surfaces de contact suffisantes des particules au traitement.
- Générer des produits :
 - 1) plus concentrés en carbone et en énergie, moins concentrés en oxygène et en hydrogène, devenus plus aptes à la co-combustion avec le charbon que la biomasse d'origine ;
 - 2) avec des propriétés conférant des avantages lors des opérations logistiques et de mise en œuvre (**hydrophobie, broyabilité**) ;
 - 3) de couleur sombre (marron à noir) ; on parle de "*biocal*" ou "biocharbon" ;
 - 4) avec une composition en cendres et en microéléments modifiée ;
 - 5) qui devront être densifiés sous forme granulée (= *densified through pelletization*), pour faciliter leur transport, leur stockage mais aussi la mise en œuvre de leur combustion. Ils sont alors dénommés "black pellets" = granulés noirs, par opposition au granulés de bois "blancs" ou "white pellets", non traités thermiquement ;
 - 6) pouvant être brûlés dans des centrales thermiques ou des chaufferies à charbon, en co-combustion avec celui-ci.
- De co-générer des gaz, souvent utilisés pour assurer l'autonomie énergétique du procédé, comme vecteurs de chaleur directs ou par leur combustion. Ces gaz entraînent une partie des microéléments alors que d'autres sont concentrés dans la fraction solide.
- De faire l'objet de travaux de développement depuis plus de 10-15 ans, sans avoir atteint avec succès l'échelle industrielle (difficultés de finalisation des procédés, de leurs changements d'échelle et de la maîtrise de leur économie).

En dépit de ces traits communs, la diversité des conditions de process possibles et, par la suite, de qualités des produits obtenus est très importante.

Diagramme de Van Krevelen qui classe les matières selon leur rapport hydrogène/carbone (en ordonnée) et oxygène/carbone (en abscisse).

L'objectif des traitements thermiques est de modifier la biomasse "dans la direction" du charbon, ou du moins de ses ratios H/C et O/C.

NB : Peat = tourbe.



2.2. La torréfaction (torrefaction)

La torréfaction est un traitement thermique de la biomasse, lors duquel cette dernière est chauffée dans une atmosphère non oxydante, de façon à augmenter sa densité énergétique et son hydrophobicité.

Le bois ou d'autres biomasses lignocellulosiques, sous forme de plaquettes, sont soumis à une température de 250 à 350°C, pendant un délai pouvant aller de quelques secondes (réacteur cyclonique) à plus d'une heure (le plus souvent entre 10 et 30 minutes), à pression atmosphérique ou peu élevée, dans une atmosphère inerte (azote) ou pauvre en oxygène.

La décomposition thermique des composants de la matière lignocellulosiques dépend principalement de la température et de la taille des particules.

Suivant les technologies, le chauffage est direct (*direct heating*), assuré par la circulation d'un gaz qui circule au travers du lit de biomasse ou indirect, au travers d'une paroi. Des systèmes de chauffage par micro-ondes ont également été développés. Il y a destruction des hémicelluloses alors que les structures de la lignine et de la cellulose sont inégalement altérées (dépolymérisation partielle). Les teneurs en oxygène et en hydrogène du produit sont réduites, tandis que sa concentration en carbone augmente. Les gaz de torréfaction émis (hydrocarbures, CO et composés organiques volatils) sont recyclés pour être brûlés et participer à l'alimentation énergétique du procédé. Le combustible obtenu conserve environ 70 % de la biomasse initiale et 90 % de son contenu énergétique.

Le produit issu du réacteur est refroidi puis broyé. La granulation nécessite une addition d'eau. Elle permet d'obtenir un combustible attendu comme homogène, friable, hydrophobe et stable, de PCI = 20 à 24 GJ/t et d'humidité 2-4 %.

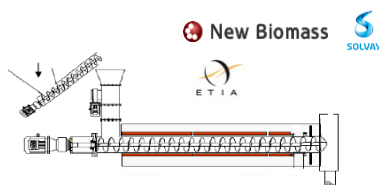
De nombreux fours ou réacteurs de torréfaction ont été développés et les valeurs des deux paramètres que sont la température et la durée de séjour peuvent être combinées de multiples façons. Ainsi, la torréfaction peut être "douce" ou "forte". Plus le produit se rapproche du charbon par sa composition (richesse en carbone, pauvreté en oxygène, etc.) plus il est difficile à granuler. Un compromis doit donc être trouvé pour pouvoir obtenir un granulé de bois torréfié satisfaisant.

Principales technologies de torréfaction (source : Mathieu Campargue, RAGT, 2017), incluant celles mises en œuvre en France par LMK Energy (=Thermya Areva)

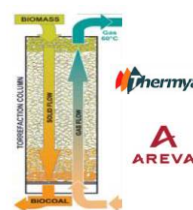


Wyssmont

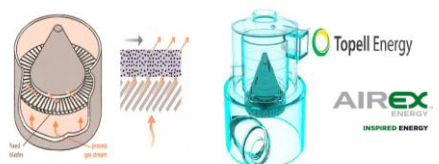
Four à plateaux,
ou four à soles



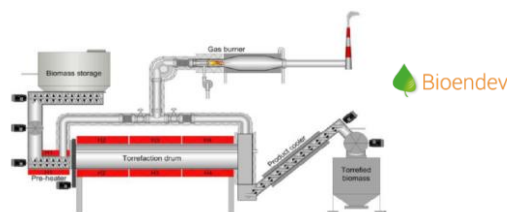
Four à vis.



Réacteur à lit
compact



Réacteur cyclonique



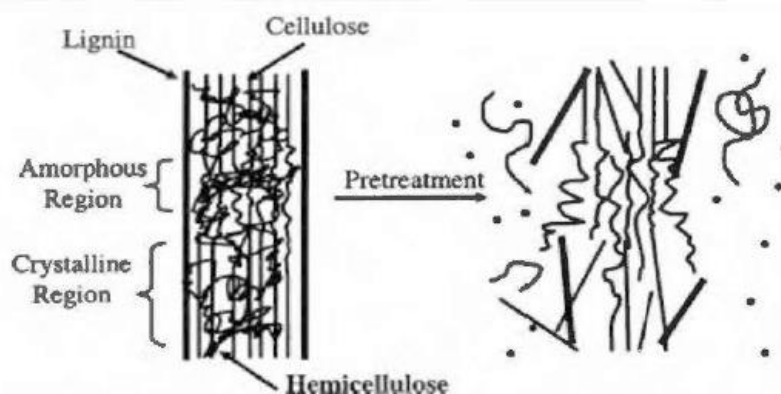
Réacteur à four tournant

2.3. L'explosion à la vapeur ou vapocraquage suivi d'une décompression explosive (steam explosion)

La technologie de base n'est pas récente : le premier procédé d'explosion à la vapeur du bois aurait été breveté en 1926 (procédé de Mason, dans lequel des plaquettes de bois sont soumises 2 minutes à de la vapeur d'eau, à 285°C et 35 bars, puis 5 secondes à 70 bars, avant décompression brutale). L'usage commercial aurait été initié



dans les années 1950, pour la production de panneaux de bois reconstitués. Ainsi, la fabrication des panneaux de type MDF (Medium Density Fiberboard) peut faire appel à un procédé d'explosion à la vapeur lors de l'étape de défilage. Des variantes du procédé de base pour différentes applications (production de pâte à de cellulose, de biocarburants, etc.) utilisent des additifs (acides, oxydants, CO₂, etc.) ce qui ne serait pas le cas pour la production de "biocharbon". L'explosion à la vapeur, également appelée technologie Masonite (De Long, 1981), est un procédé thermomécanochimique qui se déroule en deux étapes : **un vapocraquage à hautes température et pression, suivi par une décompression explosive**. La matière est introduite dans un réacteur où est injectée de la vapeur saturée, d'une température de 160 et 270°C, sous une pression de 10 à 50 bars. Selon les procédés, le temps de séjour s'étale de quelques secondes à quelques dizaines de minutes, avant que l'ensemble de la matière "vapocraquée" et de la vapeur ne subisse une détente brutale, jusqu'à un retour à la pression atmosphérique. La matrice lignocellulosique est déstructurée : les faisceaux de fibres se séparent et peuvent se fragmenter, en fonction de la sévérité des paramètres appliqués. Le craquage génère la formation d'acides organiques (acétique, ...) qui participent à l'hydrolyse partielle des hémicelluloses et à une altération de la structure des lignines. Différentes propriétés physiques de la matière traitée sont modifiées (surface spécifique, capacité de rétention d'eau, couleur et taux de cristallinité cellulosique). La présence d'acides organiques dans le produit brut obtenu implique de disposer d'installations résistantes à la corrosion.



Pour la production d'un "black pellet", le procédé comporte :

- La préparation de la matière première qui doit être dépierrée, dé-métallisée, broyée, criblée.
- Le pré-séchage.
- L'explosion à la vapeur elle-même, selon un procédé par lots ou en continu.
- Le refroidissement puis le séchage, de façon à atteindre l'humidité optimale pour la granulation.
- La granulation, généralement plus facile à conduire que celle des produits torréfiés (moindre dégradation des lignines) mais dont la qualité dépend des paramètres appliqués lors du procédé.

Après granulation, les produits finaux montrent un PCI de 17-19 MJ/kg, une masse volumique de 650 à 790 Kg/t, une humidité de 2 à 4 % et un contenu en matières volatiles de 70-80 % de la matière sèche, ce qui facilite leur combustion ultérieure.

Différentes modélisations de l'économie de ces procédés ont été réalisées, en comparaison de ceux du granulé "blanc". L'explosion à la vapeur serait plus gourmande en investissements et en charges de fonctionnement mais son produit offrirait des avantages sur les coûts logistiques entre l'usine et le client final (moindres volumes de transport par unité de PCI, stockage simplifié) et pourrait être utilisé en proportions plus élevée dans le cas de co-combustion avec le charbon.

Les effluents liquides générés par le procédé sont acides mais peuvent contenir des molécules organiques présentant un potentiel de valeur ajoutée.

2.4. Résumé comparatif

Le tableau qui suit est à considérer avec certaines précautions car il regroupe des données de plusieurs sources dont la validité n'a pas pu être systématiquement vérifiée. Le "charbon" rassemble toute une famille de produits de contenus en carbone, PCI et teneurs en eau très diverses (*depuis les plus hautes qualités d'antracite à 90-95 % de carbone, 10-15 % d'humidité, 10-20 % de cendres, jusqu'au lignite, à 65-72 % de carbone, 30-60 % d'humidité et 10-50 % de cendres, en passant par les charbons bitumineux et sous-bitumineux*). De plus, si la

description des biocombustibles prend très généralement comme référence le PCI², les différents charbons sont souvent décrits pour leur PCS.

Comparaison des caractéristiques moyennes de différents combustibles

	Plaquette forestière	Granulé "blanc" premium	Granulé de bois explosé à la vapeur	Granulé de bois torréfié	Charbon
PCI MJ/kg	7-11	> 16.5	17-19	20-24	30-35
PCI MWh/t	2.2	> 4.6	4.9-5.1	6.1-6.4	8.9-9
Densité énergétique apparente (GJ/kg)	2-3	8-11	14.5	15-18.7	18-24
Humidité %	30-50 %	< 10 % (7-8)	2- 8 %	1-5	10-15
Masse volumique kg/m ³	250-400	> 600 (650-700)	675-750	750-900	800
Cendres %		< 0.7	0.4-0.8	0.5-0.9	10-20
Hydrophobicité	non	non	oui	oui	oui

2.5. Normalisation des biocombustibles traités thermiquement

Une norme volontaire n'a pas de caractère obligatoire ni réglementaire : elle est habituellement rédigée par les professionnels d'un secteur, pour faciliter le commerce, sur un marché existant, de produits disposants de retours d'expérience suffisants.

Début 2013, alors qu'aucun biocombustible traité thermiquement n'était fabriqué à l'échelle industrielle, un projet de norme les concernant a fait l'objet de travaux du comité technique ISO concerné (TC 238), en anticipation du développement de leur marché. Pour les différentes classes de produits, les plages de valeurs de chaque spécification ont fait l'objet d'intenses négociations, chaque partie prenante voulant s'assurer que les futurs produits de sa technologie puissent trouver leur place dans la norme à venir. Pour plusieurs revendications importantes, comme l'hydrophobicité des produits ou l'aptitude à être re-broyé pour la co-combustion avec du charbon, aucune méthode d'analyse n'était normalisée. A finalement été publiée, en décembre 2016, une spécification technique, plus légère qu'une norme à faire évoluer : ISO/TS 17225-8: 2016 "Biocombustibles solides – Classes et spécifications des combustibles – Partie 8 : Combustibles de biomasses traitées thermiquement et densifiées". Elle reste encore sans application commerciale.

2.6. Matières premières traitées

La promotion de la torréfaction, comme celle de l'explosion à la vapeur, met systématiquement en valeur l'argument que ces technologies s'appliquent à toute forme de biomasse lignocellulosique. La réalité est plus complexe. Les deux technologies visent à dégrader partiellement ("un peu mais pas trop") une matrice lignocellulosique qui varie dans sa composition et ses propriétés physico-chimiques, d'une espèce botanique à l'autre³.

L'expérience préindustrielle accumulée sur la torréfaction semble avant tout concerner le bois vierge, résineux ou feuillu, sous forme de produits connexes de scieries et, moins fréquemment, de plaquettes forestières ou même d'écorces.

Pour l'explosion à la vapeur, les références de pilotes comme de recherches sont beaucoup moins nombreuses et l'expérience semble avant tout acquise sur le bois de résineux.

² Rappels : PCI = pouvoir calorifique inférieur. Le PCI n'est pas mesuré mais calculé, à partir du PCS = pouvoir calorifique supérieur, résultat direct de l'analyse. On a : PCS = PCI + chaleur latente d'évaporation de l'eau contenu dans le combustible. Le rapport PCS/PCI d'un charbon "moyen" est d'environ 1.05.

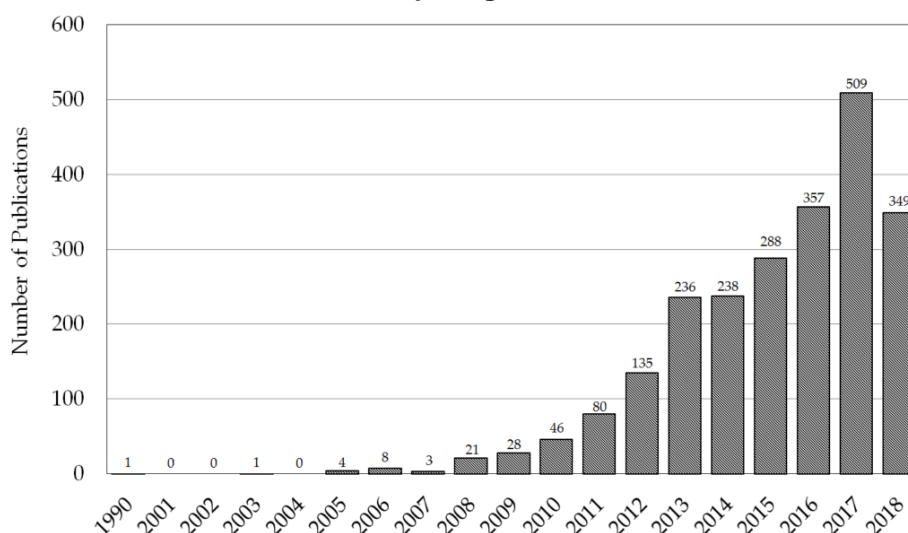
³ Rappels : la cellulose est un polymère de glucose présentant des longueurs et des conformités variables, amorphes ou cristallines, inégalement difficiles à dégrader. Les hémicelluloses sont une famille de polymères ramifiés, de sucres en C5 et C6. Leurs compositions sont différentes dans les bois de feuillus, de résineux ou dans les pailles de graminées. Les lignines sont une vaste famille de polymères complexes et ramifiés, à base de trois monomères, présents dans des proportions très diverses. Ces trois groupes de polymères s'assemblent entre eux, selon des configurations qui les rendent inégalement résistants à des fragmentations physiques ou à des modifications chimiques.

3. Acteurs et projets

3.1. Torréfaction

La liste d'acteurs engagés dans le développement de la torréfaction est longue, avec quelques dizaines de projets ayant atteint l'étape pilote et plusieurs démonstrateurs actifs ou l'ayant été (*la liste exacte est difficile à garder à jour : si les nouveaux projets sont souvent annoncés, leur échec ou leur interruption ne l'est pas*). La recherche est abondante et les publications scientifiques sont nombreuses.

Nombre de publications scientifiques sur la torréfaction de la biomasse, recensée par une équipe de chercheurs portugais en 2018⁴.



L'IBTC (INTERNATIONAL BIOMASS TORREFACTION COUNCIL), affilié à **BIOENERGY EUROPE** rassemble une partie des acteurs engagés dans des développements de biocombustibles torréfiés.

Le tableau ci-dessous présente quelques exemples d'entreprises engagées dans le développement d'un procédé de torréfaction. Les rares usines en construction méritent l'attention car aucun projet n'a encore atteint l'étape industrielle.

Quelques projets de torréfaction pour la production de biocombustibles solides

Entreprise/projet	Pays	Technologie	Capacités Kt/an	Commentaires
AIREX ENERGY	Canada	Torréfaction flash (2-3 secondes) dans un réacteur cyclonique.	15	Projet d'unité de 100 Kt.
BIOENDEV AB	Suède	Four tournant (<i>rotary drum</i>)	16	Entrée au capital d'investisseurs japonais. Projet d'unité de 60 Kt.
CIBV⁵	France	Four multi-soles, vertical - avec huile thermique. Technologie CMI.	45	CMI = Cockerill Maintenance et Ingénierie (Belgique)
FUTERRA TORREFAÇAO E TECNOLOGIA S.A	Portugal	Lit fluidisé (<i>swirling bed</i>)	120	Unité en construction + 55 Kt de granulé blanc.
LMK ENERGY	France	Four à lit mobile (<i>moving bed reactor</i>), chauffage direct.	20	Issu de la technologie Thermya (torréfaction "douce")
RESTORATION FUEL - OREGON TORREFACTION	USA	Four tournant (<i>triple rotary drum</i>)	100	Unité en construction (Oregon). Lancement prévu mi 2019.

⁴ Future Perspectives of Biomass Torrefaction: Review of the Current State-Of-The-Art and Research Development. Jorge Miguel Carneiro Ribeiro et al. Sustainability 2018, 10, 2323

⁵ CARBON INGEN'R BUGÉAT VIAM, filiale dédiée au projet de SOMIVAL, EIFFAGE et du FCI Limousin Sassu

3.2. Explosion à la vapeur

Seulement deux entreprises semblent avoir atteint l'étape du démonstrateur. Ce sont le nord-américain **ZILKHA** et le norvégien **ARBAFLAME**.

ARBAFLAME aurait produit ses premiers lots expérimentaux en 2003. Plus récemment, le projet **ARBAHEAT**⁶, soutenu par la Commission Européenne a pour objectif la démonstration de la possibilité de conversion de la centrale thermique d'ENGIE du port de Rotterdam, en une unité de cogénération fonctionnant au "black pellet".

ZILKHA (USA) a développé son procédé à partir de 2006. En 2014, l'entreprise présentait son usine de Selma (Alabama) d'une capacité de 275 Kt/an, à partir de plusieurs réacteurs fonctionnant en parallèle et par batch, La fabrication de granulés noirs a été initiée en 2015, pour s'arrêter en 2017.

En France, deux projets sont en cours de développement :

Porté par l'entreprise **EUROPEENNE DE BIOMASSE**, le projet FICA-HPCI⁷ va mettre en œuvre la technologie d'explosion à la vapeur en continu du finlandais VALMET, dans une unité en construction qui sera d'une capacité de production de 120 Kt de granulés de biomasse explosée à la vapeur.

EDF développe le projet **ECOCOMBUST**, sur le site de sa centrale thermique de CORDEMAIS (Loire Atlantique). Un pilote est en fonctionnement. Les matières premières ciblées sont des déchets de bois et des résidus ligneux.

3.3. Autres procédés

On peut citer le "black pellet" du russe **BIONET**, issu de la granulation de résidus riches en lignine d'hydrolyse acide du bois, disponibles sous forme d'énormes stocks (4.5 millions de tonnes), datant de l'époque soviétique. BIONET se dit capable de produire 100-150 Kt/an de son granulé et les ressources disponibles devraient assurer 12 ans d'activité. En dépit de propriétés similaires à celles des produits issus d'un traitement thermique de la biomasse, le granulé "noir" de BIONET ne peut être classé parmi ces derniers.

4. Pourquoi une telle absence de réalisations industrielles pérennes ?

L'histoire récente de la torréfaction et de l'explosion à la vapeur est jalonnée de présentations de procédés décrits comme "à maturité" et de "projets industriels, au démarrage imminent", avec un marché potentiel qualifié de gigantesque. Comme le rappelle la publication portugaise, citée au § 3.1, il y avait, en 2011, plus de 60 projets actifs de développement de la torréfaction et 15 démonstrateurs à grande échelle prévus. Très peu de ces derniers ont vu le jour et aucun n'a encore été suivi d'un développement industriel pérenne.

Au-delà des excès d'annonces de start-ups en quête de fonds, on peut s'interroger sur les raisons de cette lenteur à l'industrialisation. Le dialogue avec différents acteurs et observateurs du secteur permet d'esquisser quelques premiers éléments de réponse :

- Plusieurs des entreprises engagées dans un projet n'avaient **pas d'expertise suffisante de la biomasse** et de la lignocellulose. De leur côté, les équipementiers ont surestimé les capacités de leur matériel.
- **La maîtrise des procédés thermiques et des traitements à la vapeur sous pression** est loin d'être anodine, en particulier quand il s'agit de les mettre en œuvre à l'échelle industrielle.
- **Les changements d'échelle** sont particulièrement difficiles car ils modifient l'efficacité des transferts de chaleur et leur homogénéité.
- Les technologies en œuvre ne se résument pas à un simple chauffage de matière. La bonne **récupération et la valorisation des gaz émis** est délicate, en particulier quand ils se chargent d'acides organiques.

⁶ Cost-effective transformation of a Highly-Efficient, Advanced, Thermal Ultra-SuperCritical coalfired power plant into a CHP by retrofitting and integrating an ARBAFLAME biomass upgrading process. Duration: 01/10/2018 to 30/09/2022.

⁷ FILIERE INDUSTRIELLE CHAMPAGNE-ARDENNES – HAUT POUVOIR CALORIFIQUE INDUSTRIEL

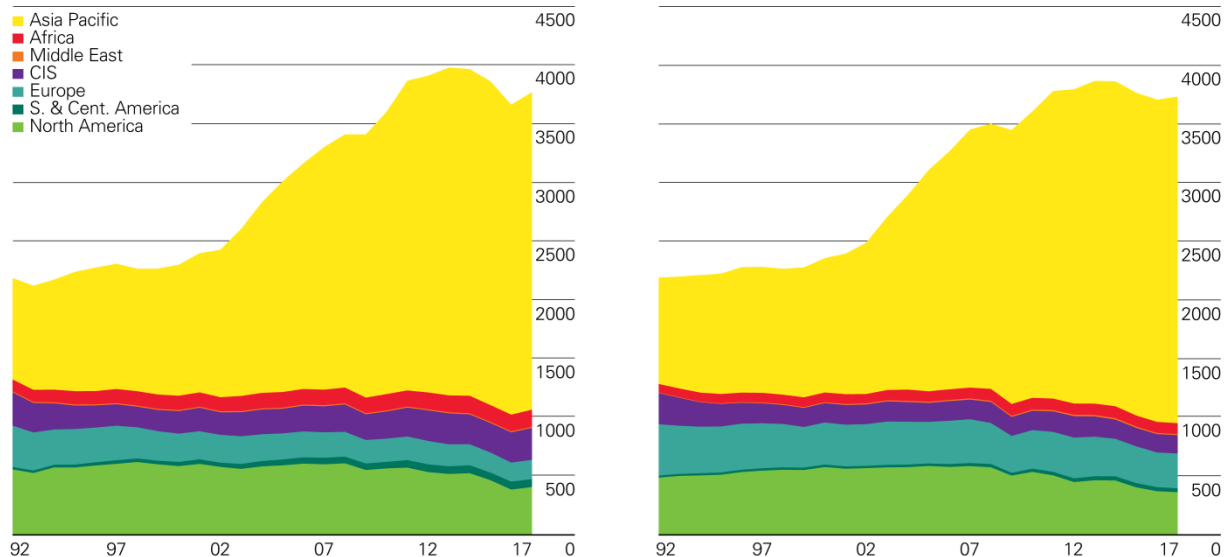


- **La nature poussiéreuse des produits** complique leur convoyage, leurs manipulations et implique la présence d'un ensemble de dispositifs de sécurité coûteux pour éviter explosions ou incendies (qui ont dévasté plusieurs installations expérimentales).
- **La nécessité de granuler**, pour conditionner le produit, accroît le défi technologique, en impliquant un compromis difficile : le charbon - ou ce qui s'en rapproche - ne se granule pas. Une fois la lignine d'une biomasse trop altérée, l'incorporation de liants onéreux (de type amidon) devient nécessaire, ce qui dégrade l'économie du procédé.
- **L'enjeu de performances économiques** est fondamental, alors que de tels procédés sont coûteux. Aujourd'hui, plusieurs centrales thermiques européennes et asiatiques ont déjà été converties, en partie ou totalement, au granulé "blanc" et constituent autant de points de référence, en termes techniques qu'économiques. Le granulé "noir" doit apporter impérativement un "plus" de qualité, à moindre coût. Une mauvaise évaluation du bilan matière ou énergétique, le besoin d'additif pour granuler, etc. sont autant d'occasions de dégrader le prix de revient d'un granulé noir face à son concurrent blanc.
- **Une méfiance croissante des énergéticiens** à qui l'on présente ces technologies depuis de longues années, sans concrétisation. Pour les unités déjà converties au granulé blanc industriel, l'intérêt potentiel est moindre.

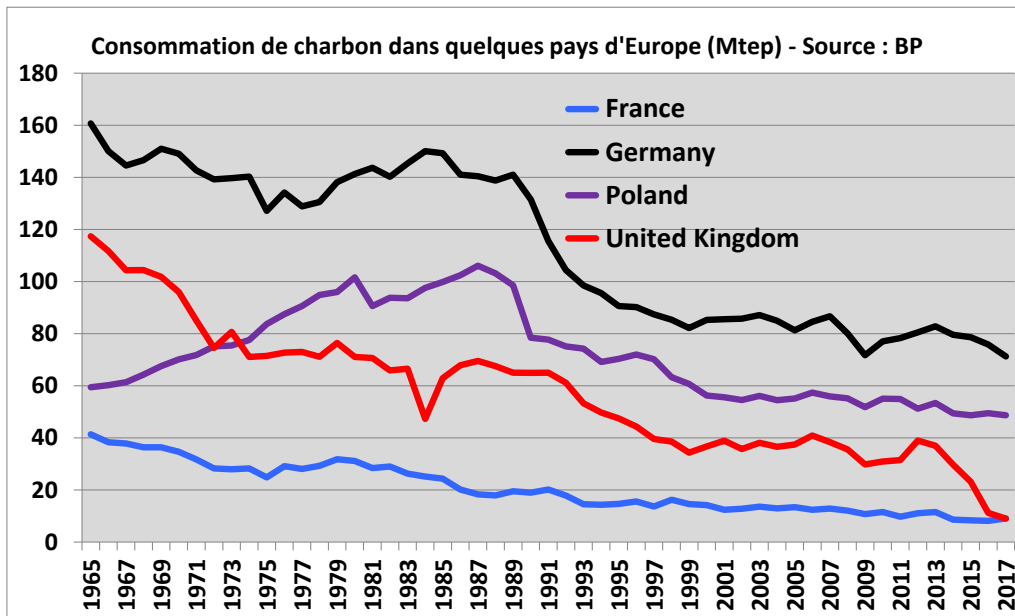
5. Les marchés potentiels

Selon BP (British Petroleum) qui publie chaque année son *Statistical Review of World Energy*, le charbon demeure la principale source d'énergie pour la production d'électricité dans le monde. Ce combustible comptait pour 38 % de la production mondiale électrique 2017, soit la même part qu'en 1998 malgré une "légère baisse" au cours des dernières années.

Production [à gauche] et consommation mondiale de charbon, de 1992 à 2017, Mtep (source : BP)

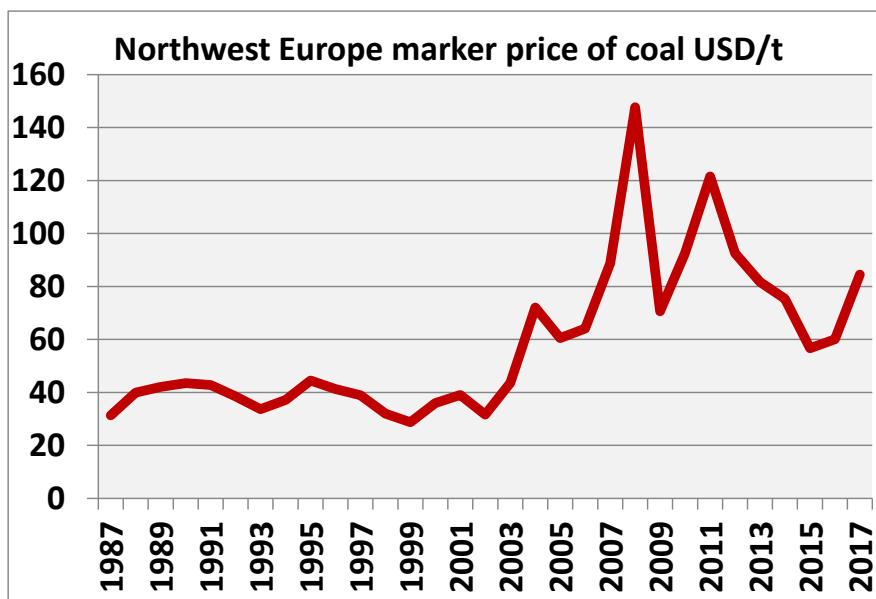


Au-delà de la production électrique, la consommation de charbon, toutes valorisations confondues, a connu une croissance très forte ces dernières décennies, essentiellement en Asie. Dans la même période, les usages du charbon en Europe ont régulièrement baissé mais son utilisation pour la production électrique demeure importante, particulièrement en Allemagne et en Pologne. Le Royaume Uni a, pour sa part, banni rapidement le charbon pour tous ses usages et est devenu, de très loin, le premier consommateur de granulé "blanc" pour la production d'électricité.



Le prix du charbon a fortement varié ces dernières années, atteignant des sommets lors de la crise de 2008. Il n'en reste pas moins celui d'une source d'énergie très compétitive, largement répartie sur le globe, à l'inverse du gaz et du pétrole dont les réserves sont concentrées dans un petit nombre de pays.

Prix moyen du charbon en Europe de l'Ouest : source BP



Le charbon montre un PCI variable suivant sa qualité mais on peut - pour simplifier - le considérer comme près du double de celui des granulés "blancs". Les utilisations industrielles de ces derniers font l'objet de contrats d'approvisionnements sur plusieurs années, selon des cahiers des charges techniques spécifiques à chaque énergéticien. La multiplication des opérateurs et la nécessité de pouvoir compléter ces contrats à long terme par des achats plus opportunistes a fait se développer un marché "spot", avec des cotations régulières. Depuis 2009, ce prix spot du granulé a évolué entre 115 et 210⁸ USD/t, alors que le prix du charbon thermique, près de deux fois plus concentré en énergie, se tenait entre 55 et 120 USD/t (après son pic de 2008, à 150 USD/t).⁹ L'usage du granulé de bois reste donc non compétitif et ce sont bien des décisions politiques (incitations aux énergies renouvelables ou taxations du carbone) qui peuvent conduire à son utilisation pour la production d'électricité.

⁸ Prix spot Argus CIF ARA (= Europe de l'Ouest).

⁹ Les cours à suivre sont ceux du charbon thermique, utilisé par les centrales électriques, restant nettement moins élevés que ceux du charbon à coke, utilisé par la sidérurgie.

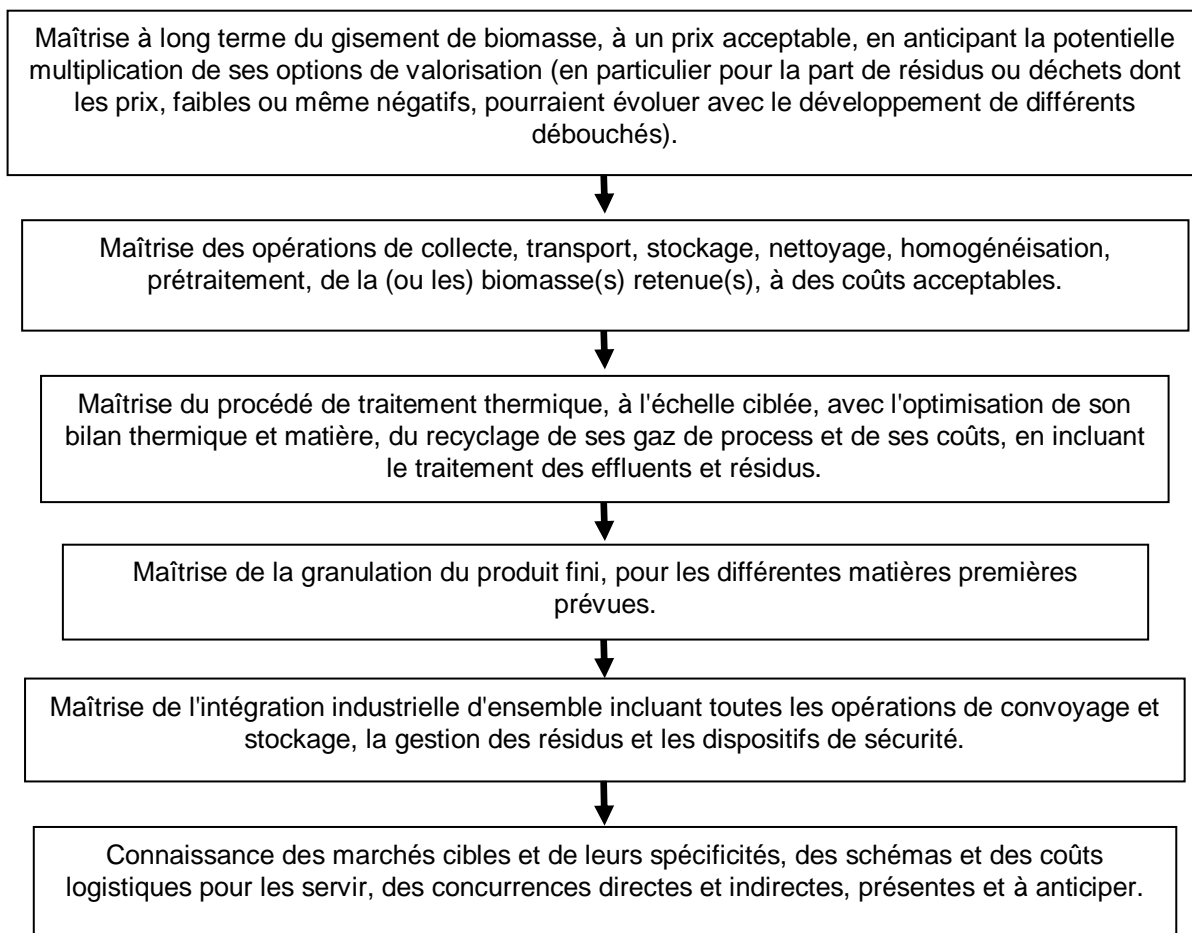
Certains promoteurs du "black pellet" avancent que son marché potentiel est celui de l'ensemble du charbon. Les analyses plus crédibles sont identiques à celles développées pour le granulé blanc industriel : elles consistent à examiner, pays par pays, puis une par une, les centrales thermiques ou les chaufferies au charbon, susceptibles d'être converties à la biomasse, dans le cadre de politiques "climat" nationales. Les futurs granulés noirs devront se positionner sur un tel marché, en valorisant leurs avantages spécifiques (logistique facilitée par l'hydrophobie et la concentration du produit, mise en œuvre plus proche de celle du charbon). Les premières productions ne sauraient être comparables en volumes à celles du granulé blanc qui est fabriqué dans des grandes ou très grandes unités (plusieurs "méga-usines" nord-américaines produisent plus de 500 000 tonnes de granulé par an). Le granulé noir pourrait se positionner dans des centrales ou chaufferies encore non converties à la biomasse, ses propriétés permettant d'alléger les investissements nécessaires.

Le combustible concurrent n'est pas le charbon mais bien le granulé blanc industriel. Les promoteurs du granulé noir ne s'y trompent pas : ils comparent systématiquement les performances de leur produit à celles du granulé blanc, tout en insistant sur la compatibilité de leur combustible avec le charbon et aux schémas de co-combustion.

Une question générale concerne les deux biocombustibles : le granulé noir comme le granulé blanc industriel seront-ils des combustibles de transition, pour une à quelques décennies, ou peuvent-ils espérer contribuer de façon durable à un mix électrique, évoluant, par exemple, des grandes centrales thermiques actuelles vers des unités plus petites de cogénération ?

6. Les points de vigilance sur les projets en cours ou à venir

Les principaux facteurs clés de succès d'un projet de production de "black pellets" peuvent être résumés dans le schéma suivant :



Chaque maillon de la chaîne de valeur appelle des optimisations pouvant impliquer tant de longues étapes de R&D ou d'études que des compétences spécifiques. L'échec de nombreux projets tient à un excès d'attention sur le maillon du traitement thermique, en considérant les autres comme accessoires. Un spécialiste du charbon et de la diversité de ses qualités restera surpris devant l'extrême variabilité de la biomasse et son instabilité, tant qu'elle n'est pas séchée. Un bon ingénieur thermicien n'est pas un spécialiste de la granulation et n'anticipe pas forcément ses contraintes, etc.

On peut donc lister les points de vigilance suivants :

- L'étude des gisements de biomasse a-t-elle bien pris en compte les évolutions rapides de la valorisation de ce qui peut être aujourd'hui une ressource négligée voire un déchet coûteux mais pouvant devenir en quelques années une matière première de valeur, convoitée par plusieurs filières ?
- Le projet rassemble-t-il (en interne ou via des partenariats) des compétences suffisantes sur la mobilisation et le stockage de la biomasse ? Sur les procédés industriels à mettre en œuvre (y compris la granulation) ? Pour la compréhension des besoins des clients finaux ?
- Quelles sont les bases de connaissance des matières premières envisagées ? Quelles références de description de leur variabilité ? Comment sont envisagés les approvisionnements, les stockages, les pré-traitements ?
- Les bilans matière et énergétique sont-ils clairement établis ? Avec quelle robustesse ? Quels sont les risques identifiés de dérive ? Quelles seraient alors les conséquences techniques et économiques ?
- Quelle est l'échelle du démonstrateur en comparaison de celle des futures unités industrielles ?
- Dans les perspectives de passage à cette échelle industrielle, quel est le modèle envisagé pour le traitement thermique ? La multiplication des réacteurs de la taille du démonstrateur en parallèle ou un plus gros réacteur ? Un procédé par lots ou en continu ? Quelles économies d'échelle et sur quels postes ?
- Quelle attention est portée à toutes les questions annexes au procédé : stockages, convoyages, gestion des poussières, traitement des résidus, installations de sécurité, etc. ?
- Quel marché, quelles cibles, dans quels pays ? Comment sont projetées les évolutions des besoins à 5, 10, 15, 20 ans ? Sur la base de quels scénarios ?
- Comment sont anticipées les différentes concurrences, qu'elles soient directes, indirectes ou au travers d'évolutions plus larges dans les productions et les consommations d'énergie électrique ou thermique ?

7. Conclusions/Perspectives

L'explosion à la vapeur et la torréfaction sont deux technologies aux principes de base simples mais dont la mise en œuvre industrielle est complexe, d'autant plus qu'elles s'appliquent à une biomasse par nature hétérogène et que le conditionnement final du produit nécessite une étape de granulation.

Le besoin mondial de remplacement du charbon par des ressources renouvelables est considérable. La solution d'un biocombustible présentant des propriétés voisines est séduisante car elle permet une pérennisation des installations existantes.

La promesse d'un "bio-charbon" peu coûteux, concentré en énergie, facile à manipuler, à transporter, à stocker et à brûler en co-combustion n'est pas encore tenue, en dépit de l'abondance de travaux de recherches et de développements conduits depuis une quinzaine d'années.

Les "black pellets" auront à faire face à la concurrence du granulé blanc industriel dont la consommation mondiale représente déjà une vingtaine de millions de tonnes, servies par des unités de fabrication ayant optimisé leurs effets d'échelle.

L'explosion à la vapeur ou la torréfaction doivent permettre de produire des granulés biocombustibles à pouvoir calorifique élevé, hydrophobes et pouvant être stockés en plein air, aptes à la co-combustion avec le charbon ou à se substituer à lui, dans des centrales thermiques ou des chaufferies existantes. Le granulé "noir" ne l'emportera sur le granulé blanc que si ces propriétés différenciatrices lui confèrent un avantage économique suffisant et pérenne.



L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

<https://www.ademe.fr/>

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous un regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

Etat des lieux de la filière des granulés de biomasse torréfiée ou explosée à la vapeur

Résumé : Dans la perspective de substituer au charbon des biocombustibles renouvelables, différents prétraitements thermiques de la biomasse lignocellulosique ont été développés. Parmi ceux-ci, la torréfaction et l'explosion à la vapeur font l'objet de travaux depuis plus de quinze ans, sans encore aucun succès industriel durable. La demande potentielle d'un "bio-charbon" renouvelable est importante, dans les pays voulant pérenniser leurs centrales thermiques et autres chaufferies au charbon, tout en respectant leurs objectifs "climat".

La concurrence établie par le développement très rapide de filières de production de granulé industriel "blanc" renforce les défis que doit relever un granulé "noir". Sa capacité à homogénéiser un large ensemble de matières premières disponibles, en particulier de déchets, reste à démontrer.

Une liste de facteurs clés de succès et de points de vigilance est proposée. Une approche intégrée est indispensable, depuis la maîtrise du gisement de biomasse jusqu'à une bonne mise en œuvre de la combustion dans les centrales thermiques ou chaufferies clientes. Le procédé devra apporter à la chaîne de valeur un avantage économique marqué.

En France, on dénombre deux projets de production de bio-charbon mettant en œuvre la torréfaction et deux l'explosion à la vapeur, avec une unité industrielle en construction.

Essentiel à retenir :

En dépit d'un succès annoncé dès le milieu des années 2000, les traitements thermiques de la biomasse pour produire des combustibles renouvelables et substituables au charbon n'ont toujours pas franchi l'étape d'industrialisation. Les nombreux obstacles techniques et économiques ont été sous-estimés.

Quatre projets de démonstration sont en cours en France : deux mettent en œuvre l'explosion à la vapeur et deux autres la torréfaction.

