

L'émergence d'une chimie doublement verte

Martino Nieddu, Estelle Garnier et Christophe Bliard



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/rei/4355>

DOI : 10.4000/rei.4355

ISSN : 1773-0198

Éditeur

De Boeck Supérieur

Édition imprimée

Date de publication : 15 décembre 2010

Pagination : 53-84

ISSN : 0154-3229

Référence électronique

Martino Nieddu, Estelle Garnier et Christophe Bliard, « L'émergence d'une chimie doublement verte », *Revue d'économie industrielle* [En ligne], 132 | 4e trimestre 2010, document 3, mis en ligne le 15 décembre 2012, consulté le 03 juin 2022. URL : <http://journals.openedition.org/rei/4355> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/rei.4355>

Martino NIEDDU (*)
Estelle GARNIER (**)
Christophe BLIARD (***)

L'ÉMERGENCE D'UNE CHIMIE DOUBLEMENT VERTE

Mots-clés : chimie verte, agro-industries, biopolymères, développement durable, bioraffinerie, mythe rationnel, espérances technologiques.

Key words : Green Chemistry, Green Economy, Biopolymers, Sustainable Development, Biorefinery, Rational Myth, Technological Expectations.

Ce que nous appelons *chimie doublement verte* (= C2V dans la suite du texte) est constitué de l'ensemble des dispositifs scientifiques ou socio-économiques dédiés à l'émergence de technologies de substitution des produits fossiles par des matières premières renouvelables, issues de l'agriculture et de la foresterie (Nieddu & Garnier 2008 ; Garnier, Kurek, Nieddu, 2008). Ces dispositifs dessinent la possibilité d'une recomposition sectorielle dont le pourtour n'est pas encore stabilisé mais qui comprendrait des cultures dédiées et une partie des secteurs de l'énergie, de la chimie et des industries alimentaires (additifs et alimentation animale). Le présent article est une étape dans un programme de travail qui vise à proposer une description ordonnée des efforts des acteurs pour organiser la formation de l'espace économique concer-

(*) Martino Nieddu est maître de conférences à l'université de Reims. Il est responsable du projet ANR « Une approche économique de l'intégration des dimensions socio-économiques et techniques dans les Programmes de recherche en chimie doublement verte », réf. ANR-09-CP2D-01-01 AEPRC2V, et coordinateur de cet article.

(**) Estelle Garnier est doctorante en Économie à l'université de Reims.

(***) Christophe Bliard est chargé de recherche au CNRS dans l'Institut de Chimie Moléculaire de Reims (unité de recherche UMR6229 associée à l'université de Reims).

né par cette recombinaison (1). Tel que les acteurs l'exposent dans un schéma aujourd'hui canonique [cf. par ex. : Octave et Thomas (2009)], il s'agit du segment formé par les deux étapes allant de la biomasse à sa première transformation (par extraction/séparation ou fractionnement/cracking), puis de celle-ci à sa deuxième transformation par fonctionnalisation et formulation. Ce segment aboutit à la livraison de « produits agro-industriels intermédiaires » (que ces acteurs souhaitent aussi variés que des acides gras, des amidons modifiés, des élastomères, des fibres, des résines, des sucres, des antibiotiques, des vitamines, des polymères ou monomères, des esters, des dextrines, des surfactants, des acides organiques, des alcools).

Il s'agit donc de « demi-produits » au sens de Weil (*in* Le Masson, Weil, Hatchuel, 2006) : des produits dont certains paramètres sont validés tandis que d'autres restent ouverts à l'exploration et à la variété, qui vont devoir réussir leur combinaison avec d'autres technologies ou savoir-faire dans des processus d'industries aussi diverses que l'énergie, la cosmétique, la métallurgie, l'industrie du papier, la construction, la pharmacie, l'industrie du bois, le traitement des pollutions ou la plasturgie. La nécessité de fonder les nouvelles relations économiques sur des connaissances partagées, des outils communs et la mobilisation de communautés d'acteurs d'origines différentes nous a conduit à proposer d'observer les dynamiques en cours en termes de formation de patrimoines productifs *collectifs*.

Pourquoi parler de chimie doublement verte ?

L'appellation C2V renvoie à deux entrées. L'une désigne l'origine des matières premières; elle assimile la chimie verte à une *chimie biosourcée* (Colonna, 2006). L'autre désigne comme chimie verte la nécessité pour la chimie, suite aux accidents industriels et problèmes liés à la toxicité, de se redéfinir en fonction de son impact sur l'environnement : au cours des années 1990, elle a été codifiée en 12 principes – non contraignants – par les Américains sous l'impulsion d'Anastas, ou institutionnalisée en Europe à travers des directives plus contraignantes telles que la directive Reach. Cette chimie verte propose de rechercher les meilleurs compromis possibles, compte tenu de l'état des connaissances et des processus, pour éviter la toxicité et minimiser les effluents liés à la chimie traditionnelle. S'il est préconisé (7^{ème} principe) l'« *utilisation de matières premières renouvelables; lorsque la technologie et les moyens financiers le permettent, les matières premières utilisées doivent être renouvelables plutôt que non renouvelables* » (Anastas et Warner, 1998, p. 45), rien ne garantit qu'une chimie du carbone renouvelable, en substitution des

(1) Cette étape est destinée à fournir une description des caractéristiques de l'environnement économique du chercheur en C2V, dans le cadre d'un projet ANR centré sur le rôle du chercheur dans cette dynamique (« Une approche économique de l'intégration des dimensions socio-économiques et techniques dans les programmes de recherche en chimie doublement verte »).

intermédiaires pétrochimiques, réponde aux principes de chimie verte, voire soit acceptable du point de vue de principes plus généraux de développement durable. Ce que nous appelons C2V constitue donc plus un problème à résoudre et un objectif à atteindre qu'une solution disponible.

Les incitations à se tourner vers une chimie doublement verte

Le respect des principes de chimie verte ne constitue qu'un des aspects de la question de la soutenabilité de l'effort de changement technologique que cet article cherche à traiter. En effet, il ne suffit pas de prendre acte des changements dans les prix du pétrole, pour en déduire des sentiers de substitution. Si ces changements offrent *a priori* des opportunités, ceci ne nous dit rien des alternatives économiques et techniques que pourront réussir à mettre au point les acteurs. Ceux-ci sont par ailleurs tenus de conduire le changement en prenant des décisions *ex ante* dans un contexte d'incertitude technologique majeure. Or, ils sont insérés dans des systèmes productifs qui, s'ils leur offrent des ressources et des capacités d'intervention, limitent leur champ des possibles, soumettent leurs actions à des conditions de viabilité (Amendola et Gaffard, 1992), et les conduisent à rechercher le changement sur des trajectoires précises. Une des caractéristiques des « *sociétés de changement technologique rapide* » est l'existence d'une hyperconcurrence des matériaux et des solutions de substitution technologiques émergentes (Larrue de la Tournemine, 1991) (2). On sait que la capacité de certains groupes d'acteurs à activer des programmes de recherche et à les orienter dans des directions particulières peut être déterminante dans la sélection d'une trajectoire. Celle-ci peut alors s'auto-renforcer sur un produit ou un process n'ayant pas au départ d'avantage particulier, que ce soit en termes de qualités fonctionnelles ou en matière de prix relatifs (Foray, 1989, Dockès, 2002).

C'est la raison pour laquelle on a écarté, au moins à cette étape de notre programme de recherche, l'idée de travailler sur les variations de prix relatifs pour comprendre les incitations à développer des solutions « chimie verte », considérant qu'elles ne permettent pas d'indiquer aux agents de façon claire quels sont les nouveaux process et produits pertinents pour substituer les ressources fossiles. Cette hypothèse, étayée par des témoignages convergents, revient à

- (2) Les exemples de cette hyperconcurrence abondent. On verra plus loin que les procédés de pyrolyse avoient des procédés d'hydrolyse enzymatique pour la production de biocarburants et d'intermédiaires pour la chimie, tandis que certains s'interrogent sur le fait de savoir si le meilleur chemin n'est pas de transformer directement la biomasse en électricité. Au sein des biocarburants eux-mêmes, la concurrence est aujourd'hui ouverte entre une variété de matières premières et de substrats possibles, et avec les microalgues qui cherchent à invalider le scénario de l'ensemble de ces filières potentielles. Dans le domaine de la plasturgie à base de « bio-polymères » les interrogations sont aussi larges : faut-il privilégier la voie de la recyclabilité ou de la biodégradabilité ? Sur quel polymère ou intermédiaire issu du renouvelable faire porter l'effort technologique permettant d'en explorer les potentialités ?

traiter la C2V comme un univers instable au sens que Godard (1993) donne à ce terme : un univers où le calcul économique traditionnel ne peut déterminer les choix des acteurs *que de façon très partielle*, en l'absence d'une représentation minimale de leurs préférences et de l'enchaînement des process et des marchés dans lesquels les « demi-produits » programmés seraient susceptibles d'entrer.

Ceux-ci accordent donc une place particulière à la construction de représentations collectives du futur, sur lesquelles ils pourront entraîner des partenaires et fonder des stratégies d'apprentissage et de « compétition » (Despeyres et Dumez (2006)); la mobilisation des scientifiques y occupe une place centrale, car ils sont sollicités par les acteurs économiques pour fournir des scénarios d'itinéraires crédibles, destinés à consolider les efforts de conduite du changement – à partir de choix *ex ante* en situation d'incertitude sur les développements technologiques et leur acceptabilité sociale.

Dans une première partie, on développera l'idée que de telles situations conduisent les acteurs à penser la recomposition sectorielle par la formation de communautés destinées à résoudre des problèmes de coordination inédits (1.1.), notamment ceux rencontrés par des stratégies « d'innovations modulaires » (1.2.), pour *créer de l'ordre* dans un environnement instable à travers la constitution d'objets, de ressources et de représentations du futur en termes de *patrimoines productifs collectifs* (1.3.). Lorsque des impulsions significatives seront données au cours des années 1990, la chimie verte au sens des douze principes d'Anastas ne faisait pas partie de tels patrimoines (1.4.). En revanche, ce sont les acteurs des agro-industries qui structurent cette dynamique à travers un concept de raffinerie végétale qu'ils vont proposer aux pouvoirs publics de soutenir (1.5.).

On peut déduire analytiquement de cette première partie la nécessité de décrire la « mise en ordre » des efforts de développement de patrimoines productifs collectifs – à la fois dans leur dimension de cohérence synchronique (comment des acteurs se coordonnent sur cet effort à un instant t sans recourir à de l'information classique du type prix/marché) et dans sa dimension diachronique (comment ils se projettent *ensemble* dans le futur pour gérer l'incertitude?).

Dans la seconde partie, on développe cette approche des patrimoines productifs collectifs à travers une « démarche narrative », et en particulier de son principe méthodologique qui veut qu'on établisse le plus précisément possible *l'état des connaissances des acteurs au moment où ils agissent* (Dumez et Jeunemaitre, 2005). Il s'agira d'abord de décrire cet outil d'incitation à la coordination des acteurs scientifiques et économiques qu'est devenue la procédure de lancement de projets collectifs, se déclinant au niveau européen, national et local (2.1.). D'un point de vue diachronique, l'effort de constitution en patrimoines productifs collectifs que reflètent ces projets se traduit par l'exploration d'espérances technologiques dont nous présenterons (de façon très syn-

thétique) trois voies, établies à partir de la littérature et sur dire d'experts (Nieddu, 2009) (2.2.). Les désappointements de la fin des années 1990 conduisent les acteurs à prendre acte de l'insuffisante intégration de certains aspects du développement durable, et de la chimie verte (telle que la biodégradabilité), et à recomposer le mythe rationnel de l'usage des agro-ressources en direction d'un concept de bioraffinerie, proposé comme objet central de la transition vers les ressources renouvelables (2.3.).

I. — LA FORMATION DES PATRIMOINES PRODUCTIFS COLLECTIFS

Dans cette partie, l'on s'appuie sur la littérature des systèmes d'innovation et de production (Amable, Barré et Boyer, 1997 ; Malerba, 2002) en l'orientant d'une façon particulière ; leurs évolutions dessinent à la fois des contraintes structurelles et des sources d'opportunités. Leur structure même est donc l'enjeu d'une concurrence qui se noue sur le long terme et pas seulement dans l'immédiateté des affrontements sur les marchés.

La façon dont va s'ordonner le changement technologique pourra donc être observée dans les efforts d'acteurs *historiquement situés* pour recomposer les bases des connaissances de ces systèmes afin de trouver de nouveaux sentiers de développement cohérents avec leur spécialisation. On s'intéresse alors à des incitations à créer sur le long terme de nouveaux « mondes de production », ce qui implique des changements systémiques.

On ne peut donc que pointer l'importance de la construction de visions du futur pour assurer la convergence des comportements. Ces visions incitent à la recombinaison des bases de connaissances et reviennent à chercher à organiser des communautés nouvelles qui soient porteuses d'une représentation commune du futur technologique. On mettra l'accent sur le fait que l'échec significatif de tentatives d'innovations modulaires, renforce pour les acteurs la conviction de la nécessité de « créer de l'ordre » (cf. *infra* 1.3.) dans le changement technologique. On défendra également l'idée que les nécessités de la chimie verte ne jouent pas un rôle premier dans cet effort de mise en forme, mais que les acteurs des agro-industries cherchent à jouer un rôle moteur pour regrouper des communautés d'action autour de leurs projets.

1.1. Des communautés pour conduire l'effort de recombinaison des compétences

Ces communautés se nouent autour de ressources scientifiques, techniques, économiques et sociales existantes ou en formation qui sont *des patrimoines productifs collectifs*. Deux dimensions sont présentes dans cette notion : (1.) l'idée de ressources communes qui doivent être produites ou identifiées comme telles et être préservées au cours du temps pour que des acteurs puissent se coordonner et (2.) l'idée de « prise de pouvoir sur le futur » (Godard,

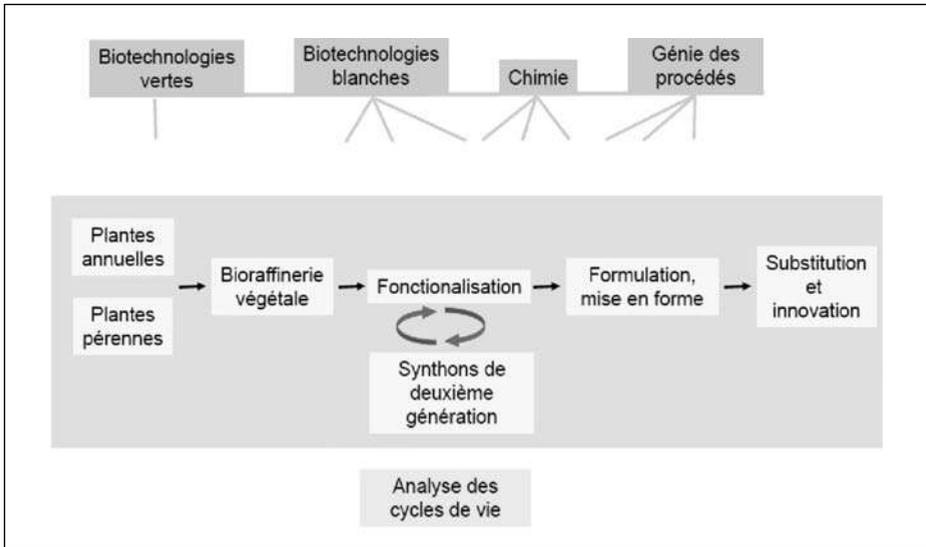
1990); dire qu'un élément fait patrimoine, c'est dire qu'on souhaite un futur dans lequel il est présent (3). Si la problématique est bien celle de l'émergence d'un secteur économique nouveau, elle doit se penser dans cette perspective temporelle longue où tous les registres de l'action collective sont concernés: de la recherche fondamentale à l'innovation industrielle et à la construction de modèles économiques et de marchés. D'où l'importance accordée aujourd'hui à des exercices de réflexion stratégiques, que ce soit aux États-Unis ou en Europe. Ceux-ci portent sur des « feuilles de route technologiques », fixent collectivement un horizon atteignable et une méthode de coordination censée permettre de l'atteindre (4).

Dans les exercices de prospective liés aux développements des usages de la biomasse et des agro-ressources pour le non-alimentaire (unité prospective INRA, 2005; Colonna, 2006), les acteurs développent une représentation idéale des changements, liée à une complémentarité des innovations, de la matière première à ses transformations et usages, (voir figure page suivante).

Cette logique de mise en système est le produit d'« espérances technologiques » (Hekkert *et al.*, 2007): les avancées des biotechnologies durant les années 1980 dans le domaine de la médecine et de la pharmacie pourraient être transférées et mises en relation avec des secteurs qui appartiennent historiquement à des « mondes de production » différents (l'agriculture et le bâtiment, la plasturgie ou l'automobile). L'accent mis sur l'importance du rôle de la recherche en amont, qu'elle soit fondamentale ou finalisée, ne vise pas tant à créer des voies radicalement nouvelles qu'à organiser les trajectoires technologiques permettant de nouer ces relations intersectorielles – d'où la nécessité

- (3) Là où les tenants d'une analyse monocausale ne s'intéresseraient qu'à l'engagement des ressources monétaires dans des relations marchandes, visant à acquérir du capital et de la main-d'œuvre, ou ne verraient les relations constitutives des communautés qu'en termes de contrainte stratégique (dilemme du prisonnier), ou de pouvoir et de rente (domination sur un réseau).
- (4) On peut citer ici trois grands documents de référence pour le milieu des acteurs de la C2V :
— le document USDA DOE (1999) « *"Vision" document Plant/ Crop-Based Renewable Resources 2020: A Vision to Enhance U.S. Economic Security Through Renewable Plant/Crop-Based Resource Use* », (<http://www.oit.doe.gov/agriculture/>), DOE/GO-10099-706, February 1999 ;
— le document américain déterminant les grands intermédiaires d'origine agricole prioritaires (T Todd Werpy and Gene Petersen (ed.) (2004) *Top Value Added Chemicals from Biomass: Volume 1-Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas*, Report produced for the U.S. Department of Energy (DOE), by the National Renewable Energy Laboratory, a DOE national Laboratory, August 2004, 76 p.);
— l'exercice de synthèse des opportunités technologiques élaboré pour la Commission européenne par Wolf, O. *et alii* (2005) *Techno-economic feasibility of large-scale production of bio-based polymers in Europe*, European Commission: Technical Report EUR, 22103 EN 256 p.

FIGURE : Colonna, 2006, CNRS Chimie pour le développement durable, 2 oct. 2006



d'identifier les périmètres de nouvelles communautés technico-scientifiques et économiques (5).

1.2. Innovation modulaire vs. innovation systémique en développement durable

D'un point de vue théorique, ces notions de communautés et de patrimoines productifs collectifs renvoient au fait que dans toute économie décentralisée, les acteurs doivent prendre en charge la division du travail et assurer la cohérence du système productif par l'existence de dispositifs de coordination à la fois synchroniques et diachroniques (Sapir, 1997). Ils se trouvent alors face à une contradiction qui doit être régulée. La division du travail permet que les

- (5) On ne porte pas ici un jugement, qu'il soit positif ou négatif, sur ce mécanisme ; ces communautés, parce qu'elles fondent la compétitivité des acteurs, sont tout autant excluantes que permissives du développement, comme le montre l'exemple historique des communautés formées par l'agriculture industrielle autour des ressources telles que l'accès au crédit, la coopération, les outils industriels partagés, la recherche collective au service de la profession. Au service d'un modèle de développement qui a permis des progrès rapides, ces outils collectifs ont aussi puissamment contribué à l'élimination, hors mécanismes de marché, d'une agriculture pluriactive, économe en intrants et particulièrement résistante aux fluctuations de marché (Nieddu et Gaignette, 2001).

systèmes productifs soient décomposables. Mais aucun acteur ne souhaite gérer la totalité du système, car cela générerait pour lui des coûts, cognitifs et autres, écrasants (Vanhée, 2008). Tous développent des stratégies qui leur permettent de ne pas avoir à le faire. Une des conditions du développement des nouvelles technologies réside donc dans la régulation de cette contradiction.

Dans le domaine des biopolymères (6), on a pu observer les effets de ce constat en termes de stratégies. Les acteurs développent des stratégies de rupture schumpetérienne, que nous avons qualifiées de stratégies d'innovation modulaire (Nieddu, 2000). Il s'agit de changer le contenu d'un seul « tiroir » du système productif sans avoir à supporter le coût du changement des autres « tiroirs », soit parce qu'on a réussi à créer un « polymère-clé » autour duquel les autres acteurs seront obligés de s'agglomérer, soit parce que le nouveau « tiroir » vient substituer de façon fonctionnelle un élément moins performant. Cette stratégie est particulièrement visible en pharmacie où une molécule est évaluée comme nouvelle, ou plus efficace par des procédures d'essai institutionnalisées, puis vient remplacer les anciennes (Amable, Barré, Boyer, 1997). Elle l'est moins dans des situations d'*innovation systémique*, lorsque le rendement privé et social de l'innovation dépend de son adoption par l'ensemble du système (Foray, 1994).

Le cas de l'introduction des ressources renouvelables ou de leurs dérivés dans des systèmes existants pose surtout le problème de l'acceptation de coûts de transformation (que ce soit au niveau des techniques ou de l'acquisition des compétences) le long d'une filière de production, dans un système sectoriel de la chimie marqué d'après Malerba par l'importance de la division verticale du travail (Malerba, 2002, 2004, 2005). Or comme l'indique le directeur des partenariats d'Arkema, il faut « tout changer » sans pour autant que les changements à réaliser n'impliquent une rupture épistémique : « on change la nature des réacteurs, des catalyseurs et des impuretés » [cité par Latieule (2006)]. C'est pourquoi on a pu interpréter la situation des biopolymères de la fin des années 1990 (Nieddu, 1999a,b,c) comme une situation de « désordre technologique », dans laquelle cette question des ressources à allouer au changement systémique n'avait pas été prise en charge, d'où de très faibles agglomérations autour des acteurs se revendiquant comme porteurs de polymères-clés à travers leurs prises de brevet. Cette forme d'échec à constituer en communauté (qu'on opposera dans la seconde partie aux stratégies collectives de constitution en secteur), de la part des acteurs du modèle de rupture schumpetérienne est bien traduite par un texte de Pavitt (1998) : « What Adam Smith Tells Us and Joseph Schumpeter Doesn't ».

- (6) Le terme « biopolymères » a été utilisé à la fin des années 1990 dans une relative confusion sémantique qui mélangeait des polymères ou copolymères biodégradables (à base en partie fossile) et une chimie des polymères visant à les produire à partir de substrats naturels. À l'origine, le terme était utilisé pour désigner des matériaux médicaux biocompatibles.

1.3. Patrimoines productifs collectifs et secteur en univers incertain

Quelles sont les bases de connaissances de cette constitution en communauté? Deux secteurs contribuent à l'essentiel à celles spécifiques à la C2V. Le secteur des *biotechnologies et de la pharmacie* est, selon McMillan *et alii* (2000) ou Malerba (2002), fondé sur une division du travail d'innovation entre universités et acteurs privés. Celle-ci se combine avec des institutions de régulation de l'appropriation des connaissances produites (brevets, autorisations de mise sur le marché et réglementation). Les savoirs de ce secteur sont interrogés à partir de la fin des années 1980 dans l'espoir d'un transfert rapide des connaissances vers des dispositifs appropriables par des firmes en chimie du végétal. Ainsi Monsanto annonçait à la fin des années 1990 une solution tout « OGM » pour produire directement, dans la plante, avec de hauts rendements, les substrats de plastiques biodégradables. Ceci va faire l'objet d'effets d'annonce nombreux, suivis d'un abandon du programme.

En fait, les logiques de transferts vont être plus lentes et plus complexes. Les brevets sur les polyacides lactiques des années 1990 portent sur des pansements biorésorbables dans l'organisme avant qu'on s'intéresse à leurs propriétés en plastiques biodégradables, ou qu'on s'interroge sur leur production à partir du végétal. Dans son bilan de 2002, Michel Vert note que leur futur dépend du développement de procédés industriels de polymérisation peu onéreux, et de l'amélioration des propriétés thermiques, et donc de la mobilisation de compétences du *secteur de la chimie*. On retrouve alors des caractéristiques analysées par Malerba pour ce secteur : l'importance de la division verticale du travail de R.D., la présence simultanée d'une RD interne et externe aux firmes (plates-formes collaboratives ou universités) pour résoudre les problèmes productifs, et la nécessité de fortes relations usager-producteur dans le monde industriel pour réussir à porter les produits à réalité (7).

La constitution de patrimoines productifs collectifs correspond donc à une nécessité : celle de reformer, au moins sur un sous-ensemble clairement délimité, l'unité et la cohérence du processus d'élaboration d'un projet productif. Le corollaire de la sollicitation des chercheurs sur des programmes de recherche est plus la tentative de former des patrimoines productifs collectifs dans des espaces économiques structurés que la rupture technologique elle-même. On rejoint ici les travaux de la sociologie économique autour de White, pour qui les marchés sont reliés à d'autres domaines institutionnels, et pour qui « *la logique sociale et économique qui sous-tend l'existence des organi-*

(7) Le secteur ne saurait donc exister sans le fait que « *the increasing reliance on external links for complementary scientific and technological knowledge has led to the emergence of networks of three types : interfirms, university-industry and user-producers in speciality segments* » (Malerba, 2002 :15).

sations n'est pas dérivée d'un impératif de rationalité (limitée ou non), mais plutôt d'un impératif de recherche de stabilité et de contrôle dans un environnement radicalement incertain. Les stratégies développées par les entreprises mobilisent différents types de ressources pour atteindre des objectifs présentés comme étant désirables, et par-là même génèrent leur identité de marché. Les organisations, à travers leurs stratégies, tentent donc de créer de l'ordre à partir du chaos qui caractérise leur environnement » (White et alii, 2008, p. 17).

Du point de vue théorique, ces patrimoines productifs collectifs sont des ressources qui 1) sont recherchées pour leur valeur collective, 2) doivent être partagées pour exister, 3) être considérées en tant que patrimoines pour justifier l'effort de les préserver, dans les phases d'incertitude sur leur capacité à produire des objets nouveaux à des conditions de marché acceptables (Nieddu, 2007). En tant que faits stylisés, les patrimoines productifs sont d'abord des ressources immatérielles permettant des apprentissages entre utilisateurs et producteurs (Foray, 1994), et des outils cognitifs partagés (Zaclad, 2007), des dispositifs de reconnaissance et qualification de ressources libres, (telles que des connaissances scientifiques), comme des actifs à part entière du secteur (Billaudot, 2004). Il s'agit au plan matériel de dispositifs « localisés » qui permettent aux acteurs scientifiques et aux acteurs économiques de se rencontrer autour de laboratoires publics ou privés collectifs dédiés et d'activités de développement technologique (démonstrateurs ou unités pilotes avant industrialisation). Il s'agit ensuite d'institutions dédiées (Barrère, 2007) et d'outils institutionnels de constitution en communauté, qui ne sont pas spécifiques à la C2V mais que ses acteurs mobilisent particulièrement : les « plates-formes technologique » de l'Europe ou les « pôles de compétitivité » en France. L'institutionnalisation de la chimie verte fournit également un exemple de ressources institutionnelles visant à permettre une coordination d'acteurs autour d'un effort productif commun (Woodhouse and Breyman, 2005).

1.4. Chimie verte et ressources renouvelables

On a dit plus haut que les questions d'utilisation des agro-ressources et la notion de chimie verte n'avaient pas un lien automatique. Au début des années 1960, les grands chimistes tels que Natta justifiaient le caractère « progressiste » de la chimie des ressources fossiles par le fait qu'elle libérait des terres agricoles, qui pouvaient enfin être réorientées vers l'alimentation. Or, aux États-Unis comme en Europe, les excédents agricoles deviennent un problème structurel dès le début des années 1970. Tandis que les acteurs de la chimie vont suivre, à partir du texte fondateur de Rachel Carson sur l'usage du DDT, une longue évolution en réponse aux graves contestations de leur champ professionnel (Bensaude-Vincent, 2005, 2008).

Aux États-Unis, le mouvement qui mène à l'institutionnalisation de la chimie verte a été amorcé dans une logique sanitaire et environnementaliste. Le *Pollution Prevention Act* de 1990 et l'*Environmental Protection Agency* (EPA)

y jouèrent un rôle structurant. Au début des années 1980, le terme qui précéda en usage courant aux États-Unis celui de *green chemistry* était d'ailleurs *Environmental chemistry*. Selon Woodhouse et Breyman (2005, *op. cit.*, p. 204) les administrateurs de l'agence vont considérer que « *the act* [Pollution Prevention Act] *heralded a new era in the philosophy and policy of controlling the risks of toxic chemicals... [It] served as guidance by providing a series of approaches to pollution prevention. At the top of this series is "source prevention. In other words, the ultimate approach to preventing problems with toxic chemicals is not to produce such substances in the first place..."* ».

Si les premières publications en chimie verte comme les actes du symposium de 1994 mentionnent les matières premières agricoles comme matières premières alternatives, leur usage est conditionné par l'objectif explicite de réduction des risques. Dans l'introduction de ces actes, Anastas et Williamson (1996 : 6) y font référence, pour présenter le chemin logique d'amélioration des conditions de réaction de la chimie verte : « *1. Nature of the Feedstocks or Starting Materials 2. Nature of the reagents or transformations, 3. Nature of the reaction conditions, 4. Nature of the final product or target molecule* ». Les matières premières agricoles n'y figurent donc que parce que « *in some case these four elements are closely inter-related and in some case inextricably* » (*idem*). Les auteurs ne considèrent donc bien ici que les endroits où il est impossible de faire de la chimie verte sans utiliser un substrat d'origine agricole. De même, l'ouvrage coordonné par Nelson (2004) *Agricultural applications in Green Chemistry* ne fait référence, à l'exception d'un article sur les conditions d'extraction fermentaire d'éthanol, qu'aux questions environnementales en agriculture – usages de pesticides à base d'huiles naturelles, ou phytoremédiation par des plantes capables de dépolluer les sols par exemple.

Dans sa première période, l'émergence d'activités issues des agro-ressources se fait en référence à d'autres temporalités : celles de la gestion des excédents agricoles qui se généralisent au cours des années 1970, et de la recherche de nouvelles sources d'activités assurant la présence d'industries dans le monde rural. Il s'agit d'abord d'une histoire de surcapacités de production : la formation des communautés et des patrimoines productifs en C2V renvoie à l'action des groupes d'agriculteurs et des firmes agro-industrielles, dans un contexte de remise en cause et de réformes des politiques de soutien agricoles, plutôt que de celle des industriels de la chimie.

1.5. Le « grand retour » du monde agricole dans la chimie

Ce caractère central de l'agro-industrie dans les dynamiques observables trouve sa source dans deux éléments qui expliquent la précocité des projets des acteurs du monde agro-industriel : d'une part, il a conservé le souvenir des usages industriels non-alimentaires des productions agricoles (notamment la transformation des surplus en alcool et les tentatives de fournir des alternatives à certaines matières premières avant et durant la Seconde Guerre mondia-

le) (8). D'autre part, son organisation en bassins de production agro-industriels l'a habitué à construire des circuits économiques de première transformation et de livraison de produits agro-industriels intermédiaires (par exemple l'amidon entrant dans l'industrie alimentaire ou papetière) (Nieddu et Gaignette, 2001, *op. cit.*). Cette continuité de l'alimentaire et du non-alimentaire est d'autant plus forte lorsque les technologies de la C2V se situent dans la continuité de celles du génie alimentaire.

D'ailleurs, en réalité, les substitutions recherchées par ces acteurs ne visent pas que le pétrole. L'investigation de voies chimiques pour la substitution des *produits alimentaires intermédiaires* concurrents se fait conjointement, dans le domaine des additifs alimentaires par exemple. Les directives européennes vont faciliter ce jeu concurrentiel en considérant en 1988 que les arômes produits par voie biotechnologique sont réputés naturels (et, plus récemment, que ceux-ci ne sont pas intégrés dans le périmètre de la directive Reach) (9) : on trouve ainsi dans l'ouvrage de référence de 2006 un chapitre consacré à la substitution de vanilline par extraction d'acide férulique des co-produits industriels de la betterave ou de résidus de l'amidonnerie (Lesage-Meessen *et alii*, 2006).

La stratégie de substitution, vers un modèle de raffinerie végétale ?

Des plantes historiquement liées au non-alimentaire, telles que les chanvres et le lin, sont revisitées pour leurs propriétés spécifiques (Garnier *et alii*, 2007). Les acteurs du monde agricole, des grands acteurs de la collecte de céréales, comme Cargill, les amidonniers comme National Starch, Roquette, ou Novamont suivent la piste de l'élargissement des utilisations des produits agro-industriels intermédiaires existants de l'alimentaire vers une chimie d'intermédiaires utilisables en plasturgie. L'amidon est le produit phare de la recherche des années 1990 (Bastioli, 2001). D'autres travaillent sur les poten-

(8) A.-L. Young (2003, p. 273) raconte que « ...all Ford cars were finished in an enamel in which soybean oil was used extensively (it was estimated that about a half-bushel of soybeans were used in the manufacture of every Ford car). By 1941, Henry Ford had produced his first automobile with an "all plastic" body. The car climaxed a dozen years of research based on Ford's long-standing belief that someday he would "grow automobiles from the soil" [2]. The car made its appearance when a steel shortage threatened to cripple the automobile industry's non-defense production. Unfortunately, World War II forced industries to focus on meeting the needs of the Defense Department and plastic vehicle bodies had no place in the war effort. This story of Henry Ford and plastic from soybeans is a lesson on how difficult it is to promote and sustain innovation. Almost 50 years would pass before both the industry and the public would again embrace bio-based products ».

(9) Voir (http://www.dgccrf.bercy.gouv.fr/manifestations/colloques/aromes_alimentaires/08_guerere.pdf), pour un débat sur les arômes, relevé le 12 avril 2009.

tiels des protéines végétales ou de la poudre de lait, substrat peu coûteux en raison des excédents, et dont l'usage est aussi répandu que l'amidon en génie industriel alimentaire (Prochazka & Assezat, 2008).

La recherche d'usages non-alimentaires des produits agricoles va, à partir du premier choc pétrolier, être dominée par la figure de la « raffinerie végétale », liée au paradigme de l'énergie (10). Former autour d'une raffinerie un réseau collectant la matière première agricole et l'épargne locale ou des aides nationales aux territoires ruraux n'est d'ailleurs que la reproduction des méthodes de constitution d'outils agro-industriels collectifs par la coopération agricole, qui avaient présidé aux succès français des trente glorieuses (Nieddu & Gaignette, 2001, *op. cit.*); on retrouve cette mobilisation de communautés rurales autour des premières unités de production d'éthanol aux États-Unis.

D'après la littérature, et des entretiens (réalisés par nous) auprès de certains acteurs des premiers développements des années 1980, les procédés de raffinerie végétale explorés utilisaient les mêmes principes de vapocraquage que la pétrochimie. Après broyage, le prétraitement de la matière première (équivalent de la distillation et du vapocraquage pétrochimique), était prévu par procédés physico-chimiques sous pression soit par thermo-hydrolyse, soit par explosion de la masse cellulosique à la vapeur, en condition acide, conduisant à l'utilisation d'acide sulfurique comme dans le procédé AFEX considéré comme bien adapté aux plantes herbacées retenues pour expérimentation dans certaines régions françaises, alors que les pays forestiers comme le Canada et la Finlande vont explorer d'autres voies (Ballerini, 2006). Les Américains du National Renewable Energy Laboratory vont théoriser deux types de plateformes : la première dite « sugar platform » pour reprendre la terminologie est basée sur l'extraction de sucres destinés à former les monomères de base de la chimie du végétal, ou des biocarburants, la seconde « syngas platform » est basée sur la gazéification de la biomasse et des co-produits (11).

- (10) Par exemple, le programme français Carburol de 1979. Elle se développe surtout, aux États-Unis et en Europe, au cours des années 1980, lorsque la mise en place de jachères va être considérée comme un tournant inéluctable. Les usages énergétiques sont l'essentiel du premier PCRDT européen de 1984. L'usage autre qu'énergétique apparaît dans le premier programme multiannuel de recherche et de développement technologique agro-industriels à partir de la biotechnologie (ECLAIR), 1988-1993, du second PCRDT.
- (11) Cf. (<http://www.nrel.gov/>). La seconde voie nous avait *a priori* semblé moins fortement articulée à la C2V qu'à l'énergie, dans les années 1990. On dispose d'un bilan à tout le moins mitigé de la voie de la production d'énergie par gazéification des années 1990, dans une étude réalisée sur le relatif échec de la filière néerlandaise (Negro *et alii*, 2008). Néanmoins on notera que ces auteurs et d'autres considèrent qu'en fonction des produits visés, la filière gazéification conserve toute sa pertinence.

Dans ce qui suit, on s'attachera donc plus particulièrement aux dynamiques qui trouvent leur origine dans les besoins du monde agricole et agro-industriel, et qui, de façon dominante, cherchent à recomposer un secteur sur la base des connaissances biotechnologiques. D'autres acteurs seront porteurs d'autres logiques de patrimoines productifs : ils explorent alors d'autres voies, à partir des ressources propres qu'ils cherchent à valoriser. Par exemple, en France, le CEA explore une voie thermo-chimique de gazéification des « lignocellulosiques » (bois/paille, ou culture spécifique), dans un programme sur les bio-carburants de 2^{ème} génération, en coordination avec l'Institut Français du Pétrole (IFP). On comprend, de par la position du CEA dans la production d'énergie, le fait qu'il étudie les apports d'énergie extérieure dans les procédés, ce qui correspond à des recherches qu'il conduit en parallèle sur l'hydrogène et l'électricité.

II. — VERS UNE C2V ? LES MUTATIONS D'UN MYTHE RATIONNEL

On a dessiné dans la première partie un cadre analytique dans lequel l'assemblage des ressources collectives constituait un enjeu central des stratégies des acteurs ; la « mise en ordre » d'un nouveau modèle économique pose en effet au monde des agro-industries un ensemble de défis et de difficultés. Cette « mise en ordre », qu'est l'assemblage des ressources considérées comme devant entrer dans les patrimoines productifs collectifs du secteur en formation, se fait à partir d'une certaine représentation du futur, qui doit être analysée au regard de la question qui nous occupe : la soutenabilité de l'effort de conduite du changement technologique dans un contexte de chimie doublement verte.

Il est donc nécessaire de décrire de *façon substantive* les patrimoines productifs collectifs, lesquels ne peuvent être réduits à une valorisation monétaire, mais vont constituer à la fois des actifs tangibles et intangibles (les représentations du futur devant être considérées comme des actifs ayant une valeur économique, même si celle-ci n'est pas chiffrable sauf à fixer une convention *ad hoc*). C'est la raison pour laquelle on a documenté les différentes voies explorées. La raffinerie du végétal apparaît ainsi comme l'expression directe de ce que l'on peut qualifier, à la suite d'Hatchuel (1997) de *mythe rationnel*, à savoir un chemin de mobilisation, sur un sentier d'exploration d'espérances technologiques, couplé à l'idée que la « vision à long terme » doit l'emporter sur les difficultés conjoncturelles, et les espérances de développement sur les informations fournies par le calcul économique.

La documentation de la formation des patrimoines productifs collectifs tels que nous les avons décrits dans la première partie (problématique de mobilisation de connaissances, recombinaison systémique plutôt qu'innovation modulaire et intégration de principes de chimie verte par des acteurs centraux dans la dynamique de formation) conduit à observer le changement technolo-

gique dans des dimensions précises (Nieddu & Garnier, 2008). On s'intéressera particulièrement ici à des variables liées à la logique interne du système technologique indépendamment et souvent antérieurement à des questions de prix, car les conditions de viabilité des objets techniques tiennent d'abord à leurs capacités à entrer dans des combinaisons technologiquement efficaces (Gonod, 1991). On aura bien sûr à observer la façon dont les variables liées à l'acceptabilité sociale des technologies entrent en jeu dans le domaine qui nous occupe. Enfin, on a vu que l'on se doit de prêter attention à la façon dont les acteurs cherchent définir leur logique de division du travail, d'alliances et de découpage du système productif en « ensembles » qu'ils considèrent comme cohérents.

On s'appuiera essentiellement sur le cas de la France pour décrire la mobilisation des ressources institutionnelles. Ces ressources se déclinent du niveau européen (voire des collaborations transatlantiques comme dans le cas de la bioraffinerie) jusqu'au niveau local (2.1.). Puis on précisera les trois types d'espérances technologiques autour desquelles ces communautés choisissent de rassembler les ressources privées et collectives (2.2.). On terminera enfin sur les mutations que la réalité va imposer au périmètre de ces communautés (2.3.). On défend l'idée qu'elles sont de deux ordres. D'une part, les années 1990 correspondent à une période de surestimation des solutions portées par des grands polymères (le « tout amidon » ou le « tout PLA »), et de sous-estimation des complémentarités technologiques nécessaires à l'existence de nouveaux produits. Ceci va conduire à la fin des années 1990 à chercher des raccourcis de développement à travers des composites polymères renouvelables, polymères issus de la chimie du pétrole ; mais leur identité « développement durable » va se trouver âprement discutée, ce qui va entraîner la recherche d'autres complémentarités technologiques (2.3.1.). D'autre part, la raffinerie végétale va être requalifiée en bioraffinerie, à la fois pour essayer d'asseoir sa légitimité sociétale et pour formaliser des relations inter-industrielles nouvelles : celles-ci produisent une décomposition du système productif autour des produits intermédiaires issus du renouvelable grâce à des procédés biotechnologiques (2.3.2.). Mais ceux qui revendiquent la position de producteurs de ces intermédiaires sont souvent encore à la recherche des collaborations pertinentes avec leur aval.

2.1. La mobilisation de ressources institutionnelles

Les dispositifs institutionnels présentés ici ont pour point commun de s'appuyer largement sur la procédure d'incitation à la mobilisation du monde de la recherche scientifique grâce à la procédure de *lancement de projets* de recherche, sous la condition d'un lien avec des entreprises. Ces dispositifs articulent des niveaux de mobilisation locale des organisations sectorielles et les niveaux institutionnels d'intervention nationaux et européens. Certes, il s'agit de procédures d'action publique aujourd'hui génériques ; néanmoins, elles jouent un rôle particulier dans le cas qui nous occupe. En effet, le monde de l'agriculture et des agro-industries suit des dynamiques d'apprentissage repo-

sant sur des connaissances technologiques qui lui sont largement extérieures : les firmes impliquées (cf. *infra* 2.3.2 c) vont donc adopter la trajectoire explorée par l'industrie plutôt qu'une trajectoire propre, suivant en cela un comportement modélisé par Oltra et Llerena (2002).

La mobilisation européenne se fait par montée en puissance de la thématique dans les programmes-cadres. À l'origine tournés vers l'énergie, ceux-ci rapprochent les bases de connaissances issues des projets portant sur le non-alimentaire, sur l'énergie, sur les matériaux et sur les biotechnologies. Le constat que ces quatre domaines contiennent des ressources utiles aux autres, conduit à chercher une forme d'unification de ces bases de connaissance pour en faire les moteurs de la recomposition intersectorielle. En particulier, la stratégie de la plate-forme technologique SusChem réside dans l'organisation de l'articulation des biotechnologies dites blanches avec la technologie des matériaux et le design de process et de réactions chimiques, tableau 1.

Au niveau français, la mobilisation des acteurs des années 1980 conduit en 1994 à la création d'Agrice, un Groupement d'Intérêt Scientifique porté par les

TABLEAU 1 : Historique des programmes-cadres de recherche et développement technologique liés au non-alimentaire

Non-food	Biomass Energy	Materials	Biotechnology
First Framework Programme (FP1) - 1984-87			
	Energy from Biomass		Biotechnology Action Programme
<i>Single European Act' - Science becomes a Community responsibility</i>			
Second Framework Programme (FP2) - 1987-91			
ECLAIR	Energy from biomass within Non-Nuclear Energy JOULE		BRIDGE
Third Framework Programme (FP3) - 1990-94			
AIR - Non-Food J	JOULE II - THERMIE	AIR - Non-Food	Biotechnology (I)
Fourth Framework Programme (FP4) - 1994-98			
FAIR - Green Chemicals	JOULE III - THERMIE	Forest/Wood	Biotechnology (II)
Fifth Framework Programme (FP5) - 1998-02			
QoL KA 5	ESSD	GROWTH -	QoL KA3 QoL KA3 - Cell Factory
Sixth Framework Programme (FP6) - 2002-06			
	ESSD	GROWTH	Life sciences, genomics and health
Seventh Framework Programme (FP7) - 2007-13			
Food, Agriculture and Fisheries, and Biotechnology (KBBE)	Energy	Nanosciences, Nanotechnologies, Materials and New Production Technologies	Within KBBE (Économie de la connaissance basée sur les bio-produits)

Source : Combs, 2007

pouvoirs publics, l'ADEME, les organisations professionnelles agricoles et des partenaires industriels (12).

La mobilisation au niveau local des bassins de production agro-industriels, où se construit la compétitivité de monde agro-industriel est le troisième élément caractéristique de cette méthode des projets. Lieux de confrontation entre pouvoirs publics et acteurs privés, les structures créées au début des années 1990, telles qu'Europol'Agro en Champagne-Ardenne, le Centre de Valorisation des Glucides en Picardie, la Plate-forme régionale Agro-Bio-Industrielle de Lorraine (PRABIL) généralisent la méthode de l'appel à projet, à la fois pour orienter des unités de recherche vers le domaine, les inciter à fournir des « états de l'art » permettant d'asseoir une réflexion stratégique régionale, et planifier dans le temps l'effort de ces unités. Cette logique de mobilisation régionale est intégrée en 2004 dans la nouvelle politique industrielle des pôles de compétitivité. Ceci va conduire à la configuration suivante : le monde agricole des productions végétales obtient l'organisation d'un « *pôle de compétitivité à vocation mondiale* » porté par les régions Champagne-Ardenne et Picardie, le pôle Industrie Agro Ressources (=IAR). Parallèlement, un acteur majeur des agro-industries, l'amidonnier Roquette, constitue une autre communauté d'acteurs, *Biohub* qui obtiendra également un soutien des pouvoirs publics approuvé en décembre 2006 par la Commission européenne.

Les actions structurées concernées par la C2V se retrouvent donc en France éclatées entre plusieurs communautés. Le pôle Axelera, organisé autour des leaders de la chimie en Rhône-Alpes, vient aux ressources renouvelables par le biais des préconisations de la chimie verte. Le pôle IAR coexiste avec le réseau Biohub. Ces deux communautés amorcent une convergence dans l'association « chimie du végétal », à l'origine initiée par Roquette, qui « *a pour vocation de réunir les acteurs économiques majeurs des agro-industries, de la chimie et de leurs industries clientes en aval, qui s'engagent dans le développement industriel de la chimie du végétal en France et en Europe* ». Les rapprochements entre les pôles Axelera et IAR illustrent l'effort de formation de patrimoines productifs collectifs dans leur constat de la « *nécessité de créer un*

- (12) AGRICE a été le point de rencontre autour des valorisations agricoles non-alimentaires entre les organisations professionnelles des oléagineux (ONIDOL), des céréales (AGPB) et des betteraves (CGB) et les organismes publics de recherche susceptibles de leur apporter des ressources (l'Institut français du Pétrole, l'INRA, le CNRS et l'ADEME) sous l'égide des ministères chargés de l'Agriculture, de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement. Les sociétés Totalfina, Elf, Limagrain et Edf les rejoignent puis la structure sera renouvelée en 2001 pour une période de six ans avec un partenariat élargi aux acteurs suivants : les organisations de recherche du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), les sociétés Arkema, Bayer Cropscience, Cerestar France, Eiffage Travaux publics, L'Oréal, Rhodia, le financeur Oseo. Agrice sera dissoute et relayée par un programme Biopolymères en 2008.

“pilote” de filière qui rassemblerait d’amont en aval tous les acteurs potentiels de la filière bio-ressources » (Axelera News Letter, n° 7, 2007, p. 2).

2.2. Trois voies de mobilisation sur des espérances technologiques

La notion d’espérances technologiques (Brown *et alii*, 2003) vise à décrire le fait que les acteurs s’emparent des avancées scientifiques, pour les traduire dans l’exploration de cycles de développement d’opportunités technologiques particulières, et tester des scénarios d’articulation entre l’offre et la demande spécifiques. Le fait de former des « promesses technologiques initiales » trop optimistes – ce qui a été souvent le cas pour les usages des ressources agricoles comme en témoignent les annonces de construction de capacités de production tout au long des années 1990 – ne doit pas faire oublier tout l’intérêt de ces représentations initiales.

Leur simple énoncé a des effets économiques réels : faciliter l’attention des financeurs, stimuler l’élaboration d’agendas techniques et politiques qui permettent de constituer des « espaces protégés » sur des niches de développement qu’on traite comme du « patrimoine », c’est-à-dire qu’on cherche à préserver des calculs de rentabilité tant qu’ils ne sont pas à maturité.

Un exemple d’expression du mythe rationnel et des espérances technologiques liées à la chimie doublement verte dans un « review » scientifique

« Green materials are the wave of the future. There is immense opportunity in developing new bio-based products. New environmental regulations and societal concern have triggered the search for new products and processes that are compatible with the environment. The incorporation of bio-resources in composite materials can reduce further dependency on petroleum reserves. The major limitations of present biodegradable polymers are their high cost. Renewable resource-based bioplastics are currently being developed, further research should overcome the performance limitations » ; (...) « Eco-friendly bio-composites from plant-derived fiber (natural/biofiber) and crop-derived plastics (bio-plastic) are novel materials of the twenty-first century and would be of great importance to the materials world, not only as a solution to growing environmental threat but also as a solution to the uncertainty of petroleum » (Mohanty *et alii*, 2002, p. 20).

Les interviews d’un certain nombre d’experts nous ont conduits à identifier au début des années 2000, trois voies de mobilisation sur des cycles d’espérances technologiques qui structurent les stratégies de substitution des produits d’origine fossile.

La première consiste à chercher à profiter des qualités des différents composants de la plante, et de la complexité du vivant. Les bétons de chanvre ou les composites intégrant des fibres de lin (pour réduire l’usage de la fibre de verre comme matrice des résines de bateau de plaisance ou dans l’automobile) en sont de bonnes illustrations (Garnier *et alii*, 2007, *op. cit.*) ; cette stratégie est mise en avant particulièrement clairement dans le discours de Vegeplast qui se

place sur le marché de substitution de la *pièce plastique à usage limité dans le temps*, avec le Vegemat® un composite décrit comme tirant ses propriétés de la présence simultanée des fibres (rôle de renfort qui améliore les propriétés mécaniques), de l'amidon (propriétés thermoplastiques), des protéines (propriétés thermoplastiques), des lipides (action lubrifiante utile dans les process) et des additifs (naturels évidemment). Cette voie ne peut pas être considérée comme le seul apanage de petites entreprises : par exemple, Dupont communiquera en 2008 sur un produit du même type, le « Biomax® TPS Renewably Sourced™ » repris à la société australienne Plantic.

La déstructuration de la plante conduit à une autre stratégie consistant à isoler un polymère naturel (l'amidon par exemple) pour le « fonctionnaliser » c'est-à-dire lui apporter des fonctions spécifiques intéressant un marché ; le traitement peut être chimique (par addition d'un réactif), ou photochimique (par ex. greffage d'additifs organiques sur l'amidon par traitement sous rayonnement), thermique et mécanique afin de le doter des qualités fonctionnelles recherchées. Le polymère fonctionnalisé peut également entrer grâce à ces traitements dans des composites. Une partie du programme régional champardennais Amival portait sur ce type de procédés ; le programme Lignostarch mélange deux polymères naturels, lignine et amidon, la lignine étant un hydrophobant de l'amidon. Roquette revient début 2009 vers une communication sur des polymères fonctionnalisés (Gaiahub).

La troisième voie est celle de la « bioraffinerie » qui pousse la déstructuration de l'amidon, de la cellulose et des hémicelluloses de la plante pour obtenir les « building blocks » (13) de l'industrie chimique. Elle consiste à prendre acte de la structure de l'industrie chimique. Sa division verticale du travail a pour point de départ des « grands intermédiaires » (Buffenoir, 2007). Ce sont donc ces grands intermédiaires qui sont désignés comme cibles de substitution. Les cas des polyacides lactiques (PLA), sont éclairants de ce point de vue : dans son survey de 1998, le chercheur de Cargill, J. Lunt présente encore les deux voies, la voie pétrochimique d'origine, qui a permis la mise au point des PLA et la voie fermentaire microbienne de production de l'acide lactique à partir de matières renouvelables (Lunt, 1998). Il s'agit, à cette époque, d'une stratégie de substitution « terme à terme ». De la même façon, des programmes récents visent à optimiser un process de production de

(13) Les building-blocks peuvent être définis comme des molécules de faibles masses moléculaires (<250-300) possédant au moins une fonction chimique réactive. La fonction réactive permet des ré-assemblages moléculaires. Ces molécules constituent donc dans le langage du chimiste véritablement des « briques moléculaires » comme dans un jeu de LEGO. Les amidon, glucose, fructose, etc. ou gaz de synthèse « biobasés » extraits des plantes sont considérés comme des plates-formes intermédiaires de production de ces monomères building-blocks qui vont entrer dans la chimie.

ce grand intermédiaire traditionnel de la pétrochimie qu'est l'éthylène, à partir de la chimie biosourcée (éthanol) et d'un procédé enzymatique.

Au vu de ce qui vient d'être exposé, il est nécessaire de prendre acte du maintien d'une variété de sentiers technologiques. Le maintien de cette variété traduit l'incertitude fondamentale perçue par les firmes sur l'avenir de la compétition entre les différentes filières technologiques possibles. Dit autrement, les processus d'apprentissage « extensifs » (ou apprentissages de la diversité, cf. Foray, 1994 ; Larrue, 2004) sont loin d'être terminés. Ces processus sont d'autant plus importants dans le cas qui nous occupe que le monde agro-industriel cherche à valoriser l'ensemble de la plante. Il se trouve donc face au problème de savoir s'il doit trouver une méthodologie qui permette de faire subir la même stratégie de transformation à tous les co-produits de l'activité de transformation des plantes – par exemple la transformation de toutes les parties de la plante en gaz de synthèse – ou s'il doit explorer (à des coûts qui peuvent être importants) pour chaque co-produit, des solutions technologiques qui se situent dans des mondes de production différents.

Les acteurs cherchent aussi à délimiter des champs stratégiques, à l'intérieur desquels se fera la focalisation de ressources matérielles ou relationnelles et de recherche (14) et à y attirer d'autres acteurs par ailleurs concurrents ; ces champs sur lesquels sont mobilisés les réseaux socio-techniques et scientifiques peuvent être celui d'une matière première (le chanvre, le miscanthus, l'amidon, etc.), d'un grand intermédiaire dont il faudrait explorer les opportu-

- (14) La théorie de tels champs peut être faite à partir d'une approche bourdieusienne des champs, car on en trouve l'ensemble des composants, dont des *habitus* réglant les comportements stratégiques, une logique de *position* à l'intérieur du champ et l'*illusio* conduisant à un acteur à penser que ce champ est le lieu pertinent pour déployer ses activités. En tant qu'univers social, le champ bourdieusien est le lieu où les agents qui, occupent une position dans le champ sont à la fois agis par leurs *habitus* et agissants, participant au constant rééquilibrage du champ et à la constante redéfinition de ses enjeux (Lahire, 1999). Il contient un *principe d'inclusion* au sens où il s'agit d'un microcosme qui s'il est inclus dans l'espace social global, est défini par rapport à cet espace du fait de sa (toujours relative) autonomie. Il se constitue historiquement autour d'une loi qui lui est propre et le rend relativement indépendant des logiques économiques externes (l'innovation est en son sein inappréciable selon ces critères externes). L'autonomie du champ se mesure à sa capacité de « *réfraction* » des déterminants externes ; il n'est jamais complètement le « *reflet* » de rapports de force socio-économiques extérieurs au champ, mais constitue une « *médiation spécifique* » entre les logiques externes et internes. Le champ est donc un espace structuré de positions, un réseau de relations objectives entre des agents qui s'interdéfinissent par un ensemble de compétences spécifiques communes. Dans le cas précis des agromatériaux, c'est la communauté épistémique des membres du champ qui accumule cet ensemble de compétences spécifiques. Les luttes ont pour objet l'appropriation de cet ensemble de compétences mais peuvent aussi avoir pour objet sa redéfinition ; en ce cas, elles peuvent modifier profondément la configuration du champ en redistribuant radicalement le capital selon les nouvelles normes imposées. Ce que Bourdieu nomme capital spécifique est de notre point de vue du *patrimoine collectif*. Ceci s'explique car des acteurs peuvent être à la fois concurrents sur un aspect de l'action collective et membres de groupes non concurrents au sens de Cairnes (Dimou, 2006) sur un autre aspect.

nités d'utilisation (le glycérol, l'acide succinique, le furfural, etc.) ou d'un grand procédé autour duquel il faut stabiliser des communautés d'usage (la bioraffinerie).

À chaque fois, ces acteurs se présentent comme porteurs d'un schéma idéal de développement, racontant une solution porteuse de développement durable à la fois du point de l'émission de CO₂ et du point de vue du marché. Comment ce schéma idéal, expression directe d'un mythe rationnel évolue-il lorsqu'un *désappointement* (Brown, 2003, Ruef & Markard, 2006) apparaît ? En particulier lorsque les résultats des travaux exploratoires font prendre conscience que le mouvement de substitution va être plus complexe et plus long que prévu initialement ? La soutenabilité de l'effort de transformation du système productif impose que des dispositifs de justification, en l'absence de résultats encore tangibles, permettent de « faire tenir » les acteurs de la recherche (entreprises, laboratoires et pouvoirs publics ou privés) dans la direction indiquée, ce qui suppose que les attentes de résultats sont plus fortes que les déboires technologiques. Ces évolutions du mythe rationnel sont repérables à partir des stratégies d'adaptation sur les biopolymères, d'une part, et du concept de raffinerie végétale d'autre part.

2.3. Les redéploiements du mythe rationnel

En effet, deux grands tournants ont été opérés dans la gestion de ces champs. Le premier qu'on peut dater du début des années 2000, au vu de la littérature, est la remise en cause des champs stratégiques de l'amidon et du PLA, produits conçus un moment comme les bases de « voies royales » du développement, notamment vers la plasturgie. Ces voies apparaissent comme ne permettant pas d'atteindre les fonctionnalités recherchées, sauf à les enrichir de combinaisons et complémentarités qui n'avaient pas été envisagées à l'origine (2.3.1.). Le second, que l'on peut situer à partir des rapports officiels américains et européens, comme se situant dans la période 2004-2005 (Wolf *et alii*, 2005) est la formalisation de la démarche stratégique consistant à transformer la raffinerie verte en « bioraffinerie » chargée de produire de grands intermédiaires chimiques (2.3.2.).

2.3.1. Amidons modifiés et « polymères à tout faire » : vers une spécialisation ?

Durant les années 1990 les amidons TPS (= amidons thermoplastiques), ou PLA obtenus par fermentation des sucres ou polymères microbiens présentent des ensembles de revendications extrêmement larges. Cette tendance à prétendre prendre en charge à *elles seules* une très large gamme de fonctionnalités est contre-intuitif si l'on se réfère à ce que nous savons des objets technologiques : rares sont ceux qui peuvent se présenter comme le produit de technologies unitaires, tableau 2 (page suivante).

TABLEAU 2 : Ubiquité du PLA : des espérances technologiques autour d'un polymère-clé ; mais qui ne spécifient pas dans quelles combinaisons technologiques ce polymère doit entrer pour être fonctionnel

Main application areas Example Industrial applications	Agriculture, forestry, Fisheries, Civil engineering and Construction industry
Medical applications	Bonding, Closure, Separation, Scaffold, Capsulation
Packaging and daily use applications	Bags, Food packaging, Packaging of consumer goods, Food tableware Bottles, Containers, Decorative parts, Films, Kitchenware, Labels, Laminates Non-wovens, Toiletries, Carpe

Source : Schwark F. (2009, p. 648)

Cette observation faite sur le PLA, est confirmée par celles sur les amidons dits TPS, dans lesquels on avait placé beaucoup d'espairs au début des années 1990, alors qu'il va apparaître au cours de la décennie qu'on ne connaissait pas suffisamment la structure fondamentale de leur matière pour les adapter aux fonctionnalités recherchées (15). Bastioli, (2001 : 355) constate au bout de dix ans d'investissement dans le domaine que : « *In the sector of food packaging biobased materials are not used extensively because of the high price, the non ideal water barrier properties and the limited research efforts on the interaction between the packaging material and food products (...)* ». En suivant les évolutions de certains chercheurs sur la base de monographies, l'on a pu constater que la stratégie de recherche de modification des amidons natifs s'est transformée en deux temps, lorsqu'il apparut que les programmes de recherche marquaient le pas sur les fonctionnalités recherchées.

La gestion des premiers désappointements technologiques avait conduit durant les années 1995-2000 à ramener l'amidon à un simple matériau de charge. Celui-ci était mélangé à des polymères de synthèse issus du pétrole, comme le polycaprolactone, introduits pour prendre en charge les fonctionnalités recherchées – dont, de façon paradoxale, la biodégradabilité. Cette stratégie conduisait à des co-polymères plus fragmentables que réellement biodégradables. La polémique sur la biodégradabilité de ces produits (Jianmin Fang & Fowler, 2003 :83 (16), Ren, 2003) a conduit à fermer cette voie pour rechercher des copolymères d'ori-

- (15) Les chimistes interviewés livrent des récits dans lesquels ils décrivent les produits issus de la pétrochimie comme des matériaux « statistiques », « amorphes », « linéaires » alors que les amidons sont des matériaux difficiles car « très organisés », « hyperbranchés », « dotés de capacités d'autostructuration ».
- (16) « *In order to overcome the inherent hydrophilicity of starch, blends with conventional hydrophobic synthetic polymers (e.g. polyethylene or polypropylene) have been considered for the production of plastic bag and commodity products. However, the physical mixing of non-biodegradable polymers with 6-20 % of starch affords materials in which only the starch portion is biodegradable, leaving the porous and hardly biodegradable synthetic polymer behind. This approach, therefore, cannot be recommended* » (Jianmin Fang & Fowler, 2003 p. 83).

gine entièrement renouvelable (Bewa, 2006) au prix d'une recombinaison des communautés et des bases de connaissances mobilisées.

Une stratégie d'exploration systématique de toutes les associations possibles entre polymères issus du renouvelable va émerger, pour les combiner jusqu'à obtenir les qualités fonctionnelles attendues (17). La recherche se tourne ensuite vers d'autres logiques de complémentarités en explorant d'autres cycles d'espérances technologiques. Celles-ci obéissent aux tendances lourdes de la science du moment : l'exploration se fait en particulier autour de l'apport potentiel des nanosciences. Par exemple, des nanoclays issus de recherches à la frontière de la chimie minérale et organique (argiles organiquement modifiées) sont mobilisés pour fournir les propriétés fonctionnelles qu'on a considérées comme difficiles à atteindre avec les polymères naturels issus du renouvelable ; la montée du thème dans la littérature montre que les nanocomposites jouent, en raison de leur ubiquité, dans l'esprit de certains chercheurs le même rôle en terme de coordinateur du mythe rationnel que l'amidon TPS ou le PLA durant les années 1990 [voir par ex. Hasmutkh *et alii*, 2006, Chivrac *et alii*, (2006, 2007, 2008), Bordet *et alii*, (2008) et Joshi, Satish V. (2008) et les Bibliography of carbohydrate polymers/Carbohydrate Polymers 2006 à 2009], tableau 3 page suivante.

Cette recherche de complémentarités s'accompagne de deux réflexions. L'accent va être mis sur une combinaison recyclabilité/compostabilité des matériaux issus de la C2V plutôt que sur leur seule biodégradabilité. Les acteurs vont solliciter des experts pour les aider à positionner les polymères naturels en fonction de leurs capacités respectives en matière de substitution de polymères issus de ressources fossiles, plutôt que de continuer à en revendiquer des potentialités trop générales : c'est à cet endroit qu'ils cherchent à nouer des collaborations en vue d'apprentissages sur les utilisations, et que l'on retrouve la logique de patrimoines collectifs (18), tableau 4, *infra*.

2.3.2. L'ancrage du concept de bioraffinerie dans le paysage économique

Le concept de raffinerie végétale a été, à son origine, dominé par son usage pour des productions de biocarburants. Ceux-ci présentaient entre autres le double inconvénient d'être difficiles à équilibrer économiquement et de produire des co-produits sinon indésirables, du moins difficiles à abandonner en déchets ultimes, dans une logique de chimie verte. Au début des années 2000, le concept apparaît comme présentant des éléments de fragilité, à la fois en termes d'acceptabilité sociale et pour des raisons techniques, masqués un moment par

(17) Voir par exemple l'évolution du programme de travail de L. Averous (<http://averousl.free.fr/Publication.html>).

(18) Par exemple, en plasturgie le réglage des machines est toujours très délicat, d'où l'idée de coopérations et de partages d'informations pour approfondir des potentialités réelles et non théoriques.

TABLEAU 3 : Polymères, entre revendications larges de substitution et début de spécialisation sur des qualités fonctionnelles précises

Polymère visé par la substitution	Polymère « naturel »	Producteurs	Applications
Polystyrène	Amidon thermoplastique (=TPS)	National Starch and Chem. (US): Eco-foam; Novamont, Italie: Mater-Bi®; Rodenburg, Netherlands: Solanyl®; BIOP, Germany: BIO-Par®	Applications d'emballages, mousses matériaux de remplissage en vrac, pièces moulées
LDPE (polyéthylène basse densité) et HDPE (haute densité)	PLA (voie fermentaire)	Copolymers de Natureworks PLA, joint venture between Cargill and Teijin Ltd Japan Hyacil, in the Netherlands, and Toyota's Ecoplastics division are planning commercial production.	Emballage alimentaire (transparence, bonnes propriétés mécaniques et perméabilité à l'humidité convenable mais pas à temp.>60°). Mélanges de fibres en intérieurs automobile, tissus d'ameublement et de garnitures
Polypropylène PP LDPE HDPE	Polysaccharides microbiens (PHA PHB) polyhydroxyacides de la famille des polyesters	Proctor & Gamble (Nodax®) Metabolic (Biopol®) USA, Biomer®, RFA	PHB: point de fusion, cristallinité et température de transition vitreuse semblables à celles du polypropylène (PP), meilleure résistance aux solvants et à la lumière ultraviolette.
Polyesters	Biopolymères microbiens polyesters composés de deux monomère différents (diacide -succinique + dialcool comme 1,3-Propanediol)	Metabolic explorer (fr.) polyesters textiles de hautes Sorona®: résine polymère thermoplastique d'origine pétrolière puis faites à partir de Bio-PDO.	Polyesters textiles de hautes performances, soins cosmétiques et corporels et applications industrielles des glycols. En formulation dans une variété de produits incluant les composites, les laminés, les tissés, les polyesters aliphatiques, les antigels
Additif multifonctionnel	Nanoclays	Southern Clay Products, Inc. (filiale de Rockwood Sp., rachat en déc 2005 du développeur de Süd-Chemie) Cloisite® and Nanofil®: additifs (organiquement modifiés à l'échelle nanométrique). Revendiquent d'améliorer les propriétés des pièces injectées pour l'industrie automobile, des emballages souples et rigides (films, bouteilles, plateaux), en électronique et dans le revêtement de fils et de câbles	La « Melt intercalation » émerge comme méthode car elle est considérée comme compatible avec les process industriels habituels (extrusion et injection molding) et qu'elle permettrait l'absence de solvants. Ces améliorations comprendraient une résistance supérieure, l'augmentation de modules de stockage, la réduction des distorsions de chaleur, la baisse de la perméabilité au gaz et de l'inflammabilité, et une plus grande biodégradabilité.

Sources : tableau réalisé à partir de Bewa (2006),
Joshi, Satish (2008),
complété par notre veille internet (Nieddu 2009)

TABLEAU 4 :
Un exemple de requalification du potentiel de substitution du PLA

	LDPE	PP	HDPE	PS	HI-PS	PVC	PET	PA
Potentiel	+	+	+	+/-	+/-	-	++	+/-

Substitution : ++ ; probable : + ; possible : +/- ; douteuse : -
Source : Kosior & alii, 2006

les espoirs générés par la montée des prix du pétrole, mais exacerbé par les tensions que ses espérances ont générées sur les marchés alimentaires.

a) Une requalification globale de la cohérence du projet de raffinerie végétale

D’où une stratégie consistant à consolider collectivement le projet en le requalifiant : le concept de « bioraffinerie » vise précisément à codifier une philosophie générale de l’usage dans l’industrie chimique de la matière première agricole (point de vue technique) et de sa cohérence en termes de développement durable (point de vue sociétal). Diverses opérations vont être menées par les acteurs américains et européens dont un groupe de travail conjoint Europe-États-Unis qui débutera en 2004, et des projets européens financés en vue d’explorer l’acceptabilité sociale du concept (Biorefinery euroview et Biopol) : ces projets, supportés par le 6^{ème} PCRD sont explicitement dédiés à la construction de la « vision » à long terme du développement de la bioraffinerie (Christian *et alii*, 2007). Simultanément une étude des réactions et de l’acceptabilité sociale du concept est commanditée (Peck *et alii*, 2009) (19).

Les récits produits dans le cadre des projets européens *Biorefinery Euroview et Biopol* mettent en avant la cohérence du concept en termes de développement durable. La bioraffinerie n’est plus présentée comme une unité de production indépendante, mais un ensemble localisé d’entreprises utilisant de façon croisée les coproduits des unes ou des autres. Les descriptions de ces complexes industriels organisent donc une mise en scène des économies de flux et de matières, répondant aux principes d’écologie industrielle illustrés par la success story du complexe de Kalundborg.

- (19) De la même façon, les acteurs de la bioraffinerie vont chercher à prendre leurs distances par rapport à l’engouement récent pour les biocarburants. Le discours récent insiste sur la raffinerie des parties non-alimentaires de la plante et l’usage de ressources nouvelles (déchets urbains et ligno-celluloses). L’appel à communication du congrès de décembre 2008, « *Biopolymères, biomatériaux, chimie verte* », s’inscrit dans le cadre du programme « Chimie pour le développement durable », et est introduit par les considérations suivantes : « *Les besoins énergétiques représentent à eux seuls environ 90 % de la consommation de pétrole. Ils ne pourront être satisfaits que très partiellement par la production de biomasse végétale et ceci au risque d’induire des effets néfastes sur l’équilibre des marchés des matières premières agricoles et sur la disponibilité des ressources alimentaires. Par contre, le développement pour les valorisations en chimie et matériaux est un enjeu qui paraît compatible avec la taille plus limitée de ces marchés (environ 5 % du carbone fossile) et avec la valeur ajoutée supérieure des produits pétrochimiques comparée à celle de l’énergie* ».

b) Le recentrage de la bioraffinerie sur un nombre limité de grands intermédiaires

Le projet *Biorefinery Euroview* recense quatre types de bioraffineries en fonction des matières premières d'origine : utilisant les céréales, la forêt et les lignocelluloses, les huiles, et enfin « verte » au sens de l'utilisation de déchets. Poser cette diversité revient à rendre le « projet bioraffinerie » robuste : le développement ne dépend pas d'une seule ressource, le concept peut s'adapter à de grandes familles de terrains, ce qui permet d'élargir les coalitions d'acteurs autour d'un modèle.

Les documents sur la bioraffinerie proposent souvent une cartographie de la très grande variété des possibilités théoriquement ouvertes : par exemple, la bioraffinerie à base de céréales décrit d'un côté l'extraction d'amidons (transformés notamment en amidons TPS ou hydrolysats pour produire de l'éthanol et d'autres précurseurs), des protéines et des huiles (conduisant à des hydrolysats) ; de l'autre la masse lignocellulosique des pailles subit, elle aussi, un *cracking* qui conduit à une « dépolymérisation » des chaînes de polysaccharide à des mélanges de sucres du type pentoses ou hexoses (C5 ou C6) et à des résidus de lignines qui peuvent être gazéifiés puis transformés par procédés Fischer-Tropsch en carburants ou précurseurs chimiques.

Mais comment ordonner cet ensemble quasi infini d'opportunités de transformation, alors que les schémas apparaissent d'une si grande plasticité qu'on imagine pouvoir produire n'importe quels grands intermédiaires « équivalents » aux intermédiaires issus du pétrole à partir de substrats agricoles, voire tout simplement ces intermédiaires pétroliers eux-mêmes (l'éthylène, le butadiène par exemple) ? Comment réduire et orienter cette variété vers des marchés réels ? On peut remarquer à cet endroit un approfondissement de la logique de formation de patrimoines productifs collectifs : les exercices de prospective vont proposer de réduire le nombre des grands intermédiaires sur lesquels les acteurs publics et privés sont invités à concentrer leurs efforts : ainsi le rapport américain de 2004 au département de l'énergie dégage un « top 12 » des « grands intermédiaires » identifiés comme prometteurs sur dire d'experts. Les enjeux industriels se déplacent alors vers cette liste limitée de grands précurseurs et leurs usages (Werpy & Petersen ed., 2004 ; McKinlay *et alii*, 2007), dont émergent plus particulièrement le glycérol, l'acide succinique, et le sorbitol et ses dérivés.

c) Les entreprises entre appropriation et collaboration

La dynamique attendue des « roadmap » technologiques sur les grands intermédiaires est l'appropriation de leurs process de production par des firmes privées. Si ce mouvement d'appropriation économique est avéré, notre veille sur la communication de ces firmes amène à constater qu'elles ne peuvent pour autant pas s'affranchir de la mise en commun des bases de connaissances issues des biotechnologies.

D'un côté, la stratégie de production d'intermédiaires permet une décomposition du système productif. Ceci repose probablement sur l'idée que le rem-

placement des intermédiaires pétroliers permet d'intégrer la chimie sans entraîner de changements majeurs dans ses circuits économiques et les positions d'acteurs concernés. De l'autre, comme dans le cas des plastiques issus d'amidon ou de PLA, les dynamiques de combinaison et d'organisation des complémentarités entre technologies semblent inachevées, à la fois sur le segment de production des produits agro-industriels intermédiaires et dans les apprentissages que ce segment doit faire avec son aval – la nouveauté tenant probablement au fait que ces apprentissages commencent à être explicitement intégrés dans certains programmes (Garnier *et alii*, 2008), (20).

On remarque, en effet, que tout en visant l'appropriation de la production des grands intermédiaires désignés collectivement comme cibles, les firmes importantes du secteur tentent toutes de nouer des collaborations. Ainsi, outre l'isosorbide, Roquette revendique à la fois l'exploration de l'acide succinique et du glycérol, mais, pour ce faire, noue des collaborations avec d'autres entreprises susceptibles de leur apporter un portefeuille de technologies, et des universités propriétaires de brevets sur les enzymes utilisables en catalyse (l'université Rice pour l'acide succinique). Sur les mêmes grands intermédiaires, ARD, l'entreprise de recherche et développement portée par le consortium de coopératives céréalières et sucrières champardennaises décline un ensemble de projets de valorisations en essayant des filiales par produits. Pour l'acide succinique, elle monte la société Bioamber en joint-venture avec un apporteur de technologies détenant des licences de brevets d'enzymes de fermentation de

Un « cas d'école » : l'isosorbide

« ...Un produit se détache en particulier parmi les candidats (biosolvants, biolubrifiants...) que l'industrie des biotechnologies blanches – et le programme BioHub – s'active à développer pour les proposer au marché : l'isosorbide. Issu de la transformation de l'amidon des céréales, ce produit peut participer, en tant qu'intermédiaire de synthèse ou comonomère associé, à la production de diverses matières plastiques comme le PET (polyéthylène téréphthalate). À noter toutefois que seule la première étape, celle de transformation du glucose, fait appel à des processus de dégradation enzymatique. Les deux étapes ultérieures, d'hydrogénation et de déshydratation, sont pour leur part intégralement chimiques. Cette mixité des procédés illustre assez bien le niveau de développement actuel des biotechnologies blanches qui nécessitent encore, le plus souvent, des process traditionnels de la chimie de synthèse. Sur le plan technologique, l'emploi de l'isosorbide présente en particulier un gros intérêt pour l'industrie des plastiques : en effet, il confère une bien meilleure résistance thermique aux polymères et spécialement au PET. Il diversifie ainsi les applications de ce dernier notamment pour l'embouteillage à chaud » (21).

Extrait de Arnaud Queyrel (2007) *Chimie verte, Une solution à (bien) évaluer*, http://www.bulletins-electroniques.com/ti/139_06.htm

- (20) Le projet Matoren dans le CPER régional champardennais prévoit par exemple l'exploration des potentialités en coopération avec le pôle plasturgie d'Oyonnax, alors que les programmes précédents ne prévoyaient que des engagements individuels de firmes visant à préparer leur appropriation des technologies nées dans le sous-système scientifique.
- (21) Depuis la stratégie d'utilisation de l'isosorbide s'est diversifiée : en 2009, Roquette annonce un diester d'isosorbide le Polysorb ID, dans une fonction de plastifiant alternative aux phtalates visés par la directive Reach.

l'United States Department of Energy (Erbert, 2007), la société DNP Green Technology. (3) La start-up Metabolic Explorer présente sur son site un modèle économique dans lequel elle propose de négocier des licences de production exclusives par région ou par application.

Il faut donc noter que si chacun de ces acteurs détient une part de maîtrise des savoir-faire, il reste une interrogation forte sur la capacité à produire les process complets allant jusqu'à des objets finals. Arkema, qui n'est pas le premier venu en chimie, a dû développer une collaboration avec un laboratoire allemand pour évaluer la performance de nouveaux catalyseurs sur des transformations du glycérol en acroléine et acide acrylique. Ce qui est le signe que les process sont loin d'être optimisés (22).

Le fait que les entreprises ne puissent pas se détacher de la constitution des patrimoines collectifs nous semble également attesté par ce qu'elles revendiquent en matière d'installation de capacités de production. Par exemple, ARD revendique l'installation d'une unité de 2000 t, annoncée en décembre 2008 pour septembre 2009 de la même façon que Metabolic Explorer revendique la construction de pré-pilotes. Roquette et DSM annoncent un projet d'une unité pilote « de plusieurs centaines de tonnes à Lestrem » sans indiquer de capacité de production pour la fin 2009 (23).

L'information disponible semble donc indiquer que si les acteurs de la chimie du végétal revendiquent dans leur communication des implantations, c'est aussi une façon de s'annoncer comme partenaires sérieux, et de maintenir la crédibilité du mythe rationnel autour duquel elles cherchent à favoriser l'agglomération

- (22) Arkema, qui est un acteur majeur dans la chimie des acryliques s'était tourné vers HTE car cette société est spécialisée dans l'expérimentation intensive de catalyseurs. Le projet consistait à évaluer les performances de nouveaux catalyseurs susceptibles d'intervenir dans les réactions de conversion en acroléine et en acide acrylique du glycérol co-produit du biodiesel. Le choix d'Arkema, qui détient pourtant déjà plusieurs brevets dans ce domaine, s'est porté sur les laboratoires de HTE à Heidelberg car ceux-ci utilisent une technologie exclusive de tests en parallèle permettant de réduire les durées d'expérimentation nécessaires à la qualification des catalyseurs. Cette approche dite « haut débit » montre l'importance prise par les nécessités d'optimiser des process nouveaux.
- (23) Ces projets doivent bien sûr être rapportés aux capacités de production des grands intermédiaires de la pétrochimie comme l'éthylène pour lequel Buffenoir (2007) situe les unités de production actuellement pertinentes autour de 1,7 million de t/an; les derniers agrandissements par Technip en Russie portaient sur une augmentation de capacité de 400 000 t, tandis que Linde a récemment emporté un marché en Inde qui fera partie selon les dirigeants de Linde, d'un complexe pétrochimique qui produira 1,1 million de tonnes d'éthylène, 400 000 tonnes de propylène, 150 000 tonnes de benzène et 115 000 tonnes de butadiène par an. La seule annonce d'importance qu'on a repérée du côté des agro-resources est la déclaration du brésilien Braskem, avec un polyéthylène et un polypropylène issus de sucre de canne, et la mise en place d'une unité de production à l'échelle industrielle de polyéthylène vert d'une capacité de 200 000 t/an, dont la construction commencerait en août 2010.

des coordinations dont ils ont besoin, non seulement pour faire exister de nouveaux produits intermédiaires, mais aussi pour finaliser ces demi-produits.

CONCLUSION

On a cherché, dans ce récit des recompositions sectorielles conduites par les acteurs des agro-industries, à retracer les modalités de mobilisation non seulement des acteurs économiques, mais aussi du monde scientifique, pour constituer le socle de ce qui apparaît potentiellement comme un nouveau secteur. Il nous semble à cet endroit qu'une description fine des origines des acteurs, des sentiers qu'ils ont explorés, des ressources institutionnelles qu'ils ont su mobiliser ou des verrous scientifiques et technologiques concrètement rencontrés ont une portée explicative que ne pourraient avoir des analyses en termes de prix et de coûts de production (sauf au moment où ceux-ci peuvent être estimés de façon complète et plausible par les acteurs). Et ce, y compris pour discuter d'éventuels abandons ou processus de sélection des voies que nous avons pointées, discussion dont on conçoit l'importance, mais qui n'est pas le sujet du présent article.

La notion de patrimoines productifs collectifs a été utilisée en dynamique puisque ceux-ci se structurent autour de mythes rationnels. Il s'agit de rendre compte d'une situation et d'une période de focalisation d'acteurs autour de sentiers technologiques, qu'ils construisent aussi en vue d'organiser le terrain sur lequel ils vont concourir. Adopter ce point de vue permet aussi, de notre point de vue, de renouveler l'étude de la façon dont le monde de la science est sollicité, et d'interpréter les signaux envoyés par les acteurs de voies concurrentes. Si le monde de la bioraffinerie « plante entière » est confronté et contesté par d'autres voies technologiques, il faut lire à la même aune, la prétention de ces dernières à s'installer comme productrices des grands intermédiaires de synthèse, pour aller au-delà des effets d'annonce que tout acteur cherche à produire périodiquement. Ainsi, l'annonce par Total en mars 2008 d'une unité prépilote, et des annonces américaines confirment que la voie ancienne du méthanol à partir de biomasse mais aussi de gaz de charbon ou même de résidus de pétrole, reste d'actualité. Mais il faudrait pouvoir en faire l'inventaire réel – par exemple en termes de cycle de développement du mythe rationnel et des désappointements : il semblerait que dans les process de gazéification, l'on butte sur des verrous en termes de purification des gaz.

De même, la voie des micro-algues représente un autre « monde de production » qui connaît depuis début 2009, une vogue sans précédent. Les pétroliers y voient une possibilité d'échapper à la pression des fournisseurs de biomasse en lançant leur propre production « hors sol » ; des acteurs cités plus haut expriment des marques d'intérêt, alors qu'ils sont aussi engagés sur la voie de la bioraffinerie des céréales. Toutefois il s'agit bien à nouveau d'un mythe rationnel : un communiqué de presse récent d'Alcimed (30 mars 2009) souligne que les problèmes techniques (l'extraction de l'huile des algues n'est pas acquise) et environnementaux sont loin d'être résolus pour les microalgues. Les espérances technologiques des « bioalgues » exprimées aujourd'hui (production d'hydrogène, de biocarburants, ou de biogaz) nécessiteront encore des

travaux de recherche et développement importants. « *L'industrialisation de l'énergie à partir de microalgues ne pourra se faire qu'à condition que de nombreuses compétences collaborent pour lever les barrières existantes : génie génétique, phycologie, biochimie, pétrochimie. Les experts mondiaux sont peu nombreux et les savoir-faire ont tendance à se disperser. Il est nécessaire qu'en Europe, des collaborations fortes entre industriels et chercheurs de ces différents domaines voient le jour comme aux États-Unis pour participer à la ruée vers l'or vert* », conclut le communiqué. On ne peut mieux illustrer les contraintes d'apprentissage et d'engagement dans la construction de patrimoines collectifs, et donc la nécessité de les documenter.

BIBLIOGRAPHIE

- ANASTAS P.-T., WILLIAMSON T.-C. (ed.) (1996), « Green Chemistry – Designing Chemistry for the environment », Washington, DC: American Chemical Society, ACS symposium series 626, 251 p.
- ANASTAS P.-T., WARNER J.-C. (1998), *Green Chemistry – Theory and practice*, Oxford University Press, 135 p.
- AVEROUS L. (2007), « Cellulose-based biocomposites : comparison of different multiphasic systems », *Composite Interfaces*, vol. 14, n° 7-9, pp. 787-805.
- BASTIOLI C. (2001), « Global status of the Production of Biobased Packaging Materials », *Starch/Stärke* 53 (2001) 351-355.
- BENSAUDE-VINCENT B. (2005), *Faut-il avoir peur de la chimie ?*, éd. Empêcheurs De Penser En Rond, 305 p.
- BENSAUDE-VINCENT B., SIMON J. (2008), *Chemistry, the impure science*, Imperial College Press, 262 p.
- BEWA HILAIRE (2006), « Matériaux polymères biodégradables et applications », note de synthèse II, *Ademe*, 16 p.
- BORDES P., POLLET E., BOURBIGOT S., AVÉROUS L. (2008), « Structure and properties of PHA/clay nano-biocomposites prepared by melt intercalation », *Macromolecular chemistry & physics*, vol. 209, n° 14, pp. 1473-1484.
- BROWN N., Van LENTE H & RIP A. (2003), « Expectations In and About Science and Technology », Background Paper for the Expectations in S&T Workshop, 13-14 June, Utrecht, The Netherlands.
- BROWN Nik (2003), « Hope Against Hype – Accountability in Biopasts, Presents and Futures », *Science Studies*, vol. 16(2003), n° 2, 3-21.
- CHIVRAC F., POLLET E., SCHMUTZ M., AVÉROUS L. (2008), « New approach to elaborate exfoliated starch-based nano-biocomposites », *Biomacromolecules*, vol. 9, n° 3, pp. 896-900.
- CHRISTIAN D. *et alii* (2007), « La bioraffinerie : un concept qui fait son chemin », *Biofutur*, 2007, n° 282, pp. 20-23.
- COLONNA P. (ed.) (2006), *La chimie verte*, Lavoisier, Tec & Doc, 532 p.
- COMBS J. (2007), « Building the european knowledge based bio-economy -the impact of non-food research (1988 to 2008) » Outputs from the EPOBIO project (EPOBIO: Realising the Economic Potential of Sustainable Resources – Bioproducts from Non-food Crops), *CPL Scientific Publishing Services Ltd*, (<http://www.biomatnet.org/>).
- DEPEYRE C. et DUMEZ H., « Le rôle du client dans les stratégies de coopération », *Revue française de gestion*, 2007/7, (176).
- DIMOU M. (2006), « J.-E. Cairnes : groupes non concurrents et organisation industrielle », *Revue d'Économie Industrielle*, n° 113 | URL : (<http://rei.revues.org/index249.html>).
- DOCKÈS P. (2002), « La nouvelle économie « institutionnelle », l'évolutionnisme et l'histoire » Journées d'étude Institutionnalisme et "évolutionnisme", Centre Walras, Lyon, 2-3 décembre 2002, miméo, 18 p.
- DUMEZ H., JEUNEMAITRE A. (2005), « La démarche narrative en économie », *Revue Économique*, vol. 56, n° 4, juillet, pp. 983-1005.
- FORAY D. (1989), « Les modèles de compétition technologique, une revue de la littérature », *Revue d'Économie Industrielle*, n° 48, 2^{ème} trim., 1989, pp. 16-34.

- FORAY D. (1991), « Dynamique économique et nouvelles exigences de l'investigation historique : "learning to love multiple equilibria" », *Revue Économique*, 1991, n° 2, pp. 301-314.
- FORAY D. (1994): « Les nouveaux paradigmes de l'apprentissage technologique », *Revue d'Économie industrielle*, n° 69, pp. 93-104.
- GARNIER E., NIEDDU M. (2009), « La mutation génétique d'un mythe rationnel : de la raffinerie du végétal à la révolution de la chimie doublement verte ? », colloque de Cerisy, *Ethnotecnologie prospective : l'empreinte de la technique, comment les techniques transforment la société*, du 2 au 9 juillet 2009 : (<http://www.ccic-cerisy.asso.fr/ethnotecnologie09.html>).
- GARNIER E., NIEDDU M., KUREK B. (2008), The coordination of the actors in the "doubly green chemistry" of Agro-materials, *Journées Biopolymères, Biomatériaux, Chimie Verte*, La Baule, les 4 & 5 décembre 2008.
- GARNIER E., NIEDDU M., BARBIER M., KUREK B. (2007), « The dynamics of the French hemp system and its stakeholders, published by the Haworth Press », in *Journal of Industrial Hemp – Production, processing and products*, pp. 67-88.
- GODARD O. (1990), « Environnement, mode de coordination et système de légitimité : analyse de la catégorie du patrimoine naturel », *La Revue économique*, 41(2), pp. 215-242.
- GODARD O (1993), « Stratégies industrielles et conventions d'environnement : de l'univers stabilisé aux univers controversés », in *INSEE-Méthodes, Environnement et Économie*, vol. 39-40, pp. 145-174.
- GONOD P.-F. (1991), « Le système technologique » in Arena et al. (ed) *Traité d'économie industrielle*, Economica, pp. 594-624.
- HATCHUEL A. (1997), « Comment penser l'action collective ? Théorie des mythes rationnels », in Tosel, A. et Damien R. (Eds.), *L'action collective*. Presses universitaires de Franche-Comté, pp. 177-202.
- HEKKERT M.-P. et al. (2007), « Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 74, Issue 4, May 2007, pp. 413-432.
- INRA (2005), « Valorisation non-alimentaire des produits agricoles », note prospective de synthèse, (www.inra.fr/content/download/5613/61153/file/FicheVANA.pdf).
- JIANMIN Fang and Paul FOWLER (2003), « The use of starch and its derivatives as biopolymer sources of packaging materials », *Food, Agriculture & Environment*, vol. 1(3&4) : 82-84. 2003.
- JOSHI Satish V. (2008), « Can Nanotechnology Improve the Sustainability of Biobased Products? The Case of Layered Silicate Biopolymer Nanocomposites », *Journal of Industrial Ecology*, 12, n° 3, pp. 474-489.
- KOSIOR E. et alii (2006), *Lightweight compostable packaging : literature review*, Published by The Waste & Resources Action Programme (www.wrap.org.uk), 48 p.
- LARRUE P. (2004), « Action collective et régimes technologiques dans les phases d'émergence : le cas du consortium PNGV », *Revue d'Économie industrielle*, année 2004, vol. 106, n° 1, pp. 31-48.
- LATIEULE S. (2006), « Les intermédiaires bio s'invitent dans la chimie », *Info Chimie Magazine*, 475, nov. 2006, pp. 6-9.
- Le MASSON P., WEIL B., HATCHUEL A. (2006), « Les processus d'innovation. Conception innovante et croissance des entreprises Paris », Hermès Lavoisier, 471 p.
- LORDON F. (1997), « Les systèmes d'innovation à l'ère de la globalisation », de B. Amable, R. Barré, R. Boyer, Economica, Compte rendu de lecture, in *L'Année de la Régulation*, vol. 1. 336-343.
- LUNT J. (1998), Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers, *Polymer Degradation and Stability*, 59 (1998) 145-152.
- MALERBA F. (2002), « New Challenges For Sectoral Systems of Innovation in Europe », *DRUID Summer Conference 2002 on Industrial*, Copenhagen, Denmark, June 6-8, 2002.
- McKINLAY J.-B., VIEILLE C., ZEIKUS J.-G. (2007), « Prospects for a bio-based succinate industry », *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 76, n° 4, septembre 2007, pp. 727-740.
- McMILLAN G. Steven, Francis NARIN, David L. DEEDS (2000), « An analysis of the critical role of public science in innovation: the case of biotechnology », *Research Policy* (29), 2000 :1-8.

- MOHANTY A.-K., MISRA M., DRZA L.-T. (2002), Sustainable Bio-Composites from Renewable Resources : Opportunities and Challenges in the Green Materials World, *J. of Polymers and Env.*, vol. 10, n° 1/2.
- NIEDDU M., GARNIER E. (2008), *Évaluation et changement technologique dans le développement soutenable, le cas des agromatériaux*, École Chercheurs de Cargèse, CNRS, 19-25 oct. 2008, (http://www.cnrs.fr/edd/recherche/fichiers/ET_EvalDur_Oct08/MNieddu.pdf).
- NIEDDU M. (2007), « Le patrimoine comme relation économique », *Économie appliquée*, vol. LX, n° 3, pp. 31-57.
- NIEDDU M., GAIGNETTE A. (2001), « L'agriculture française entre logiques sectorielles et territoriales (1960-1985) », *Cahiers d'économie et de sociologie rurales*, n° 37, pp. 47-87.
- NIEDDU M. *et alii* (1999a1), « La bataille des brevets a commencé », pp. 26-30 et (1999a2), « Biopolymères, une dynamique étouffée ? » in *Biofutur*, dossier « bioplastiques provenant de l'agriculture », n° 193, oct. 1999, pp. 22-26.
- NIEDDU M., BLIARD C., COLONNA P. *et alii* (1999b), « Biopolymères et agromatériaux : les entreprises prennent position », *Industries alimentaires et agricoles*, n° 11/12, nov.-déc., pp. 52-59.
- NIEDDU M. (1999), « Science et dynamiques économiques, le cas des biopolymères », in *Sciences de la Société*, Toulouse, n° 49, pp. 87-104.
- NEGRO S.-O., SUURS R.-A.-A., HEKKERT P. (2008), « The bumpy road of biomass gasification in the Netherlands : Explaining the rise and fall of an emerging innovation system », *Technological Forecasting & Social Change*, 75 (2008) 57-77.
- NELSON W.-M. (ed.) (2004), *Agricultural applications in Green Chemistry*, American Chemical Society, ACS symposium series 887, Washington (D.C.), 206 p.
- OLTRA V., LLERENA P. (2002), « Diversité des processus d'apprentissage et efficacité dynamique des structures industrielles », *Revue d'Économie industrielle*, année 2002, vol. 98, n° 1, pp. 95-120.
- PAVITT K. (1998), « Technologies, Products and Organization in the Innovating Firm: What Adam Smith Tells Us and Joseph Schumpeter Doesn't », *Industrial and Corporate Change*, 1998, vol. 7, issue 3, pp. 433-452.
- PECK P. *et alii* (2009), « Examining understanding, acceptance, and support for the biorefinery concept among EU policy-makers », *Biofuels, Bioprod. Bioref* (2009).
- PELEGRIN-BOUCHER E., GUEGUEN G. (2005), « Stratégies de "coopétition" au sein d'un écosystème d'affaires : une illustration à travers le cas de SAP », *Finance Contrôle Stratégie*, vol. 8, n° 1, mars 2005, pp. 109-130.
- PROCHAZKA F., ASSEZAT G. (2008), « Développement d'un matériau thermoplastique, biodégradable et hydrosoluble à base de protéines laitières », (http://gfp2008.ccsd.cnrs.fr/docs/00/32/33/92/PDF/resume_gfp2008.pdf).
- RUEFA A., MARKARD J. (2006), « What happens after a hype ? Changing expectations and their effect on innovation activities in the case of stationary fuel cells » *EASST Conference 2006*, August 23-26, University of Lausanne.
- SCHWARK F. (2009), « Influence factors for scenario analysis for new environmental technologies – the case for biopolymer technology », *Journal of Cleaner Production*, 17 (2009) pp. 644-652.
- VERT M. (2002), « Polymères de fermentation » : Les poly(acide lactique)s et leurs précurseurs, les acides lactiques, *L'Actualité chimique*, 2002, n° 11-12, pp. 79-82.
- WHITE H.-C., GODART F.-C., CORONA V.-P. (2008), « Produire en contexte d'incertitude « La construction des identités et des liens sociaux dans les marchés », *Sciences de la Société*, fév. 2008, n° 73, pp. 17-40.
- WOLF O. *et alii* (2005), *Techno-economic feasibility of large-scale production of bio-based polymers in Europe*, European Commission : Technical Report EUR, 22103 EN 256 p.
- REN X. (2003), « Biodegradable plastics : a solution or a challenge ? » *Journal of Cleaner Production*, 11 (2003) 27-40.
- VANHÉE Nathalie (2008), *La coordination des savoirs au sein de partenariats d'innovation*, thèse de Strasbourg I, (http://eprints-scd-ulp.u-strasbg.fr:8080/1018/01/VANHEE_Nathalie_2008.pdf), relevée le 25 déc. 2008.
- WOODHOUSE Edward J. and Steve BREYMAN (2005), « Green Chemistry as Social Movement ? » *Science, Technology, & Human Values*, vol. 30, n° 2 (Spring, 2005), pp. 199-222.