



**HAL**  
open science

# Bioraffinerie environnementale et les usages en cascade de la biomasse

Diana Garcia-Bernet, Fayza Daboussi

► **To cite this version:**

Diana Garcia-Bernet, Fayza Daboussi. Bioraffinerie environnementale et les usages en cascade de la biomasse. *Innovations Agronomiques*, 2016, 54, pp.75-88. 10.15454/1.5137737499806558E12 . hal-01604663

**HAL Id: hal-01604663**

**<https://hal.science/hal-01604663>**

Submitted on 27 May 2020

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

## Bioraffinerie environnementale et les usages en cascade de la biomasse

Garcia-Bernet D.<sup>1</sup>, Daboussi F.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INRA, UR 0050 Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement, 102, Avenue des étangs, F-11100 Narbonne

<sup>2</sup>LISBP - INSA Toulouse INSA/CNRS 5504 - UMR INSA/INRA 792, 135, Avenue de Rangueil, F- 31077 Toulouse Cedex 04

Correspondance : diana.garcia-bernet@inra.fr

### Résumé

La biomasse lignocellulosique est reconnue comme étant la ressource renouvelable la plus abondante de notre planète et dans ce sens elle est de plus en plus sollicitée pour faire face aux demandes de la bio-économie. Les demandes d'une population mondiale en augmentation constante ne pourront jamais être satisfaites si cette ressource essentielle n'est pas utilisée de manière plus efficace et durable, avec des étapes séquentielles d'utilisations massiques. La fréquence et l'efficacité de ces étapes doivent ensuite être maximisées, l'étape finale (de récupération d'énergie) se produisant à la toute fin du cycle de vie du produit. Ce principe est appelé **utilisation en cascade**. Cette hiérarchisation des usages dirige la biomasse tout d'abord vers des utilisations **matière** à haute valeur ajoutée plutôt que vers une valorisation **énergie seule** (combustion, incinération). L'utilisation en cascade peut jouer un rôle essentiel dans le développement de l'économie circulaire, néanmoins cette stratégie de valorisation n'est pas encore très répandue en raison de certains obstacles comme : l'approvisionnement durable des ressources ; certains verrous technologiques (prétraitements, procédés de séparation, etc.) ; le manque d'approche intégrée promouvant l'application énergétique et massique de la biomasse ; le manque d'entente entre les différents acteurs d'une même filière, etc. L'implémentation des usages en cascade de la biomasse suppose un challenge technique important de par les changements dans la structure et fonctionnement de tous les secteurs concernés. Pour qu'une telle stratégie puisse être déployée au niveau national et/ou Européen, des connexions entre les différents secteurs doivent être établies afin de faciliter le transfert des produits, coproduits et déchets entre les différents secteurs impliqués dans la filière. Egalement, des actions de R&D doivent être menées afin de mieux appréhender les impacts environnementaux et économiques de l'utilisation en cascade de la biomasse dans l'industrie. Dans un contexte économique incertain de certains secteurs de l'industrie agro-alimentaire, l'utilisation de la biomasse en cascade pourrait aussi aider à la création de nouvelles activités, afin de multiplier les sources de revenu pour assurer un niveau d'efficacité économique et maintenir les emplois.

**Mots-clés:** Usages en cascade, Bioraffinerie environnementale, Biomasse, Biotechnologies, Approche zéro-déchet.

### Abstract: Environmental biorefinery and cascade use of biomass

The very ambitious objectives fixed by EU governments for succeeding the energy transition towards renewable energy have greatly promoted aroused interest in biomass utilization for bioenergy and green chemistry applications. In order to avoid land use conflicts, R&D efforts are necessary for efficient biomass exploitation (whole biomass utilization). It is clear that growing world biomass demand would

not be satisfied without an efficient and sustainable exploitation scheme. Cascading use of biomass resources such as wood or agricultural byproducts can provide an efficient use of these resources from the point of view of natural resource, material and land consumption. It is effectively a principle to increase the productivity and efficient use of scarce and valuable raw material. The principle of cascading biomass use has been proposed to maximize resource efficiency and GHG emission reductions. In practice, it would entail a systematic effort, first to exploit biomass for higher-added-value products, as material input, before using it as an energy source. Cascading biomass use can play a key role in the development of the circular economy, nevertheless this strategy is not very widespread due to several obstacles: technological (biomass supply, pretreatment, fractioning, extraction and separation of components) and strategic (lack of integrated "matter + energy" valorization approach, lack of coordination between members of the different economic sectors), etc. Cascading biomass use implementation involves important technological challenges to adapt in the structure and behavior patterns of all concerned sectors. For a better biomass cascading use deployment, strong connections between different sectors, to allow for a transfer of biomass byproducts, wastes and residues between sectors are needed. Also, R&D efforts should be put on environmental and economic impact studies. Cascading biomass use will allow meeting increasing demands without proportionately increasing pressures on natural resources, most notably land and related services for biodiversity and ecosystems. Also, this approach can help the agri-food sector enterprises to create new activities, in order to diversify revenue streams, thus ensuring economic efficiency and maintaining jobs.

**Keywords:** Cascading use principle, Environmental biorefinery, Biomass, Biotechnologies, Zero discharge approach.

## Introduction

Dans le contexte de la valorisation non alimentaire de la biomasse, un développement accru de nouveaux usages - *en plus des usages classiques comme le bois énergie et matériaux, les plantes textiles, etc.* - sujet à des contraintes et enjeux sociétaux, économiques, environnementaux et techniques est observé ces dernières années. Les développements de ces nouvelles filières ne nécessiteront pas les mêmes accompagnements selon qu'il s'agisse de l'utilisation de déchets d'industries, de déchets urbains ou de sous-produits "diffus" dispersés sur le territoire ; ou de nouvelles cultures dédiées dont toute la chaîne de valorisation doit être mise en place (De Cherisey, 2007).

Les demandes d'une population mondiale en augmentation constante ne pourront jamais être satisfaites si cette ressource essentielle n'est pas utilisée de manière plus efficace et plus durable. De nombreux experts estiment dorénavant que **la biomasse doit être exploitée par étapes séquentielles d'utilisations massiques**. La fréquence et l'efficacité de ces étapes doivent ensuite être maximisées, l'étape finale (de récupération d'énergie) se produisant à la toute fin du cycle de vie du produit. Ce principe est appelé «**utilisation en cascade**» (Sirkin et ten Houten, 1994 ; Haberl et Geissler, 2000).

## 1. Utilisation en cascade et économie circulaire

L'utilisation en cascade de la biomasse fait appel à **l'utilisation efficace de ressources valorisant des résidus et des matières recyclées pour l'utilisation matérielle afin d'étendre la disponibilité totale de la biomasse dans un système donné** (Vis et al., 2016). Il existe de nombreux concepts et théories traitant de l'utilisation en cascade, généralement basés sur des interprétations différentes du mot *cascade*. Ces concepts couvrent de multiples aspects, qui vont des produits réparables et d'occasion à des combinaisons complexes de produits principaux, dérivés et accessoires, dans le cadre de ce que l'on appelle des cascades *primaires* et *secondaires*. Deux aspects importants doivent néanmoins être pris en compte : 1) l'utilisation en cascade implique faire des choix entre différentes options de traitement ou de valorisation ; 2) étant donné que ce choix d'application spécifique va

influencer les utilisations futures de la biomasse, une vision « chaîne de valeur » est nécessaire dès le début (Essel et Carus, 2014).

**L'utilisation en cascade fait référence à l'usage efficient des ressources et présente des points communs avec d'autres approches telles que l'économie circulaire ou le recyclage.** (Essel et Carus, 2014). En effet, l'économie circulaire vise à éradiquer la production de déchets, pas uniquement lors du processus de production comme le fait le lean management, mais de façon systématique, tout au long du cycle de vie et d'utilisation du produit et de ses composants (Zils, 2014, Figure 1). Le terme *en cascade* peut également avoir des significations différentes selon le contexte. Tous ces concepts ont cependant un point en commun : à un moment quelconque de leur déroulement, un produit au moins est utilisé comme matériau.

Le rapport *Cascading of Biomass - 13 Solutions for a Sustainable Bio-based Economy* de CE Delft (Odegard et al., 2012) soulève quelques questions sur l'utilisation de la biomasse auxquelles l'approche en cascade devrait répondre : Quelles sont les meilleures places dans la chaîne de valorisation pour l'utilisation de la biomasse? Certaines biomasses peuvent-elles être valorisées « plusieurs fois » à travers l'approche en cascade ? Quel est le meilleur usage pour une biomasse? Quels critères retenir pour privilégier des usages ?

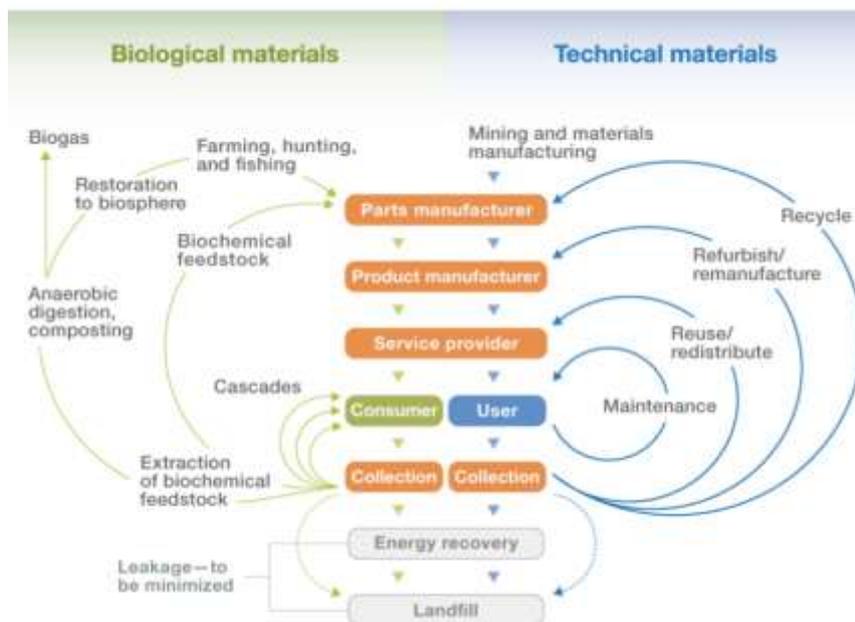


Figure 1 : Economie circulaire vs économie linéaire d'après Zils, 2014, <http://www.mckinsey.com>

## 2. Utilisation en cascade de la biomasse

Ce sont les industries métallurgiques et du verre qui sont à l'origine de ce concept. Le principe d'utilisation en cascade de la biomasse est issu de l'industrie du bois et a été implémenté pour maximiser l'efficacité d'exploitation des ressources forestières tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. En pratique, cela implique un effort systématique pour exploiter la biomasse-bois d'abord pour obtenir des produits à haute valeur ajoutée (papier, matériaux) avant de l'utiliser pour fournir de l'énergie. Dans la filière bois, comme dans la plupart des cas de mise en place d'usage en cascade, la plus haute valeur économique des produits coïncide avec une plus haute valeur environnementale (Keegan et al., 2013).

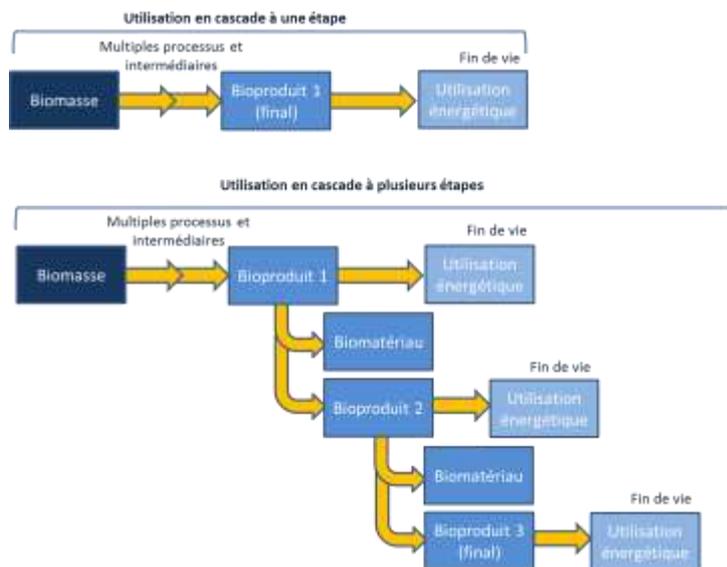
L'importance et l'utilité du principe de l'utilisation en cascade de la biomasse est reconnue au niveau européen par plusieurs institutions œuvrant au développement de la bioéconomie en Europe. La

Commission Européenne a produit plusieurs documents de travail sur le développement de cette approche de valorisation : Forest Strategy 2013 (EC 2013), Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe – SWD 2012, etc. Le groupe de travail pour le développement de la biotechnologie en Europe de SusChem (European Technology Platform for Sustainable Chemistry) a identifié l'implémentation de traitements combinés pour exploiter la totalité de la biomasse comme un des challenges scientifiques et technologiques à résoudre pour 2025 (Burel, 2011).

L'utilisation en cascade d'une biomasse peut se présenter sous 3 formes, non mutuellement exclusives (Odegard et al., 2012 ; ValBiom, 2016) :

1. La cascade dans le temps. Plusieurs utilisations successives garantissent une plus longue durée de vie de la biomasse. L'usage qui laisse le plus d'options ouvertes en fin de vie doit être préféré. Un exemple typique est le recyclage du papier.
2. La cascade en valeurs. La cascade dans le temps peut-être optimisée par la cascade en valeurs (économiques, environnementales, socio-économiques) pour s'assurer que la valeur la plus élevée possible est obtenue au moment de choisir entre plusieurs solutions et que la valeur dans l'ensemble du cycle est maximisée.
3. La cascade en fonctions est la coproduction **obtenue à travers les bioraffineries**. C'est la production de différents flux fonctionnels (par exemple protéines, huile et vecteur énergétique) à partir d'un seul flux de biomasse, maximisant ainsi l'utilisation fonctionnelle totale.

L'utilisation en cascade de la biomasse donne la priorité aux valorisations à plus haute valeur ajoutée, la réutilisation et recyclage de produits et promeut la valorisation énergétique lorsqu'il n'y a plus d'autre option de valorisation (Figure 2). Cette **hiérarchisation des usages** dirigeant la biomasse tout d'abord vers des utilisations « matière », plutôt que vers une valorisation « énergie seule » (combustion, incinération) qui détruit la matière première<sup>1</sup> maximise la quantité de carbone séquestrée dans des biomatériaux et des produits biosourcés. Elle promeut également la production d'énergie combinée avec des coproduits, comme les digestats ou composts après méthanisation (<http://www.birdlife.org>).



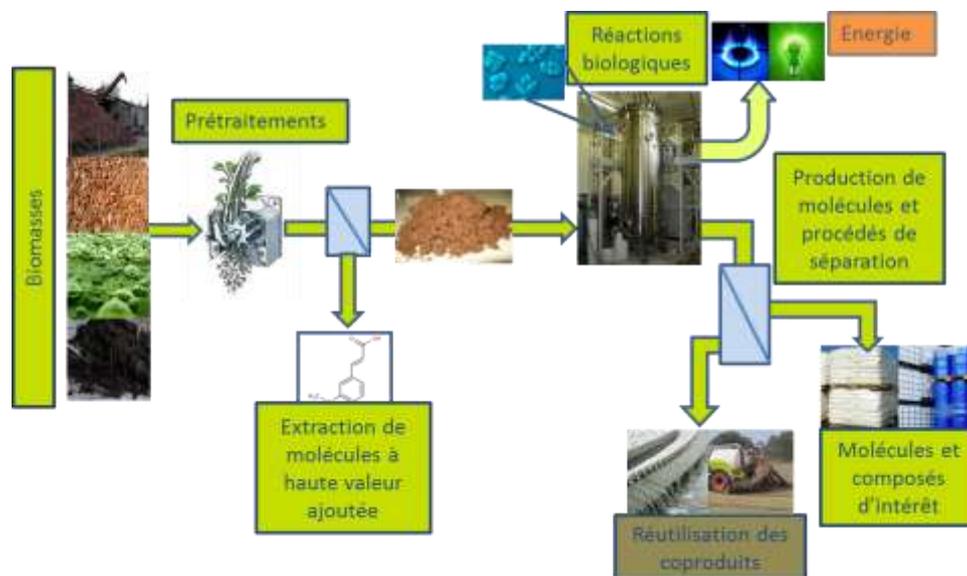
**Figure 2** : Flux associés aux utilisations en cascade à une étape et à plusieurs étapes. (Adapté de Essel et Carus, 2014)

<sup>1</sup> Du point de vue de l'économie circulaire, la combustion et incinération peuvent être considérées comme une fuite ou une perte de matière première (<http://www.mckinsey.com>).

### 3. Usages en cascade de la biomasse et bioraffinerie

L'usage en cascade est très souvent associé à la **bioraffinerie**, dans laquelle plusieurs produits (biosourcés) sont obtenus à partir d'une même biomasse<sup>2</sup>. Dans ce cas, l'usage en cascade concerne la production de plusieurs produits en même temps, plutôt que des utilisations successives dans le temps, comme dans l'usage en cascade. Ces deux interprétations peuvent être à la fois différentes, mutuellement exclusives et complémentaires (Odegard et al., 2012).

Le principal frein identifié au déploiement des bioraffineries est le manque de viabilité technico-économique, en raison de la mise en œuvre de prétraitements nécessaires pour améliorer les rendements des transformations biologiques de la biomasse. Pour minimiser les coûts d'investissement et d'opération liés aux opérations de prétraitement, Il serait par conséquent intéressant de mettre en œuvre des schémas de valorisation et traitement de la biomasse ou résidus agroalimentaires, forestiers, etc. basés sur la valorisation en cascade de ces substrats, à travers la valorisation intégrale (matière + énergie) pour diminuer l'impact économique des prétraitements en augmentant la rentabilité économique des filières (Figure 3).



**Figure 3** : Approche rationnelle pour une multi-valorisation en cascade de la biomasse (García-Bernet, 2016).

Dans son plan d'action national de 2010, la France s'est fixé un objectif à l'horizon 2020 de 23 % d'EnR (énergies renouvelables), soit une production annuelle supplémentaire de 20 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) par rapport à 2006. **Ce plan a identifié la biomasse comme la principale source potentielle d'EnR** et prévoit, pour réussir la transition énergétique, l'implémentation à grande échelle de digesteurs anaérobies pour production de bioénergie (biogaz) à partir de résidus agro-alimentaires et de biomasses dédiées comme le miscanthus, entre autres. Le potentiel énergétique de la filière méthanisation en France s'élève à environ 7 millions de tep (tonne équivalent pétrole), soit l'équivalent de 4% de la consommation actuelle en énergie finale de la France.<sup>3</sup> Néanmoins, la valorisation énergétique de la biomasse possédant une faible valeur ajoutée, cette filière en devenir

<sup>2</sup> Bioraffinerie: « succession de procédés physiques, chimiques et/ou biologiques de déconstruction, de séparation et de fonctionnalisation visant à transformer de façon durable la biomasse en produits commerciaux intermédiaires ou finis » (Colonna, 2011).

<sup>3</sup> Ce gisement se trouve essentiellement dans les résidus et co-produits agricoles, avec 5 millions de tep, et les déchets industriels et des ménages, avec 1,7 millions de tep.

nécessite des solutions pour améliorer le rendement des installations afin qu'elles soient rentables, à travers une meilleure transformation de la matière, entre autres (ADEME, 2013). L'approche **multi-valorisation en cascade de la biomasse « matière + énergie »** est une option intéressante pour augmenter la rentabilité économique de ces filières et par la même occasion, de répondre à la demande croissante du marché en produits biosourcés qui pourraient être produits au long du processus de transformation.

#### 4. La bioraffinerie environnementale et les usages en cascade

La hiérarchisation des usages doit être considérée comme une ligne stratégique qui viserait à favoriser un ordre dans les priorités de valorisation de la biomasse. Une hiérarchisation similaire pour la gestion des déchets a été mise en place par la législation Européenne (Directive cadre 2008/98/CE<sup>4</sup>). Dans le traitement des déchets, quelle que soit leur nature d'ailleurs, c'est toujours la même hiérarchie qu'il faut respecter, hiérarchie incarnée par l'échelle de Lansink (Figure 4).



Figure 4 : Echelle de Lansink-niveaux de valeur dans la gestion des déchets (source : <http://reversedconcepts.nl>)

Les contraintes environnementales de plus en plus dures et les ambitieux objectifs fixés par la France et l'UE pour réussir la transition énergétique ont encouragé ces dernières années le développement de schémas innovants de traitement en remplacement des procédés conventionnels ayant une valorisation des déchets, coproduits et sous-produits limitée ou inexistante<sup>5</sup>.

Lorsque la biomasse considérée est un résidu de l'activité humaine<sup>6</sup>, le concept de bioraffinerie se décline sous sa forme dite de **bioraffinerie environnementale**. Cette approche permet d'élargir les potentialités des procédés de traitement/valorisation des déchets car, en plus de réaliser un traitement

<sup>4</sup><http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:FR:PDF>

<sup>5</sup> Coproduits, sous-produits et déchets sont des termes communément utilisés pour désigner des productions "induites", c'est-à-dire des productions indissociables des cycles de production du ou des produits commerciaux majeurs. Le Comité national des coproduits avait proposé, en 2000, un essai de définition (France Agrimer, 2012) :

- coproduit : leur valorisation économique est totale et ils disposent d'un marché adossé à une cotation. Des agents économiques spécialisés, différents des producteurs, interviennent fréquemment pour assurer leur distribution.

- sous-produit : leur valorisation est partielle, spécifique ou locale. Quand elle existe, la valorisation économique reste de faible valeur ajoutée, soumise aux aléas économiques, et ne permet souvent l'intervention que d'un unique opérateur intermédiaire.

- déchet : matière dont le producteur cherche, avant tout, à éliminer (mise en décharge, incinération, retour au sol...) (directive 2006/12/CE de l'Union européenne).

<sup>6</sup> Les coproduits et déchets avec statut de « biomasse » selon l'ADEME sont: coproduits et effluents des industries de transformations de matières biologiques (scieries, papeteries, agro-alimentaires, élevages...); autres déchets organiques (déchets urbains, boues issues des stations d'épuration, ordures ménagères, déchets verts...); résidus de cultures et d'élevage; graisses animales dans les abattoirs.

de la pollution, ces procédés (et les écosystèmes associés) recèlent des fonctionnalités très riches en termes de valorisation des sous-produits et de services rendus pour le développement de la Bioéconomie (Figure 5).

A titre d'exemple, s'il est clair qu'aujourd'hui la digestion anaérobie ou méthanisation est perçue comme une valorisation énergétique via la production de méthane et d'un digestat valorisable du point de vue agronomique, bien d'autres applications sont possibles comme la production de biohydrogène et de molécules plateformes pour la conception de produits biosourcés. Pour l'optimisation de ces filières, des procédés faisant appel à des écosystèmes de grande diversité, mis en œuvre dans des procédés complexes et souvent interconnectés et devant intégrer des sources multiples d'approvisionnement selon un contexte territorial généralement subi, sont nécessaires. Il est donc obligatoire de concevoir les procédés en fonction de compromis entre services rendus (i.e., intégrer les dimensions agronomiques et écosystémiques en complément du traitement de la pollution et de la production de molécules et d'énergie). Or, ces compromis ne sont pas aujourd'hui explicitement intégrés dans la conception des procédés et des filières (Rapport AERES LBE-INRA, 2014).

Dans ce contexte, le LBE (Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement UR INRA 0050) conduit des recherches avec l'objectif de concevoir, de mettre en œuvre et d'optimiser des procédés biologiques sobres, performants, fiables et évolutifs autour de filières durables de valorisation et/ou traitement de différents résidus issus des activités humaines, en profitant des multiples compétences disciplinaires présentes au LBE : Ecologie Microbienne, Génie Microbiologique, Génie des Procédés, Modélisation et Mathématiques Appliquées. Cette activité de recherche se décline :

- A l'échelle du processus par la caractérisation des cinétiques, des systèmes clés physiologiques et des dynamiques de populations microbiennes,
- A l'échelle du procédé par le développement de nouveaux systèmes d'épuration, par l'optimisation de l'hydrodynamique, de la dépense énergétique ou des rendements et productivités des installations, ainsi que par la mise en œuvre de techniques physico-chimiques de co-traitement ;
- Jusqu'à l'échelle de la filière par l'intégration des besoins des agrosystèmes (i.e. systèmes récepteurs, à savoir les sols agricoles et les cultures associées), des contraintes environnementales (i.e. impact quantitatif et qualitatif des produits résiduels de traitement sur les milieux récepteurs eau, air, sol), sanitaires (i.e. minimisation des risques liés aux éléments organiques et microbiologiques), économiques (i.e. minimisation des investissements, diminution des intrants de fonctionnement, optimisation des performances) et sociétales (i.e. production d'éléments objectifs sur l'innocuité et la traçabilité des produits pour renforcer l'acceptabilité des nouvelles filières de traitement).

Par rapport à une bioraffinerie «classique» qui utilise directement la biomasse native et non des déchets ou coproduits, la bioraffinerie environnementale doit faire face -en plus des contraintes liées à la disponibilité de la ressource, à la faisabilité technologique ou économique- à d'autres contraintes : elle doit prendre en compte le devenir des produits résiduels solides après traitement (i.e. digestat, compost,...) et des effluents liquides traités qui constituent des ressources encore insuffisamment valorisées. Ces produits et sous-produits générés doivent répondre de manière accrue à des critères de qualité agronomique (i.e. satisfaire les besoins hydriques, apporter de manière raisonnée les éléments minéraux et les matières organiques contenus dans les produits résiduels) sous des contraintes d'innocuité environnementale et sanitaire (contaminants chimiques et biologiques). Le digestat, aujourd'hui considéré comme un déchet, devrait être demain un produit selon la stratégie européenne du "End of Waste" et ainsi contribuer au développement de la filière méthanisation en France tel que souhaité et inscrit dans le plan national "Energie Méthanisation Autonomie Azote" (EMAA). La méthanisation présente bien plusieurs intérêts pour l'agriculture : elle permet de valoriser les effluents d'élevage et sous-produits agricoles pour produire de l'énergie, dans une logique d'économie circulaire,

puisque l'azote organique provenant des produits résiduaux issus des activités agricoles et/ou humaines retourne au sol et peut se substituer partiellement à l'azote minéral qui, par la suite, est indispensable à la croissance des cultures, elles-mêmes retournant dans le cycle sous forme d'alimentation par exemple. En effet, l'azote est une matière première indispensable à l'agriculture pour la fertilisation des cultures et l'alimentation animale, mais c'est aussi une «charge» pour les exploitations :

- Environnementale : effluent potentiellement source de pollutions ;
- Économique : coût des intrants chimiques, gestion des effluents ;

Il existe également des déséquilibres azotés entre les territoires: zone d'excédents, zones déficitaires dépendantes aux engrais chimiques (DRAAF, 2013).

La gestion du cycle de l'azote et des autres éléments minéraux, en lien avec celui du carbone, se situe au cœur de cette problématique car ils sont à la fois indispensables à la croissance des végétaux et des animaux et des polluants potentiels de l'environnement. La fabrication des engrais minéraux azotés et phosphatés fait appel à des ressources non renouvelables, en cours de raréfaction (gaz naturel et énergie pour la synthèse chimique d'azote minéral, roches phosphatées pour la fabrication d'engrais P). Réciproquement, l'agriculture peut contribuer à la régulation du cycle du carbone, et donc à l'atténuation du changement climatique, via le stockage de C dans les sols et dans la biomasse ou via la production d'énergie renouvelable, comme dans le cas de la méthanisation (Pellerin et Martinez, 2015).

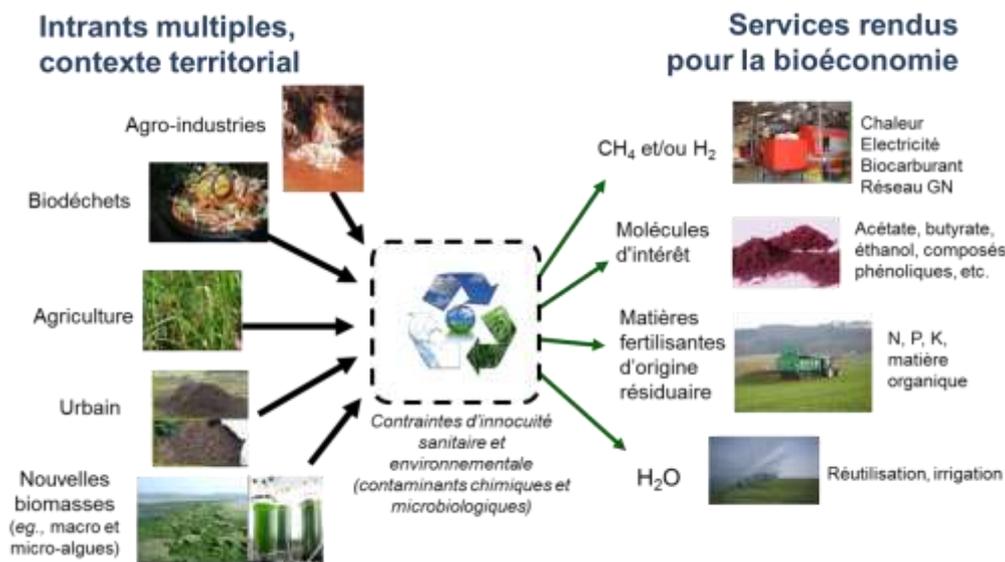


Figure 5 : Le concept de Bioraffinerie Environnementale développé par le LBE-INRA Narbonne (<https://www6.montpellier.inra.fr/narbonne>).

## 5. Exemples d'application d'usages en cascade en bioraffinerie environnementale

L'utilisation en cascade de la biomasse peut jouer un rôle essentiel dans le développement de l'économie circulaire ; néanmoins cette stratégie de valorisation n'est pas encore très répandue. Au LBE-INRA, nous travaillons sur cette approche avec l'objectif de développer des filières de traitement durables et viables, associant l'extraction des composés minoritaires mais à haute valeur ajoutée à la production de bioénergie pour diminuer l'impact économique des prétraitements.

Exemples de projets en cours :



## 6. Les microalgues dans le contexte des usages en cascade

Les biotechnologies industrielles ont pour objectif de contribuer au développement sociétal durable en créant des solutions technologiques innovantes qui prennent en compte les contraintes de production, de consommation et de préservation de l'environnement. Dans ce cadre, une attention est portée sur l'utilisation accrue du carbone renouvelable, en substitution au carbone d'origine fossile, pour la production de composés valorisables dans les secteurs de la chimie, des matériaux et de l'énergie. Pour atteindre cet objectif, les scientifiques et les industriels ont travaillé de manière synergique et efficace pour identifier puis optimiser des biocatalyseurs répondant à ces prérogatives.

C'est dans ce contexte que les microalgues sont apparues comme une solution porteuse d'avenir car ce sont de fantastiques usines cellulaires présentant un temps de croissance très rapide et capables de produire des composés selon deux modes: en conditions autotrophes, en utilisant du CO<sub>2</sub> comme source de carbone, luttant ainsi contre l'effet de serre et en conditions hétérotrophes en utilisant une autre source de carbone renouvelable (Scott et al., 2010). De plus, elles peuvent être cultivées en eau de mer ou dans des eaux usées, une propriété qui réduit considérablement la concurrence pour l'approvisionnement en eau douce et préserve les terres agricoles. Enfin, leur capacité à consommer et/ou stocker les métaux lourds et une grande variété de composants organiques toxiques (DOE, 2010), en font des organismes très prisés dans le secteur de l'environnement. Ainsi, les microalgues (que l'on peut considérer comme des mosaïques plantes – microorganismes) sont des pépites pour les biotechnologies industrielles répondant à un grand nombre de critères tant économiques, sociétaux qu'environnementaux.

Leur capacité de captation de CO<sub>2</sub> sont particulièrement attractives pour les cimenteries et chaufferies pour maîtriser les rejets de gaz carbonique et ainsi répondre aux normes environnementales. C'est ainsi que la cimenterie de Gargenville dans les Yvelines qui couvre plus de 20% des besoins de l'Île de France a réalisé un partenariat avec Algosource et le GEPEA pour s'équiper en photobioréacteurs solaires permettant la fixation par les microalgues du CO<sub>2</sub> rejeté. De tels partenariats existent également à l'étranger avec Bio Fuel Systems / Cemex (Espagne), Pond Biofuels (Canada). De plus, des programmes visant à valoriser les émissions de CO<sub>2</sub> de l'industrie sidérurgie ont vu le jour, notamment les projets VALORCO et VASCO.

La biomasse algale se caractérise par une grande richesse en lipides, protéines, polysaccharides, vitamines, pigments et antioxydants (Barra et al. 2014). Actuellement, leur production industrielle représente une économie de niche de l'ordre de 15 000 tonnes de biomasse par an, essentiellement pour des marchés à haute valeur ajoutée tels que les compléments alimentaires, les acides gras polyinsaturés, les antioxydants et l'aquaculture. La taille du marché de ces produits est estimé à 5-6,5 milliards de dollars, avec une répartition de 1,25 à 2,5 milliards pour les compléments de santé, 1,5 milliards pour la production d'acide docosahexaénoïque (DHA) et enfin 700 millions pour le secteur de l'aquaculture (Pulz et Gross, 2004). Mais c'est dans le secteur de l'énergie et de la chimie que les microalgues font l'objet de toutes les attentions en raison de leur richesse naturelle en carbohydrates et en lipides (30-70%). Ces propriétés métaboliques sont des atouts pour la production de biocarburants, notamment le biodiesel et l'éthanol. Cependant, le coût de production reste élevé entre 9\$ à 25\$ par gallon pour une culture ouverte et 15\$ à 40\$ pour une culture en photo bioréacteurs (Gendy et al. 2013). Réduire ce coût devient un challenge de premier ordre.

Plusieurs verrous tant biologiques que technologiques doivent être levés pour parvenir à une exploitation économique des microalgues dans ces secteurs. Différentes stratégies ont émergé dans ce sens: (i) le développement de bioraffineries pour valoriser les coproduits à forte valeur ajoutée (DHA, caroténoïdes, protéines, polymères) (ii) l'optimisation des procédés pour augmenter les performances des photobioréacteurs et diminuer les coûts de la récolte ainsi que d'extraction de molécules (iii) l'amélioration des propriétés métaboliques des microalgues. L'étude de Chisty en 2007 illustre parfaitement ce dernier point en révélant qu'une augmentation du contenu en lipides de 30 à 70%

conduit à une augmentation de la productivité lipidique de 58 700L/ha à 136 900 L/ha est considérablement plus élevé que celle correspondant à l'huile de palme (5950 L/ha) ou du colza (1190L/ha). Ainsi la production de biocarburant par les microalgues est de l'ordre de 50 à 120 tonnes/ha/an contre seulement 4 tonnes/ha/an pour l'huile palme. Ces résultats extrêmement prometteurs ont accéléré le développement de plusieurs axes de recherches: certains portent sur l'optimisation des paramètres de culture (milieu, lumière, CO<sub>2</sub>, nutriments...) afin d'améliorer la production de composés spécifiques. D'autres visent à modifier le patrimoine génétique des microalgues pour augmenter et/ou créer de nouveaux composés, via la biologie de synthèse (Radakovits, 2010).

La preuve de concept que les microalgues peuvent produire de nouvelles molécules intéressantes les secteurs thérapeutiques et de la chimie verte a été récemment apportée (Specht et al. 2010 ; Hempel et al. 2011), ce qui constitue une avancée considérable.

C'est dans ce cadre que le Dr. Fayza Daboussi a été recrutée par l'INRA en 2015 au sein du Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Biologiques et des Procédés pour créer une équipe de recherche « Biologie de Synthèse chez les Microalgues » dont la mission est de façonner le potentiel métabolique des microalgues via le développement de méthodologies génétiques permettant à ces biocatalyseurs d'être des acteurs clés de la bioéconomie. Alors que la France compte un grand nombre de centres de recherche explorant les microalgues sous toutes les coutures comme l'écologie, la physiologie, l'évolution des génomes, seuls quelques laboratoires développent des méthodologies d'ingénierie génétique permettant de relier un gène à une fonction et de développer les microalgues en tant que biocatalyseurs industriels pour la production de molécules. Dans ce contexte, l'équipe « Biologie de Synthèse chez les Microalgues » dispose d'une expertise unique en France dans le domaine de l'ingénierie génétique ciblée (utilisation de nucléases de type TALEN, CRISPR/Cas9), acquise par le Dr. Daboussi dans ses précédentes fonctions de Directeur du Département R&D de la société Cellectis. Cette équipe développe un arsenal de méthodologies permettant de manipuler génétiquement le génome des microalgues avec facilité et précision (insertion de gènes à un site prédéfini, inactivation de gènes spécifiques). Ces technologies de pointe permettent d'accroître les connaissances dans le métabolisme des microalgues, un prérequis pour augmenter la production en composés naturels et pour permettre de produire de nouveaux composés.

## 7. Les obstacles à l'utilisation en cascade de la biomasse

Selon Essel et Carus (2014), seuls quelques exemples d'utilisation en cascade de la biomasse ont pu être concrétisés avec succès en Europe à ce jour en raison de plusieurs verrous, dont les principaux sont : « l'environnement politique et le système réglementaire qui prévalent en Europe qui favorisent l'utilisation directe pour la production d'énergie, les volumes insuffisants, une qualité variable et la contamination des flux de biomasse, les problèmes de viabilité commerciale de la chaîne d'approvisionnement et de l'étape de transformation, ainsi que la diminution des propriétés techniques des produits ».

D'après le rapport Cascades - étude sur l'utilisation en cascade optimisée du bois (Vis et al., 2016), l'utilisation en cascade à étapes multiples de tout produit doit par nature faire face à des obstacles causés par l'interrelation entre les flux matériels du produit « A » au produit « B ». Parmi les principaux obstacles pour la filière bois, les auteurs ont identifié :

- Des obstacles dus à l'approvisionnement durable et techniquement disponible des ressources. Face aux mobilisations économiques, fonction de la demande du marché, l'utilisation en cascade constitue en soi une manière pertinente de réduire la pression sur l'approvisionnement de biomasse et de faire face à la demande croissante en applications industrielles

- Des obstacles techniques pour la valorisation intégrale de la biomasse (prétraitements, procédés de séparation, etc.) ; des efforts plus intensifs en R&D doivent conduire à résoudre les défis techniques et logistiques pour que des solutions rentables puissent être mis en œuvre.
- Des obstacles administratifs empêchant les usages en cascade de certaines biomasses. Il n'existe pas d'obligation paneuropéenne pour la séparation à la source du bois par exemple, comme il en existe pour le verre, les matières plastiques, le papier, etc. Egalement, l'absence de directive cadre Européenne pour encourager et cadrer le réemploi et le recyclage de la biomasse, comme la Directive cadre 2008/98/CE relative aux déchets. De plus, la directive EU d'avril 2009 sur la promotion des énergies renouvelables (EnR) encourage l'utilisation de biomasse à des fins de production d'énergie directement.
- Des obstacles dus au manque d'approche intégrée promouvant l'application énergétique et matérielle de la biomasse, les usages énergie et matière étant généralement traités séparément.

Nous pouvons rajouter également le manque de coordination/entente entre les différents acteurs d'une même filière.

## 8. Conclusions, leviers d'action et opportunités

Dans un contexte de croissance du marché des produits biosourcés, l'usage en cascade de la biomasse représente un moyen pour s'assurer de l'efficacité d'une exploitation rentable des ressources évitant les conflits d'usage. Comme souligné par Essel et Carus (2014) « toute forme d'utilisation matérielle peut servir de point de départ à une utilisation en cascade, avec tous les bénéfices potentiels qu'il est possible d'en tirer pour l'environnement et l'emploi. Le seul principe valable est qu'on ne peut incinérer qu'une fois ».

Néanmoins, les politiques européennes doivent fournir le cadre légal adéquat pour favoriser la valorisation en cascade de la biomasse, dans laquelle seuls les produits en fin de vie seront envoyés vers des filières de valorisation « énergie seule » (combustion, incinération) pour éviter toute concurrence pour le substrat biomasse entre la valorisation matière et cette valorisation ultime, ce qui fait augmenter la demande en biomasse « matière première ».

L'implémentation des usages en cascade suppose un challenge technique important de par les changements dans la structure et fonctionnement de tous les secteurs concernés (production, transformations, utilisateurs finaux, etc.). Pour qu'une telle stratégie puisse être déployée au niveau national et/ou Européen, des connexions entre les différents secteurs doivent être établies afin de faciliter le transfert des produits, coproduits et déchets entre les différents secteurs impliqués dans la filière (bois, oléagineuses, céréales, etc.). En effet, la plupart d'initiatives réussies concernent des (co)produits transformés en un produit similaire à l'intérieur du même secteur ou de la même branche du secteur (papier, verre, métal). Egalement, des actions de R&D doivent être menées afin de mieux appréhender les impacts environnementaux et économiques de l'utilisation en cascade de la biomasse dans l'industrie. Cette approche devrait permettre le développement de filières de traitement viables économiques tout en étant respectueuses de l'environnement. Dans un contexte économique incertain de certains secteurs de l'industrie agro-alimentaire, elle pourrait aussi aider à la création de nouvelles activités, afin de multiplier les sources de revenu pour assurer un niveau d'efficacité économique et maintenir les emplois.

## Références bibliographiques

- ADEME, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 2013. Exercice de prospective de l'ADEME « Vision 2030-2050 ». Document Technique, Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050, 297 pp. Document disponible à l'adresse suivante : [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)
- Barra L., Chandrasekaran R., Corato F., Brunet C., 2014. The challenge of ecophysiological biodiversity for biotechnological applications of marine microalgae. *Mar. Drugs* 12, 1641–1675
- Burel C., 2011. Industrial or White Biotechnology Research for Europe. Rapport Secrétariat de la section IB de SusChem- EuropaBio, Bruxelles, Be.
- Chisti Y., 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnol. Adv.* 25, 294–306
- Colonna P., 2011. Le carbone renouvelable dans les systèmes alimentaires, énergétiques et chimiques. Leçon inaugurale Chaire de Développement durable-Environnement, énergie et société, Collège de France.
- De Cherisey H., Roy C., Pouet J.C., 2007. La valorisation de la biomasse - Guide d'information à l'attention des administrations et des établissements publics. Rapport Vade-mecum Biomasse ADEME, Mission de coordination interministérielle pour la valorisation de la Biomasse.
- D.O.E., 2010. National Algal Biofuels Technology Roadmap.
- DRAAF, 2013. Plan Énergie Méthanisation Autonomie Azote - Rencontre du Réseau Régional Énergie Climat région Rhône Alpes, Novembre 2013.
- Energie Wallonie, 2016. Recommandations pour l'élaboration d'une stratégie wallonne « Biomasse-énergie » 21 Avril 2016.
- Essel R., Carus M., 2014. Améliorer l'efficacité des ressources par une utilisation en cascade de la biomasse. *Rural* 21, Vol. 48 Nr. 3/2014: Bioéconomie.
- D. García-Bernet. (2016) Traitement des déchets: des procédés de traitements classiques vers la bioraffinerie environnementale. Colloque Adebitech CoproInov – Coproduits, innovations et filières, quelles sont les nouvelles stratégies ? Romainville, Octobre 2016.
- Gendy T.S., El-Temtamy S.A., 2013. Commercialization potential aspects of microalgae for biofuel production: an overview. *Egypt. J. Pet.* 22, 43–51.
- Haberl H., Geissler S., 2000. Cascade utilization of biomass: strategies for a more efficient use of a scarce resource. *Ecological Engineering* 16, S111 – S121.
- Hempel F., et al., 2011. Microalgae as bioreactors for bioplastic production. *Microb. Cell Factories* 10, 81.
- Keegan D., Kretschmer B., Elbersen B., Panoutsou C., 2013. Cascading use: a systematic approach to biomass beyond the energy sector. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 7:193–206.
- LBE-INRA Narbonne (2014). Rapport d'évaluation AERES (Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur), vague E : campagne d'évaluation 2013-2014.
- Odegard I., Croezen H., Bergsma G., 2012. Cascading of Biomass - 13 Solutions for a Sustainable Bio-based Economy. Delft, CE Delft, August 2012.
- Pellerin S., Martinez J., 2015. Quels leviers pour une gestion plus durable des cycles biogéochimiques dans le cadre de la transition agroécologique ? *Innovations Agronomiques* 43,107-113.
- Pulz O., Gross W., 2004. Valuable products from biotechnology of microalgae. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 65, 635–648
- Scott S.A. et al., 2010. Biodiesel from algae: challenges and prospects. *Curr. Opin. Biotechnol.* 21, 277–286
- Sirkin T., ten Houten M., 1994. The Cascade Chain - A Theory and Tool for Achieving Resource Sustainability with Applications for Product Design. *Resources, Conservation and Recycling*, 10, 213-277.
- Specht E., Miyake-Stoner S., Mayfield S., 2010. Micro-algae come of age as a platform for recombinant protein production. *Biotechnol. Lett.* 32, 1373–1383

Vis M., Mantau U., Allen B. (Eds.), 2016. Study on the optimised cascading use of wood. No. 394/PP/ENT/RCH/14/7689. Final report. Brussels, 2016. 337 pages

Radakovits R., Jinkerson R.E., Darzins A., Posewitz M.C., 2010. Genetic engineering of algae for enhanced biofuel production. *Eukaryot. Cell* 9, 486–501

Zils M., 2014. Moving toward a circular economy. Narrated slideshow, Février 2014, McKinsey&Company.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL ou son DOI)