FORUM

Avenir des filières biomasse à l'horizon 2030

Mardi 3 février 2015
Rennes

73 rue de Saint Brieuc - CS 56520 – 35065 RENNES Cedex
Antenne Pays de la Loire - Maison de l'Agriculture - La Géraudière - 44939 NANTES Cedex 9

Sommaire

Introduction **3**

Les ressources en 2030 : où en seront les usages ? **4**

Vers une valorisation intégrée des ressources biomasse 4

Quelles sont les ressources possibles pour répondre à ces enjeux ? 5

Adaptations à prévoir 9

La valorisation de la biomasse énergie en 2030 : avec quels vecteurs ? **12**

Panorama des procédés de conversion énergétique de la biomasse 12

Focus sur les solutions technologiques envisageables en 2030 dans l'Ouest 13

La multiplication des vecteurs énergétiques pour une réponse à tous les usages 19

L'économie circulaire en 2030 : un levier pour mieux valoriser la biomasse ? **23**

Constat de la raréfaction des ressources et enjeux liés à la biomasse 23

Le concept de l'économie circulaire appliqué à la biomasse : quels verrous devront être levés d'ici 2030? 25

Des exemples d'économie circulaire à l'horizon 2030 27

La biomasse comme source de développement local 29

Bibliographie de références **31**

Introduction

En février 2010 Aile lançait son forum « prospective biomasse et milieu rural » sur fond de transformation du marché du bois énergie et de lancement de la filière biogaz. 5 ans après, l'évolution est nette[1] et une dynamique est lancée.

Aujourd'hui, le scénario d'évolution de la consommation énergétique française d'ici 2030 a pour objectif de continuer la hausse de la part d'énergie renouvelable (32% en 2030) et notamment l'utilisation importante de la biomasse comme source d'énergie. Cette croissance se poursuivra dans les décennies suivantes dans la limite des ressources disponibles.

Les ressources en biomasse étant à la fois abondantes mais limitées, le développement de leur utilisation doit être à la fois géré et planifié. Il doit s'astreindre à mettre en œuvre les technologies les plus efficaces. Pour cela, faut-il envisager des ruptures technologiques et de nouveaux modèles économiques ?

Face à ces enjeux, Aile a souhaité poser la question de l'avenir des filières biomasse en organisant un nouveau forum en 2015, à l'occasion de ces 20 ans, lieu d'échange et de débat avec les acteurs des filières de l'Ouest.

La réalisation de ce document s'appuie sur une revue bibliographique large et sur des éléments d'analyse du contexte par notre Association.

Trois parties permettent d'articuler cette analyse :

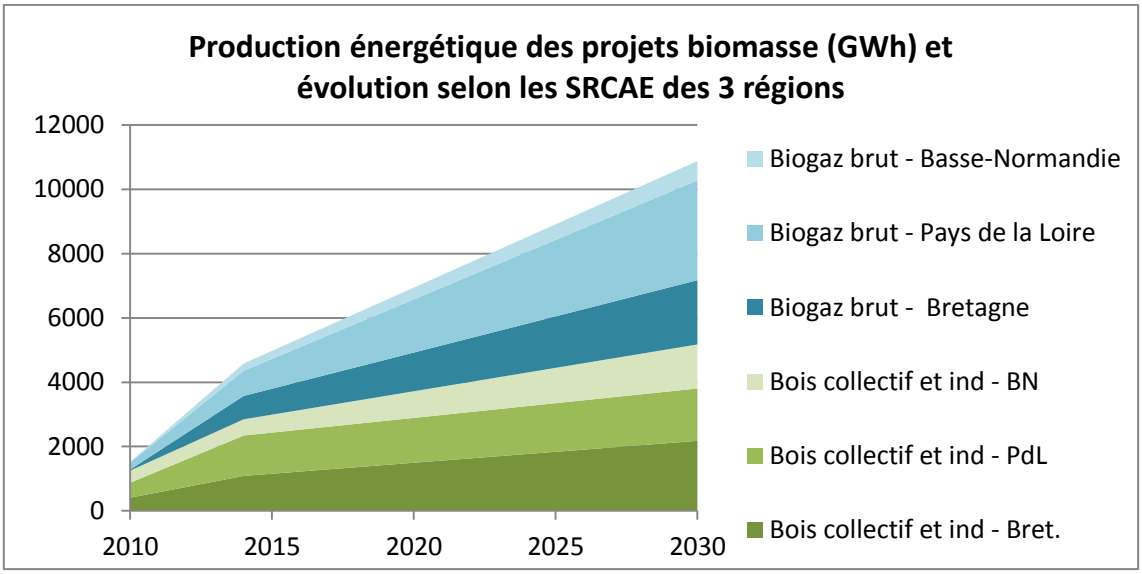
- Les ressources en 2030 : où en seront les usages ?
- La valorisation de la biomasse énergie en 2030 : avec quels vecteurs?
- L'économie circulaire en 2030 : un levier pour mieux valoriser la biomasse?

[1] Cf. rapport bilan Plan bois énergie 2007-2013 et carte biogaz évolutive depuis 2008.

Les ressources en 2030 : où en seront les usages ?

Depuis 2010, la production d'énergie à partir de biomasse du Grand Ouest a plus que doublé. Dans le Grand Ouest comme en France, cette production doit encore être multipliée par trois d'ici à 2030 pour atteindre les objectifs des Schéma Régionaux Air Climat Energie (SRCAE).

Le bois énergie dans le Grand Ouest s'est fortement développé ces dernières années, sous l'impulsion d'appels à projets nationaux (BCIAT et CRE) et des dispositifs d'aides régionaux (Fonds chaleur, PBEB). La production actuelle se situe autour de 3000 GWh en 2014. L'effort à poursuivre pour atteindre les 5200 GWh en 2030 reste considérable. La filière biogaz est quant à elle plus récente avec un développement très marqué depuis 2010 et un très fort développement attendu pour atteindre 5700 GWh, une production supérieure à celle du bois énergie en 2030.



L'atteinte des objectifs de développement de la biomasse énergie pourra se réaliser grâce à :

- la valorisation de l'important panel de ressources locales (partie II)
- une meilleure efficience de l'utilisation de la ressource biomasse : à quantité de biomasse constante, la production d'énergie sera supérieure grâce à une meilleure préparation et conversion énergétique de la matière (partie III).

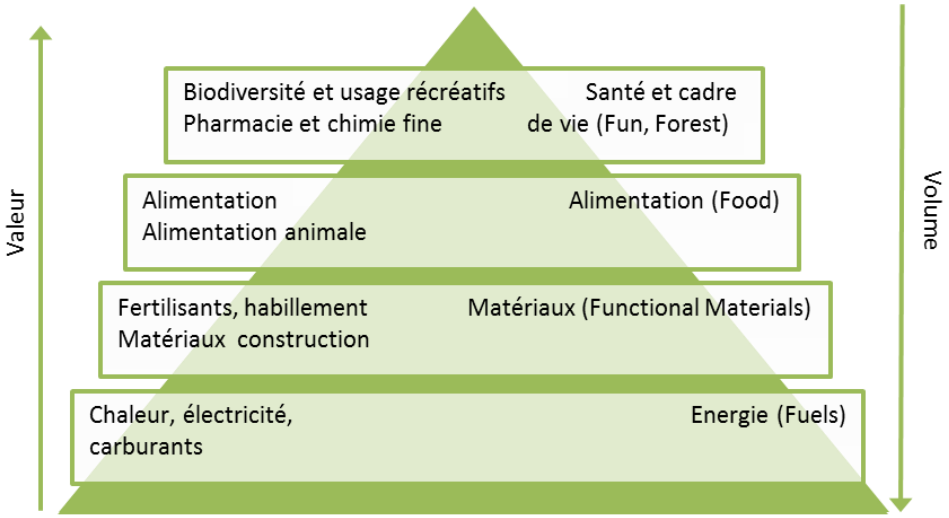
Nous allons développer ces deux approches plus tard, et aborder maintenant les transformations plus profondes qui nécessiteraient d'être mises en place.

Vers une valorisation intégrée des ressources biomasse

La transition vers une économie plus sobre et basée sur des ressources renouvelables suppose d'apporter une réponse plus globale aux défis interdépendants auxquels le monde fait face : augmentation de la population, diminution des ressources fossiles et minérales, concurrence d'usage des terres, changement climatique…

Cette transition nécessite de nouvelles approches cherchant à valoriser au mieux la ressource. La biomasse remplit en effet un certain nombre de fonctions essentielles et concurrentes : l'alimentation (Food) qui est l'usage fondamental et la fertilisation des sols, deux fonctions pour lesquelles la biomasse est indispensable. La biomasse est utilisée depuis toujours pour la production de matériaux (Functional material) essentiellement le bois construction, pour l'habillement et pour la production d'énergie (Fuel). A ces différents usages, il convient d'ajouter les usages récréatifs

(Fun) et de réserve de biodiversité (Forest). Ces usages peuvent être regroupés en 4 catégories : santé, alimentaire, matériaux et énergie, dont la valeur peut se schématiser sous la forme d'une pyramide. Cette approche se base sur des notions économiques et non de valeur d'usage, l'alimentation restant une fonction vitale.



Pyramide des valeurs de la biomasse d'après WTC, BBE (2011)

Cette pyramide schématise la valeur potentielle de la biomasse selon son usage, avec l'énergie se situant comme le dernier usage de la biomasse.
Elle permet d'imaginer des chaînes d'usage de la biomasse en cascade. Prenons l'exemple du lin oléagineux, dont on extrait l'huile pour l'alimentation humaine. Le tourteau résultant est valorisé en alimentation animale. La fibre de la tige peut servir pour l'habillement, qui sera ensuite recyclé en isolant. Cet isolant finira par produire de l'énergie et dans le meilleur des cas les cendres fertiliseront le sol. Au cours de ce processus, la valeur ajoutée diminue progressivement au fur et à mesure des cascades d'utilisation. Le bois est un autre exemple d'utilisation en cascade de la biomasse. La forêt joue un rôle majeur comme puits de carbone, réserve de biodiversité. L'exploitation de la partie noble du bois est valorisée pour créer des meubles, ceux-ci servent ensuite de matière première pour la fabrication de contre-plaqué ; le contre-plaqué sera recyclé avant d'être enfin incinéré. Les sous-produits alimentent les filières bois industrie et énergie.

Cette hiérarchisation d'usage est d'autant plus importante à garder à l'esprit que la réduction des réserves d'énergie fossile et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre amènent à accroître les usages non alimentaires de la biomasse.
Aujourd'hui, la principale barrière à la mise en place de ces usages en cascade est économique : les multiples étapes de collecte, de tri, de transformation, de livraison engendrent des coûts dépassant de beaucoup les capacités de financement dans notre économie actuelle.

Quelles sont les ressources possibles pour répondre à ces enjeux ?

Panorama des ressources biomasse

Jusqu'ici la production d'énergie à partir de biomasse provient principalement des **espaces boisés et ses dérivés** mais si l'on souhaite développer la part d'énergies renouvelables d'origine végétale, des ressources complémentaires sont nécessaires.

L'agriculture, l'industrie agro-alimentaire ont pour vocation première de produire des matières alimentaires. Elles génèrent d'importantes quantités de **coproduits végétaux et animaux** susceptibles de trouver une valorisation dans des applications énergétiques. Ces matières sont les plus faciles à mobiliser et sont actuellement déjà valorisées en énergie ou dans d'autres filières.
D'autres matières faciles à mobiliser sont les **résidus de culture et d'entretien du territoire** : menues pailles, pailles de colza, roseaux, fauche de bord de route, etc. Leur coût de collecte peut cependant être important, la production d'énergie ne sera donc pas à court terme le seul objectif de la collecte ; il faut leur trouver des intérêts supplémentaires (limiter les adventices, exporter pour limiter l'enrichissement du milieu…).

Les **cultures énergétiques** peuvent venir en complément de ces ressources existantes. Les cultures annuelles (lin, chanvre, etc.) permettent de conserver une possibilité de rotation et peuvent être intéressantes agronomiquement à insérer dans une rotation. Les cultures pérennes comme le miscanthus présentent l'avantage d'être plus économes en intrants, elles peuvent également être valorisées en bordure de cours d'eau ou de fossés si ceux-ci sont portants et accessibles ou dans des parcelles éloignées du cœur de l'exploitation.

Outre la ressource terrestre le Grand Ouest dispose d'un gisement de **biomasse marine** qui représente un potentiel énergétique réel. Les microalgues, riches en lipides, sont pressenties pour la production de biocarburants de 3ème génération destinés à remplacer à terme les huiles végétales, avec une production visée au-delà de l'horizon 2030. Les macroalgues produites ou cueillies sont valorisées en matériaux ou en alimentation.

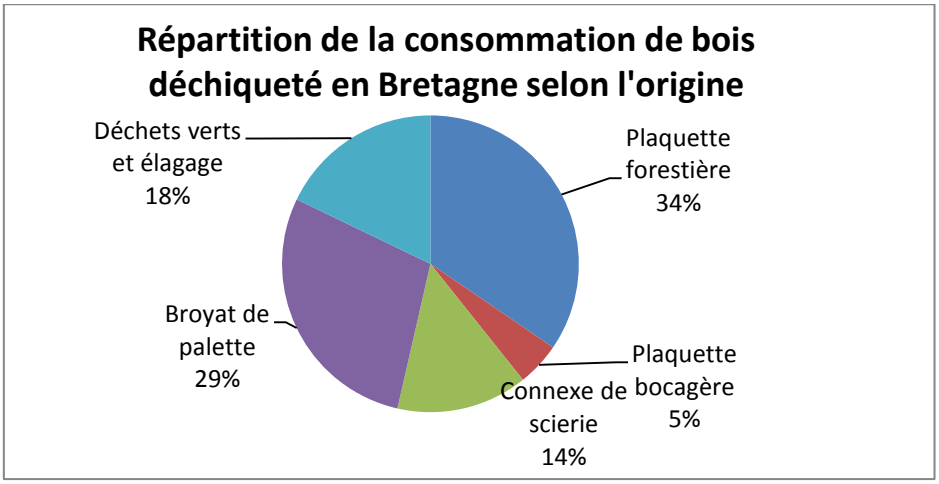
La biomasse se caractérise par une abondance et une diversité de ressources. Contrairement aux ressources fossiles, la biomasse est uniformément répandue sur les territoires. Elle peut jouer un rôle essentiel dans la résilience des territoires. En lien avec la multiplicité d'usage de cette biomasse, l'enjeu sera l'assurance d'une utilisation durable de ces ressources.

Des projets biomasse énergie intégrant plus de biomasse herbacée

La biomasse ligno-cellulosique

La première source d'énergie du Grand Ouest reste le bois bûches (3 millions de tonnes) qui représente 78% de la consommation de bois. Cette consommation tend vers une stabilisation grâce au remplacement des appareils de combustion anciens par de nouveaux appareils plus performants et à l'isolation progressive des habitations, ce qui contribue à répondre à l'enjeu de la qualité de l'air. Ces appareils de petite taille supportent mal des combustibles autres que le bois.

Les trois régions consomment l'équivalent de 1 million de tonnes de bois plaquettes pour le chauffage industriel et collectif. La répartition de la consommation de plaquettes est la suivante :



La plaquette forestière et d'élagage prend une part de plus en plus significative dans l'approvisionnement des chaufferies bois. Les gisements de broyat de palette et de connexes de scierie, les plus faciles à mobiliser sont largement consommés aujourd'hui.
Théoriquement, la biomasse disponible dans le Grand Ouest peut permettre de répondre aux objectifs 2030 de développement du bois énergie, 5200 GWh soit 2 millions de tonnes de plaquettes bois. Plus des trois quart de cette ressource se trouve dans le bois forestier et d'élagage. En réalité, la mobilisation dépend de la volonté des propriétaires mais aussi de la croissance de la filière bois matériau, dont le bois énergie est le sous-produit. Les contraintes techniques et économiques (coût du bois énergie) limitent l'accès à ce gisement à court terme ; sa mobilisation à moyen terme reste ambitieuse.

D'autres ressources peuvent compléter ce gisement forestier et bocager:

Les collectivités collectent des tonnages importants de déchets verts actuellement majoritairement compostés. Une partie de la ressource ligneuse, correspondant au refus de criblage, peut être collectée avant la phase de compostage et alimenter des chaufferies

biomasse. A l'échelle du Grand Ouest, sur la base d'une valorisation de 15% des déchets verts, la quantité de bois énergie valorisable s'élève à 120 000 tonnes soit 12% de la production supplémentaire à réaliser d'ici 2030. La ressource brute pourrait trouver d'autres pistes de valorisation après une phase de préparation préalable (cf. partie III).

Les cultures ligno-cellulosiques, les taillis à courte rotation, taillis à très courtes rotations, le miscanthus ou autre culture peuvent être implantées sur des surfaces limitées. La plantation des surfaces spécifiques, environ 10 000 hectares par région, paraît compatible avec les objectifs de développement de la biomasse et reste très peu significatif à l'échelle de la production agricole. L'équivalent de 30 000 hectares sur le Grand Ouest, soit 0,6% de la SAU équivaudrait à la production de 500 000 tonnes de biomasse et l'équivalent de 60% de l'effort supplémentaire à réaliser.

Les menues pailles sont un des sous-produits peu valorisés actuellement et qui peuvent représenter des quantités significatives. A l'échelle du Grand Ouest, si 50% des menues pailles des céréales sont exportées pour un usage combustible, cela représente l'équivalent énergétique de la moitié de l'effort à fournir d'ici 2030. Utilisées en vrac ou sous forme de briquettes dans des chaudières adaptées et équipées de filtres, ce gisement pourra compléter à moyen terme la ressource bois. Une autre perspective intéressante de valorisation intégrée serait d'utiliser la menue paille comme litière. Elle serait ensuite valorisée en méthanisation pour la production de biogaz. Le digestat issu de la méthanisation servirait de fertilisant.

Substrats agricoles : cultures énergétiques et déjections animales

Pour répondre aux objectifs des SRCAE des régions Basse-Normandie, Bretagne et Pays de la Loire à l'horizon 2030, il faut mettre en place les unités de méthanisation permettant d'atteindre environ 5 700 GWh de biogaz brut sur les 3 régions (environ 600 GWh en Basse Normandie, 2000 GWh en Bretagne et 3100 GWh en Pays de la Loire).
Pour les régions Bretagne et Pays de la Loire, ces chiffres sont obtenus en réalisant une interpolation linéaire entre les objectifs 2020 et 2050.

Début 2015, on dénombre 220 projets de méthanisation (toutes typologies confondues) en Basse Normandie, Bretagne et Pays de la Loire. Cela représente 225 GWh de biogaz brut en Basse Normandie (donnée 2011), 720 GWh en Bretagne et 780 GWh en Pays de la Loire (données fin 2014).
17 unités fonctionnement en Basse Normandie, 44 en Bretagne et 42 en Pays de la Loire.

Sur la base de l'analyse des 135 projets de méthanisation agricoles et multi-acteurs, accompagnés dans le cadre du Plan biogaz Bretagne et Pays de la Loire, nous retiendrons les hypothèses de production énergétique et de ration d'approvisionnement suivantes :

Analyse des 135 projets Plan Biogaz	Unités agricoles	Unités multi-acteurs
Energie primaire moyenne (GWh)	4,5	20,5
Surface moyenne CIVE (ha)	50	35
Surface moyenne cultures dédiées (ha)	15	7
Tonnage moyen effluents	5 500	23 000
% effluents moyen dans ration	68%	55%

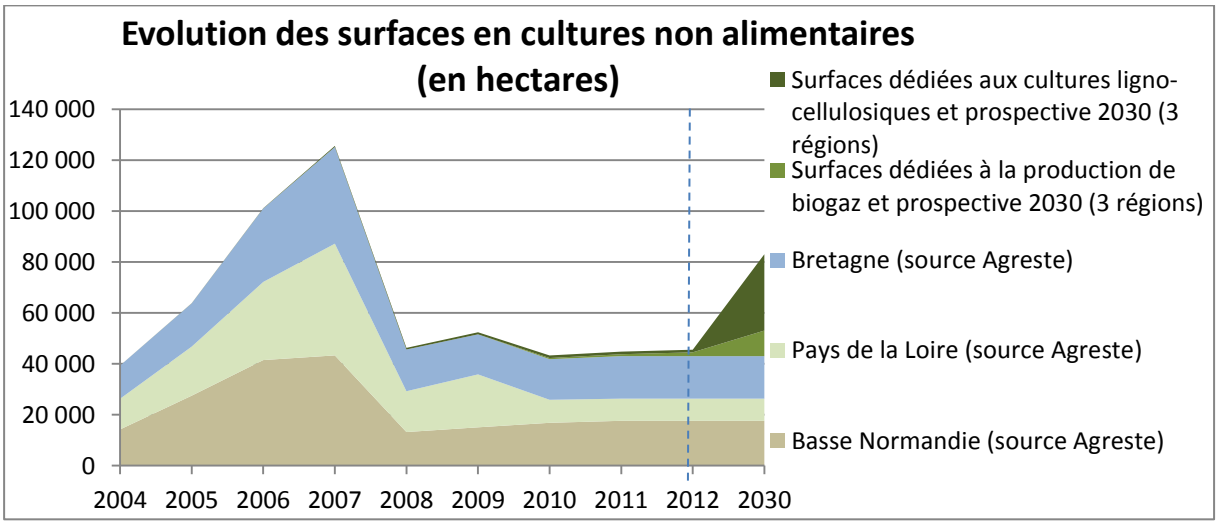
Si l'on considère que la filière méthanisation se développe autour des unités de méthanisation agricoles et multi-acteurs (développement limité des projets industriels purs ou de collectivités), les objectifs SRCAE seront atteints avec :
- 600 unités à la ferme ou collectives agricoles
- 150 unités de méthanisation centralisées multi-acteurs

En moins de 5 ans, le pourcentage de déjections animales dans les rations d'approvisionnement d'unités de méthanisation agricoles a augmenté de plus de 10 points. On suppose que le modèle continue d'évoluer dans ce sens, les effluents représentant plus de 80 % du gisement mobilisable de matières organiques sur les 3 régions. Si l'on envisage une augmentation de 68 à 85% sur les projets agricoles et de 55 à 70% sur les projets centralisés, il faudrait donc mobiliser 8,5 millions de tonnes de déjections animales pour réaliser ces 750 projets. Cette mobilisation représente moins de 28 % du gisement mobilisable estimé lors de l'étude ADEME de 2013 et conforte la filière dans l'idée de poursuivre cette évolution.

Les cultures énergétiques et les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) permettront d'assurer une partie de l'apport de substrats à fort potentiel méthanogène complémentaire aux déjections. Ces cultures pourront être du sorgho dans les zones plus sèches, des prairies, de l'avoine, du triticale. Certaines zones sensibles pourront être entièrement reconverties en couvert pérenne et

prairie et être valorisées en méthanisation. A l'horizon 2030, tablant sur une utilisation raisonnée identique à ce qui se projette actuellement, les surfaces dédiées à la production de cultures énergétiques pour la méthanisation atteindraient 10 000 ha. Les surfaces cultivées en CIVE représenteraient 35 000 ha, mais ne mobilisent pas de surfaces dédiées. On peut pour autant s'interroger sur l'impact de cette conduite à long terme sur les rendements en cultures principales et le risque de sur-sollicitation des sols.

Le graphique ci-dessous compare la mobilisation potentielle de cultures énergétiques (méthanisation et combustion) aux surfaces actuellement dédiées à la production de cultures non alimentaires (principalement des surfaces de colza destinées à produire des biocarburants).



Ce développement correspondrait aux surfaces en place aujourd'hui pour la production de biocarburant. En estimant cette dernière production stable, les surfaces totales en cultures énergétiques resteraient plus faibles que celles plantées en 2007 avant l'augmentation du prix des céréales.

Dans les pays où l'utilisation de cultures énergétiques a été très prônée comme en Allemagne, certains projets commencent à s'orienter vers des matières résiduelles de l'entretien des territoires.

Valorisation des produits d'entretien du territoire

La valorisation des déchets verts sur les territoires peut permettre de limiter l'immobilisation de surfaces dédiées aux cultures énergétiques. Les 180 000 kilomètres de routes des 3 régions représentent un potentiel de 110 000 tonnes de matière sèche d'herbe valorisable en méthanisation, ce qui correspond à plus de 300 GWh d'énergie primaire biogaz (5 % des objectifs des SRCAE). Ce potentiel d'énergie primaire équivaut à environ 35 000 ha de CIVE et pourra venir en substitution d'une partie des cultures énergétiques prévues initialement dans la ration d'approvisionnement.

Valorisées par les exploitants en tant que litière, les landes nécessitent aujourd'hui d'être gérées par fauchage puis exportation pour pérenniser ces milieux. Beaucoup de surfaces ne sont pas mécanisables. Si 15% des landes sèches, qui occupent 48 000 hectares en Bretagne, sont coupées régulièrement pour une valorisation énergétique, cela équivaudrait à l'équivalent de la production de 4 000 ha de culture ligno-cellulosique.

Vers des systèmes plus flexibles

La productivité de la biomasse varie d'une année sur l'autre. Le changement climatique intensifiera ce phénomène. Les systèmes basés sur la biomasse vont donc devoir s'adapter à ces conditions.
En année de production fourragère suffisante et fort rendement en céréales à paille, la menue paille pourra être en partie laissée au sol. On privilégie ainsi la vitesse de chantier de récolte à la quantité de biomasse récoltée à l'hectare. Les cultures pérennes type miscanthus et produits secs d'entretien du territoire pourront être valorisés en énergie. Ces années de production fourragère suffisante, le stock de combustible bois énergie augmentera. Cette réserve de plaquettes servira aux années de production fourragère déficitaire. Ces années de pénurie

fourragère, une partie des menues pailles, du miscanthus et des produits d'entretien du territoire comme les roseaux et landes ou fauche de bord de route pourra compléter la production de litière et/ou de fourrage.

Adaptations à prévoir

Préparation de la biomasse pour optimiser son potentiel énergétique

Le préalable reste l'optimisation du tri des ressources, permettant d'atteindre les rendements de valorisation énergétique les meilleurs possibles.

Défibrage des matières ligno-cellulosiques
Pour la biomasse fibreuse, plutôt destinée à être valorisée en méthanisation (pailles, fumiers pailleux, fauches d'herbe tardives…), il est essentiel de préparer la matière afin de pallier plusieurs problématiques. En effet, ces matériaux sont plus difficiles à :

- Acheminer jusqu'au digesteur : blocage dans les systèmes d'introduction de matières solides ou difficulté à pomper
- Brasser : de par la cavité des tiges, ces substrats forment une couche flottante et engendrent une consommation importante d'énergie pour assurer un brassage suffisant pour leur dégradation ;
- Et donc dégrader : cette couche flottante n'est en conséquence que partiellement dégradée par les bactéries

Plusieurs outils de broyage et hachage sont actuellement développés pour préparer ces matières fibreuses à être valorisées en méthanisation voie liquide infiniment mélangé. Cette évolution technologique permettra d'élargir la gamme de matière qu'il est possible d'intégrer en méthanisation et d'optimiser l'expression de leur potentiel méthanogène.

Ces outils, plutôt que de « couper » la matière, cherchent à reproduire l'action de « mastiquer » telle qu'elle est observée dans la nature, principalement chez les ruminants. Les substrats sont ainsi déchiquetés et fournissent une surface d'attaque beaucoup plus importante pour les bactéries. Certaines expérimentations ont permis d'observer une augmentation de l'efficience de l'unité très importante.

Criblage du bois plaquette
Dans la filière bois énergie, le criblage des plaquettes permet d'éliminer les brins longs (appelés queue de déchiquetage) et de réduire le taux de fines dans les plaquettes. Ces fines, qui représentent jusqu'à 10% du tonnage du combustible, peuvent ensuite être compressées pour produire des briquettes de qualité industrielle. Cette opération présente l'intérêt de réduire le taux d'imbrûlés dans les cendres, l'encrassement des équipements et l'émissions d'imbrûlés (particules, CO, COV..). La matière première serait ainsi mieux valorisée. L'énergie nécessaire à la granulation représente à peine 3% du pouvoir calorifique des briquettes. Le frein à une telle valorisation est plutôt d'ordre économique et logistique.

Homogénéisation des propriétés de la biomasse
En voulant valoriser un panel plus large de ressources biomasse, les unités de valorisation devront faire face à des matières premières de plus en plus hétérogènes. Pour pallier ce problème, il faudra veiller à mélanger les sources, pour permettre de valoriser énergétiquement ces sous-produits dans les meilleures conditions.

Adaptation des technologies à la biomasse

La combustion de biomasse herbacée en chaudière polycombustible
Les sous-produits agricoles et d'entretien du territoire (pailles, menues pailles, broyats de landes, roseaux, etc.) ont des caractéristiques énergétiques proches de celles du bois à quelques éléments près qui peuvent poser quelques difficultés lors de leur combustion en chaudière. Les principaux points concernent leurs caractéristiques chimiques (présence de chlore, d'azote, de soufre, formant des fumées nocives), leur teneur en cendres (besoins élevés de systèmes d'évacuation), la température de fusibilité des cendres qui peut être assez faible et entraîner la formation de mâchefers ou les caractéristiques physiques (granulométrie, masse volumique etc.).

Des essais réalisés dans le cadre du projet Green Pellets ont montré qu'il est possible de valoriser une telle ressource en adaptant la chaudière au combustible. Les constructeurs de chaudière développent des outils de combustion adaptés à la biomasse herbacée (avec des systèmes de grilles mobiles, de décendrage automatique, de filtration des fumées). Sur des chaudières de puissance importante, la combustion de biomasse herbacée est rendue possible par ces dispositifs techniques spécifiques.

Four poly-combustible de la COOPEDOM (20 MW – Domagné)

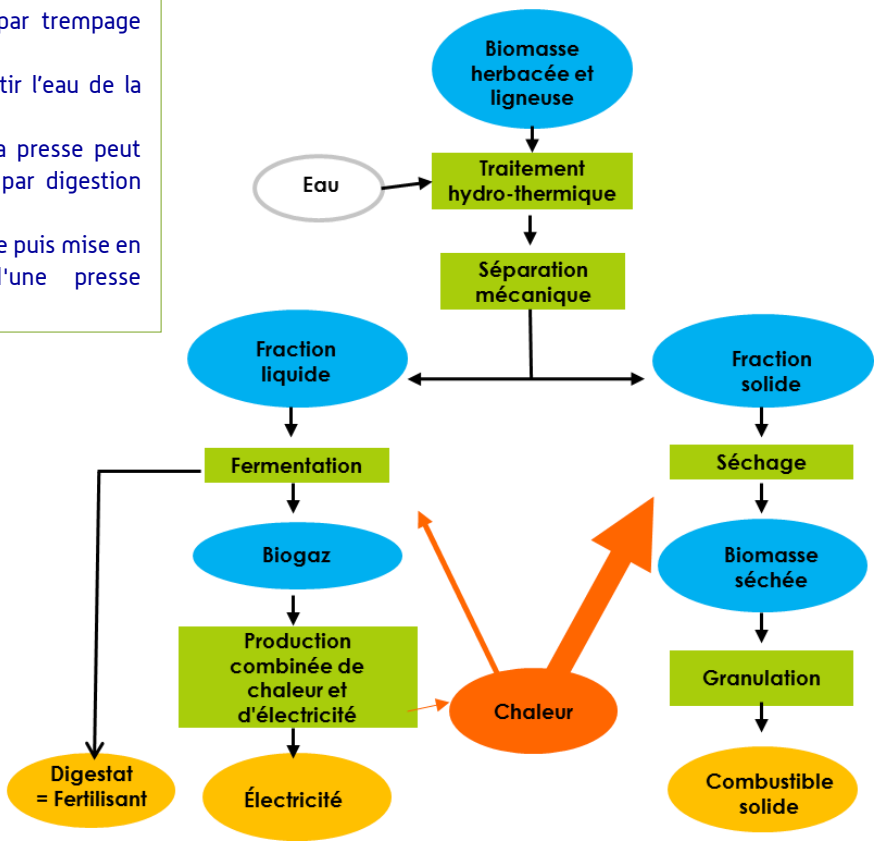
Technologie de valorisation intégrée des produits

La biomasse est le plus souvent triée pour valoriser la partie ligneuse en combustion et la partie fermentescible en méthanisation. Certains produits sont difficiles à séparer, la biomasse peut se trouver faiblement lignifiée et donc ni adapté à de la méthanisation ni à de la combustion. Une gestion intégrée de la biomasse peut permettre d'optimiser cette valorisation. Cette technologie, testée dans le cadre du projet Interreg Combine, réalise ce « tri » en prétraitement.

Une technologie innovante, le procédé IFBB, mis au point par l'Université de Kassel en Allemagne, ouvre une voie à ces herbes matures ou déchets verts. Le principe consiste à infuser l'herbe dans un bain d'eau chaude puis à la passer dans une presse à vis qui sépare la biomasse en deux fractions : l'une solide, épurée des minéraux indésirables, utilisable pour la combustion sous forme de pellets ; l'autre liquide, contenant des composés facilement digestibles, utilisables dans une installation de biogaz.

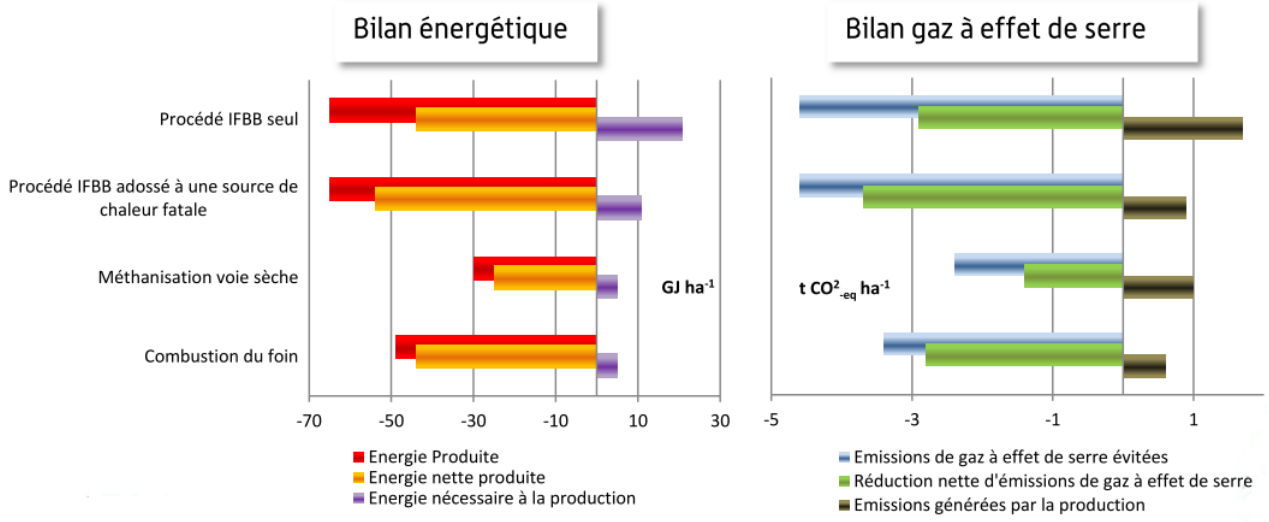
Étapes du procédé :

- La biomasse est broyée et ensilée
- L'ensilage est prétraité par trempage dans l'eau à 40°
- Une presse à vis fait sortir l'eau de la biomasse
- Le liquide résultant de la presse peut être converti en biogaz par digestion anaérobie
- La phase solide est séchée puis mise en briquettes à l'aide d'une presse hydraulique



La technologie est mise en application dans la ville de Baden-Baden en Allemagne.

Ce procédé permet de produire un combustible de qualité améliorée par rapport à la biomasse herbacée introduite. Le trempage de l'ensilage suivi de la séparation de phase permet de réduire les minéraux dans la phase solide. Pour une qualité optimale du combustible, il est conseillé d'avoir environ 50% de biomasse ligneuse en entrée du procédé. Les bilans énergétiques et gaz à effet de serre sont intéressants.



La valorisation de la biomasse énergie en 2030 : avec quels vecteurs ?

Les solutions techniques pour convertir la biomasse en source d'énergie s'appuient sur une grande variété de procédés physiques, biologiques et chimiques, qui plus est souvent combinables. Aux solutions déjà existantes s'ajoute donc une série de perspectives d'évolutions technologiques dont le développement technique et commercial doit répondre aux enjeux de société.

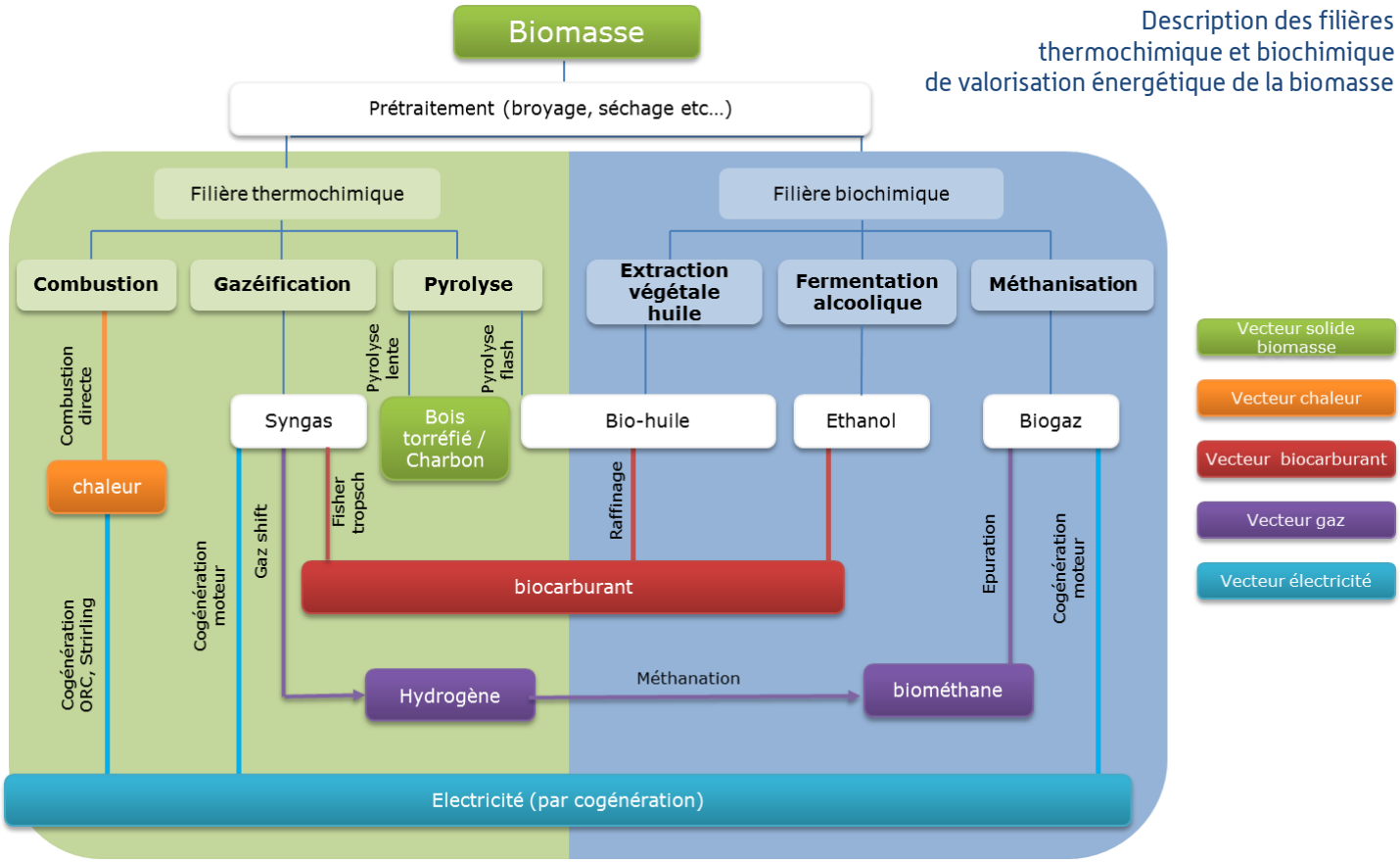
L'efficacité énergétique est une des priorités de ce développement. L'utilisation de technologies performantes à haut rendement ou encore la densification du contenu énergétique de la biomasse (biohuiles, torréfaction, etc.) sont des axes de développement.

Enfin, pour couvrir la variété des usages énergétiques, la production de gaz de synthèse et la production décentralisée d'électricité sont des usages de la biomasse qui deviendront incontournables

Panorama des procédés de conversion énergétique de la biomasse

Les différentes solutions de conversion énergétique de la biomasse déterminent autant de filières économiques. En premier lieu la matière première et souvent le secteur d'activité sont les premiers facteurs de segmentation de ces filières. Selon le type de biomasse et les procédés de conversion utilisés deux types de filières apparaissent. D'une part les filières thermochimiques transforment la biomasse en la soumettant à des conditions de pression et de chaleur intenses tout en contrôlant la présence d'oxygène. D'autre part, les filières biochimiques utilisent les procédés métaboliques (fermentation).

Description des filières thermochimique et biochimique de valorisation énergétique de la biomasse



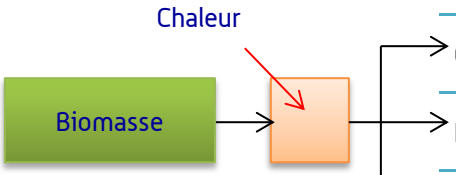
Par ailleurs, le mode de transport et de valorisation de l'énergie est un autre facteur de segmentation de ces filières. Plusieurs vecteurs énergétiques existent, les plus courants étant la chaleur et l'électricité auxquels peuvent s'ajouter les vecteurs gaz (méthane et hydrogène), les vecteur liquides (biocarburants) ou éventuellement solides (bois, charbon etc…).

Le panorama des procédés de conversion énergétique présenté en page gauche souligne les nombreuses opportunités techniques et met en lumière différentes filières de valorisation de l'énergie de la biomasse.

Les filières thermochimiques

Selon les contraintes appliquées à la biomasse (chaleur, pression et manque d'oxygène), on obtient des gaz, liquides ou solides en proportions diverses. Le fait de contrôler la présence d'oxygène et la température permet de stopper la conversion avant la combustion complète. C'est aussi le principal point délicat de ces technologies, qui sont difficiles à mettre en œuvre à petite échelle.
En fonction du niveau d'oxydation permis lors de la réaction on se dirige soit vers une pyrolyse en milieu réducteur, une gazéification ou une combustion en milieu présentant un excès d'oxygène. Cet éventail de procédés peut générer de nombreux produits intermédiaires avec des propriétés et des usages variés.

Ainsi la conversion énergétique de la biomasse par la filière thermochimique est rendue possible pour des technologies plus ou moins matures selon le type de matière première utilisée, l'échelle du procédé mis en œuvre et la forme envisagée de valorisation de l'énergie.



Distribution des produits de transformation (% de masse sèche)

	Torrefaction	Pyrolyse lente ou carbonisation	Pyrolyse flash	Gazéification	Combustion
Gaz	5	35	13	**85** (Syngaz)	99 (CO2)
Liquide	20	30	**75** (bio huile)	5	-
Solide	**75** (biomasse torréfiée)	**35** (charbon – biochar)	12	10	1
	200-300°C – 1h – Patm Pas d'O2	*220°C – qq heures Pas d'O2*	*350-550°C – qq secondes*	*700- 1500°C – qq minutes Patm - 1/3 O2*	*>800°C – qq heure – Parm Excès d'O2*

Sources : R Van Poucke, Université de Gent, Combine – Dufour, LRGP Nancy

Les filières biochimiques

Selon la nature de la biomasse et sa composition principale (polysaccharide, sucre ou huile), la valorisation biochimique sera différente. Ce sera une simple extraction pour l'huile ou une fermentation pour l'éthanol. Pour des matières plus complexes où une extraction directe n'est pas possible la digestion anaérobie peut être une solution.

Focus sur les solutions technologiques envisageables en 2030 dans l'Ouest

Parmi l'éventail de procédés technologiques présentés plusieurs pourront contribuer au défi de la mutation énergétique de nos territoires :

La densification énergétique de la biomasse solide : la torréfaction

La densification de l'énergie biomasse est une réponse apportée pour une meilleure utilisation des ressources existantes (gain de rendement) ou encore pour la réduction des coûts de transport (densité énergétique plus importante à volume égal). La granulation de bois est un exemple en plein essor. La torréfaction du bois en est un autre qui est beaucoup moins développé.

Description :

Hieg-vd

La torréfaction intervient entre le séchage et la pyrolyse du bois. Le bois torréfié est donc un intermédiaire entre le bois brut et le charbon. Sous l'effet de la chaleur, le bois perd essentiellement de l'eau jusque 160°C. Entre 180 et 270°C il brunit, perd de l'eau et des gaz (CO2, acide acétique, méthanol). Il devient friable et perd son caractère hygroscopique (moins sensible à la reprise d'humidité). Au-delà de cette température, la réaction exothermique devient difficilement contrôlable et le bois se transforme en charbon.

Panel de technologies : parmi les différentes technologies, (four à vis, four à plateau vibrant, tournant), on peut citer une entreprise Française Thermya (rachetée par Areva en 2012) qui développe un four vertical à lit mobile à contre-courant.

AVANTAGES
- Combustible obtenu à fort pouvoir calorifique, stable (6MWh/tonne contre 5 MWh/tonne pour bois anhydre) - Meilleur rendement énergétique de production que le charbon (93% contre 60%) - La combustion du bois torréfié émet peu d'acides - Produit hydrophobe, facilement stockable

INCONVENIENTS
- Investissement élevé sur petite unité (entre 1 et 8tonnes/h), extrapolation à grande échelle difficile - Cout de maintenance lié notamment au traitement des co-produits gazeux. - Valorisation énergétique des co-produits à faible pouvoir calorifique difficile - Applicabilité à de la biomasse agricole ?

Application : à l'heure où plusieurs centrales nucléaires sont arrêtées pour redémarrer des centrales à charbon, la co-combustion de bois torréfié fait partie des pistes d'application les plus regardées. Au-delà, les propriétés du bois torréfié peuvent faire de cette étape un préalable à une installation de gazéification pour obtenir un gaz propre. Enfin, on commence à voir arriver sur le marché du granulé de bois de « seconde génération » (LMK energy, Biogreen).

Degré de maturité : **ce sujet est au stade développement**

Malgré des premières installations dans les années 1980 (Pechiney), la plupart des installations de torréfaction du bois existantes sont encore au stade de pilote, la technologie en est dans la plupart des cas au stade de développement et de pré industrialisation.

Exemple dans l'Ouest : Pas d'application recensée dans l'ouest.

Sources : Schwob et Bourgeois, 1982 ; Nocquet, 2012

L'utilisation de l'énergie bois en phase liquide

AILE

L'enjeu de la transformation de l'énergie biomasse en phase liquide est à la fois l'utilisation de biocarburant, combustible à haute valeur énergétique, et la possibilité d'adapter ce carburant sur des technologies de chaudière ou de moteur proches des technologies existantes. Nous aborderons ici seulement les procédés thermochimiques permettant de dégrader les biomasses ligneuses pour donner du carburant dit de deuxième génération.

Description :

La transformation de la biomasse en phase liquide pour la production de biocarburant intervient durant deux procédés, la liquéfaction et la pyrolyse flash. Le premier n'existe qu'au stade expérimental, il nécessite des conditions de pressions élevées et une complexité du process sans garantie de production d'un carburant de qualité. Son principe rappelle notamment le principe de la pétrogénèse. Le second procédé, plus ancien et plus connu, est la production d'huile de pyrolyse entre 300 et 500°C en l'absence d'oxygène.

Enfin, depuis une vingtaine d'années, les chercheurs testent l'utilisation du procédé Fisher-Tropsch sur le syngaz de biomasse. Celui-ci permet de composer des hydrocarbures par l'action de catalyseur sur le syngaz.

AVANTAGES
- Production de bio-huile à plus ou moins forte valeur ajoutée - Piste à développer pour un usage à forte valeur ajoutée des huiles (utilisation alimentaire par exemple) - Le procédé BiomassToLiquid produit un carburant utilisable sans étape de raffinage.

INCONVENIENTS
- Prétraitement du bois (broyage millimétrique, séchage) - Grande variabilité, faible stablité thermique et présence d'impuretés solides dans les huiles de pyrolyse. - Offre émergente mais références inexistantes localement - Très petit marché pour les utilisations à forte valeur ajoutée déjà occupé par la pétrochimie. - Procédé Btl complexe, envisageable à l'échelle industrielle avec un coût du carburant sorti atteignant plus de 0,70$HT/l. faible rendement.

Application : Les huiles de pyrolyse sont complexes et nécessitent un raffinage pour être exploitée en biocarburant ou en chimie verte. Par contre le procédé BiomassToLiquid permet d'obtenir un carburant directement utilisable en substitution de diesel.

Degré de maturité : **ce sujet est au stade pilote.**
La liquéfaction sous haute pression (dite hydrothermale) est développée par l'Université d'Aarhus (Program for Bioraffinering). Un groupement français réuni autour du projet Liqhyd met en place un démonstrateur suivant ce procédé.
Le procédé BiomassToLiquid est au stade du pilote. La société Choren avait lancé en 2008 un premier pilote qui n'a pas réussi à être industrialisé. Fin 2014, le CEA a inauguré la première étape de son pilote Syndièse. Le groupement mené par Total a lancé lui aussi la réalisation d'unités pilotes d'ici 2017 dans le cadre du programme BioTfuel.

Exemple dans l'Ouest :
Pas d'application recensée dans l'ouest.

Source : Dufour 2009, Kpogbemabou 2011

La production de biochar par pyrolyse de la biomasse

Le biochar est du charbon obtenu par pyrolyse de la biomasse. Il est notamment utilisé en amendement organique. Cette application s'inspire de la formation de la *Terra Preta de Indio* au Brésil. Ce sol a été créé il y a 2500 ans par accumulation de charbon. Il est marqué par une fertilité particulièrement élevée. Ce caractère est intimement lié aux propriétés du charbon qui agit sur toutes les fonctionnalités du sol, en augmentant le pH, la vie microbienne et la rétention d'eau et d'éléments nutritifs. Cette application permet d'envisager une valorisation commerciale du produit solide.

Description : la technique de pyrolyse lente permet de produire en proportions équivalentes du charbon, du gaz et du liquide pyroligneux. Pour trouver une rentabilité à ce type de procédé, la valorisation de chaque phase est essentielle et notamment le recyclage des gaz de pyrolyse dans le process.

AVANTAGES
- Le process est déjà existant et relativement simple et diffusable. - Le prétraitement de la biomasse est très simple. - Les produits solides ont plusieurs valorisations possibles.

INCONVENIENTS
- Le gaz de synthèse obtenu est un gaz pauvre et acide qui peut être valorisé en combustion dans un bruleur adapté et cher. - Offre émergente - Selon la matière première et la conduite du processus de pyrolyse, la qualité du produit obtenu est très différente

Application : Le charbon obtenu peut être utilisé pour plusieurs usages, classés par valeur ajoutée croissante, en combustible, en support d'amendement appelé biochar, en charbon actif.

Degré de maturité : **ce sujet est au stade développement.**

Exemple en France :
Le projet européen BioenNW, qui associe notamment Rittmo et la société Compomar cherche à valoriser des rebuts de criblage en biochar pour la plateforme de compostage. Sur les 1000 tonnes de matières entrantes, il est prévu de produire 240tonnes de biochar et 1265MWh/an d'énergie (hors huile de pyrolyse). Le biochar viendra améliorer le compost produit et alimentera les bâtiments de la société en énergie.

Exemple dans l'ouest :
La société Green Charcoal International situé dans le 44 commercialise une unité de production de biochar, le Pyro-6G.

La transformation du bois en syngaz

Lors de la combustion de la biomasse, l'étape de production de gazéification est une étape intermédiaire de la réaction. Ce gaz est ensuite oxydé au cours du même procédé pour délivrer son pouvoir calorifique et alimenter un vecteur chaleur. L'intérêt d'une réaction de combustion incomplète comme la gazéification est la production de syngaz. Ce produit est une autre forme de vecteur énergétique.

Description : après les étapes de séchage et de pyrolyse, la gazéification permet la transformation d'un combustible solide en un combustible gazeux en milieu oxydant. Le gaz de synthèse obtenu, appelé syngaz, contient en mélange principalement du monoxyde de carbone et de l'hydrogène (dihydrogène), une plus faible quantité de dioxyde de carbone (de l'ordre de 10%) et une très faible quantité de méthane (de l'ordre de 1%).

AVANTAGES
- Un gazéifieur peut être démarré rapidement et produire à froid avec un bon rendement => souplesse. - Limite les rejets atmosphériques de particules comparé à une chaudière biomasse.
INCONVENIENTS
- Préparation de la biomasse (broyage voir séchage) - Coût élevé entre 4000 et 6000/kWe installé - Pas de cadre règlementaire - Peu de pilote en France et vision dépassée de ce procédé presque centenaire.

Panel de technologies :
La gazéification du bois permet d'extraire 65 à 75% du pouvoir calorifique du bois. Plusieurs technologies coexistent avec des plages de puissance applicables différentes, des régimes de température foyer et des niveaux de puretés des gaz obtenus très variés. Les plus petites installations utilisent un procédé avec un foyer à lit fixe vertical, fonctionnant soit à co-courant soit à contre-courant pour les plus petites installations. Dans le registre des plus petites installations, le gazéifieur à lit étagé (un lit horizontal mis en mouvement par une vis) permet d'atteindre un niveau de pureté des gaz supérieur aux deux premiers. Les plus grosses installations utilisent des systèmes à lit fluidisé ou lit entrainé, ce dernier permet d'atteindre des niveaux d'impureté avant lavage très faible.
Ce gaz peut être valorisé de nombreuses façons après lavage des gaz, craquage des goudrons et éventuellement après action d'un catalyseur. La filtration et le lavage du gaz permet d'atteindre des niveaux d'émissions de poussières en sortie d'échappement d'un moteur par exemple inférieur à 5mg/Nm3 (Cleansgaz) soit 10 à 30 fois sous les valeurs limites demandées par la règlementation française.

Application : le gaz obtenu, selon sa composition, peut alimenter une turbine à gaz pour faire de la cogénération, servir à la production de biocarburant (Fisher – Tropsch). Une fois épuré, comme ce qui est actuellement déjà fait sur le biogaz, le syngaz peut être injecté dans le réseau. Les rendements énergétiques globaux de chaque mode de valorisation sont très différents. Il est généralement moins bon que celui de la combustion mais il permet de produire un sous-produit qui rend possible de nombreuses applications.

Degré de maturité : **ce sujet est au stade développement.**
Cogénération : il existe de nombreuses technologies développées et commercialisées. Cependant la France n'est pas en avance sur le sujet et présente seulement des pilotes. La pureté des gaz obtenus est très variable selon les technologies, les plus performants ont une concentration de goudron de 10 - 30mg/Nm^3 sachant que l'idéal pour les moteurs est de descendre en dessous de 50mg/Nm^3.

Exemples dans l'ouest :
- Alren- EDDA energie, la société a monté deux gazéifieurs expérimentaux sur le même site dans le Morbihan. Son objectif est de valoriser de la biomasse végétale, des sous-produits animaux (déjections) voire aussi des déchets riches en carbone (plastiques).
- Enerxyl, unité pilote implantée en 2013/2014 dans les Côtes d'Armor avec l'entreprise de transformation du bois Houée. Le prototype alimente un groupe électrogène et produit 400kWe et 600 kWth. Il permet à l'entreprise de valoriser une partie de ces co-produits bois, d'en retirer un revenu sur la vente d'électricité et d'envisager des prestations de séchage.

La production d'hydrogène à partir de biomasse

95% de l'hydrogène utilisé dans le monde est produit à partir du gaz naturel. L'intérêt de la biomasse est d'inscrire cette production dans le cadre d'un cycle de production d'énergie renouvelable en limitant l'impact sur l'effet de serre.

Le vaporéformage du biogaz issu de la méthanisation ou encore la fermentation obscure

de la biomasse (algues) sont deux techniques encore trop coûteuses. Une troisième voie est plus approfondie, celle de la gazéification de la biomasse. En effet ce procédé peut être orienté en présence de vapeur d'eau pour privilégier la production d'hydrogène lors d'une réaction dite de « gas shift ».

Description :
La gazéification produit un mélange gazeux contenant déjà de l'hydrogène (de l'ordre de 30-40% de dihydrogène H2). Cette étape est poursuivie par une seconde réaction de Shift entre le monoxyde de carbone contenu dans le syngaz et l'eau contenue dans la vapeur. Il s'agit d'une réaction d'oxydo-réduction utilisant par exemple de l'oxyde de fer comme catalyseur. Le carbone en présence de ce catalyseur permet la dissociation de l'hydrogène de l'eau[2]. Le gaz obtenu est ainsi riche en hydrogène et utilisable.

Application : l'hydrogène est plus un vecteur d'énergie qu'une source d'énergie. Il peut être utilisé dans les moteurs, pour la production de biocarburant (synthèse Fisher Tropsch), dans les piles à combustible ou encore dans d'autres réactions chimiques comme la méthanation.

AVANTAGES
- Le H2 peut être utilisé grâce à la pile à combustible qui présente un bon rendement de production électrique
INCONVENIENTS
- La poussière (carbone, minéraux) peut altérer le catalyseur. - Les acides et goudrons peuvent nuire aux agents catalyseurs de la réaction. - La dégradation des goudrons sont très gourmands en énergie

Degré de maturité : **ce sujet est au stade de la recherche**
Le taux de poussières obtenu dans le syngas se situe dans le meilleur des cas généralement entre 5 et 10 mg/Nm^3. Or la production d'hydrogène nécessite l'utilisation de catalyseurs admettant des taux de poussières beaucoup plus faibles. La recherche s'applique à mettre au point un matériau rédox qui servirait de catalyseur et qui serait plus résistant à l'abrasion et au contact des cendres de bois. Un autre frein à ce développement est l'optimisation énergétique du process gourmand en énergie (pour le craquage des goudrons à plus de 1100°C)

Exemple dans l'ouest :
Le projet ValorPAc porté par un groupement nantais emmené par l'Institut des Matériaux Jean Rouxel met au point l'association d'une pile à combustible à un gazéifieur produisant de l'hydrogène, conçu par la société S3D. L'intérêt du choix de la pile à combustible est son rendement électrique qui est potentiellement le plus élevé parmi les technologies de production d'électricité (50 à 60% - hors valorisation thermique).

Source : Muller, ETH Zurich ; Association Française de l'Hydrogène ; GrDF ; ENEA

La production de biométhane à partir de la biomasse : la méthanation

La méthanisation n'est pas le seul procédé permettant de produire du biométhane à partir de biomasse. La méthanation a été développée au début du siècle dernier et pendant les années 1970 aux USA, d'abord pour la production d'ammoniac, puis pendant la crise pétrolière pour la production d'énergie. Cette réaction peut être utilisée pour enrichir du syngas en biométhane ou pour améliorer les rendements d'une unité de méthanisation. On verra aussi qu'elle peut aussi être couplée à la production d'électricité renouvelable.

Description :
Deux possibilités de synthèse existent, la voie chimique et la voie biologique.

La voie chimique est basée sur la réaction Sabatier[3]. Il s'agit d'hydrogéniser du CO / CO2 et de produire ainsi du CH4 et de l'eau. Cette réaction demande un apport d'énergie fort. Des catalyseurs comme le nickel, le rhodium ou le ruthénium (Bengauer, 2013) sont utilisés pour réduire la quantité d'énergie au démarrage. La température optimale de conversion du CO2 est de 200°C. Le réacteur peut être constitué d'un seul élément ou de plusieurs réacteurs en ligne avec des échangeurs de chaleur entre chaque élément. Un seul réacteur simple ne permet pas de contrôler la température. Avec une température élevée, l'usure du catalyseur est plus rapide, ce qui impacte les charges de maintenance.

La voie biologique consiste à introduire de l'hydrogène dans le méthaniseur et ainsi favoriser la dernière étape de production du biogaz. En effet les bactéries méthanogènes consomment de l'hydrogène qui est en général déficitaire dans cette réaction. D'un autre côté, l'introduction d'hydrogène augmente le pH et ne peut donc être introduit qu'en proportion limitée.

[2] 6 CO + 6 H2 O = 6 CO2 + 6 H2 :

[3] $4\ H_{2\,(g)} + CO_{2\,(g)} \rightarrow CH_{4\,(g)} + 2H_2O_{(g)}$.

AVANTAGES
- Basé sur une technologie mature de méthanation (60 ans) - Le procédé permet de stocker du CH4 facilement dans les infrastructures déjà existantes et de le valoriser en bio-GNV. - Valorisation possible de chaleur produite par le process par voie chimique (température élevée contrairement à la voie biologique)
INCONVENIENTS
- Investissement élevé (1500€/kW CH_{4PCS}), extrapolation à grande échelle difficile - Nécessite de la chaleur au démarrage - Cadre règlementaire pas défini. - Faisabilité de voie biologique au niveau industriel ?

Application :
Le méthane est plus un vecteur d'énergie qu'une source d'énergie. Il peut être utilisé dans les moteurs, pour la production de biocarburant par compression ou liquéfaction, utilisé dans des turbines à gaz pour générer de l'électricité ou être stocké dans le réseau de gaz

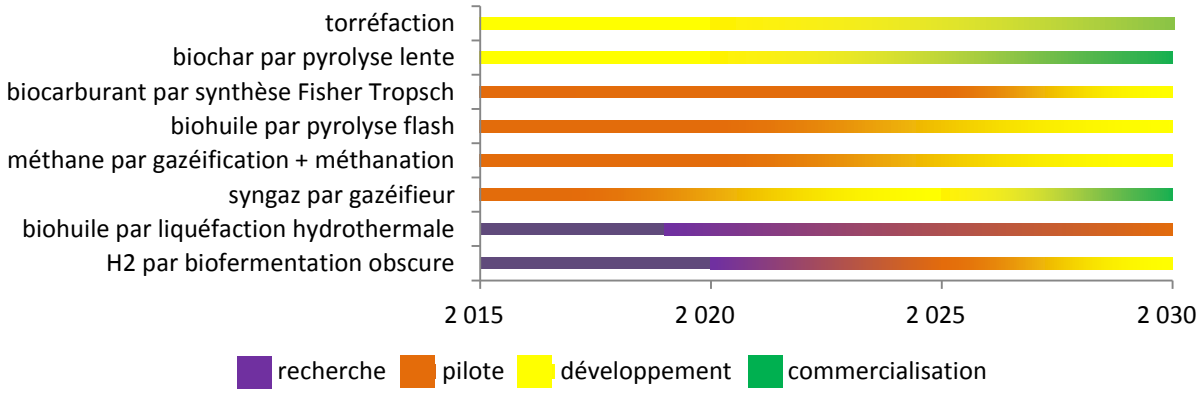
Degré de maturité : **ce sujet est au stade pilote**
Il existe de nombreux projets et quelques-uns sont commercialisés en Europe. La France n'a pas dépassé le stade pilote. La technique utilisée permet une durée de vie de 60 000h mais lorsque l'hydrogène est issu de l'électricité renouvelable excédentaire avec un fonctionnement aléatoire, la durée de vie n'excède souvent pas 25 000h selon les premiers retours d'expériences.
La pureté du gaz est satisfaisante (92% CH_4/Nm^3) et avec les règlements de l'injection de gaz en vigueur ce n'est pas la qualité du gaz de synthèse qui s'oppose au développement de ce procès.

Exemple dans l'Ouest :
Le projet Power-to-gas porté par l'AFUL Chantrerie à Nantes prévoit l'installation d'un électrolyseur pour produire de l'hydrogène avec l'électricité d'une éolienne et la récupération de CO2 de fumée de la chaudière bois.

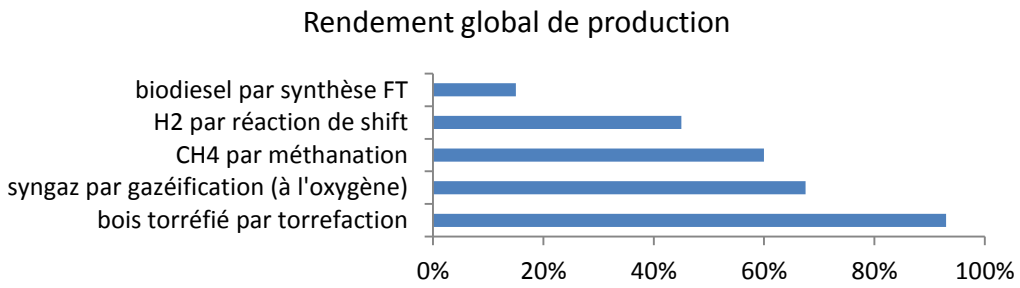
Bilan de cette revue technologique

Le niveau de maturité des procédés examinés est différent. Excepté la pyrolyse lente pour la production de biochar et la torréfaction qui peuvent être considérés au stade développement, les autres procédés sont au stade pilote voire recherche. D'ici 2030, en l'état d'avancement des réflexions en France, il est probable que les pilotes sur la gazéification et sur la méthanation débouchent sur des développements.

Niveau de maturité des différents procédés technologiques
de conversion énergétique de la biomasse



Si on regarde l'efficacité de ces procédés, elle est très variable et d'autant plus faible qu'il y a eu de réactions en chaine. Les rendements en produits de chaque procédé varient en fonction de la matière première et des conditions opératoires comme la température, la vitesse de chauffage, la composition du comburant etc…



Source : Schwob et Bourgeois, 1982 ; Nocquet, 2012 ; Dufour, 2009 ; Mozaffarian, 2003 ; Spath, 2005 ; Beguide et Fanmoe Fepeussi, 2013

La recherche continue pour améliorer les performances de ces différentes voies, mais d'ores et déjà, les technologies de gazéification, de méthanation et de torréfaction semblent être des pistes crédibles et relativement efficaces pour valoriser l'énergie de la biomasse.

La multiplication des vecteurs énergétiques pour une réponse à tous les usages

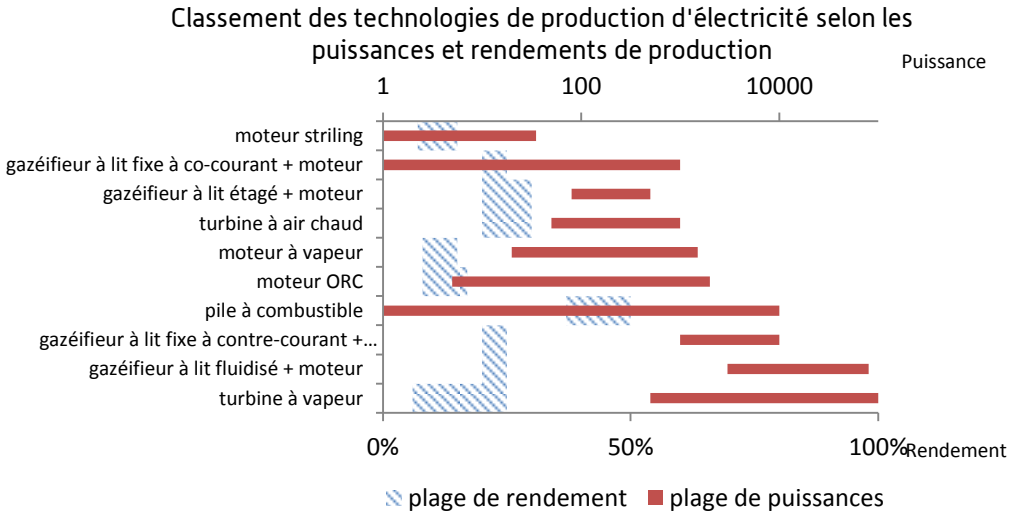
De nombreux procédés technologiques innovants font l'objet de recherches ou sont en cours de développement. Mais la poursuite de cette rupture technologique n'a de sens que si l'on parvient à l'intégrer dans le paysage énergétique. Pour cela, au-delà de l'évolution des modes de consommation, ce sont les modes d'utilisation de l'énergie (bâtiment, transport voire process) qui doivent évoluer. Sans cela, aucune évolution technologique n'est possible (on parlait déjà de voiture électrique dans les années 90, de gazéification dans les années 80, de méthanisation dans les années 70 etc…). Un des facteurs majeurs pour une meilleure intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique et notamment les sources d'énergies intermittentes comme l'éolien ou le solaire, c'est le développement de nouveaux vecteurs énergétiques qui permettent de mobiliser autrement cette production.

Le développement de la production d'électricité à partir de biomasse

Technologies, rendements et coûts

Pour la majorité des solutions techniques, la conversion de l'énergie contenue dans la biomasse en électricité passe par une étape de combustion, soit la combustion directe de la biomasse, soit la combustion de produit de synthèse issu de la transformation de la biomasse. La variété des procédés de conversion thermique de la biomasse permet d'alimenter les différents dispositifs de production d'électricité :

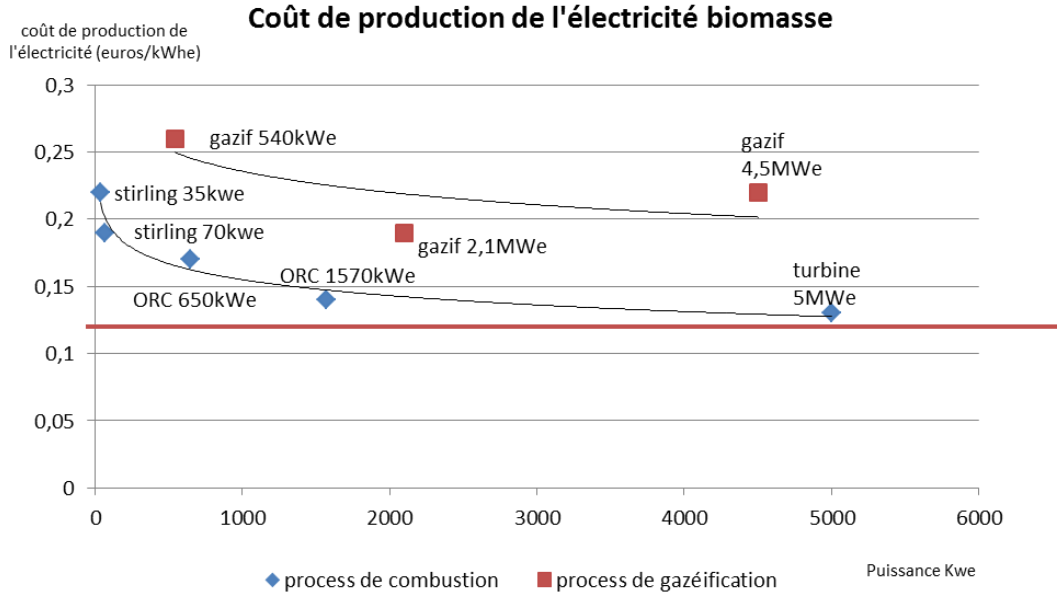
- le biogaz ou le syngas alimente le moteur de cogénération à gaz entrainant un alternateur,
- la vapeur fait tourner une turbine,
- la chaleur actionne les moteurs Stirling ou ORC.



Sources : Cleansgaz, ADEME, ENEA

Ainsi de nombreux usages peuvent être couverts mais le point commun à toutes ces technologies est le faible rendement de cette étape de conversion électrique. Selon les technologies il varie entre 10 et 35%, les meilleures performances étant atteintes pour les piles à combustibles qui permettent d'atteindre des rendements de 50% (les principaux freins au développement de piles sont leur coût et leur fiabilité). L'amélioration en général de l'efficacité des procédés de production d'électricité nécessite la valorisation de l'énergie thermique résiduelle par cogénération. Le rendement de production énergétique global atteint alors 70 à 85%.

Enfin, le coût de tels procédés ramené à la puissance électrique installée nécessite des investissements élevés uniquement sur la partie spécifique à la production d'électricité. Il varie entre 2000euros/kWe et 6000euros/kWe selon la technologie et la taille du projet.



Source : Obernberger, 2008

Le coût du KWh électrique est supérieur au tarif électrique en France avec un coût variant entre 13 et 26 centimes du kWhe selon la technologie et la taille du projet (en 2014, le prix de base du kWe est de 13 centimes). Ce genre de projet ne peut se développer sans subventions à l'investissement significatives ou tarif d'achat spécifique. La substitution d'une énergie plus coûteuse comme celle appelée lors des ultra-pointes est une piste, mais le faible nombre d'heures d'appel (70-100 h/par an) en limite l'intérêt.

Adéquation avec le réseau électrique

Le réseau électrique historiquement centralisé autour de quelques noyaux de production distribuant de l'électricité sur le réseau vers les consommateurs se complexifie avec l'apparition de très nombreux sites de production délocalisés, parfois en bout de réseau. Les outils de gestion de ce réseau (centrale de production délocalisée, stockage, interconnexion, effacement) doivent évoluer pour proposer de nouvelles fonctionnalités et améliorer les performances, c'est l'enjeu du développement des smart grids (Linky, projet européen Supergrid etc…). Le développement de nouveaux modes de production d'énergies alternatives sera plus facilement soutenable dans ces conditions.

Aujourd'hui, une des principales difficultés de la production localisée d'énergie renouvelable est le caractère intermittent des sources d'énergie utilisées qui limite la gestion prévisionnelle des moyens de production du réseau. Comparé au photovoltaïque et à l'éolien, la production d'électricité à partir de biomasse par cogénération est moins erratique car elle n'est pas liée si fortement aux évènements météo (ensoleillement, vent). Qui plus est la possibilité de valoriser la chaleur produite est corrélée avec les besoins de chauffage et donc les besoins d'électricité du réseau.

L'inconvénient des procédés de cogénération s'appuyant sur la combustion de biomasse est la nécessité d'avoir un fonctionnement régulier tout au long de l'année. La couverture des appels de puissance en ultra-pointe ne peut s'envisager qu'avec des procédés capables de démarrer en quelques minutes. En période de pointe, des procédés de gazéification, mais aussi des démarrages programmés de moteurs d'une unité de méthanisation, peuvent cependant répondre à l'appel de puissance régulier de la fin de journée en hiver.

Le développement du vecteur gaz associé à l'énergie biomasse

Les solutions de production d'électricité à partir de biomasse existent et sont au stade de développement. Mais leur faible rendement et leur coût limitent leur intérêt immédiat. Le vecteur gaz, bien que moins développé que l'électricité présente de belles opportunités.

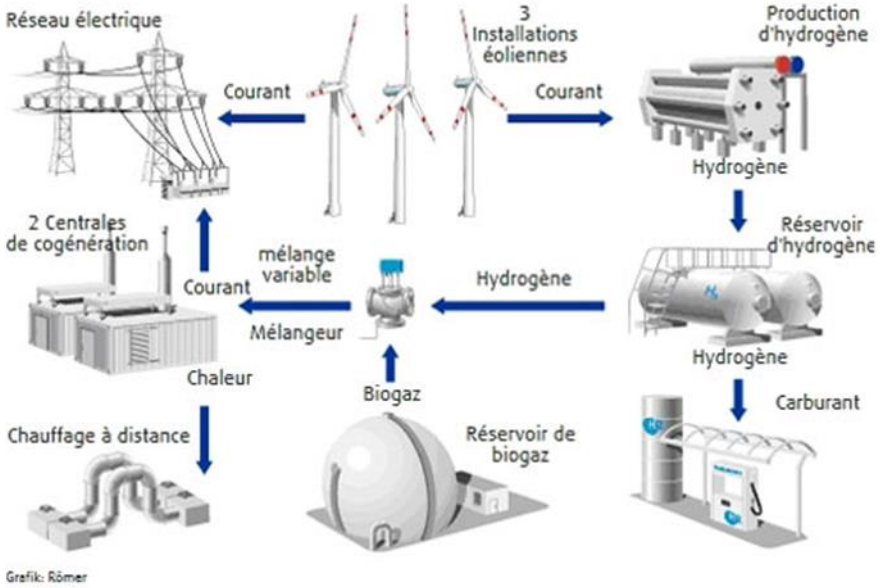
La place du vecteur gaz dans le schéma énergétique

Parmi les procédés de conversion énergétique de la biomasse, l'énergie peut être restituée sous forme directe de chaleur (combustion), d'électricité (cogénération) ou alors de gaz (méthanisation et gazéification). L'avantage du gaz par rapport aux deux autres formes d'énergie est qu'il est facilement stockable (contrairement à l'électricité) et facilement transportable (contrairement à la chaleur).

La France a un réseau de distribution de gaz qui couvre les besoins de 80% de la population. Le biométhane peut être injecté et mélangé au gaz pour desservir les points de livraison.

Cependant, en milieu rural, la desserte en gaz n'est pas toujours assurée. Il existe des possibilités de stockage en cuve pour l'approvisionnement d'un petit réseau gaz localisé (pour un seul client industriel par exemple) ou pour collecter le gaz sur un site de production isolé. Un transport par camion peut être mis en place entre un point de production localisé de biométhane et un point d'injection sur le réseau de gaz.

Le développement du vecteur gaz ouvre des pistes pour optimiser le fonctionnement du réseau électrique. D'une part la possibilité de stockage sur site de production, par exemple une unité de méthanisation, permet de produire de l'électricité par cogénération et d'alimenter le réseau électrique selon les besoins. D'autre part, le volume de gaz du réseau représente à lui seul une capacité de stockage d'énergie de capacité de 150 TWh (source ADEME).



L'intérêt de la biomasse pour le développement du vecteur gaz

La contribution principale de la biomasse au développement de ce vecteur est bien sûr le caractère renouvelable de la ressource et son bilan carbone plus intéressant. Dans le cas de l'hydrogène, c'est encore plus vrai car si les technologies de production d'hydrogène à partir de biomasse voient le jour, le bilan sera très avantageux : cette molécule ne contient pas de carbone et donc n'en émet pas lors de sa dégradation.

L'effort qui va être fait d'ici 2030 pour développer notamment la méthanisation va impliquer une évolution de la place du vecteur gaz dans le schéma énergétique. Par exemple, le développement de petites et moyennes unités de production de biogaz, de syngaz ou d'hydrogène permettra le développement du stockage décentralisé d'énergie, ce stockage

pouvant venir en appoint du réseau électricité en complément d'autres dispositifs de stockage (stations de transfert d'énergie par pompage – STEP). C'est une solution pour renforcer la flexibilité du réseau.

Pour aller plus loin, le vecteur gaz permet aussi le stockage de l'électricité renouvelable produite en excédent par les éoliennes ou les panneaux photovoltaiques. Le procédé de méthanation permet d'envisager la production de gaz à partir d'hydrogène fourni par électrolyse grâce à l'électricité en surplus. Ce procédé de production de gaz de synthèse peut être une solution de stockage intersaison. Ce stockage permet de pallier l'insuffisance de la production hivernale d'énergie renouvelable.

Cependant, pour parvenir à ce scénario et à une évolution du schéma énergétique, le nombre d'installations doit croitre, les solutions techniques doivent se généraliser (comme la production d'hydrogène ou de syngas) et les cadres économiques (tarif) et règlementaires devront s'adapter.

L'économie circulaire en 2030 : un levier pour mieux valoriser la biomasse ?

Le modèle linéaire de fabrication et d'utilisation des produits (extraire, produire, consommer, jeter) n'est plus compatible avec les tensions ressenties sur les ressources non renouvelables.
Lors de la Conférence environnementale de septembre 2013, le Gouvernement français a donc fixé l'objectif politique d'une transition vers un modèle économique « circulaire ». Cet objectif a été décliné et précisé dans le projet de loi relatif à la transition énergétique pour la croissance verte.

Mais jusqu'où transformer la biomasse pour que les différents usages puissent trouver des ressources « durables » ?

Constat de la raréfaction des ressources et enjeux liés à la biomasse

La population mondiale n'a jamais cru aussi rapidement, passant de 2 milliards d'habitants au début du XXème siècle à près 8,5 milliards d'ici à 2030. La croissance démographique mondiale a un impact sur l'environnement et les ressources dont on commence à prendre conscience qu'elles ne sont pas inépuisables. Nombre d'entre elles ne sont en outre pas disponibles sur le territoire français et sont donc tributaires des décisions politiques d'autres nations comme l'a montré la crise de 2011 sur les terres rares fragilisant nos économies. Le Programme des Nations Unies pour l'Environnement estime ainsi qu'un scénario tendanciel sur la croissance de la consommation mondiale conduirait à un triplement des besoins en matières premières entre 2000 et 2050. Différentes études estiment par ailleurs très probables des pénuries de certaines matières premières dès 2020 à 2030.

Si la raréfaction des ressources fossiles est régulièrement citée, celle des métaux rares est rarement mise en avant alors qu'ils sont indispensables à de nombreuses technologies visées par la transition énergétique.

Les matières premières critiques et les terres rares

Le caractère de rareté ou de criticité d'un métal n'est pas lié à l'importance du gisement (assez répandu dans l'écorce terrestre) mais à la répartition des réserves, leur difficulté d'extraction ainsi qu'à la forte dépendance de filières à son égard. Ainsi, en 2014, la Commission Européenne a rallongé la liste des matériaux critiques à 20 éléments.

Ce que l'on appelle communément les terres rares sont un groupe de métaux aux propriétés voisines et qui sont essentiels dans la fabrication de produits à haute technologie : écrans plats, ordinateurs, téléphone portables, mais aussi aux produits de l'économie verte : le terbium est utilisé dans les lampes à basse consommation, le gallium dans les LED et les cellules solaires à haut rendement, l'indium dans les cellules photovoltaïques ou encore le néodyme dans certains moteurs de voitures électriques et générateurs d'éoliennes.

L'extraction et le raffinage de ces matières, actuellement produits à moindre coût à 95% en Chine, sont souvent déplorables sur le plan écologique puisqu'ils entraînent le rejet de nombreux éléments toxiques : métaux lourds, acide sulfurique ainsi que des éléments radioactifs (uranium et thorium).

De plus, ces métaux ont aujourd'hui un très faible taux de recyclage comme le montre le tableau ci-dessous :

Produits	Principaux métaux présents	Filière de collecte
Aimants (véhicules électriques, éoliennes…)	Nd, Pr, Dy, Tb	Collecte uniquement, pas de recyclage
LED (éclairage basse-consommation)	In, Ga, Ge	Collecte uniquement, pas de recyclage
Cellules de silicium cristallin (panneaux photovoltaïque)	Si, Al, Ag In, Ga, Ge	Collecte et recyclage, mais tous les métaux ne sont pas valorisés

(D'après : Le Service de l'observation et des statistiques, le cycle des matières dans l'économie française, 2013 et PV Cycle)

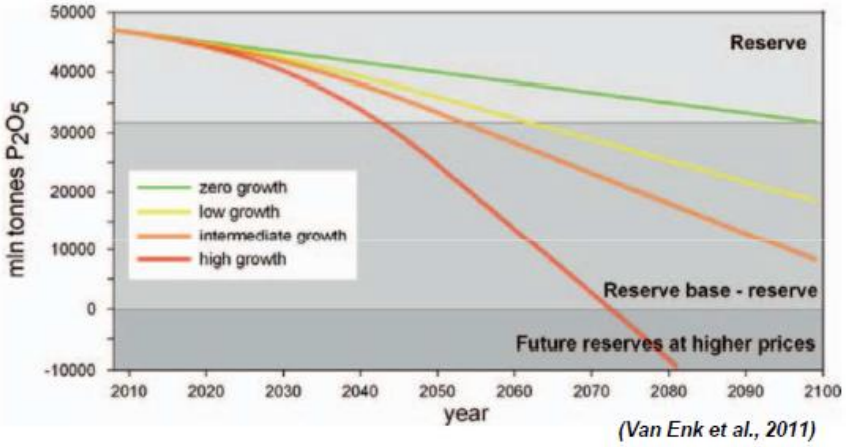
La réussite de la transition énergétique vers des énergies vertes est donc conditionnée à la disponibilité de nombreux métaux rares. Ces filières d'énergies renouvelables dont celles à partir de biomasse doivent montrer la voie de l'économie circulaire. Et ce d'autant plus si l'on souhaite y parvenir en limitant l'impact sur l'environnement.

Le cas du phosphore

Le phosphore (P) est un des éléments majeurs nécessaires à la croissance des plantes, et plus généralement à la vie sur Terre. Contrairement à l'azote, les réserves mondiales de phosphore sont limitées, principalement sous forme de roches phosphatées. De plus les réserves sont très inégalement réparties sur la surface du globe, principalement au Maroc et en Chine.

L'exploitation des gisements sert pour plus des trois quart à la synthèse des engrais phosphatés, le reste est à destination de l'alimentation animale ou d'usages industriels.

On annonçait jusqu'à peu des réserves disponibles jusqu'en 2100 suivant le rythme de consommation, mais des études récentes montrent que le pic de production pourrait être atteint dans les prochaines décennies (Carpenter S. et Benett. E, 2011). De plus, la qualité des réserves va en diminuant : la teneur en P diminue et les contaminants augmentent. Avec l'augmentation de la demande, la diminution de l'offre (en quantité et en qualité) et les tensions géopolitiques, le prix des engrais phosphatés va augmenter.



Évolution des stocks de phosphore en fonction des hypothèses de croissance.

Paradoxalement, le phosphore est indispensable à la vie et à l'agriculture, mais l'excès est nuisible pour l'environnement. Dans certains secteurs à forte pression démographique (rejets des stations d'épuration) et d'élevages intensifs (effluents animaux), les sols sont saturés en phosphore, entrainant des rejets dans les eaux de surface par ruissellement, avec pour conséquence l'eutrophisation des milieux aquatiques et le dérèglement des écosystèmes continentaux.

Face à ce constat, la gestion du phosphore est un enjeu important pour le 21ème siècle.

La première amélioration dans la gestion du phosphore concerne l'amélioration de l'efficacité et la diminution des pertes tout au long de la chaine d'utilisation. Des travaux de l'INRA ont estimé l'efficience du phosphore à l'échelle de la chaine alimentaire en France à seulement 10% (A Mollier et al., Flux et bilans de P à l'échelle de la France), mais cette efficience cache des disparités selon les secteurs et selon les régions. Ces travaux montrent que les efforts sont à réaliser principalement par l'agriculture (économies d'engrais) et par l'amélioration du recyclage des effluents urbains et agricoles.

De nombreux projets de recherche ont visé à développer des techniques de recyclages à partir des effluents : lisiers, effluents agro-industriels et rejets urbains.

Des procédés connus, de type séparation de phase, compostage, séchage permettent d'exporter des engrais organiques riches en phosphore vers des zones déficitaires. Mais pour développer massivement l'usage de phosphore recyclé, il est impératif de travailler sur l'élaboration d'engrais faciles à utiliser et de bonne qualité pour les utilisateurs (c'est-à-dire de bonne qualité sanitaire et agronomique).
D'autres procédés plus complexes permettent de recycler le phosphore sous forme de cristaux de struvite : par ajout d'ions magnésium ou potassium, les ions orthophosphate se précipitent sous forme de cristaux ($NH_4MgPO_4 \cdot 6H_2O$ ou MgKPO4.6H2O).

L'application de cette technique au recyclage du phosphore à partir d'effluents liquides est au stade d'application à l'étape semi-industrielle. Au niveau agricole, le programme PhosphOR impliquant notamment l'IRSTEA de Rennes s'intéresse aux conditions et à la maîtrise des paramètres pour assurer le recyclage du P issu des lisiers de porcs.

Installation du pilote de traitement du phosphore sur un élevage de porcs. (IRSTEA)

Dans le domaine du traitement des effluents urbains et industriels, VEOLIA a travaillé dans le cadre du programme Européen P-REX à la mise au point d'un procédé, actuellement développé sur la station d'épuration de Bruxelles.
Le passage des étapes pilotes au développement généralisé se heurte à deux problèmes : les barrières réglementaires (statuts des produits pour la mise sur le marché) et économiques (coût du traitement par rapport au prix des ressources minérales). Pour lever ces deux barrières et favoriser le recyclage du phosphore à grande échelle, la mobilisation des acteurs politiques est primordiale. AILE y travaille, notamment dans le cadre du projet Européen Interreg IVB BIOREFINE qui vise à développer le recyclage des nutriments à partir des déchets agricoles et agro-alimentaires.

Le concept de l'économie circulaire appliqué à la biomasse : quels verrous devront être levés d'ici 2030?

Le concept de l'économie circulaire

L'économie circulaire : système économique d'échange et de production qui, à tous les stades du cycle de vie des produits (biens et services), vise à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement. L'économie circulaire repose aussi en grande partie sur une politique de prévention et de gestion des déchets, qui prévient les gaspillages, favorise la réutilisation et le réemploi, maximise le recyclage et la valorisation matière, et enfin permet la valorisation énergétique des déchets non recyclables.

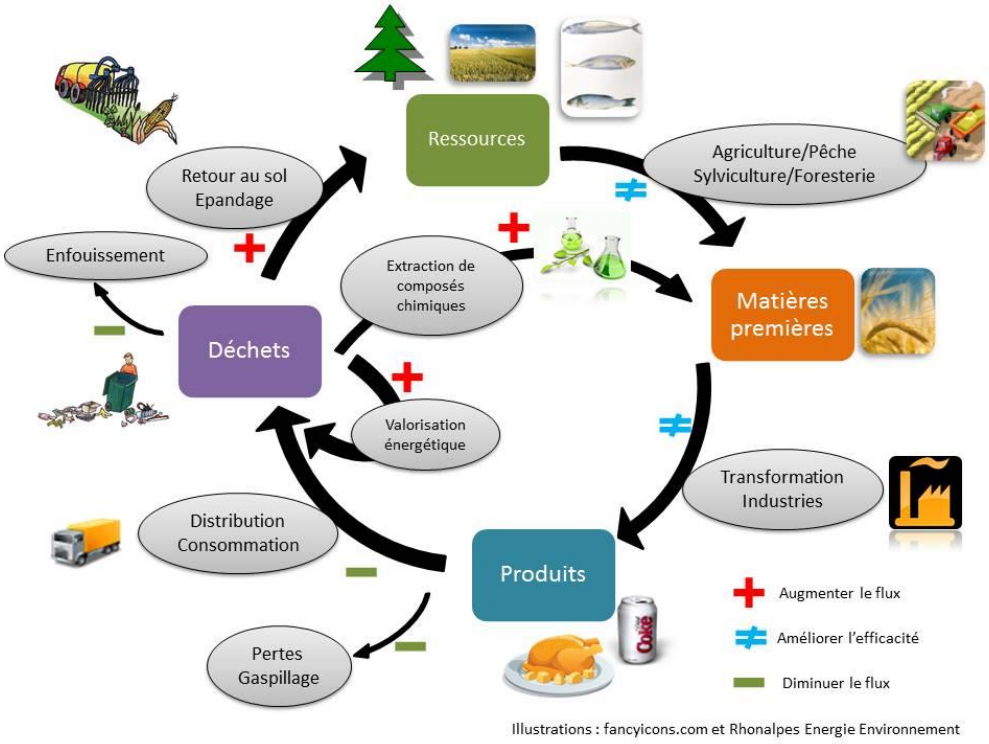


Schéma : l'économie circulaire dans le cycle de la biomasse

Sur le schéma, sont symbolisés les flux qui seront à augmenter et ceux à diminuer. A toutes les étapes du cycle il sera nécessaire de viser le « zéro gaspillage – zéro déchet ».

Après un premier usage des produits, les déchets doivent être valorisés au mieux selon la nature de ceux-ci. Avant l'ère du pétrole, la biomasse fournissait déjà les différents usages et les produits étaient nécessairement valorisés au mieux. La pétrochimie nous a fourni de nombreuses possibilités et un bond en avant technologique. Une nouvelle ère de l'après pétrole se prépare, où la biomasse fournira de nouveau une grande part de matières premières. Des technologies efficaces permettront d'aller beaucoup plus loin dans la valorisation des éléments.

Les verrous à lever

Un changement de modèle prendra des dizaines d'années. Beaucoup d'innovations sont à mettre en œuvre pour un modèle plus pérenne qui apportera des réponses aux enjeux d'emploi, d'environnement et d'énergie.

Des innovations technologiques : il s'agit de produire des matières premières renouvelables respectueuses de l'environnement et faire du déchet une matière première secondaire avec plusieurs débouchés pour une utilisation optimale. L'amélioration des performances passe également par le développement de nouveaux procédés permettant d'optimiser la valorisation des ressources. Le procédé IFBB détaillé ci-après en est une illustration.

Des innovations économiques : pour passer à une économie de la fonctionnalité, il faut procéder à une mutation des structures. Un des problèmes souvent évoqué en France est la faiblesse du coût associé à la mise en décharge. Par conséquent, la mise en place de solutions d'échanges ou de symbioses industrielles peut paraître, par comparaison, économiquement peu attractive. Par ailleurs, si la massification des besoins peut apporter un gain certain, ce modèle économique basé sur l'interdépendance, comporte intrinsèquement un degré de risque plus élevé : la défaillance de l'un des partenaires peut à tout moment venir modifier l'équilibre et s'avérer économiquement désastreux.

Des innovations fiscales : la fiscalité peut être un levier efficace pour favoriser le recyclage des déchets organiques. Les filières compostage et méthanisation sont largement promues pour valoriser les déchets organiques des gros producteurs de biodéchets. Cependant la fiscalité locale est un véritable frein : elle est proportionnelle à la valeur de l'immobilisation, qui est en général conséquente pour ces usines de traitement. A l'opposé, les déchets sont parfois transportés sur de longues distances, le coût du transport n'étant pas déterminant dans la compétitivité des filières.

Des innovations règlementaires : la règlementation peut inciter et favoriser le développement de projets d'écologie industrielle ou agricole. A l'heure actuelle, ils pâtissent d'un cadre réglementaire strict qui oblige, pour pouvoir réutiliser des flux d'énergie ou de matière, à faire des demandes d'autorisation qui s'avèrent particulièrement longues et décourageantes pour les porteurs de projet. La publication de règlements européens sur la procédure de sortie de statut de déchet pourrait encourager le développement de nouvelles initiatives de valorisation. L'autre frein majeur au recyclage des effluents urbains ou industriels est le cadre règlementaire « hygiène, sécurité et environnement » très contraignant : des projets de traitement tertiaire d'effluents sur des Taillis de saule à très Courte Rotation ont été, par conséquent, abandonnés.

Des innovations organisationnelles : l'économie circulaire ne se limite pas à l'échange de flux de déchets et d'énergie. C'est avant toute chose un système de collaboration entre acteurs, qui doivent coordonner leur stratégie et partager leurs données. Et au-delà d'un modèle d'affaire, c'est une véritable culture de coopération qu'il faut savoir mettre en place et pouvoir insuffler. Ainsi, la mise en place des projets est souvent longue car ils impliquent un dialogue permanent, ce qui peut être un frein. Les clubs d'écologie industrielle sont aujourd'hui en plein développement. L'enjeu d'ici 2030 est d'y associer les autres acteurs du territoire (agriculteurs, collectivités).

Des innovations en matière de gouvernance : travailler différemment, dans la coopération et le partage. Les projets de méthanisation territoriaux et multi partenariaux en sont une illustration. Les plus complexes impliquent une collectivité sous forme de SEM, un groupe d'agriculteurs issu d'une CUMA, un développeur et un financement participatif porté par Energie Partagée. Ces modèles favorisent l'acceptation locale des projets, qui est un des grands défis des énergies renouvelables. La maturité et la réussite d'un projet dépend également de l'implication et de l'impulsion que les pouvoirs publics sont capables de donner. Cette impulsion renvoie également à la gouvernance et à l'organisation politique et administrative du territoire du projet.

Des innovations éducatives : sensibiliser les citoyens pour sortir d'un modèle d'hyper consommation, où l'appartenance se fait par rapport à un produit. La mise en place d'une économie circulaire suppose de changer l'image

du déchet et les représentations sociales qui lui sont encore négativement associées. En parallèle, il faut également sensibiliser les agriculteurs, les agents des collectivités (voiries, assainissement collectif), les instances de préservation de la qualité de l'eau (police de l'eau, agence de l'eau) sur les changements de pratiques possibles et envisageables.

Aujourd'hui, le principal frein à l'économie circulaire est la rentabilité : chaque étape du cycle doit trouver son modèle économique pour permettre à la suivante de se mettre en place. Et la baisse importante des cours du pétrole depuis un an ne le favorise pas.
Il faut opérer un transfert de charges. L'emploi est une ressource très chargée alors que les ressources rares, non renouvelables, ne sont pas chargées. L'instauration d'une contribution climat énergie (taxe carbone) serait un véritable levier. Par exemple, elle incite les consommateurs à privilégier les modes de transports les moins carbonés (délaisser la route au bénéfice du rail). Le contenu en emploi des chemins de fer est supérieur à celui du trafic routier. Elle est donc aussi créatrice d'emplois.
Une véritable stratégie territoriale de développement de l'économie circulaire doit être mise en place, et l'échelle régionale semble pertinente. Une institution « chef d'orchestre » doit être désignée pour capitaliser les bonnes expériences, centraliser les ressources et mobiliser les financements. Ce chef d'orchestre devra pouvoir s'appuyer sur des organismes experts dans chacun des domaines concernés par l'économie circulaire. A ce titre, AILE a toutes les ressources nécessaires pour assurer le pilotage du volet « valorisation de la biomasse ».

Des exemples d'économie circulaire à l'horizon 2030

Dans le Grand Ouest, des initiatives sont déjà en place. Quelles évolutions peut-on imaginer en 2030 sur ces installations, permettant d'aller au bout de la démarche ?

Initiative industrielle territoriale

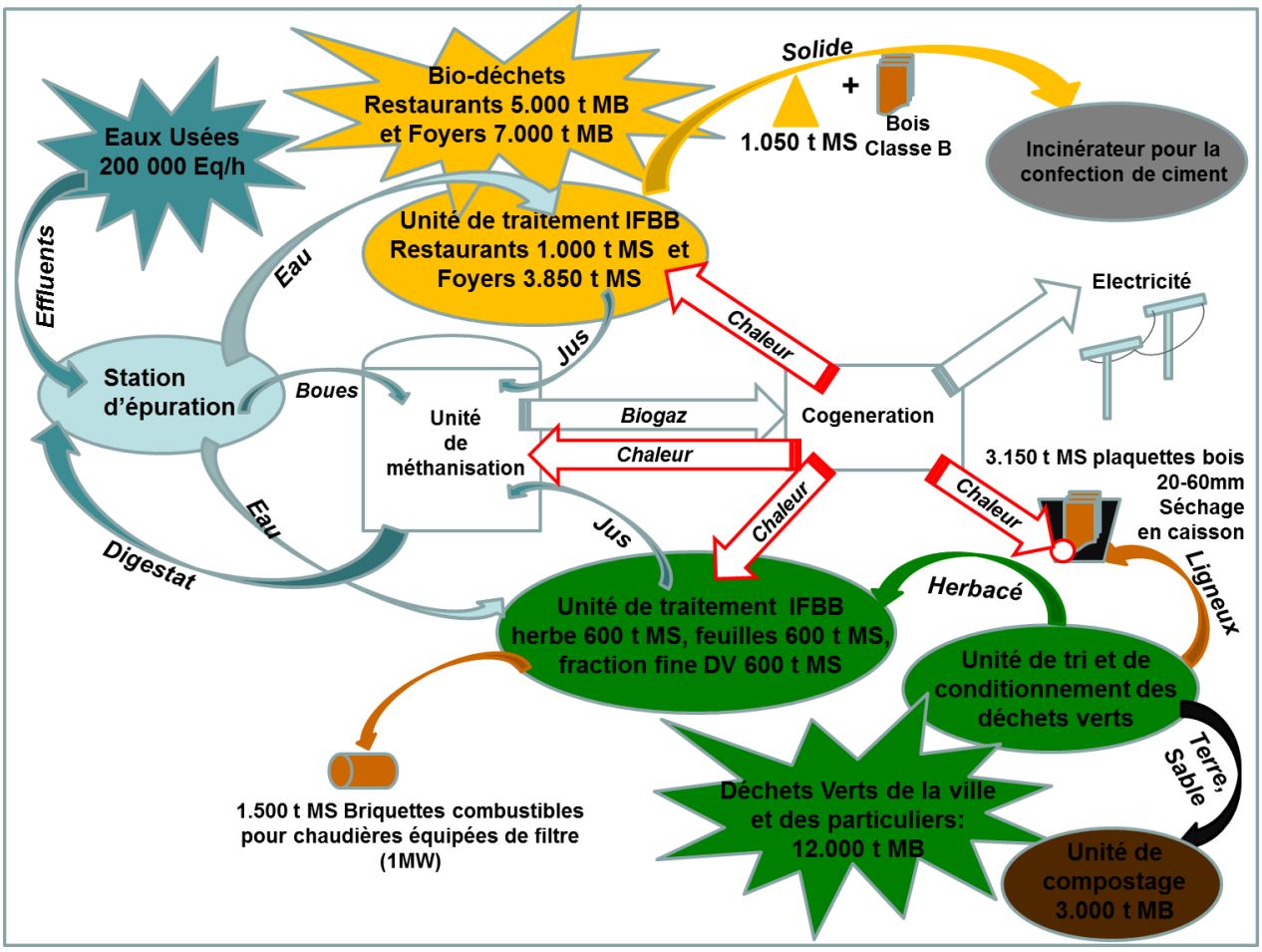
En 2030, le secteur industriel sera également moteur de la valorisation de la biomasse, et ce principalement dans le domaine des biomatériaux. L'exemple de la Green Valley à Epinal, trophée de l'économie circulaire en 2014 sera largement dupliqué sur le territoire. Il s'agit d'une alliance entre des industriels complémentaires sur la chaine de valeur bois-construction (un industriel du papier, des startups développant des procédés constructifs innovants et des nouveaux matériaux), des collectivités (Epinal, Région Lorraine) ainsi qu'un pôle de compétitivité (pôle Fibres) afin de conquérir collectivement une nouvelle niche de marché et revivifier la filière bois. La mutualisation de coûts de production entre les entreprises permet de fabriquer des matériaux biosourcés pour l'écoconstruction, compétitifs en termes de coûts. Sur le site du papetier Norske Skog à Golbey (88) se développe depuis plusieurs années une logique de mutualisation d'infrastructures (pont bascule, voirie, alimentation électrique, chaudière bois), de services (approvisionnement durable en bois, gestion des déchets, approvisionnement en énergie, logistique, maintenance, marketing, communication et distribution) et de flux (chaleur fatale, papier, cendres). Le regroupement de nouvelles entreprises sur le site de Norske Skog permet en outre d'économiser du foncier et de valoriser le bâti existant. Ce type « d'offre territoriale » permet d'attirer des nouvelles entreprises et de relocaliser certaines productions, et est donc source d'emplois sur un territoire.

Traitement des déchets verts et des effluents urbains combiné à la production de combustible : le procédé IFBB

En 2030, le traitement des déchets urbains sera également source de combustible, grâce à une synergie entre les procédés de traitement, et le développement du procédé IFBB (Integrated generator of solid Fuel and Biogaz from Biomass)

Le procédé IFBB, a été mis au point par l'université de Kassel en Allemagne afin de valoriser les biodéchets alimentaires et les déchets verts. Ce procédé a été mis en place en 2012 sur la station d'épuration de Baden-Baden (Allemagne) qui disposait déjà d'une étape de digestion des boues. Cela consiste à tremper la matière dans l'eau propre de la station d'épuration chauffée à 40°C. La matière est ensuite pressée mécaniquement (presse à vis) et va produire une fraction liquide riche en sucres intéressants pour la production de biogaz. Ce procédé convient bien pour la fraction fine des déchets verts (0-20mm) issue du déchiquetage et du criblage des branchages et arbustes, mais aussi pour les tontes d'herbe et les feuilles apportées en déchetterie, à condition qu'elles soient exemptes de terre, sinon le matériel est directement composté pour éviter toute sédimentation dans le digesteur. Contrairement aux biodéchets alimentaires, les apports de végétaux en déchetterie sont saisonniers et il convient de conserver la matière pour en disposer toute l'année. La partie solide est quant

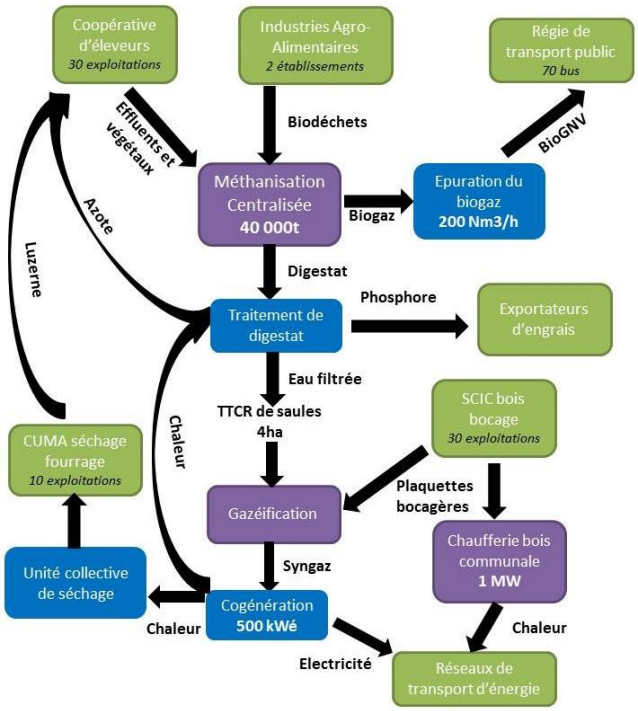
à elle pressée puis séchée : les biodéchets ainsi condensés sont mélangés à du bois de classe B pour alimenter un incinérateur permettant une économie par rapport au coût de traitement initial. Les végétaux une fois traités constituent quant à eux un combustible de qualité améliorée puisque la fraction liquide a également permis de capter des minéraux indésirables en combustion (Chlore et Soufre principalement). La fraction grossière issue du crible des déchets verts permet également la production de plaquettes de bois déchiquetées qui utilisent une partie de la chaleur produite par le co-générateur pour leur séchage. Le coût d'investissement d'une telle unité est estimé à 1,5million d'euros. La rentabilité d'une telle installation dépend d'une part de la gratuité des intrants et d'autre part du tarif de vente des biocombustibles et de l'électricité produite. La station permet également de traiter une partie du digestat produit par l'unité de méthanisation.



Stratégie agricole collective dans un secteur d'élevage

Des unités centralisées de traitement des effluents sont déjà en place dans le grand Ouest (Géotexia, Tiper…) mais les conditions économiques et règlementaires n'ont pas permis d'aboutir à des systèmes totalement « circulaires ».

En 2030, nous imaginons que sur le secteur d'un canton où la densité d'élevage est suffisante, une trentaine d'agriculteurs se regroupent pour alimenter une unité de méthanisation, valorisant environ 40 000 tonnes de matières. Le biogaz produit est épuré pour la production de biomethane carburant. Il est ensuite transporté par camion vers l'agglomération voisine, pour alimenter la flotte de bus et une partie des véhicules de la collectivité (utilitaires et camions poubelles notamment). Avec une production de 200 Nm3/heure, cela permettrait d'alimenter environ 70 bus, mais les progrès technologiques à venir permettront peut-être de faire mieux.



Le digestat subit plusieurs étapes de traitement permettant de recycler séparément l'azote (en solution concentrée de sulfate d'ammonium récupérée par stripping), le phosphore et la potasse. Les fertilisants produits bénéficient d'une certification (qui sera homogène dans toute l'Europe) et peuvent facilement être mis sur le marché. Ainsi la solution azotée reste sur le territoire, les agriculteurs utilisent moins de fertilisants azotés de synthèse. Le phosphore excédentaire est exporté vers des zones céréalières.

Après traitement, l'effluent peu chargé sert à l'irrigation de quatre ha de TTCR de saules qui seront valorisés en plaquettes combustibles. Ce gisement complètera la valorisation des haies bocagères des agriculteurs de la SCIC bois énergie locale (une trentaine d'exploitations) et les plaquettes provenant des parcelles forestières. Le bois produit localement aura deux valorisations : l'une pour la production directe de chaleur, avec l'approvisionnement d'une chaudière d'1 Mégawatt reliée à un réseau de chaleur communal. Une autre partie alimentera une unité de décomposition thermique (pyrolyse ou gazéification), produisant du syngaz et un biochar. Le biochar peut être vendu soit comme amendement, soit comme charbon combustible, pour alimenter des chaudières à microcogénération.

Le syngaz produit est valorisé en cogénération, l'électricité alimente le réseau, lui-même intégré dans une boucle énergétique locale. La chaleur issue du cogénérateur sert à de multiples usages : elle alimente une unité de séchage multiproduit, gérée en CUMA. L'unité de séchage collective permet de sécher des fourrages et de développer la luzerne sur le territoire en substitution de l'import de tourteau de soja. L'hiver, la chaleur sert au traitement du digestat de l'unité de méthanisation.

La biomasse comme source de développement local

Pour pérenniser la dynamique des territoires

Le comportement des acteurs locaux sur le développement du bois énergie ou de la méthanisation, à la fois sous forme de projets individuels ou de projets collectifs, depuis une quinzaine d'années, peut laisser penser qu'il existe une certaine capacité des acteurs du Grand Ouest pour mener ce type de projets innovants.

Par ailleurs, des éléments de contexte objectifs viennent appuyer le fait que l'Ouest soit un territoire propice au développement de ces solutions :

Les ressources agricoles, forestières et marines sont importantes et réparties sur l'ensemble du territoire.

Le contexte d'alimentation électrique de la région Bretagne doit l'inciter à repenser son mode de production d'énergie pour être moins vulnérable.

La dépendance énergétique des trois régions aux énergies fossiles et fissiles est très forte.

Des exemples de projets multipartenariaux existent déjà (SCIC bois énergie, SAS méthanisation, Enercoop Bretagne…) avec le savoir-faire pour les reproduire voire les généraliser.

Pour accentuer le développement d'une filière économique

Force est de constater que **la filière bois énergie**, malgré son développement rapide, n'a pas réussi l'intégration des étapes de conception et de fabrication d'équipements dans l'économie française, excepté de rares cas de réussite. Cependant sur des technologies comme la gazéification, encore au stade de développement technique et commercial chez nos voisins européens, il existe encore des marges de manœuvre pour du développement technologique et commercial en France. En effet de nombreux sujets de recherche traitent depuis une quinzaine d'années de l'optimisation de ce procédé. Il existe donc des compétences sur le marché. Mais un des principaux freins à ce développement en France est l'absence de marché du fait d'une tarification de l'électricité beaucoup moins avantageuse sur la petite et moyenne cogénération.

Concernant **la méthanisation**, il s'agit d'une filière en devenir et pour laquelle tout reste à faire en termes de massification et de création d'emplois et d'activités.
A l'instar de la plupart des nouvelles technologies d'énergies renouvelables, mais plus fortement, la méthanisation nécessite une implication et présence locales pour s'adapter au marché et suivre le fonctionnement des installations.
Le potentiel de création d'installations de méthanisation dans l'Ouest est important puisque 500 à 800 projets pourraient voir le jour à l'horizon 2030, soit un chiffre d'affaire potentiel de 80 à 145 millions d'euros par an ainsi qu'un chiffre d'affaire pour l'exploitation de ces unités d'environ 4 à 8 millions d'euros par an.
Sur ce chiffre d'affaire, la part de chiffre d'affaire pouvant revenir aux entreprises françaises serait compris dans une fourchette de 44 à 77 millions d'euros par an, auquel pourrait s'ajouter 32 à 55 millions d'euros si un certain nombre d'équipementiers régionaux développaient leur marché.

	%	Ch affaire (M€) pour 50 unités/an	Ch affaire (M€) pour 80 unités/an
% d'origine régionale ou française aujourd'hui	54	43	78
% d'origine régionale ou française demain	37	30	54
% d'origine étrangère uniquement	9	7	13
TOTAL	100	80	145

En première analyse, on constate donc que le marché de la méthanisation est loin d'être négligeable pour le Grand Ouest, tant en biens d'équipements qu'en terme d'exploitation.
Les impacts de son développement en matière d'économie circulaire sont par ailleurs considérables.

Bibliographie de références

Partie 1

Cat-Agrofood, Wageningen UR (2012). Chances for biomass. Integrated valorisation of biomass resources

Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050.

Schéma Régional Air Climat Energie Bretagne, Basse-Normandie, Pays de la Loire :
http://www.plan-eco-energie-bretagne.fr/upload/docs/application/pdf/2013-11/srcae_web_05_11_2013_cle7f1151.pdf
http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/140418_SRCAE_PdL.pdf
http://www.basse-normandie.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SRCAE_BasseNormandie_2_cle7689af.pdf

Eco Origin CBB Développement, Capbiotek, Valorisation des biomasses en Bretagne. Enjeux et perspectives

Biomasse Normandie (2014). Animation du volet bois-énergie du programme Défi'NeRgie. Rapport d'avancement fin 2013.
http://www.biomasse-normandie.org/IMG/pdf/RF2013_SYNTHESE.pdf

Atlanbois (2012). Note sur le bois énergie en chaufferie automatique en région Pays de la Loire.
http://www.atlanbois.com/wp-content/uploads/downloads/2012/08/note-bois-energie-pdl_mai2012.pdf

AILE (2014). Bilan de la filière bois déchiqueté en Bretagne (2007-2013). Mai 2014
http://www.aile.asso.fr/wp-content/uploads/2014/06/Rapport-public-PBEB-2007-2013.pdf

ADEME (2013). Estimation des gisements potentiels de substrats utilisables ne méthanisation. Avril 2013.

Partie 2

ADEME, GrDF, GRTgaz (2014), réalisé par : E&E Consultant, Hespul, Solagro, Hydrogène et la méthanation comme procédé de valorisation de l'électricité excédentaire (Power-to-Gas)

ADEME (2001) –Pyrolyse et gazéification de la biomasse pour la production d'électricité, procédés et acteurs

AFHYPAC (2013)- memento de l'hydrogène

Association Foncière Urbaine Libre (AFUL), (2014), Consultation pour le choix technique d'une assistance technique.

Beguide B, Fanmoe Fepeussi M (2013) - Contribution à la production des biocarburants de deuxième génération: cas du biodiesel à partir des résidus de bois, Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°2 (2013) 213 – 224

Bengaouer, A. (2013), MÉTHANATION CO2 PROJET SYDGAHR

ENEA Consulting (2011) - Application des systèmes hydrogène pour les besoins du développement à l'horizon 2020 – 2050

Faessel L (2013) - Le biochar, un nouvel intrant pour les supports de culture ?, Rittmo

GrDF (2013) - Biométhane et gazéification – évaluation du potentiel de production en France aux horizons 2020 et 2050 – rapport final.

Halouani K (2005) – Production d'hydrogène par gazéification du bois et du charbon de bois, IPEIS, Bulletin des énergies renouvelables

Jahn,M., et al (2013), Oxidative dry-reforming of biogas :Reactor Design and SOFC System Integration, Frauenhofer IKTS.

Jantscher S (2014) - Plant operation and market introduction of the CLEANSTGAS staged biomass gasification concept, CLEANTGAS GmbH

Kpogbemabou D (2011) – procédé de fabrication de biocarburants à partir de biomasse lignocellulosique biologiquement destructurée, Université de Poitiers

Lucchese P (2011) - Production d'Hydrogène à partir de la biomasse, Albi, CEA

Mauviel G, Dufour A, Lédé J (2009) – séminaire « conversion thermochimique de la biomasse », LSGC CNRS Nancy

Müller C (2015) - Distributed production of ultra-pure hydrogen from woody biomass, Laboratory of Energy Science and Engineering, ETH Zurich

Nocquet T (2012)- Torréfaction du bois et de ses constituants. Expérience et modélisation des rendements en matière volatiles, INP Toulouse

Schwob Y, Bourgeois JP (1982) – le bois torréfié réducteur d'avenir ?, Laboratoire de pyrolyse des biomasses, Ecole Nationale Supérieure des Mines

SGC (2013), Power to Gas - a technical review, SGC.

Van Poucke R (2014) - Combine – Thermochemical conversion, Université de Gent

Willison J (2010) – HYCOFOL : Production d'HYdrogène par COuplage de procédés de Fermentation à l'Obscurité et à la Lumière appliqué à la Biomasse Végétale, CEA

Youngsukkasem,S. et al., (2014), Rapid Methane production from Synthesis gas : Bio-conversion at High cell loading, Swedish Centre for resource Recovery,

www.enerzine.com - L'intermittence des énergies renouvelables n'est pas une fatalité

Partie 3

IAU Ile de France (2013), Économie circulaire Écologie industrielle : éléments de réflexion à l'échelle de l'Ile de France

Star COLIBRI project (2011) Joint european biorafinery vision for 2030

Service de l'Observation et des statistiques (2013), Le cycle des matières dans l'économie française.

SMICVAL (2013) Compte-rendu du forum « Economie circulaire et développement durable des territoires »

ADEME (2014) Guide méthodologique du développement des stratégies régionales d'économie circulaire en France.

Carpenter.S and Benett E.M, (2011), Reconsideration of the planetary bounary for phosphorus

ARBOR Project (2013), Inventory techniques for nutrient recovery from digestate

www.consoglobe.com : « La fin du phosphore menace l'agriculture mondiale »

www.institut-economie-circulaire.com

www.phosphorusplatform.eu

Partenaires fondateurs de Aile :

Agence locale
Programme Save

L'association AILE remercie ses partenaires pour leur soutien

FEDER

Programmes européens

AILE - 73 rue de Saint Brieuc - CS 56520 – 35065 RENNES Cedex - Tél : 02 99 54 63 23
Antenne Pays de la Loire - Maison de l'Agriculture - La Géraudière - 44939 NANTES Cedex 9 - Tél : 02 40 16 36 22
www.aile.asso.fr – courriel : info@aile.asso.fr