

Communication pour le VIII^e forum de l'innovation
Congrès Réseau de Recherche sur l'Innovation
Session : Les nouveaux défis du processus d'innovation environnementale

Auteurs : **Baptiste Privé***

*Doctorant en sciences économiques

Université de Reims, laboratoire REGARDS (EA 6292)

*baptisteprive@orange.fr

Contrat doctoral en co-tutelle avec l'Université de Liège, sous la codirection d'Aurore Richel (Gembloux Agro-Bio Tech) et de Martino Nieddu (URCA, EA 6292)

Travail réalisé dans le cadre de BIOCA PSDR 4, soutenu par FEDER, la région Grand-Est et l'INRA

Titre : Les enjeux d'une variété technologique dans une bioéconomie durable

Mots-clefs : bioéconomie, bioraffinerie, transition, innovation environnementale et technologique.

Résumé :

Notre système économique fondé sur l'utilisation des ressources fossiles doit faire face à la nécessité d'une transition écologique annoncée depuis les années 1970. Cette problématique de grande transition vient interroger ce que l'on appelle bioéconomie. Nous expliquerons les différentes formes que cette dernière peut prendre et pourquoi elle prêche à désaccord entre ses différents acteurs. Ces différentes tensions nous amènent à tester les conditions d'émergence d'une autre variété technologique que le modèle utilisé actuellement, à savoir la bioraffinerie. Nous fondons notre réflexion autour de l'articulation entre l'agroécologie et l'industrialisation d'un territoire en traitant les principales questions économiques qui se posent : les rendements et les coûts. Nous proposerons les premiers résultats d'une enquête menée auprès de collègues chimistes ainsi que de différentes collaborations. Nous proposerons ainsi une stabilisation de l'état des savoirs autour des possibilités technologiques qui s'ouvrent pour une bioéconomie durable.

Abstract :

Our economic system founded on fossil energy sources must deal with the necessity of an ecological transition announced since 1970s. This problematic of a big transition highlights what we call bioeconomy. We will explain the different forms taken by the bioeconomy. The different tensions lead us to test if there is another technology diversity instead of the dominant model of the biorefinery. We found our thoughts around the articulation between agroecology and industrialisation of a territory, and the principal economic questions: productivity and costs. We will propose the first results of a survey with chemists. We will establish a picture of the knowledges around the technological possibilities for a sustainable bioeconomy.

1. Introduction

Les préoccupations environnementales sont désormais entrées dans le débat public depuis la deuxième moitié du XX^{ème} siècle. Le fameux « *Silent Spring* » de Rachel Carson (1962), le rapport du club de Rome (1972) et celui de Gro Harlem Brundland (1987) jusqu'à la récente COP 21 de Paris (2015) ont amené à la tentative d'une mobilisation en faveur d'un développement soutenable. Mais si la nécessité du changement semblait s'être imposée, la situation n'évolue pas significativement, comme vient le rappeler l'appel des 15 000 scientifiques (Ripple et al., 2017) ou encore le titre du Monde daté du 18 avril : « *La demande mondiale de pétrole va continuer à augmenter [d'ici à 2040]* » (Wakim, 2018).

C'est dans ce cadre d'une « transition écologique et énergétique » jugée nécessaire que nous viendrons interroger ce que l'on appelle aujourd'hui « bioéconomie ». Cette dernière est définie au sens large en tant que « *production durable de la biomasse et la transformation durable de celle-ci en une gamme de produits destinés à l'alimentation humaine et animale, mais aussi à la chimie, les matériaux et la production d'énergie finale* » (Colonna et al., 2015, p.280). Elle est donc vue comme l'ensemble des activités économiques en lien avec l'innovation, la production et l'industrialisation de procédés biologiques issus de ressources renouvelables (OCDE, 2009, p.14).

L'intérêt autour de la bioéconomie est justifié d'un point de vue institutionnel par le document « horizon 2020¹ » de la Commission Européenne (rédigé en 2012), sensé définir une stratégie européenne de l'utilisation durable des ressources renouvelables. Au-delà de son aspect d'outil d'aide à la transition énergétique et écologique, la bioéconomie est également l'une des clefs de perspective à long terme de croissance économique (Colonna et al., 2015).


En tant que stratégie écologique et économique, la bioéconomie n'est pas une notion stabilisée faisant l'objet d'un consensus quant à son utilisation. Elle amène les différents acteurs (politiques, chercheurs, économistes, chimistes) à se poser plusieurs questions et à la positionner plutôt en tant qu'idée « en transition ».

Et comme chaque idée présentée comme « la » solution écologique dans le contexte d'une sacrosainte croissance économique sans cesse recherchée, des tensions apparaissent et différentes visions se forment. Notre première partie s'attardera donc sur la caractérisation des différentes formes de la bioéconomie.

2. Quelle(s) bioéconomie(s) et quelles controverses ?

La bioéconomie prête en effet à controverse dans le sens où elle peut prendre plusieurs formes en fonction des définitions qui lui sont prêtées et des usages qui en sont faits. C'est pourquoi, certains auteurs caractérisent trois formes de bioéconomie en tant que régime de production de connaissances et d'activités économiques différentes (Vivien, Debref, Nieddu et Befort, 2017).

¹ http://europa.eu/rapid/press-release_IP-12-124_fr.htm

Type de bioéconomie	Activités économiques 	Construction de connaissances
Régime 1	Equilibres entre contraintes écologiques et activités humaines.	Raisonnement en économie circulaire.
Régime 2	Des biotechnologies fondées sur l'industrialisation de la biologie.	Connaissances en génie génétique et autour d'une économie des promesses.
Régime 3	La variété du vivant réduite à une biomasse pour l'énergie et la chimie.	Toutes les connaissances sur la transformation de la biomasse autour (i) de la thermochimie, (ii) des voies de biotechnologies traditionnelles et (iii) des biotechnologies issues du génie génétique.

La reconnaissance de ces trois formes nous permet de dire que la bioéconomie n'est pas une construction sociale simple dans une tentative de transition écologique mais que c'est elle-même un monde en tension. Les discussions et débats émanent de l'intégration, autour de la bioéconomie, de nombreuses technologies et d'un capital de connaissances scientifiques important. Ainsi la vision basée sur les connaissances des biotechnologies (qui doivent agir en tant qu'éléments de rupture technologique et permettre la transition vers une économie fondée sur les matières premières biologiques) s'oppose à une vision davantage « économique » (appelée « *BioEconomy* » par Colonna et al., 2015) où l'on espère une croissance durable à travers des progrès dans les biosciences (biologisation des procédés et produits industriels, réduction des déchets).

Ces différentes visions posent la question de savoir si le passage d'une économie dépendante des ressources fossiles à une économie basée sur la biomasse va continuer le trend industriel d'intensification d'usage des ressources, ou bien s'il y aura une rupture avec une « *tendance historique issue des révolutions scientifiques et industrielles du XIXème et XXème siècle* » (Nieddu et Vivien, 2015, p.8). Suivra-t-on un scénario de « transition écologique » (à travers une biologisation de notre économie) ou bien un scénario de « d'intensification » (à travers l'industrialisation de la biologie) ?

Au milieu de ces interrogations se trouve la bioraffinerie, qui apparaît comme l'un des principaux outils transitionnels vers la bioéconomie, mais qui doit faire face à une large remise en question.

3. La bioraffinerie en tant que continuité des raffineries pétrolières ?

Derrière ce titre provocateur se cache en réalité les nombreuses interrogations autour du modèle de la bioraffinerie. L'abandon progressif de notre modèle économique et énergétique basé sur les énergies fossiles n'est pas « automatique et naturel ». C'est pourquoi certaines visions dominantes de la bioéconomie ont concentré certaines solutions techniques et scientifiques spécifiques (Calvert et al., 2017), au point de ne pas faire apparaître la bioraffinerie comme un nouveau paradigme mais de la maintenir dans les « traditions de recherches particulières de la chimie » (Nieddu et al., 2014b).

En effet, la bioraffinerie est définie comme la succession d'opérations physiques, chimiques et/ou biotechnologiques, des procédés de fonctionnement de la chimie moderne (à savoir le fractionnement de la plante, la purification et la recombinaison/fonctionnalisation) pour produire des produits commerciaux finis ou intermédiaires avec certaines propriétés d'usage ou de réactivité (ce que l'on appelle des « molécules plateformes »). Elle est donc en réalité une technologie ancienne (Colonna et al., 2015) mais apparaît comme le modèle dominant pour répondre à la problématique de la transition vers l'usage des ressources renouvelables (Nieddu et al., 2014b).

Certes, l'usage de la biomasse pour remplacer les énergies fossiles n'est pas nouveau en soi (Henry Ford voyait déjà en 1925 du « carburant présent en chaque plante » ; voir Sillanpää et Ncibi, 2017, p.235, pour d'autres exemples similaires). Et en ce sens, la bioraffinerie ne semble pas être la meilleure voie à suivre, elle n'est pas la solution unique et doit davantage être assimilée à un objet « *intermédiaire et transitionnel* » (Nieddu et Vivien, 2015). D'autant plus qu'elle nécessite l'utilisation d'une grande quantité de biomasse (problème de renouvellement des ressources), de gros investissements financiers, qu'elle apparaît comme « sale » à cause des coûts énergétiques et des problèmes de propreté importants à cause des impuretés, des coproduits, de la variabilité de la matière première (par exemple les « biocarburants » peuvent être plus polluants que les carburants « classiques » ; voir Giampietro et Mayumi, 2009).

Le verrou principal dans l'usage de la biomasse est la déconstruction de la matière végétale puisqu'aucun végétal ne donne de biomasse brute utilisable directement en chimie ou en fermentation sans un traitement préalable. C'est d'ailleurs l'objet d'un dilemme permanent chez les chimistes dans l'usage de la biomasse. Dès lors, deux philosophies de la chimie sont en concurrence (c'est-à-dire deux « façons de faire » de la chimie, de traiter la biomasse) :

- (i) La première philosophie/stratégie vient briser les liaisons moléculaires et se fonde sur le grand principe de fractionnement/purification/recombinaison. Ce principe du *cracking* (propre à l'industrie pétrochimique) consiste à se focaliser sur une « cible d'utilisation retenue », c'est-à-dire les composés actifs présentant un intérêt particulier. On réduit la variabilité et la complexité de la plante à des intermédiaires de base simples. Les procédés technologiques mobilisés ici consistent à exploser (« cracking ») la biomasse, à la déconstruire pour en extraire les seules composantes jugées intéressantes. Le reste n'est généralement pas valorisé et devient donc des déchets ou coproduits qu'il faut éliminer.
- (ii) La deuxième philosophie/stratégie vient repérer les structures complexes du vivant pour préserver un principe actif et limiter les transformations de la matière première. On cherche à conserver des grands composants des plantes pour les fonctionnaliser. L'objectif est de « tirer parti de la nature » plutôt que de la briser par un craquage

coûteux énergétiquement, on veut prendre en compte les « *connaissances fondamentales sur les structures de la matière* » (Nieddu et al., 2014b).

Nous cherchons à discuter d'un point de vue « économie écologique » des différentes innovations en train de se faire, des manières à repenser les technologies acceptables pour articuler agroécologie² et procédés de transformation de la biomasse, afin de donner un produit avec une valeur économique et environnementale (et donc de nous situer dans la deuxième philosophie). Il est donc nécessaire d'identifier la variété technologique existante et les procédés industriels propres pouvant être une alternative au modèle de la bioraffinerie et de ses problèmes chimiques et de propreté.

4. Innovations, nouveaux procédés et processus, nouvelle approche : quelles difficultés ?

Les enjeux de la transition énergétique et écologique posent la question de l'émergence d'une ou de plusieurs innovation(s) environnementale(s)³, notamment face aux différentes critiques environnementales et fonctionnelles, techniques, qui sont faites face à la trajectoire suivie actuellement (celle de la bioraffinerie). Reste donc à savoir quel type de trajectoire il est possible de suivre. Dans leur article de 2015, Colonna et ses collègues, identifient trois approches complémentaires en ce qui concerne les énergies biosourcées, les molécules biosourcées (comme les molécules plateformes, les lubrifiants tensio-actifs, les solvants), les matériaux biosourcés (polymères) :

- (i) La première approche est « structurale », avec la reproduction des molécules d'origine pétro-sourcée. Il s'agit d'identifier les biomolécules qui ressemblent à celles utilisées dans la chimie du carbone fossile, puis d'adopter le procédé pour effectuer la substitution.
- (ii) La deuxième approche est fonctionnelle, avec la production de molécules biosourcées originales, ayant des fonctionnalités (c'est-à-dire des usages) similaires à celles des molécules d'origine pétrochimique. Les procédés utilisés ici seront assimilables à des innovations de substitution (on entend par « innovation de substitution » une innovation qui cherche à substituer terme à terme certaines parties du produit de manière à maintenir la forme et les performances du produit -Béfort, 2016-). Cette approche est davantage en lien avec la « chimie verte » (on explore les molécules existantes pour voir celles qui se rapprochent de ce que l'on connaît). On cherche des « équivalences fonctionnelles », avec des procédés de transformation permettant une plus grande diversité en termes de solutions végétales (et donc de substitution aux énergies fossiles).

² « *Mode de production agricole prenant en compte la protection de l'environnement et le respect des ressources naturelles* » (Larousse)

³ Définie au sens large comme « *un procédé, équipement, produit, technique, nouveau ou amélioré qui évite ou réduit les impacts sur l'environnement et les risques écologiques* » (Debref, 2014).

- (iii) La dernière approche se classe en tant qu'innovation de rupture (on cherche à s'éloigner le plus possible de la pétrochimie). L'objectif est l'élaboration de molécules dotées de nouvelles fonctionnalités et qui permettent de valoriser les caractéristiques propres des matières premières végétales.

Au-delà d'une classification « basique » en ce qui concerne les différentes catégories d'innovation, l'enjeu principal réside dans la trajectoire à suivre. Nos deux philosophies de la chimie permettent de mettre en avant le besoin de changement et l'amorce de la transition, y compris dans le monde de la chimie.

Il faut désormais considérer la dimension environnementale comme une nouvelle variable indispensable qui doit tendre à faire évoluer le champ de « la science et du laboratoire » (c'est-à-dire de nouvelles stratégies de conception des réactions chimiques, une nouvelle façon d'obtenir les mêmes résultats) et le champ « technico-économique » (où l'on vise un changement dans les modes de production pour atteindre des objectifs de soutenabilité économique et environnementale).

Or s'il faut un changement dans les façons de faire, cela implique un changement dans la façon de penser. Car si des alternatives existent, cela ne signifie pas que le changement est automatique et que les autres vont suivre (quelle est la viabilité économique de ces nouveaux procédés ?). De la même manière qu'une innovation ne pourra pas résoudre tous les problèmes, une seule « technique » (c'est-à-dire une seule façon de faire de la chimie, aussi verte soit-elle) ne suffit pas à expliquer la volonté de changement : il faut prendre en compte les dimensions scientifique, économique, politique et sociale (Maxim, 2011).

La difficulté de changement de philosophie vient également du fait que l'innovation s'inscrit dans un nouveau type de chimie (verte), pour laquelle il n'existe pas de définition consensuelle, d'autant plus qu'elle vient bouleverser un domaine bien installé, qui a ses habitudes. Jean Pierre Noel Llored (*deuxième partie, chapitre 4* dans Maxim, 2011) précise d'ailleurs que la chimie verte n'est pas une mutation de la chimie, mais un renouvellement des pratiques. Ici seuls les 12 principes énoncés en 1998 (voir Anastas et Warner, 2000) font office de référence chez les chercheurs et doivent permettre la réduction de la consommation énergétique, des ressources renouvelables, des substances et déchets toxiques.

D'un point de vue davantage matériel et économique, on peut avancer que modifier les procédés et processus de production un secteur industriel qui se classe comme le troisième en France (derrière l'automobile et la métallurgie) et qui pesait en 2015 près de 75 milliards d'euros⁴ s'annonce compliqué.

C'est pourquoi certains auteurs estiment que le changement de paradigme et le changement de trajectoires/voies technologiques ont pour point de départ les « héritages productifs et les connaissances » des acteurs (Nieddu et al., 2014a et 2014b). Dans les communautés scientifiques et chimiques, la séquence basique issue de l'industrie pétrochimique, repose sur « fractionnement/purification/recombinaison » du végétal. Cette séquence apparaît dans le modèle de la bioraffinerie, pourtant identifié comme étant le principal outil dans la transition écologique et énergétique. Ceci illustre que les communautés scientifiques se reposent avant

⁴ <https://www.entreprises.gouv.fr/secteurs-professionnels/chimie/industrie-la-chimie>

tout sur des apprentissages, des savoirs faire, des connaissances, des matériels, des compétences⁵ pour choisir les voies technologiques.

A cette notion « d'héritages productifs et de connaissances », Kirby Calvert (Calvert et al., 2017) y ajoute l'importance des représentations du futur⁶ par les acteurs. L'émergence d'un nouveau monde énergétique se formerait à partir de la création de visions du futur pour que de nouvelles institutions reconfigurent les différentes attentes socio-politiques. On définit ce qui peut être fait dans le futur afin de donner les priorités politiques et les trajectoires technologiques à suivre. C'est à travers ces concepts que la bioraffinerie s'est imposée en tant que vision dominante de la bioéconomie : les héritages productifs et les connaissances en pétrochimie ont permis de suivre une voie technologique et technique particulière déjà connue et maîtrisée (celle du *cracking*), et les visions de l'or noir un jour substitué par l'or vert ont justifié ce modèle.

Ces héritages et ces connaissances ont tracé une voie technologique basée sur ce que les entreprises ont appris en termes de recherche technologique et de choix techniques. Pour en sortir, les différents acteurs s'appuient sur des visions communes du futur, sensées dessiner de nouveaux « paradigmes et trajectoires technologiques » (Gaffard, 1990, p.237) autour de « promesses technico-économiques » (Joly, 2010) permettant des espérances technologiques.

En effet, les différents enjeux (scientifiques, technologiques, industriels) convergent vers l'objectif de biosourcer l'existant (à savoir ce qui est actuellement à base d'énergies fossiles). Pour cela, il faut développer de nouvelles molécules innovantes, qui soient à des coûts acceptables et obtenues par des procédés qui ne s'inspirent pas de ceux utilisés par la pétrochimie (Ricco-Lattes et Bastien-Ventura, *première partie, chapitre 2* dans Maxim, 2011).

5. Vers de nouvelles trajectoires technologiques : contexte de recherche

L'objet de notre thèse est de sortir du schéma d'une seule voie technologique dominante à laquelle les différents acteurs se rattachent. Nous pensons qu'il est préférable de proposer un « mix technologique » aux acteurs de la chimie et aux industriels. Par « mix technologique », nous entendons une diversité de procédés et de processus pour la transformation de la biomasse, en sortant du *dominant design* du *cracking* (Nieddu et al., 2014a).

a. Prendre en compte la variété de la biomasse

Nous justifions tout d'abord nos recherches autour de ce mix avec la richesse de la biomasse disponible et qui est sensée devenir la source d'approvisionnement numéro un dans la transition écologique et énergétique. Définie largement comme l'ensemble de la masse vivante et plus précisément comme la « matière organique carbonée produite par des organismes vivants et ses dérivés, formée principalement de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote » (Colonna et al., 2015, p.284), la biomasse prend plusieurs formes⁷ et peut provenir à la fois de :

⁵ C'est ce que Vivien, Barthélémy, Barrère et Nieddu (2005) appellent les « *patrimoines productifs collectifs* », voir également « *Economie Appliquée* » (2007, volume 60, numéro 3).

⁶ Notion à laquelle fait également référence Nieddu (voir 2014a et 2014b)

⁷ Liste issue de l'article de Colonna et al., 2015.

- Produits d'origine agricole, issus des cultures traditionnelles (céréales, oléagineux), des cultures dédiées à la bioraffinerie (miscanthus, panic érigée) et des résidus de culture et d'élevage (pailles, tiges, feuilles).
- Produits d'origine forestière,
- Produits d'origine aquatique (algues par exemple),
- Co-produits et effluents des industries de transformation des matières biologiques (scieries, papeteries, industries agro-alimentaires, élevages industriels),
- Autres déchets organiques (déchets et ordures).

Au-delà de la variété présentée, et donc des différentes méthodes de traitement de ces biomasses, elles ne présentent pas toutes les mêmes avantages techniques et économiques (voir Himmel et al., 2007 ; Sillanpää et Ncibi, 2017). Chaque type de biomasse a des niveaux d'organisation différents, des structures et propriétés particulières. A travers cette « hétérogénéité compositionnelle », il est possible de donner des produits à fortes valeurs ajoutée sur des segments à faible volume (chimie fine), des produits de masse à faible valeurs ajoutée (carburants), des produits intermédiaires en termes de volumes et de prix (polymères, tensioactifs) et des résidus pour les besoins énergétiques des bioraffineries (Colonna et al., 2015).

D'autant plus qu'actuellement, les connaissances sont limitées dans la capacité d'extraction de la matière végétale produite sur un sol donné sans dégrader la fertilité de ce dernier. Ce qui est d'autant plus problématique si l'on cherche à articuler agroécologie et intensification de l'usage des ressources.

b. Le scénario de l'intensification de l'utilisation des ressources

L'intensification des procédés doit permettre à la chimie de réduire les impacts environnementaux et énergétiques mais sans dégrader la qualité d'usage des produits et en apportant un avantage compétitif (que l'innovation technologique peut amener). Le principe de départ est un usage optimisé et raisonné des ressources naturelles. L'idée poursuivie est de rompre avec le dogme des « besoins qui augmentent toujours, donc il faut augmenter la production ». On doit sortir des modèles nécessitant de trop grosses quantités pour permettre une meilleure utilisation de la matière première et donc son intensification. Dans les représentations qu'ont les acteurs de la chimie verte, l'objectif de réduction des matériaux utilisés (donc des matières premières) peut trouver sa solution dans l'intensification des process de transformation (Garnier, 2012, p.132).

L'intensification d'un procédé consiste à développer des techniques et appareils permettant de réduire la taille des unités par rapport à leurs volumes de production et de consommation d'énergie (ce que semble incapables de faire les bioraffineries portuaires ou territoriales qui représentent des monstres industriels gros consommateurs d'énergie et disposant d'une implantation sur plusieurs hectares). Il s'agit de manière simple de diminuer le rapport taille/capacité des équipements chimiques, leur consommation d'énergie et d'eau, leurs déchets. L'intensification peut concerner l'ensemble de la chaîne de production (culture, transports, stockage, réaction, séparation, isolement etc.) et les technologies mobilisables doivent être moins chères et plus « durables » (c'est-à-dire efficaces d'un point de vue énergétique et

économique) que celles utilisées actuellement (Ricco-Lattes et Bastien-Ventura, *première partie, chapitre 2* dans Maxim, 2011).

Cette trajectoire recherchée de l'intensification n'est cependant pas aussi facilement accessible. La raison principale est qu'il faut plusieurs changements techniques et technologiques sur les procédés et machines actuellement utilisés : il faut chercher à faire plus petit et plus efficace tout en étant moins coûteux, le tout non plus sur un seul procédé, mais sur de multiples combinaisons d'opérations différentes (Charpentier, 2005). L'intensification offre plusieurs options, ce qui nécessite l'identification des structures (c'est-à-dire des machines, des procédés) à mobiliser et les étapes chimiques et techniques limitantes au sein de ces structures (transformation, transfert) puisque l'on sort des techniques maîtrisées. Le passage d'une chimie en batch à une chimie en continu pose donc des problèmes techniques (quels sont les facteurs limitants), culturels (on fait un pari sur une innovation/un procédé différent) et économiques (quels sont les coûts des investissements), comme le souligne Gourdon (2016).

On suppose que l'intensification s'inscrit dans la logique d'une innovation de rupture⁸ plutôt que dans celle d'une innovation incrémentale⁹, dans le sens où l'on va chercher à faire de la chimie autrement, c'est-à-dire avec des « *technologies de substitution des produits fossiles par des matières premières renouvelables* » et ce jusque dans les étapes de transformation et de fonctionnalisation de ces matières (Nieddu et al., 2010).

c. Identification de nouveaux procédés d'intensification

Afin d'identifier ces nouveaux procédés durables, nous menons des entretiens auprès de chercheurs ayant participé à diverses écoles thématiques, dont nous avons récupéré les différentes présentations¹⁰. A travers le dépouillement des travaux, on cherche à identifier d'autres technologies que le cracking de la bioraffinerie et qui permettent une utilisation optimisée et raisonnée de la biomasse, dans une logique d'intensification.

Il ressort (y compris à travers les écrits de Gourdon, 2016, et Poux et al., 2010) que l'intensification des procédés peut être obtenue par de nouvelles méthodes de production (que nous cherchons donc à identifier) qui concernent :

- Le fonctionnement en régime transitoire, cyclique, pulsé pour augmenter les contacts entre phases,
- Le fonctionnement dans des conditions extrêmes de température et de pression ; inversion des sens d'écoulements des fluides pour réaction-génération dans le même équipement,
- Le fonctionnement avec des technologies ultrasons, microondes, rayonnements lumineux ou sous champ magnétique pour augmenter la productivité des procédés et la sélectivité de réactions catalytiques,

⁸ Définie par Debref (2016) comme une solution *ex-ante* qui « révisé l'ensemble du processus de production » et notamment les procédés de production (comme dans notre cas).

⁹ Définie par Debref (2016) comme une solution *ex-post*, « en bout de chaîne » et qui consiste en une « *additivité technologique* » comme première réponse aux problèmes environnementaux. On ne change (presque) rien au procédé actuel, on ajoute simplement de quoi proposer un début de solution.

¹⁰ « Les outils du génie chimique pour la conception de procédés durables » (Grasse 2017), « Journée thématique extraction du SFR Condorcet » (Amiens et Reims 2018)

- L'injections étagées d'un réactif tout au long d'un réacteur pour augmenter la sélectivité dans le cas de réactions parallèles en série ;
- Le fonctionnement avec de nouveaux milieux et environnements réactionnels relevant des pratiques de la chimie verte (utilisation de solvants néotériques, fluides supercritiques, liquides dilatables contenant des gaz comprimés, liquides ioniques, liquides fluorés...).

Nos entretiens étaient donc organisés globalement en trois parties :

- (i) Présentation du procédé, de la technologie en question, ses apports dans une logique de chimie verte ou durable et quelle déconstruction de la molécule était pratiquée (afin de savoir si l'on sortait du dominant design du cracking observé et utilisé jusqu'ici),
- (ii) Quelles sont les ressources (non) mobilisables avec ce procédé, cette technologie ? L'intensification, à travers de petites unités de production, est-elle envisageable ? Une taille industrielle (où la production se compte en tonnage) est-elle possible ? Comment voyez-vous le développement économique de votre procédé/technologie ? (les freins à une utilisation industrielle, la maturité technologique par exemple),
- (iii) Comment pourrait-on situer ce procédé/cette technologie dans une ligne de production type bioraffinerie (à quel moment pourrait-il intervenir ?) ? Comme voyez-vous cette ligne de production ? Quel(le)s autres procédés/technologies peut-on y associer ?

Des questions plus précises en fonction des présentations ont pu être posées, et des recoups d'interviews et de questions ont été faites.

L'enjeu de cette communication est donc de proposer les premiers résultats de notre enquête dans le but de démontrer que d'autres possibilités technologiques existent avec autour d'elles une certaine stabilisation de l'état des savoirs, dans l'optique d'une bioéconomie durable.

d. Présentation synthétique des alternatives étudiées

Procédé/Technologie	Présentation	Avantages et inconvénients	Positionnement par rapport aux questions	Points d'intérêts
<p>Sonochimie et ultrasons</p> <p>(Micheline Draye*, Université Savoie Mont-Blanc)</p>	<p>Permet l'accélération des réactions chimiques, ainsi que leurs rendements, grâce à la sélectivité des actions.</p> <p>Permet l'évaluation des propriétés physico-chimiques sans destruction de la matière.</p>	<p>Moins de solvant, Minimise les quantités de déchets, Toutes biomasses mobilisables (en dehors de ce qui est « visqueux »), Forte consommatrice d'énergie (cas par cas nécessaire).</p>	<p>« <i>Chemin de synthèse non usuel</i> », Installation en flux continu possible, Intérêt démontré pour un passage à une échelle industrielle en chimie, « <i>Source d'énergie alternative</i> ».</p>	<p>Application des ultrasons en procédés chimiques à partir de 1927¹¹.</p> <p>Applications nombreuses dans le domaine médical (l'échelle industrielle est donc connue).</p>
<p>Electrotechnologies « Champs Electriques Pulsés » et « Décharges électriques »</p> <p>(Nabil Grimi**, Université Technologique de Compiègne)</p>	<p>Opération de pré-traitement pour faciliter la phase d'extraction.</p> <p>L'objectif est d'endommager les structures cellulaires avec des décharges électriques afin de faciliter l'extraction de ce qui nous intéresse à l'intérieur de la cellule (permet par exemple d'extraire le sucre de la betterave).</p>	<p>Permet une extraction plus rapide, avec la même efficacité, à une température moins élevée (donc moins d'énergie consommée et de destruction de la matière), avec beaucoup moins de solvants utilisés.</p> <p>Gains de temps, d'énergie et de qualité du produit.</p> <p>Technologies transposables à plusieurs matières premières.</p>	<p>Les échelles laboratoire, pilote et industrielle présentent les mêmes résultats en termes de rendements, d'efficacité et de gains d'énergie, Générateur électrique mobilisable en flux continu (ces opérations ont pu être introduites à l'intérieur d'une chaîne de production sans perturber le fonctionnement du site industriel)</p>	<p>Echelle industrielle maîtrisée, Permet de garder la structure du produit (pas de détérioration) et d'améliorer l'extraction.</p>

¹¹ RICHARDS, William T. et LOOMIS, Alfred L. The chemical effects of high frequency sound waves I. A preliminary survey. *Journal of the American Chemical Society*, 1927, vol. 49, no 12, p. 3086-3100.

		Attention aux déchets et aux co-produits, « <i>il faut savoir quoi en faire</i> ».		
Catalyse homogène et réacteurs catalytiques (<i>Carine Julcour* et Martine Urrutigoïty*, Université de Toulouse</i>)	Les catalyseurs permettent d'améliorer la sélectivité de la réaction chimique et de mieux la maîtrisée. On rend les atomes plus accessibles.	Températures moins élevées, Procédés maîtrisés et mobilisés à l'échelle industrielle, Mobilisation en flux continu, Process peu coûteux. En cas de catalyse hétérogène, le catalyseur peut être difficile à récupérer au sein de la réaction. On ne sait pas encore quelles peuvent être toutes les biomasses mobilisables. La partie purification reste problématique, on ne la maîtrise pas encore suffisamment.	On mobilise déjà une partie de ce procédé (notamment les réacteurs à lit fixe et à solide suspendu) à l'échelle industrielle et en pétrochimie. L'objectif est d'adapter le réacteur à la biomasse, et non l'inverse. On est dans le cas par cas, c'est-à-dire qu'une ligne de production modèle n'existe pas, on peut tout moduler. Permet de diminuer, miniaturiser la taille industrielle et de sortir di schéma avec « <i>les grandes colonnes</i> »	Plusieurs catalyses sont possibles (réacteur à lit fixe, réacteur mobile, réacteur à solide suspendu, etc.) en fonction de ce que l'on cherche, et ces catalyseurs peuvent être associés à d'autres technologies pour compléter l'opération. D'autres « déclinaisons » sont étudiées à l'heure actuelle, comme le réacteur échangeur monolyte polyphasique (uniquement à l'échelle laboratoire).
Photochimie préparative (<i>Karine Loubière*, Université de Toulouse</i>)	Procédé où la lumière joue le rôle principal dans la voie de synthèse et permet l'apparition de nouvelles molécules que l'on ne peut pas obtenir avec la thermochimie.	On peut atteindre un haut degré de complexité moléculaire en peu d'étapes (1 ou 2 étapes) en comparaison à la thermochimie (5 ou 6).	Forts verrous technologiques et scientifiques pour le développement de ce procédé. Mais on peut mobiliser d'autres technologies	On connaît énormément d'application de la photochimie (plus de 1000 cas recensés). La recherche scientifique et académique connaît un rebond sur ce procédé puisqu'il s'inscrit

	La molécule absorbe la lumière, « <i>s'excite</i> » et a un nouveau rôle à jouer avec des propriétés différentes.	Elle n'est plus réservée aux seules molécules à haute valeur ajoutée. Certaines voies de synthèse ne peuvent être faites qu'à travers la photochimie. Application industrielle très limitée car « <i>il faut amener la lumière à l'échelle industrielle</i> » et trouver une molécule « <i>qui vaille le coup d'être exploitée</i> ».	maitrisées autour de ce procédé (par exemple les LED). Procédé en continu plus efficace. On peut dessiner la photochimie par rapport aux performances recherchées.	totalemment dans un chemin de transition vers une « chimie verte ».
Chimie sans solvant et mécanochemie <i>(Frédéric Lamaty*, Université de Montpellier)</i>	Procédé qui consiste à l'utilisation de forces ou l'influence d'exercer des forces sur les molécules (comme pour les électrotechnologies vues plus haut).	Aucun solvant utilisé, Vitesse de réaction plus rapide, Obtention de composés uniques, Mobilisation de toutes les biomasses.	Procédé qui comporte plusieurs technologies (mortier, « ball-mill », etc.). Taille industrielle envisageable mais pas dans toutes les chimies (principalement en chimie inorganique) et il reste du travail de recherche à faire.	Aucun solvant utilisé, changement de paradigme total et intérêts pour la mobilisation de petites unités de production.
Liquides ioniques <i>(Eric Husson**, Université de Picardie)</i>	Prétraitement de la biomasse « <i>récalcitrante</i> » pour alimenter différentes voies de valorisation sans passer par le fractionnement.	Utilisables sur une des biomasses les plus « compliquées » : lignocellulosiques (résidus agricoles, forestiers), Minimisation du fractionnement, Préservation de la structure des biopolymères,	Ces solvants servent de prétraitement et peuvent donc être combinés avec beaucoup d'autres technologies et procédés dans la suite des opérations (extrusion réactive, broyeur à billes, etc.).	L'intérêt de ce procédé est qu'il s'agit d'un prétraitement efficace pour la biomasse dite récalcitrante qui peut ainsi être exploitée plus efficacement et presque entièrement.

		<p>Accès plus facile aux propriétés de la molécule, Recyclage des solvants ioniques après utilisation (jusqu'à 7 fois), Positionnement en flux continu.</p> <p>Solvants assez chers, Températures nécessaires assez élevées (jusqu'à 230/250°C).</p>		<p>Si l'on reste dans le dogme des solvants, les solvants ioniques peuvent se substituer aux solvants volatils et toxiques.</p>
<p>Chromatographie de Partage Centrifuge</p> <p><i>(Luc Marchal**, Université de Nantes, Mahmoud Hamzaoui** et Jean-Hugues Renault**, Université de Reims Champagne Ardenne)</i></p>	<p>Technique de séparation des molécules basée sur le partage entre deux phases liquides immiscibles, sans support solide.</p>	<p>Il ne reste rien dans la colonne étant donné que l'on travaille uniquement avec des phases liquides, Gains de productivité et de la pureté de la molécule avec le « scale-up »,</p> <p>« Arbitrage » à réaliser entre les gains de temps et de pureté de la molécule (exemple : durée du traitement de 1h = gains en pureté de la molécule de 13% // durée de traitement de 6min = gains de pureté de la molécule de 8%)</p>	<p>La CPC est une technologie parfaitement mobile, dont l'utilisation à l'échelle industrielle a été prouvée (jusqu'à 10L).</p>	<p>Il y a un réel gain de productivité ainsi qu'un gain de pureté de la molécule (on gaspille moins).</p> <p>Peut-on cependant se passer de la phase de fractionnement ?</p>
<p>Extrusion réactive</p>	<p>Procédé de transformation et d'extraction des</p>	<p>Alternative aux procédés en batch,</p>	<p>Les paramètres de la technologie peuvent être optimisés : profil de la vis,</p>	<p>Procédé en continu, Technologie additionnable,</p>

<p><i>(Christophe Bliard*, Université de Reims Champagne Ardenne)</i></p>	<p>polymères grâce à un système de vis modulables.</p>	<p>Pas de solvants et moins d'effluents, Contrôle paramètres et qualité produits grâce à une meilleure sélectivité, Réactions plus propres et plus rapides, Procédé en continu, Changement de paradigme nécessaire, Coûts d'investissement élevés, Axé principalement sur le non alimentaire.</p>	<p>températures, vitesse de rotation, débit. Le « scale-up » ne pose aucun problème car la technologie est déjà mobilisée à l'échelle industrielle.</p>	<p>Intensification des réactions, Technologie adaptable aux réactions et permet de nouvelles réactions.</p>
---	--	--	---	---

* : chercheurs ayant présenté à l'école thématique « Procédés Durables » (Grasse, septembre 2017).

** : chercheurs ayant présenté aux journées thématiques « Extraction » SFR Condorcet (Amiens et Reims, mars et avril 2018).

6. Conclusions

L'objectif principal de cette communication est de démontrer qu'il est extrêmement compliqué de sortir du schéma de la chimie basique, à savoir une pratique à travers les étapes de fractionnement puis de purification de la molécule. L'enjeu est de pouvoir aller vers une chimie orientée vers une organisation « extraction/analyse/classification » des molécules. Cette voie permet d'avoir une vision globale de la composition d'un extrait naturel (ainsi on peut envisager de tout utiliser plutôt que de se concentrer sur l'unique composant intéressant) ainsi que de découvrir des structures moléculaires originales et nouvelles. Mais les coûts de production autour de ces nouveaux procédés et nouvelles technologies demeurent élevés et ne permettent pas de s'inscrire dans une extraction dite continue, permettant ainsi la valorisation de la biomasse dans son intégralité.

Cependant si la stabilisation scientifique reste à faire quant à cette nouvelle voie, les principales questions et représentations communes sont d'ores et déjà posées. Tout d'abord en matière de technologie, un grand nombre d'entre elles fonctionne de manière unitaire, il faut donc chercher à savoir comment agencer toutes ces briques ensemble. Cela dépendra du produit final recherché et de la question à laquelle on veut répondre (et donc de la molécule sur laquelle il faudra travailler). Ce qui laisse à supposer que l'organisation d'une ligne de production en continu devra être du cas par cas et qu'il ne peut y avoir un nouveau *dominant design*, un nouveau schéma qui écrase les autres et ne laisse pas d'alternatives. Il ressort clairement dans les entretiens menés et dans les différentes présentations épluchées que c'est désormais aux technologies de s'adapter aux biomasses, et non l'inverse.

Dès lors, une ligne de production doit-elle nécessairement faire appel à des procédés de prétraitement de la biomasse ? Comment valoriser les résidus et les co-produits ? En dépit des premières réponses technologiques présentées ci-dessus, des réflexions plus générales semblent faire consensus :

- La méthodologie de l'analyse du cycle de vie des différentes conditions opératoires d'extraction peut être une solution pour illustrer les impacts environnementaux d'un procédé et/ou d'une technologie, d'une ligne de production,
- Une réglementation verte est réclamée par les acteurs de la chimie verte de manière à sortir des « cultures de société » propres à chaque domaine scientifique et ainsi offrir une vision plus globale,
- Le « *numbering up* » (c'est-à-dire développer plusieurs unités de production de petites ou moyennes tailles de manière à toujours traiter la même quantité de biomasse qu'avant) semble être une alternative plausible face au souci du passage à l'échelle industrielle et à la problématique d'intensification d'usage des ressources,
- Pour qu'une technologie ou un procédé soit développé et au cœur des attentions, il faut un intérêt industriel autour d'une molécule particulière ou d'une technologie, un procédé en particulier. Si les principaux leaders dans les différents domaines (par exemple pharmaceutique) ne trouvent pas d'intérêt à exploiter cette technologie ou cette molécule, alors son développement sera nettement plus compliqué.

Nous avons donc cherché à mettre en avant les solutions possibles dans l'optique d'un changement de régime/paradigme. L'idée principale reste la volonté de rompre avec le dogme « les besoins augmentent toujours donc il faut augmenter la production ».

Références :

- ANASTAS, Paul T. et WARNER, John C. *Green chemistry: theory and practice*. Oxford university press, 2000.
- AUZANNEAU, Matthieu. *Or noir : la grande histoire du pétrole*. La Découverte, 2015.
- BÉFORT, Nicolas. *Pour une mésoéconomie de la bioéconomie : représentations, patrimoines productifs collectifs et stratégies d'acteurs dans la régulation d'une chimie doublement verte*. Thèse de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, soutenue le 25 novembre 2016.
- CALVERT, Kirby, BIRCH, Kean, et MABEE, Warren. New perspectives on an ancient energy resource. *The Routledge Research Companion to Energy Geographies*, Routledge Abingdon, Oxon, New York, NY, 2017, p. 47-60.
- CARSON, Rachel. *Silent spring*. Houghton Mifflin Harcourt, 2002.
- CHARPENTIER, Jean-Claude. Process intensification by miniaturization. *Chemical Engineering & Technology*, 2005, vol. 28, no 3, p. 255-258.
- COLONNA, P., TAYEB, J., et VALCESCHINI, E. Nouveaux usages de la biomasse, dossier Agriculture et Bioressources. *DEMETER*, 2015.
- DE ROME, Club. Halte à la croissance. *Rapports sur les limites de la croissance*, 1972.
- DEBREF, Romain. *Le processus d'innovation environnementale face à ses contradictions : le cas du secteur des revêtements de sol résilients*. Thèse de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, soutenue le 13 octobre 2014.
- DEBREF, Romain. Pour une approche systémique de l'innovation « environnementale ». *Revue d'économie industrielle*, 2016, no 3, p. 71-98.
- GAFFARD, Jean-Luc. *Economie industrielle et de l'innovation*. Dalloz, 1990.
- GARNIER, Estelle. *Une approche socio-économique de l'orientation des projets de recherche en chimie doublement verte*. 2012. Thèse de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, soutenue le 30 mai 2012.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. Energy and economic myths. *Southern Economic Journal*, 1975, p. 347-381.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. *La décroissance. Entropie-Écologie-Économie*. Ellébore – Sang de la Terre. 1979.
- GIAMPIETRO, Mario et MAYUMI, Kozo. *The biofuel delusion: The fallacy of large scale agro-biofuels production*. Routledge, 2009.
- GOURDON, Christophe. Intensification des procédés – Fondamentaux et exemples d'industrialisation. *Techniques de l'ingénieur*, 2016.
- HIMMEL, Michael E., DING, Shi-You, JOHNSON, David K., et al. Biomass recalcitrance: engineering plants and enzymes for biofuels production. *science*, 2007, vol. 315, no 5813, p. 804-807.
- JOLY, Pierre-Benoît. On the economics of techno-scientific promises. *Débordements. Mélanges offerts à Michel Callon, Paris, Presses des Mines*, 2010, p. 203-222.
- MAXIM, Laura. *Chimie durable. Au-delà des promesses...(La)*. CNRS, 2011.

NIEDDU, Martino, GARNIER, Estelle, et BLIARD, Christophe. L'émergence d'une chimie doublement verte. *Revue d'économie industrielle*, 2010, no 132, p. 53-84.

NIEDDU, Martino, GARNIER, Estelle et BLIARD Christophe. « Patrimoines productifs collectifs *versus* exploration/exploitation. Le cas de la bioraffinerie », *Revue économique*, vol. vol. 65, no. 6, 2014 (a), pp. 957-987.

NIEDDU, Martino, VIVIEN, Franck-Dominique, GARNIER, Estelle, *et al.* Existe-t-il réellement un nouveau paradigme de la chimie verte?. *Natures Sciences Sociétés*, 2014 (b), vol. 22, no 2, p. 103-113.

NIEDDU, Martino et VIVIEN, Franck-Dominique. La bioraffinerie comme objet transitionnel de la bioéconomie. *Économie rurale*, 2015, no 5, p. 7-11.

Organisation for Economic Co-operation and Development & OECD International Futures Programme éd., 2009. *The bioeconomy to 2030: designing a policy agenda*, Paris: Organization for Economic Co-operation and Development.

POUX, Martine, COGNET, Patrick, et GOURDON, Christophe. *Génie des procédés durables: Du concept à la concrétisation industrielle*. Dunod, 2010.

RIPPLE, William J., WOLF, Christopher, NEWSOME, Thomas M., *et al.* World Scientists' Warning to Humanity: A Second Notice. *BioScience*, 2017, vol. 67, no 12, p. 1026-1028.

SILLANPÄÄ, Mika et NCIBI, Chaker. *A Sustainable Bioeconomy: The Green Industrial Revolution*. Springer, 2017.

VIVIEN, Franck-Dominique, NIEDDU, Martino, BARTHELEMY, Denis, *et al.* *Réinventer le patrimoine : de la culture à l'économie, une nouvelle pensée du patrimoine?*. Editions L'Harmattan, 2005.

VIVIEN F-D., DEBREF R., NIEDDU M. et BEFORT N. *Today's Bioeconomy : "The New Age Of Wood" Of Nicholas Georgescu-roegen ?* Présentation lors de la 12th International Conference of the European Society for Ecological Economics, Ecological Economics in Action: Building a Reflective and Inclusive Community. Budapest, 20-23 june 2017.

WAKIM, Nabil. La demande de pétrole va continuer à augmenter. In : *lemonde.fr* [en ligne]. 17/04/2018. Mis à jour le 18/04/2018. [Consulté le 19/04.2018]. Disponible à l'adresse suivante : http://abonnes.lemonde.fr/economie/article/2018/04/17/la-demande-de-petrole-va-continuer-a-augmenter_5286427_3234.html