



Des logiques produits dans les régulations émergentes du secteur de la « chimie doublement verte » : le cas des formaldéhydes

Nicolas BEFORT¹, Martino NIEDDU²

¹ REGARDS (EA 6292, URCA)

² REGARDS (EA 6292, URCA)

WORKING PAPER – Ne pas citer sans autorisation

RÉSUMÉ.

La transition vers l’usage de ressources renouvelables (qui pourrait déboucher vers une « chimie doublement verte »), est l’enjeu de stratégies de long terme, portées par certains grands acteurs de l’agriculture et de la chimie et les institutions européennes, américaines et brésiliennes. Leurs actions visent à transformer les relations entre l’agriculture (passant de client à fournisseur) et la chimie dans ce qui pourrait devenir un nouveau secteur au sens régulationniste du terme – des dispositifs institutionnels et un régime dominant. Celui qui se dessine est une « chaîne de valeur » reproduisant la structure de la pétrochimie traditionnelle entre carburant liquides/chimie de base et chimie de spécialité. Nous discutons à partir d’une étude de cas sur les formaldéhydes, ce *dominant design*, afin de montrer qu’en réalité une diversité de patrimoines productifs collectifs est à l’œuvre dont il faut élucider les logiques internes et les enjeux en termes de développement durable.

ABSTRACT.

The transition toward the use of biomass (which could be a “doubly green chemistry”) is a strategic arena, mainly animated by economic actors from agriculture and chemistry, and by European, American and Brazilian institutions. Their actions aim to link agriculture and chemistry in what could be become a sector in the sense of the regulation theory – institutions and a dominant regime. In their vision, the dominant design of the sector is defined as a single model of value-chains reproducing the traditional division of labour, which is characterized on the one hand as productions of liquid fuels and basic chemicals and on the other hand as the production of speciality chemicals. Conducting a case study on formaldehydes, we discuss this dominant design. We show that there exists a variety of productive heritages that have to be analyse to highlight their internal logic and their issues in sustainable development.

Keywords: sectoral regulation – productive heritages – innovation – doubly green chemistry – volatile organic compounds – sustainable development

INTRODUCTION

Les agro-industries (e.g. Roquette, Sofiprotéol, Archer Daniel Midlands), certaines firmes de l'industrie de la chimie (e.g. Arkema, Borregaard, Evonik) ou des biotechnologies (Novozymes) cherchent, à travers l'usage de ressources renouvelables, à répondre à la remise en cause virulente de la chimie, du fait de sa contribution aux émissions de CO₂, de sa dangerosité dans les *process*, et de ses pollutions diffuses, pour reconstruire leur compétitivité à travers ce que nous avons appelé une « chimie doublement verte » (=C2V) (par l'acceptation des 12 principes de régulation *volontaire* issus des travaux de l'US EPA, et par l'usage de la matière première végétale). Le défi pour cette C2V est de réussir à devenir soutenable économiquement et écologiquement, ce qui est loin d'être acquis. Nous avons montré précédemment que le travail institutionnel de ces acteurs dominants sur les concepts de bioéconomie ou de bioraffinerie vise une *problématisation* (au sens de Jullien & Smith, 2008) du fonctionnement du secteur. Cette problématisation les conduit à orienter les programmes scientifiques publics, en biotechnologie ou en catalyse, vers le renforcement de leurs patrimoines productifs respectifs et communs (Béfort, 2013 ; Nieddu et al., 2014). Cette transition met en jeu des dynamiques sectorielles documentées par Nieddu et Vivien (2012). Tout d'abord, c'est bien au niveau sectoriel que se nouent des relations de concurrence et de coopération autour de la constitution de patrimoines productifs collectifs. Puis, c'est la variété et le maintien de ces patrimoines productifs collectifs qui serait le moteur principal des stratégies d'acteurs. Enfin, le niveau sectoriel constitue à la fois un enjeu et un niveau à relier à la variété des filières et formes des produits (Béfort, 2014).

L'hypothèse des modèles évolutionnistes s'intéressant aux innovations environnementales est que moyennant la bonne incitation à innover, il sera possible de lever les *lock-ins* contraignant les stratégies d'innovation. Pour étudier l'évolution de ces productions, les auteurs évolutionnistes mobilisent les outils de paradigmes technologiques afin d'étudier l'évolution et la naissance de trajectoires technologiques plus soutenables (Bergouignan et al., 2004 ; Oltra & St-Jean, 2009). Brouillat et al. (2013), poursuivant ces travaux, s'interrogent sur le rôle des politiques publiques et les voient comme le moyen central pour permettre de lever les verrous technologiques. Il s'agirait alors de trouver la bonne incitation à l'innovation qui conduirait à l'adoption de *clean technologies*. Dans cette communication, nous souhaitons discuter le cadre évolutionniste à deux endroits. D'une part, l'entrée dans l'analyse des stratégies d'innovation par la distinction entre innovations radicales et incrémentales nous semble souffrir d'un problème de définition car les innovations radicales sont définies par rapport aux innovations radicales, elles même définies par rapport aux innovations radicales (Brouillat et al., 2013 ; Cecere et al., 2014). D'autre part, nous souhaitons discuter le concept de *lock-in*. Une contribution récente (Cecere et al., 2014) propose d'endogénéiser ce concept. Pour cela, nous proposons de mobiliser l'outil des patrimoines productifs collectifs afin de rendre compte en dynamique des *lock-ins*. Nous considérons que la question sociale de la substitution conduit à la constitution d'espaces de débats autonomes au sein desquels les questions de production vont se poser de façon particulière. Ainsi, nous proposons une étude de cas (suivant les méthodes développées par Dumez et Jeunemaître, 2005 ; Kemp et Prontoglio, 2011 ; Yin, 2014) sur les formaldéhydes.

Les formaldéhydes sont utilisés dans la production de colles et résines depuis le début du 20^{ème} siècle, sont susceptibles d'être interdits en Europe dans le cadre de REACH. Il y a donc formation d'un ensemble d'acteurs qui s'interrogent sur l'émergence de nouvelles filières comme façon de traiter le problème. Il s'agit donc de la constitution d'une *problématisation* de l'industrie au sens qu'en donnent Jullien et Smith (2008). Cette problématisation contribue *de facto* à créer un espace de débats et d'affrontements qui se structure autour de trajectoires technologiques différentes, en fonction des acteurs qui les portent.

Une première trajectoire est portée par les firmes de la chimie productrices de formaldéhydes ou de panneaux de bois qui déploient une variété de discours visant à légitimer l'usage de cette molécule. Deux autres trajectoires, identifiées au sein du projet européen Biofoamark, tiennent en une substitution par le végétal (respectivement, les tanins et les lignines) et l'abandon de

l'usage des formaldéhydes. Les trajectoires fondées sur l'usage du végétal pourraient être considérées comme radicales. Or un retour sur la genèse des usages des formaldéhydes, notamment avec la Bakélite, nous indique que les techniques mobilisées dans chacune des trois trajectoires sont similaires et reposent sur l'adaptation de formulations chimiques déjà maîtrisées. La première section est dédiée à l'élaboration d'un cadre analytique à même de relier les stratégies d'innovation aux stratégies économiques des acteurs fondées sur la reproduction de leurs patrimoines productifs collectifs. La deuxième section est dédiée à la présentation de notre méthodologie. La troisième section est dédiée à l'analyse de la stratégie de l'industrie de la chimie des formaldéhydes. Notre dernière section est consacrée aux stratégies de substitution du formaldéhyde par le végétal.

A. THEORIE DE LA REGULATION, EVOLUTIONNISME ET INNOVATION

A.1. REGULATION ET INNOVATION : QUELLES GRILLES DE LECTURE ?

Depuis les années 80 (Barrère, 1978, 1981 ; Weinstein et al., 1984), la question du changement technique est ouverte dans la théorie de la régulation. Dans ces premières contributions, Barrère pointe trois types de régulation : « *la conception de la régulation reste partielle en privilégiant l'étude de la régulation des structures et du fonctionnement et en faisant relativement l'impasse sur le problème de la régulation du système* » (Barrère, 1984, p.494). Ainsi, conjointement à la régulation des structures et du fonctionnement du système existe une régulation du « mouvement » ou du « changement » qu'il convient de saisir pour décrire les dynamiques sociales. Dans l'analyse de la transition vers l'usage de ressources renouvelables en chimie, il s'agit d'une problématique de régulation du changement. En effet, les acteurs économiques travaillent à construire leur espace économique en raison de l'incertitude inhérente à l'activité sociale (White et al., 2008 ; Béfort, 2014). La RST est ici face à un enjeu d'analyse. Il s'agit d'être à même de décrire la formation d'un nouveau secteur mettant en jeu des dimensions « productives » au sens strict du terme, institutionnel et de production de connaissances en raison d'apprentissages nécessaires. Du point de vue de l'analyse de l'innovation, en tant que dimension de la régulation du changement, la théorie de la régulation fournit relativement peu de travaux en comparaison des réflexions évolutionnistes. Cependant, nous pouvons identifier des éléments de littérature nous permettant de pointer ce qui constitue une lecture régulationniste de l'innovation.

Le premier axe de travail est celui consacré au changement technique par une modélisation endogène du progrès technique pour analyser son rôle dans la croissance (Amable, 1995). Ainsi, Amable et al. (1997) ont de même proposé une caractérisation des systèmes nationaux d'innovation dans une perspective de diversité de trajectoires des capitalismes. Coriat et Dosi (1995) ouvrent une deuxième perspective visant à organiser la discussion entre Théorie de la Régulation (TR) et Théorie Evolutionniste (TE). Les auteurs relèvent la proximité entre les deux courants notamment par 1) l'intérêt pour l'analyse du capitalisme dans sa dynamique historique, 2) un intérêt pour les institutions et 3) l'analyse des organisations comme outil de coordination entre acteurs. Cependant, les travaux de synthèse sur la TE montrent qu'elles s'intéressent bien au rôle de l'innovation dans les dynamiques économiques (Nelson et Winter, 2000) dans une perspective où les conflits sont absents. Le second point problématique que nous relevons est, dans l'analyse de l'innovation, la focalisation sur les processus de sélection. Or de ce point de vue, l'usage de David (1982) et du concept de dépendance au sentier est paradoxal. La sélection est étudiée, mais l'étude du maintien des technologies a été évacuée du dispositif analytique évolutionniste par une considération des verrouillages technologiques et des ruptures sous l'angle des « accidents historiques » et des rendements croissants d'adoption (Arthur, 1988) (cf. Sous-section suivante pour une discussion du concept de *lock-in*). Il s'agit donc là d'un paradoxe fondamental. Si les innovations sont sélectionnées en raison de l'efficacité, pourquoi est-il nécessaire de mobiliser un concept visant à constater la reproduction dans le temps d'une

innovation ? Par conséquent, la question du maintien d'une technologie dans le temps et donc de la reproduction dans laquelle celle-ci est insérée est fondamentale. Il ne s'agit pas de ne porter sur la focale que sur l'un ou l'autre de ces dimensions (reproduction et sélection). L'existence de ces deux angles d'analyse pourrait témoigner de deux aspects d'une même réalité. Ainsi, l'explication pourrait résider dans la sélection d'innovations en fonction des trajectoires existantes : les innovations sélectionnées permettraient, par la production de nouveauté, de reproduire ces trajectoires.

Les travaux portant sur la crise financière (Boyer, 2009 ; Lordon, 2009) publiés dans la Revue de la Régulation traitent la financiarisation comme une innovation. Dans ces contributions, il est à retenir que l'innovation est traitée comme (1) *une* variable du processus de transformation et (2) comme étant l'objet de stratégies d'acteurs. A ce titre, Nieddu (2000), Nieddu et Vivien (2012) et Nieddu et al. (2014) s'inscrivent, par l'approche en termes de patrimoines productifs collectifs, dans cette perspective. En effet, les auteurs démontrent qu'il n'existe pas d'innovations isolées, elles sont toutes constituées par des assemblages de ressources collectives (les patrimoines productifs collectifs) dans un univers caractérisé par de l'incertitude radicale. Ainsi, l'enjeu des stratégies d'innovation relèvent de l'exploration, et par conséquent, de l'exploitation d'opportunités construites par l'exploration et non d'un entrepreneur isolé. Par conséquent, il est nécessaire de souligner les niveaux auxquels se déploient ces stratégies. A cette image, nous pouvons relever les travaux de Jullien et Smith (var. ref.) qui interrogent l'identité d'une industrie et sa reproduction. Plus particulièrement, ces auteurs insistent sur la construction politique de l'espace dans lequel se déploient ces industries. Dans le cas de la C2V, l'exploration est réalisée au niveau sectoriel, conçu comme une grande filière fondée sur le concept de bioraffinerie (Nieddu et al., 2010). Il s'agit donc de la définition et de l'articulation de trois niveaux : secteurs, filières et firmes (Béfort, 2014).

Bien que le nombre de travaux régulationnistes portant sur l'innovation, et son rôle dans les transitions sectorielles soit limité, les travaux exposés fournissent des clés de lecture. Il s'agit de disposer (1) d'une approche systémique de l'innovation et de sa variété, qui considère (2) les processus d'assemblages de ressources collectives en vue de constituer des patrimoines productifs collectifs et (3) la reproduction, et la sélection des technologies ainsi éclairée, d'un système dont font partie des innovations et technologies. Ces trois conditions, tirées de la littérature régulationniste, vont désormais nous servir à discuter le cadre de la théorie évolutionniste des innovations environnementales.

A.2. L'IMPORTATION DES SYSTÈMES SECTORIELS D'INNOVATION POUR L'ANALYSE DES INNOVATIONS ENVIRONNEMENTALES

L'approche sectorielle de Malerba a servi de base à Oltra et Saint-Jean pour développer un cadre d'analyse à même de décrire les innovations environnementales. A l'origine, l'approche par les systèmes sectoriels d'innovations et de production (SSIP) (Malerba, 2002, 2005) avait pour but d'analyser les différences inter-sectorielles et de mesurer les écarts de performance entre ces secteurs. Ancré dans l'analyse évolutionniste, l'approche par les SSIP observent l'impact de l'innovation sur un secteur défini par l'articulation entre une base de connaissance, la forme de la demande et les institutions sectorielles. Cette approche, qui se revendique systémique, pose comme point de départ que l'innovation est au coeur des performances économiques et de leurs différences « *In a dynamic way, the focus on knowledge and the technological domain places at the centre of the analysis the issue of sectoral boundaries* » (Malerba, 2005, p.385). Au coeur de ces évolutions, Malerba pose l'hypothèse que les dynamiques économiques sont animées par une séquence « création de variété -> sélection d'un *dominant design* ». La seconde hypothèse est que la sélection d'une technologie (et par conséquent la destruction de la variété produite, dans la logique néo-schumpeterienne) se fait sur la base de la détermination de rendements croissants d'adoption. Par conséquent, l'objectif est de fournir un outil pour les politiques publiques et d'orienter le soutien à des trajectoires technologiques déterminées comme un *dominant design*.

Oltra et Saint-Jean (2009) proposent un modèle mettant en interaction les régimes

technologiques, la forme de la demande et les institutions « *limited to the instruments of environmental and innovation policy* » (Oltra et Saint-Jean, 2009, p.568) visant à définir des « *sectoral patterns of environmental innovation* ». Ici les innovations sont considérées comme suit : « *by acknowledging that environmental innovations, like innovation in general, result from a dynamic and interactive process of knowledge creation and diffusion, the emphasis is put on the coevolution between the various elements of the system* » (Ibid., p. 572). A l'image de l'approche de Malerba, l'objectif est de promouvoir l'émergence d'innovations environnementales radicales par des politiques publiques. Les innovations radicales sont des « *technologies éco-innovantes préventives qui cherchent à réduire ou éliminer la pollution à la source* » (Brouillat et al., 2013) alors que les innovations incrémentales sont des innovations curatives. Les premières auraient tendance à plus se développer que les secondes en raison de l'existence de phénomènes de *lock-in*. Ces *lock-in* sont ici liés à « *la capacité de la firme à s'adapter au changement, c'est-à-dire sa capacité à innover* » (ibid., p.88). Afin de mettre en lien la capacité d'apprentissage de la firme et les produits, il est proposé de prendre en compte l'efficacité productive, les performances environnementales et les performances du produit. L'efficacité productive vise à prendre en compte la consommation de matières premières, les rendements ainsi que les coûts de collecte et de traitement des déchets. Les performances environnementales désignent l'impact des procédés et produits sur leurs milieux. Enfin, les performances du produit désignent la qualité technique, la durée de vie et la recyclabilité. Les produits sont donc lus comme des compromis entre ces différentes dimensions. Ces compromis sont insérés dans des paradigmes technologiques définissant « *l'ensemble des variables technologiques et économiques sur lesquelles les innovations doivent porter* » (Ibid., p.92). Dans cette vision, les « *technologies de contrôle, de prévention, de recyclage interne, d'économie et de substitution d'inputs* » (Ibid., p.93) sont associées au *dominant design* alors que les « *éco-technologies et éco-innovations radicales* » (Ibid., p.93) sont associées à un « *nouveau potentiel technologique* ».

La faible diffusion des innovations radicales est attribuée à l'existence de phénomènes de *lock-in* liée à la nécessité d'intégrer les innovations dans le système productif. La conception des produits comme compromis entre différentes dimensions permet de relier les innovations aux chaînes de valeur au sein desquelles s'inscrivent les produits. Les facteurs de *lock-in* sont multiples : destruction de compétences impliquant une baisse des performances du produit, effets d'apprentissage et d'échelle, externalités de réseau permettant des rendements croissants d'adoption et complémentarités technologiques.

Par conséquent, l'objectif des politiques publiques serait alors de participer à lever ces verrous technologiques afin de créer les conditions de l'adoption d'innovations radicales. Pour cela, les évolutionnistes mettent au centre du processus le développement d'innovations environnementales : « *un des principaux critères pour juger de la performance des instruments de politique environnementale réside dans leur aptitude à stimuler la R&D et l'adoption de technologies respectueuses de l'environnement. L'efficacité dynamique de la réglementation se définit alors comme sa capacité à stimuler le développement et la diffusion d'éco-innovations (...). En effet, en favorisant les firmes les plus vertueuses sur le plan environnemental et en pénalisant les plus faibles, la politique environnementale est à même de redistribuer les cartes sur le marché. Elle offrira de nouvelles opportunités de profits pour certaines firmes, ne poussera d'autres vers la sortie et permettra l'entrée de nouvelles*» (Brouillat et al., *op. cit.*, p.100). La vertu des politiques environnementales est de stimuler des *push-pull effects* mais les effets de ces politiques dépendent de leur degré de sévérité et de leurs orientations. Par exemple, elles peuvent conduire à la formation de « *niches vertes* », et rien n'indique que ces niches deviendront par la suite un *dominant design* si l'on tient compte de la variété des trajectoires technologiques, pointées par les auteurs.

La méthodologie déployée repose sur une séquence en deux temps : identification du *dominant design* associé à de l'innovation incrémentale, puis identification de trajectoires alternatives, identifiées comme de l'innovation radicale. Ce sont deux niveaux d'analyse qui se superposent. Les innovations au sein du *dominant design* ne pourraient être qu'incrémentales, car elles s'inscrivent dans le *dominant design*. Dans le cas des innovations radicales, elles sont considérées en tant que telle car elles ne sont pas issues de la technologie dominante. Mais, comme ces innovations s'inscrivent dans des trajectoires technologiques, décrites comme des voies sur lesquelles le potentiel technologique est exploré, pourquoi ces innovations ne seraient

pas, elles aussi, incrémentales ? Ce qui est décrit comme une innovation radicale peut être interprétée comme l'impulsion qui va générer une nouvelle trajectoire, au sein de laquelle se déploient des innovations incrémentales. Si l'on admet qu'au sein de ces trajectoires ne se déploient que des innovations radicales, comment celles-ci peuvent être alors adaptées au sein du système productif ?

Il nous paraît fondamental de retenir la présence d'une base de connaissances dans laquelle les acteurs puisent pour innover et s'inscrivent dans des trajectoires technologiques. Les questions soulevées orientent donc notre analyse vers l'articulation des technologies aux systèmes productifs et du maintien/sélection des technologies dans leur variété. Ainsi, nous proposons de retenir des SSIP l'outil des bases de connaissances, dans sa variété et non dans sa sélectivité, et son lien avec les dynamiques de production, illustrées par la variété des compromis autour des produits.

A.3. DES LOCK-INS AUX PATRIMOINES PRODUCTIFS COLLECTIFS : EXPLORER LA BOÎTE NOIRE DES INNOVATIONS

Précédemment, nous avons discuté le cadre des SSIP et des innovations environnementales d'un point de vue régulationniste. Nous souhaitons poursuivre cette discussion en la déplaçant vers le concept de *lock-ins*. Nous concluons précédemment que les acteurs puisent dans une base de connaissance qui se construit en même temps que les acteurs en tirent des ressources qu'ils assemblent. La conséquence directe est la nécessité de produire une discussion du concept de *lock-in* et de son articulation à l'analyse des transitions.

A.3.1. REVISITER LES HYPOTHESES EVOLUTIONNISTES SUR LA CONCEPTION DES TECHNOLOGIES ET LEURS EVOLUTIONS

Arthur (2011) propose trois hypothèses de travail afin d'explorer ce que peuvent être les technologies. La première tient au constat que les technologies ont été traitées comme des « boîtes noires » : « *the people who have thought hardest about the general questions of technology have mostly been social scientists and philosophers, and understandably they have tended to view technology from the outside as stand-alone objects. There is the steam engine, the railroad, the Bessemer process, the dynamo, and each of these is a boxed-up object with no visible insides – a black box, to use economic historian Nathan Rosenberg's term. (...) If we want to know how they relate to each other, and how they originate and subsequently evolve, we need to open them up and look their inside* » (Arthur, 2011, p.14). Cette première hypothèse vise à prendre en considération la composition interne de la technologie, ne plus la prendre comme donnée. La deuxième hypothèse d'Arthur relie le développement de la technologie aux technologies existantes : « *what we should really be looking for is not how Darwin's mechanism should work to produce radical novelty in technology, but how « heredity » might work in technology* » (Ibid., p.18). Cette hypothèse rejoint notre proposition de considérer la sélection de nouveauté en lien avec les technologies existantes. Malgré cela, Arthur propose une troisième hypothèse de sélection des technologies sur la base de leur efficacité : « *This is because it has different purposes to fulfill, different environments to operate in (different 'habitats' to adapt to, if you like), and different designers who use different ideas. From these variations, some perform better and are selected for further use and development; they pass on their small differences to future designs. We can then follow Darwin and say that 'it is the steady accumulation, through natural selection, of such differences, when beneficial to the individual, that gives rise to all the more important modifications of structure.'* In this way technology evolves » (Ibid., p.17). Ici, l'amélioration de la technologie passerait par une étape de « sélection », sur la base de critères d'efficacité. Cette position est toutefois nuancée par la reconnaissance du caractère partiellement localisé d'une technologie. Ainsi, le processus d'exploration et de sélection des technologies est guidé par l'hérédité portée par ces technologies.

Cette proposition théorique est à relier au cadre initial des *lock-ins*. Dans sa contribution séminale, Arthur (1989) essayait de montrer que l'adoption de technologies, et donc la génération de *lock-ins*, était le résultat d'accidents historiques permettant aux acteurs de saisir quels étaient les rendements croissants d'adoption. Dans le champ de l'analyse évolutionniste du changement

technique et du *transition management*, les contributions récentes de Kemp et Prontoglio (2011) et Cecere et al. (2014) appellent à la production d'études de cas à même de prendre en compte la domination d'une matière première unique (le pétrole) sur l'ensemble des trajectoires technologiques, la spécificité de ces trajectoires et de replacer les *lock-ins* dans leur histoire longue. D'après Cecere et al. (2014), ce serait la conjonction entre les coûts, les acteurs et les technologies qui permettrait d'expliquer la formation des *lock-ins*. Cette proposition, qui vise à endogénéiser l'analyse des *lock-ins* ne permet cependant pas de lever l'hypothèse d'accidents historiques. Pour cela, nous proposons de lever cette hypothèse et d'étudier l'exploration/sélection des technologies en fonction des patrimoines productifs collectifs des firmes. Ce concept permet de rendre en compte de l'ancrage des choix des acteurs dans des logiques collectives. Ces communautés se projettent dans le futur et, ce faisant, organisent le verrouillage des trajectoires technologiques par les acteurs (Nieddu et Barrère, 2014).

A.4. CONCLUSIONS INTERMEDIAIRES

Nous identifions trois raisons qui président à l'adoption de cette approche. Elle permet d'endogénéiser les « accidents historiques » en situant les technologies dans la dynamique des trajectoires auxquelles appartiennent les technologies. L'hypothèse des rendements croissants d'adoption n'est pas complètement rejetée, elle constitue un point de départ que nous amendons. C'est la rentabilité espérée (pouvant prendre la forme de l'exploration de trajectoires technologiques par le développement de programme de recherche ou d'outils de démonstration), par la reproduction du système productif, ainsi que son insertion dans des filières existantes qui guide l'exploration ou la sélection d'une technologie. Méthodologiquement, il s'agit d'identifier les trajectoires technologiques existantes afin de mettre au jour les dynamiques de constitution de ces trajectoires, animées par des patrimoines productifs. Le schéma suivant propose une représentation de nos propositions théoriques :

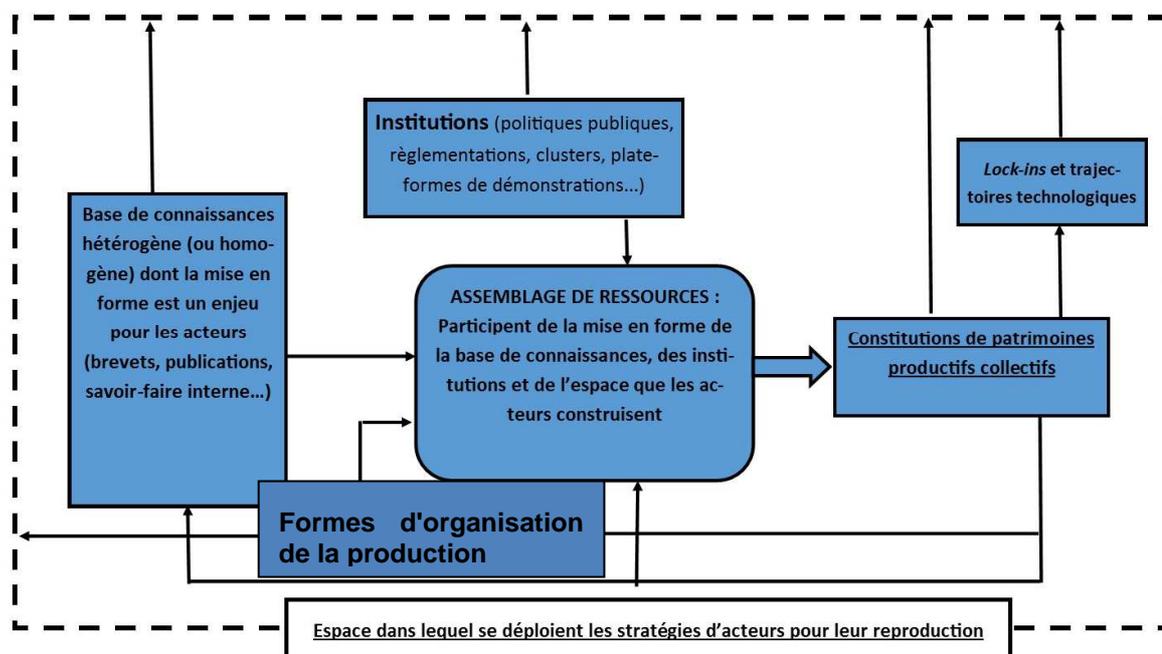


Figure 1 : Schéma de notre proposition de cadre analytique

Nous retenons l'idée de la mobilisation d'une base de connaissances, d'institutions et de formes d'organisation de la production (et par conséquent, d'échange et de consommation). Les acteurs participent à la production de connaissances et puisent dans cette base. Ils participent à sa mise en forme. Les formes d'organisation de la production sont entendues comme participant

également de la production de connaissances. L'ensemble de ces ressources est assemblé et forme des patrimoines productifs collectifs (Barrère, 2005 et Nieddu, 2005 *in* Barrère et al., 2005). Par suite, ces patrimoines génèrent des trajectoires technologiques et les acteurs constituent des *lock-ins*. L'ensemble de ces éléments participent de la mise en ordre de l'espace dans lequel s'affrontent les acteurs (Nieddu, 2000). La forme de cet espace est également un objet de concurrence entre les acteurs mobilisés.

B. METHODOLOGIE

Nous proposons, afin de répondre aux enjeux théoriques et empiriques soulevés, d'étudier le cas des formaldéhydes. La méthode des études de cas permet d'explorer des données empiriques hétérogènes et de répondre à la question du « comment » (Yin, 2014). En effet, notre question porte sur la forme des *lock-ins* et l'articulation de ces derniers aux patrimoines productifs collectifs dans le cadre de la transition vers une chimie doublement verte. Cette méthode, des études de cas, est reconnue comme une approche permettant d'identifier de nouvelles dynamiques (Kemp & Prontoglio, 2011).

Le formaldéhyde est un élément essentiel dans la formulation des résines, colles et panneaux de bois qui composent notre environnement quotidien. Leur dangerosité a été pointée dans une première étude en 1976 (Putnam & Graham, 1993). Depuis, des débats ont lieu concernant sa dangerosité réelle ou non. En 2006, l'International Agency for Research on Cancer a reconnu le caractère cancérigène des formaldéhydes. Cette évolution dans la considération des formaldéhydes a conduit la France et les Pays-Bas à mener des actions au niveau européen pour obtenir la classification de la molécule dans REACH afin d'obtenir son interdiction ou sa limitation.

Dans ce contexte, doublé de celui de la transition vers une chimie doublement verte, nous souhaitons montrer comment les acteurs existants, et de nouveaux acteurs, se mobilisent pour organiser leur substitution ou non. Compte tenu de l'analyse que nous faisons de la théorie évolutionniste des innovations environnementales et de la nécessité de disposer d'un cadre analytique à même de dépasser 1) la production de résultats normatifs et 2) des interrogations centrées sur les politiques publiques préalables à une analyse en profondeur des trajectoires technologiques, nous mettons à l'épreuve le cadre que nous proposons. De notre point de vue, les acteurs travaillent collectivement à définir l'espace du débat sur les formaldéhydes. Au sein de cet espace, ou de cette arène, les questions de production sont posées de façon particulière en fonction des acteurs. Dès lors, il s'agit d'identifier une série d'éléments. Suivant en cela l'approche évolutionniste, nous mobilisons l'outil des bases de connaissances pour identifier le patrimoine productif collectif de l'industrie des formaldéhydes. Pour cela, nous mobilisons une première étude (section C.) sur le développement de la Bakélite, dont nous montrons qu'elle sert de fondement à la production des colles et résines à base de formaldéhydes. Ainsi, nous pointons comment se constitue le compromis qui définit ces produits dans leur espace économique. Puis, nous montrons comment ce compromis est interrogé par l'évolution de la législation. Les deux dernières sections sont consacrées à l'analyse de la problématisation de l'industrie que mènent les firmes, et leur ancrage dans des trajectoires technologiques. Nous montrons une première forme de problématisation de l'espace économique par les industries de la chimie des formaldéhydes. Pour cela, nous étudions le discours produit par Formacare, l'organisation collective européenne des producteurs de formaldéhydes, puis les stratégies des membres de cette organisation. Puis, nous interrogeons les deux trajectoires de substitution fondées sur le végétal.

c. DU DEVELOPPEMENT DES RESINES A BASE DE FORMALDEHYDES A LA REMISE EN QUESTION DE CETTE MOLECULE

L'usage principal des formaldéhydes réside dans la formulation de résines thermodurcissables. Il existe deux types de formulations qui sont les résines aminoplastes (ou urée-formol, UF) et les phénoplastes (phénol-formol, PF). Dans les entretiens que nous avons menés, références étaient faites aux deux types de résines mais si l'on se tourne vers les publications portant sur la substitution des formaldéhydes, celle-ci porte principalement sur les phénoplastes (Pizzi, var. ref.). Ces résines sont utilisées comme durcisseurs, solvants, charges, vernis, lubrifiants et colorants pigmentaires (Farhi et al., 2006). Les premières études sur les phénols et les formaldéhydes ont été menées respectivement par Bayer et Losekam à la fin du dix-neuvième siècle (Ibeh, 1999). Le grand résultat de ces études a été l'observation de la réactivité des phénols avec les aldéhydes. La grande réactivité des phénols avec un second composé forment la base codifiée mais aussi tacite de l'étude des résines. Elle est codifiée au sens où les publications sur les PF ou les UF utilisent l'argument de la réactivité comme raison principale de produire ces matériaux¹. Ce faisant, formant une longue tradition de recherche, cela fait partie de savoirs tacites qui forment la représentation de ces matériaux des chimistes. En effet, durant nos entretiens avec des chimistes, l'évocation de la réactivité leur paraissait évidente. De manière osée, les chimistes nous résument la production de résines comme « *des phénols + un composé auxquels on ajoute un catalyseur* ». Il est donc fondamental de considérer ces savoirs dans la formation des trajectoires technologiques et donc des *lock-ins*.

c.1. LE DÉVELOPPEMENT DES RÉSINES PHÉNOLS-FORMALDÉHYDES : LA BAKÉLITE

C.1.1. LA BAKELITE COMME HYBRIDATION ENTRE DEUX BASES DE CONNAISSANCES HETEROGENES

L'objectif des premiers développements industriels a été de réaliser la substitution de matériaux d'origine naturelle comme le caoutchouc et le shellac. Dans le premier cas, le premier brevet sur les résines PF déposé par A. Smith en 1899 en témoigne (Tobiason, 1990). Dans le second cas, l'objectif était de remplacer le shellac pour la production de gaines souples pour les fils électriques. Le shellac est une pâte extraite d'une cochenille asiatique qui était principalement utilisée pour la décoration et le surfacage des meubles. Or, la production d'un kilogramme de shellac nécessitait les sécrétions de trois-cent mille insectes. De plus, face à la demande croissante et une offre limitée, les prix ont fortement augmenté. Dans ce contexte, Blumen déposa un brevet en 1902 sur la base des travaux de Meyer considéré comme celui ayant réussi à synthétiser le shellac. Ce premier brevet permit de débiter la production du Laccain dans une usine installée à Zwickau en Allemagne. Il s'agit donc de la première production industrielle de PF. Ce produit fut un échec commercial en raison de l'odeur qu'il laissait et de l'assombrissement qu'il produisait sur les meubles sur lesquels il était utilisé (Kosmel, 2010). Malgré tout, le Laccain fut renommé « Novolac » par Baekland. On trouve encore des publications en chimie académique mobilisant le procédé ayant servi à la production de Laccain. La recherche et l'industrialisation de nouvelles résines entre 1870 et 1910 sont marquées par l'exploration d'une variété de solutions technologiques comme la parkesine, l'ivoride ou la celluloid qui chacune, pour des raisons diverses (problème d'intégration dans les chaînes de valeur, produits fortement inflammables etc.) n'ont pas été maintenues.

¹ Par exemple, les documents de lancement du projet Biofoambark dont l'objet est de produire des mousses à partir de tanins extraits d'écorces d'arbres, revendiquent cette forte réactivité et précisent que le contrôle de cette réactivité est un enjeu pour le projet.

Dans son étude sur la bakelite, Bijker ne retient pas l'argument invoqué par les économistes du changement technique (Arthur, 1989) qui est celui de l'existence de rendements croissants d'adoption. Cet argument fonctionne *ex post* et a un statut descriptif. L'analyse de la transition, de l'adoption de nouveaux produits suppose de déplacer la focale vers le processus en lui-même. Ce qui est au cœur de la substitution de produits anciens par de produits fournissant à la fois des fonctionnalités identiques et nouvelles est son appropriation dans les mondes sociaux, supposant une construction de l'usage de la technologie (Bijker, 1987). L'intérêt pour les résines phénols-formaldéhydes a été très limité à la fin du dix-neuvième siècle : « *at the time, formaldehyde could not be produced on an industrial scale; it was merely a laboratory curiosity* » (Bijker, *Ibid.*, p.116). Les améliorations apportées à la production des formaldéhydes ont résidé dans une évolution du point de vue sur ces matières. Cet aldéhyde n'a, au départ, pas été retenu car il ne colorait pas les résines : la couleur était, à la fin du dix-neuvième siècle, interprétée comme le signe de bonnes réactions chimiques. Le résultat de ces premières recherches était la constatation de la co-production d'une substance qui pourrait éventuellement fournir une application industrielle. Face aux échecs des celluloïds et une demande croissante pour l'usage de plastiques, les recherches sur ces « résines étranges » (pour reprendre l'expression les décrivant), se sont poursuivies du point de vue de la « stabilisation ».

Un des problèmes des celluloïds étaient de réussir à produire en grandes quantités, et non inflammables, des produits moulables, ce qui suppose de pouvoir les porter à une température élevée. En 1899, Smith a montré qu'il était possible de donner une forme, après chauffage, à une résine principalement composée de phénols-formaldéhydes. Ce sont donc les recherches sur les solvants qui ont conduits les chimistes à favoriser l'usage des formaldéhydes.

La consommation de PF ne s'accroît qu'à partir de 1907 avec le développement des procédés de « chauffage-pressurisation » et la mise au point par Baekland de la Bakélite. S'il s'agissait d'une résine phénolique, c'est la technique de moulage qui a permis la production d'un grand nombre d'objets aux usages variés (Hirano et Asami, 2013). La Bakélite est décrite comme le premier plastique industriel. De l'Égypte Antique jusqu'au dix-neuvième siècle, les plastiques et caoutchoucs étaient considérés comme des produits luxueux (Bijker, 1987). La localisation et les modes d'extraction ne permettaient pas de fournir des quantités suffisantes pour être utilisées pour des applications plus standards que la bijouterie ou l'élaboration de meubles luxueux. Il est intéressant de noter que les recherches sur ces résines ont été orientées par la volonté de disposer localement (et non plus en Asie ou en Amérique du Sud) de biens intermédiaires à même de participer au développement de ce qui sont aujourd'hui des produits de consommation de masse. Les caractéristiques attendues étaient les suivantes : « *new groups showed a great interest in employing these novel molding materials, which did not have the limitations of the traditional materials such as steel, glass, wood, and ceramics. Their interest pointed to the need for materials that had not the coldness, weight, and chemical activity of metals; nor the fragility and costs of ceramics and glass; nor the transience of natural materials; but that had artistic appeal and offered the possibility for coloring. Although none of the industrial natural plastics then available could meet all these requirements, there clearly was a rapidly growing demand for such molding materials* » (Bijker, *Ibid.*, p.106).

Le plastique utilisé devait donc permettre d'offrir à la fois des produits dotés d'une identité luxueuse (notamment par le changement de couleurs) et d'autres d'une identité de solidité. Baekland, qui était un électrochimiste de formation et avait notamment développé un papier photo directement concurrent de celui de Kodak, ne travaillait pas comme les « chimistes du plastique », notamment européens. Bijker (1987), par l'analyse des cahiers de recherche de Baekland, montre comment sa formation préalable l'a conduit à appliquer une évaluation minutieuse de chacune des réactions alors que les études sur les plastiques étaient menées « tous azimuts » : « *when he started his research on phenol-formaldehyde, his work was primarily structured by the technological frames of photo chemists and electrochemists. In those frames there was no obvious reason to focus on the solvent in the condensation reaction. Rather, a detailed analysis of all reaction variables was to be expected. In the construction process of Bakelite that followed, however, Baekland interacted with the relevant social groups of celluloid chemists (...) and gradually got more and more involved* » (Bijker, *Ibid.*, p.150). La Bakélite est

donc le résultat de deux types de pratiques en chimie : d'une part, l'exploration fine des interactions chimiques, et d'autre part, la recherche sur les solvants. Le croisement de ces deux pratiques a ainsi tracé la trajectoire dominante de l'étude des résines et des plastiques à base de formaldéhydes.

C.1.2. DE LA DEMONSTRATION A L'INDUSTRIALISATION DE LA BAKELITE : LA CONSTRUCTION D'UN PATRIMOINE PRODUCTIF COLLECTIF

Nous pouvons relever trois dimensions qui ont permis à Baekland d'organiser l'industrialisation de son procédé. Tout d'abord, Baekland a poursuivi, parallèlement au développement des procédés pour la Bakelite, une partie d'un travail qu'il menait sur le Novolac. Toutefois, après avoir corrigé la première version de son brevet, il fit parvenir à plusieurs industriels des échantillons de Bakélite. Le résultat immédiat a été l'augmentation des commandes entre 1908 et 1909 (Bijker, 1987).

La deuxième dimension tient en la communication au sein de communautés scientifiques de ses résultats. Bijker relate une conférence donnée par Baekland en 1909 à la section New-Yorkaise de l'*American Chemical Society* qui fut, par la suite, publiée dans le *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* (Baekland, 1909). Dans cette contribution, Baekland présente sa méthode de production de la Bakelite et en vante les mérites pour l'industrie : « *we are now bringing about some unexpected possibilities in the manufacture of furniture and the wood-working industry in general. But I intend to devote a special evening to this subject and show you then how with cheap soft wood we are able to accomplish results which never have been obtained even with the most expensive hard wood (...). It is not so flexible as celluloid, but it is more durable, stands heat, does not smell, does not catch fire and at the same time is less expensive* » (Baekland, *Ibid.*, p.157). L'énumération se poursuit dans l'article sur près d'une page supplémentaire et se conclue sur l'argument suivant : la Bakelite, comparée à la celluloid, et par extension aux autres matériaux utilisés jusqu'alors peut être moulée par chauffage et pression.

En 1911, Baekland publia un nouvel article dans cette revue dans laquelle il décrit avoir enrichi l'éventail des possibilités de son produit : « *I found that we can enormously increase the practical uses of Bakelite by incorporating it with structural fillers, like fibrous or cellular bodies* » (Baekland, *Ibid.*, p.937). Derrière ces avancées se trouve l'optimisation de la condensation et de la quantité de formaldéhydes utilisées. Dans les études qui ont conduit Baekland à mettre au point la Bakélite, ce sont ces deux principes qui ont été au cœur des travaux. Il n'est pas anodin de trouver ces résultats dans le *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Ce journal, fondé en 1909, précise dans l'éditorial du premier numéro sa volonté de développer un espace permettant la rencontre entre la chimie, l'ingénierie chimique et leur passage dans l'industrie. En publiant à cet endroit, Baekland poursuit alors clairement sa stratégie d'implication de la communauté des chimistes dans la construction d'un objet de recherche qui est avant tout un produit industriel. Au-delà de la stratégie de substitution dans les produits, la diffusion de la Bakélite a aussi été assurée par la création de nouveaux produits, assurés par des accords de licence notamment dans l'industrie automobile, l'électricité et la radio. Du fait de la diffusion croissante de la technique de condensation phénol-formaldéhydes pour la production de résines eut lieu une guerre des brevets entre Baekland et la firme allemande *Knoll and Company*. A travers diverses publications, Baekland et Lebach, le titulaire des brevets litigieux, polémiquèrent sur la nature de leurs produits, les dates d'invention et les applications. Il s'est avéré que les brevets de Baekland ne couvraient pas complètement la production de la Bakelite car ils portaient essentiellement sur le *process* de production. Ainsi, les brevets allemands permettaient de produire des résines similaires mais avec des *process* moins coûteux. Pour défendre son produit, la firme allemande réclama le brevet avec une forme très similaire à celle de Baekland. La solution pour régler cette guerre des brevets, une licence exclusive sur la Bakelite fut accordée à une co-entreprise (Bakelit Gesellschaft GmbH) fondée entre Knoll and Company, Rütgerswerke AG. La création de cette entreprise, et l'embauche de Lebach, permit de résoudre le conflit sur les brevets et d'élargir encore la diffusion de la Bakélite en Europe. Si cette guerre des brevets eut lieu entre 1909 et 1913 (date à laquelle

Baekland reconnu l'efficacité du procédé allemand), la solution de la mise en commun de *process* et l'intégration de ces derniers dans le patrimoine productif de la Bakélite a été la solution adoptée pour deux autres guerres des brevets ayant eues lieu en 1915 et durant les années 1920.

Les années 30, du point de vue de la chimie, sont caractérisées par (1) une baisse de la demande de matières plastiques, notamment en raison de leur uniformité, (2) des prix relativement élevés notamment du point de vue des consommateurs (3) au regard des performances apportées par les produits et (4) l'émergence de la prise en compte en aval des filières des attentes des consommateurs (Arora et al., 1998 ; Galambos et al., 2007). Les *designers* industriels étaient tentés d'utiliser des matériaux biosourcés ou naturels et non plus les techniques de chimie industrielle, trop associée aux efforts de guerre de 1914-1918. Les *designers* industriels étaient donc une cible privilégiée pour Bakélite car leur rôle croissant (ainsi que celle des ingénieurs) dans l'industrie des plastiques faisait d'eux un bon moyen pour renouveler le patrimoine productif de la Bakélite. La formation de ces *designers* a conduit à l'évolution des machines mais aussi des procédés de transformation qui ont permis de remettre à la mode l'usage de ces plastiques.

C.1.3. D'UNE BASE DE CONNAISSANCE A LA FORMATION DE PATRIMOINES PRODUCTIFS COLLECTIFS

Nous avons choisi de remonter à l'émergence des résines phénols-formaldéhydes à travers le produit emblématique qu'est la Bakélite. L'étude de la production de la Bakélite, décrit comme le premier plastique industriel permet de mettre en évidence la base de connaissance et les formes d'échanges associées aux résines phénols-formaldéhydes. Ces résines sont issues de recherches portant sur les réactions entre celluloids et solvants (ou aldéhydes) et l'attention systématique portée aux réactions dans l'électrochimie de la fin du dix-neuvième siècle. Dès lors, la mise en place d'un procédé reposant sur le chauffage et la mise sous pression de la matière a permis de développer un ensemble de produits à base de résines. Les travaux de mise au point de la Bakélite ont été menées sous la forme d'exploration systématique (comme pour les celluloids) mais contrôlée des réactions entre les phénols et différents aldéhydes. Du point de vue de l'origine des matières premières, les phénols étaient à l'origine issus de coke, lui-même dérivé de charbon. En revanche, les formaldéhydes étaient d'origine naturelle.

La large diffusion des formaldéhydes n'a pas été le résultat d'une seule stratégie entrepreneuriale reposant sur une rupture technologique mais (1) sur la recherche de fonctionnalités spécifiques adaptées à la demande, (2) la diffusion auprès d'acteurs académiques et industriels, y compris pendant des guerres de brevets, des méthodes de production et d'usage de ces produits. Du point de vue de la demande, celle-ci était centrée, à l'origine sur la substitution de matières premières d'origine naturelle dont la disponibilité était limitée. Par la suite, suite à la construction de l'usage de la technologie de la Bakélite, par la structuration de communautés scientifiques et industrielles, les usages de la Bakélite se sont multipliés. Il y a donc un lien fort entre la structuration de la base de connaissances et la forme de la demande pour ces produits. L'exemple le plus illustratif est l'organisation de symposiums industriels à destination des designers industriels. Face à la désaffection de la demande de plastiques, la stratégie de Baekland a été de reconstruire l'identité des produits par une « remise au goût du jour » de ces matériaux. La reconstruction de la forme des produits a permis de relancer la demande par une nouvelle projection dans le futur de l'usage de ces matériaux en mobilisant les compétences des designers. Comme nous le confirmait P. Ribault, une des grandes caractéristiques du travail des designers industriels est de reprendre et retravailler des produits abandonnés ou délaissés. Ainsi, c'est bien un patrimoine productif collectif des résines PF qui a été formé durant le début du vingtième siècle. Nous avons pu pointer la formation d'une communauté formée par des industriels, des scientifiques en liens étroits avec l'industrie, des ingénieurs et designers qui ont construits l'usage de la Bakélite. La mise en patrimoine de compétences et objets industriels est donc la dynamique de ce qui est désormais reconnu comme la première résine plastique industrielle. La reconnaissance *a posteriori* du statut de la Bakélite est l'illustration du rôle de ces

patrimoines productifs dans la construction du changement et du maintien de trajectoires technologiques existantes.

Ce faisant, nous nous trouvons dans la perspective évolutionniste de l'étude des innovations environnementales. Nous avons identifié ce qui constitue la base de connaissances, la forme de la demande et des pratiques de consommation qui se sont institutionnalisées au cours du vingtième siècle. La mise en ordre de la réalité que nous proposons nous conduit alors à poursuivre avec la question qui traverse les travaux évolutionnistes qui est celle de l'impact des évolutions des institutions sur le changement technique. Dans l'étude évolutionniste des innovations environnementales, les changements institutionnels sont confondus avec la réglementation environnementale. De notre point de vue, et c'est le point central de la discussion sur les *lock-ins*, cette réduction conduit à manquer les stratégies de reproduction des patrimoines productifs existants. Afin de poursuivre notre démonstration, nous allons, dans les sections suivantes, présenter la forme actuelle de l'industrie des formaldéhydes puis, nous mettrons en évidence les trajectoires technologiques explorées par les firmes.

C.2. VERS UNE REMISE EN CAUSE DES FORMALDÉHYDES : L'ÉVOLUTION DE LA LÉGISLATION DEPUIS LES ANNÉES 70

C'est à partir de 1987 que le formaldéhyde a été reconnu par l'EPA comme probablement reconnu comme cancérigène pour l'Homme en cas d'exposition à des taux anormalement élevés ou normaux et prolongés. En 1992, toujours aux Etats-Unis, les taux d'expositions quotidiens autorisés ont été diminués de 25%, passant de 1ppm à 0,75ppm (Zanini et al., 2012). C'est en 2009 et 2012 que l'International Agency for Research on Cancer (IARC) a démontré clairement le lien entre l'exposition entre les formaldéhydes et des leucémies. En Europe, la législation sur les formaldéhydes est partagée entre la directive sur les émissions de Composés Organiques Volatiles (COV) et le règlement européen *Registration, Evaluation, Autorisation and Restriction of Chemicals* (REACH).

La directive européenne portant sur les COV a été adoptée en 1999. Son objectif est de contrôler et réduire la diffusion de solvants dans l'environnement. Par suite, cette directive a été transcrite quasiment à l'identique dans la législation française (Journal officiel du 13 août 2000 ; Bellis-Bergouignan et al., 2004). Bellis-Bergouignan et al. (2004) précisent que cette directive est le résultat d'un processus entamé par la Convention de Genève de 1971. La directive porte sur les activités d'impression et copiage, traitements des surfaces, de laquages ou de vernissages, de nettoyage à sec, de production de produits pharmaceutiques et de traitement du bois. C'est cette dernière activité qui nous intéresse particulièrement. La Directive contraint les acteurs à utiliser « *the best available techniques at an economically acceptable cost, or by obtaining an equivalent reduction via any other method* » (Bellis-Bergouignan et al., 2004, p.217). Au rang de ces techniques, on peut trouver des techniques de captation des émissions, de diminution des émissions ou de substitution des molécules. Nous verrons dans la section suivante que chacune des options est exploitée dans le cas des formaldéhydes.

A la différence des directives européennes, REACH est un règlement. Il n'a pas besoin d'être transcrit dans les droits nationaux pour être appliqué. Le principe de REACH est d'imposer aux utilisateurs (fabricants ou importateurs) de molécules chimiques sur le sol européen de faire la démonstration de l'innocuité des produits chimiques utilisés. La réglementation REACH repose sur l'enregistrement et l'évaluation des produits, induisant une maîtrise de leurs produits et de leurs effets par les firmes. Ainsi, elles doivent « *mettre en œuvre des mesures de gestion des risques afin d'en assurer une utilisation sécuritaire tout au long de la chaîne d'approvisionnement (fabricants, formulateurs, distributeurs, etc.) et jusqu'à l'utilisateur final* » (Lagriffoul, 2013, p.24). Le numéro spécial de la revue « Gérer et comprendre » dont est extrait la citation insiste particulièrement sur deux aspects. La charge de la preuve est renversée, c'est à la firme de faire la démonstration que le produit n'est pas dangereux et qu'il n'a pas à être inscrit dans les substances dont l'usage est limité, l'affichage signalétique modifié, ou interdites. Dans le cas du formaldéhyde, la France et les Pays-Bas se sont mobilisés pour porter la limitation des formaldéhydes. D'après les entretiens que nous avons

menés et les déclarations de Formacare, l'organe collectif des producteurs de formaldéhyde en Europe, la décision est en suspend entre une limitation et une interdiction.

La réglementation REACH, au-delà de la limitation qu'elle entraîne est perçue par une partie des chercheurs et des industriels comme une opportunité. Par exemple, dans un ouvrage consacré à la « chimie durable », Desmoulin-Canselier et Léca (2011) écrivent qu'« *il s'inscrit dans un mouvement général en faveur du développement durable, avec des dispositions qui s'articulent autour des principes de précaution, de prévention et de substitution* » (Ibid., p.159). Du côté des industriels, c'est en partie la teneur du numéro de « Responsabilité et Environnement » (2013) consacré à REACH. Dans sa contribution, Clamadieu² et de Gerlache (2013) expliquent que REACH permet aux industriels de redéfinir l'identité de leurs produits en communiquant sur leur autorisation dans le cadre de Reach. Enfin, en 2010, C. Rupp-Dahlem, responsable de l'Association Chimie du Végétal, déclarait : « *A court terme, Reach représente de nombreuses contraintes, assure Christophe Rupp-Dahlem, le président de l'association chimie du végétal et directeur de programme au sein du groupe Roquette. Mais cette réglementation est un accélérateur pour la mise sur le marché de certaines de nos molécules* » (l'Usine Nouvelle, 2010).

Ainsi, les dispositifs législatifs mis en place ouvrent des opportunités pour les acteurs de la chimie du végétal. Par conséquent, cette nouvelle contrainte ne peut être considérée uniquement comme une contrainte mais nous invite à considérer les stratégies d'adaptation des firmes à ces nouvelles règles.

D. VERS UNE SUBSTITUTION PAR LE BIOSOURCE ? LA VARIÉTÉ DES TRAJECTOIRES TECHNOLOGIQUES

Après avoir présenté l'hétérogénéité des stratégies développées par les industries de la chimie « traditionnelle » pour travailler au maintien de la trajectoire à laquelle ces firmes appartiennent, nous proposons de décrire les deux trajectoires explorant une substitution du formaldéhyde associée à la substitution de phénols d'origine fossile par des matières d'origine végétale, principalement issues de l'exploitation forestière. Nous présenterons tout d'abord la voie fondée sur l'usage des tannins. Celle-ci présente la particularité d'être très centrée autour d'A. Pizzi, chimiste à l'Université de Lorraine. La seconde trajectoire décrite est celle de l'usage des lignines envisagée pour la substitution des formaldéhydes. Plutôt portée par la FCBA, organisme de recherche de l'industrie des panneaux de bois, la voie lignine est issue des efforts de démonstration de la possibilité d'une large transition vers l'usage du végétal par un recours intensif à la lignine comme matières premières. Ainsi, dans ce contexte, un rapport australien, recommandé par le responsable Chimie Verte et Matériaux de la FCBA, estime qu'à l'heure actuelle, la montée en puissance de la réflexion sur des substituts aux résines et adhésifs utilisant des formaldéhydes est essentiellement due à un « *research push* » (FWPA, 2010).

D.1. L'INDUSTRIE DE LA CHIMIE DÉFEND SES PRODUITS

L'organisme principal de défense des producteurs de formaldéhydes en Europe est Formacare. Il s'agit d'un groupe thématique rattaché à l'European Chemical Industry Council, qui constitue l'organisation collective de l'industrie de la chimie en Europe. Formacare réunit trente-six membres. Parmi les adhérents, l'on retrouve des firmes telles que BASF, DuPont ou Celanese qui sont des grandes firmes de la chimie, pour certaines existant depuis le début du 20^{ème} siècle. On trouve aussi des producteurs de panneaux de bois ou de résines (Kronochem, Fantoni ou le groupe Frati représenté par Chimica Pomponesco). Enfin, quelques producteurs nationaux comme Ercros ou Euroresinas sont aussi membres de l'association. Les prises de position publiques de Formacare sont relativement limitées mais représentatives de la définition par les industries membres de cette association d'un problème collectif, entendu comme le partage de

² Précisons que Clamadieu est Président du comité exécutif de Solvay et G. de Gerlache est responsable de la communication du groupe.

conditions d'entreprises similaires (Jullien & Smith, 2011) qui sont fondées sur les patrimoines productifs des firmes (Béfort, 2014).

L'analyse des communiqués de presse produits par Formacare depuis 2012³ est particulièrement éclairante sur sa vision politique de l'industrie des formaldéhydes. Nous avons pu identifier trois types d'arguments portés par Formacare : les formaldéhydes sont un produit naturel, ont un impact économique positif, une discussion de la légitimité des études critiquant l'usage des formaldéhydes (.1.1.). Puis, nous montrons la diversité des stratégies adoptée par les firmes des formaldéhydes membres de Formacare (.1.2.).

D.1.1. LA PROBLEMATISATION COLLECTIVE DU FORMALDEHYDE PAR LES REPRESENTANTS DES INDUSTRIES CHIMIQUES EN EUROPE

Dans le commentaire d'une étude danoise, publié par Formacare, on trouve la citation suivante : « *Formacare Secretary General, Phil Hope, comments: "Formaldehyde is released naturally in the environment, and it is estimated that less than 1% of global formaldehyde emissions arise from industrial manufacture and use"* »⁴. En 2011, le secrétaire général de Formacare développait un argument relativement similaire à propos de la limitation de l'usage des formaldéhydes aux Etats-Unis : « *Formaldehyde has been used safely for over a hundred years. The substance has been extensively examined, with numerous studies into potential carcinogenic effects* »⁵. Cette approche vise à relativiser la dangerosité de la présence des formaldéhydes en raison de leur présence dans la nature – comme la très large majorité des molécules chimiques – mais ne répond pas sur le problème de la surexposition due aux formulations des produits chimiques qui est le cœur de l'objectif de son interdiction.

Fin 2014, Formacare a renchérit en titrant sa lettre d'information mensuelle « *Small application, big benefits* ». Dans celle-ci, l'organisme tente de travailler sur l'identité des produits en promouvant l'utilisation des formaldéhydes pour la production de résines à haute performance pour la production de résines d'acétate destinée à la fabrication de supports de ceintures de sécurité. Dans ce second argument, les résines (mises en cause par ailleurs) sont promues ici comme des moyens d'éviter l'usage du métal dans la fabrication des ceintures, et donc l'industrie des formaldéhydes participerait à la sécurité de tous : « *When it comes to road safety, reliability is the key word. Even at very low speeds, the stress on the mechanism is huge, particularly in case of frontal impact. Today, polyacetal resins are the only polymers that can resist the repeated impact tests, under extreme temperature conditions, required by vehicle specifications.* »⁶.

La troisième dimension de la problématisation tient en l'appel à une certaine communauté scientifique dont l'activité permettrait de légitimer l'usage des formaldéhydes. En 2012, alors que la Commission Européenne était sur le point de délibérer sur la reclassification des formaldéhydes visant à limiter sa diffusion, Formacare organisait avec la fédération européenne des producteurs de panneaux de bois une conférence dont le but était de « *hold an open and objective public debate on formaldehyde science, to enable all stakeholders to hear about the latest scientific research directly from the authors. These fascinating debates showed unequivocally that the body of evidence on the carcinogenicity of formaldehyde remains highly controversial among the scientific community. In our view a reclassification of formaldehyde is far from being warranted.* »⁷ said Dr. Phil Hope, Secretary General of formacare ». L'enjeu de ce colloque était de souligner les débats existants sur la toxicité des formaldéhydes, avec l'appui d'une partie de la communauté scientifique. Il est intéressant de noter que dans le communiqué de presse faisant le compte rendu de cette conférence, ce sont les études d'organismes de santé

³ Seuls les communiqués de presse depuis 2012 sont disponibles.

⁴ <http://www.formacare.org/european-commission-report-on-danish-nmvoc-study/>, consultée le 29/01/2015

⁵ <http://www.formacare.org/formacare-statement-on-12-roc>, consultée le 29/01/2015

⁶ <http://www.formacare.org/november-2014-small-application-big-benefits/>, consultée le 29/01/2015

⁷ <http://www.formacare.org/scientists-divided-on-potential-carcinogenicity-of-formaldehyde/>, consultée le 29/01/2015

publique comme l'International Agency for Research on Cancer (IARC) ou le U.S. National Cancer Institute (NCI) qui sont critiquées pour avoir utilisé ce qui serait la seule étude établissant un lien entre des cancers du nez et des formaldéhydes avec des données qui n'auraient pas été publiées. La dernière phrase de la citation précédente est particulièrement intéressante pour son double sens. D'une part, P. Hope souligne la controverse scientifique, aussi alimentée par l'industrie des formaldéhydes. Celle-ci serait encore ouverte. D'autre part, cette phrase indique que Formacare, et ses adhérents, vont encore se mobiliser pour s'opposer à la reclassification des formaldéhydes.

Cette mise en forme collective du problème des formaldéhydes est le résultat, de notre point de vue d'un compromis entre les différents types de firmes membres de Formacare comme le confirme l'analyse des stratégies par types de firmes en fonction de leurs caractéristiques.

D.1.2. « BUSINESS AS USUAL » (OU PRESQUE) POUR LES INDUSTRIES DES FORMALDEHYDES ?

Cette expression n'est pas de nous mais d'A. Magnusson, responsable développement de produits chez Johnson Matthey Formox, dans une communication à l'Asian Methanol Conference 2013. Son intervention intitulée « *Formox and Formaldehyde market update – A turbo in the future ?* » visait à présenter la vision pour le futur de sa firme. Dans son discours, l'auteur relie la croissance de la demande de formaldéhydes à la croissance économique asiatique et particulièrement chinoise. A cela s'ajoute l'usage en Chine du formaldéhyde comme intermédiaire dans la production de carburants à base de charbon. Rappelant que « *formaldehyde is very much a local product; it depends on the local supply and demand situation so plants will be built in some areas and closed in others* », la firme envisage un développement en Chine. Dès lors, la firme ne s'inquiète pas des débouchés pour ses produits. Pour la firme, la problématique des formaldéhydes est une question pour l'aval des filières, c'est-à-dire, soit pour les utilisateurs de panneaux de bois, ou pour les clients de la firme qui achèteront des licences d'exploitation. Le message de la firme est donc d'affirmer que peu importe les réglementations sur les usages du formaldéhyde, elle continuera d'en produire dans des pays où cela est possible (comme en Chine ou en Inde) et que, par conséquent, ils pourront être de nouveau exportés vers l'Europe.

Des firmes comme Dynea et Celanese ne l'expriment pas aussi clairement que Johnson Matthey Formox, mais elles suivent une stratégie similaire. Par exemple, Dynea a contracté une *joint-venture* avec Metafrax, la firme historique productrice de méthanal d'abord en URSS puis en Russie, c'est-à-dire, le précurseur essentiel à la production de formaldéhydes et par conséquent, de résines UF et PF. Cette joint-venture est le moyen pour Dynea de s'assurer la fourniture de matières premières et de débouchés pour ses produits en Russie et pour Metafrax de bénéficier des connaissances de Dynea dans la production de panneaux de bois. A ce titre, notons qu'un brevet a été publié fin janvier 2015 sur la production de panneaux de bois à haute performance, sur la base de formaldéhydes (US patents 8940127).

Si le discours des firmes étudiées ici n'évoquent pas véritablement la limitation des usages du formaldéhyde, il s'avère qu'elles développent des stratégies prenant en compte l'évolution de la législation. Certaines prennent position en Asie ou en Russie, c'est-à-dire, dans des zones géographiques avec une demande croissante de résines phénoliques et une législation sur les émissions de COV inexistantes. Cela témoigne donc d'une première stratégie d'adaptation à la montée en puissance des réglementations sur le formaldéhyde. Ici, le compromis entre les performances environnementales et performances techniques (au sens de Brouillat et al., 2014) n'est pas modifié, les produits restent identiques. Dans la partie suivante, nous allons étudier les stratégies qui relèvent de la modification de l'identité des produits tout en s'inscrivant dans la trajectoire d'une absence de substitution des formaldéhydes.

D.1.3. VERS DES PRODUITS A FAIBLES EMISSIONS : IDENTITE DES PRODUITS ET GREENWASHING

D.1.3.1. Remplacer le formaldéhyde par le glyoxal ?

Dans la trajectoire de maintien d'usages inchangés, des firmes développent des pratiques visant à verdir leurs produits à base de formaldéhydes. Pour cela, la première stratégie que nous identifions est celle de BASF qui vise à remplacer le formaldéhyde par le glyoxal. Cette molécule, très semblable au formaldéhyde, pourrait être utilisée aisément mais, comme nous l'a indiqué un médecin de l'INRS lors d'un entretien, cette molécule ne règle pas le problème des COV. La firme a produit deux documents visant à bâtir une nouvelle identité pour ses produits : « *Glyoxal shows high potential in the substitution of aldehydes, e.g. for formaldehydes or glutaraldehyde* » (Brochure BASF, p.6). Le second document de BASF dont l'objectif est de faire la promotion du glyoxal est du même type. Dès la deuxième page, il est écrit : « *What do we deliver ? (...) Sustainable development of customers' products with glyoxal from BASF* ». Ainsi, et c'est aussi ce que l'on retrouve dans la brochure évoquée précédemment, BASF se propose, à l'image du tournant qu'a pris l'industrie de la chimie dans les années 60-70, de participer à la définition du produit de ses clients : « *to discover new fields of use, we are working with our customers in innovative partnerships. As their partner we are highly interested in supporting our customers with our expertise to maximize their innovative outcome* » (Brochure BASF, p.3). Ce que fait BASF en procédant ainsi, c'est travailler l'identité des applications au sein desquelles il y aurait une substitution du formaldéhyde par du glyoxal. La promotion de l'usage de cette molécule se fait sur la base de la remise en avant d'une partie du portefeuille d'activités de BASF qui en produit depuis une cinquantaine d'années.

D.1.3.2. Les guides d'usage du formaldéhyde

Des firmes comme DuPont ou Momentive produisent des guides d'usages de leurs produits. Elles revendiquent des arguments similaires aux positions de Formacare en expliquant que le formaldéhyde est un produit naturel : « *Formaldehyde is a naturally occurring compound present in all living organisms – plants, animals and humans. As a one-carbon compound, it is used in numerous metabolic processes for the biosynthesis of more complex molecules* » (Momentive, 2012). DuPont tient un discours du même type. Dans une brochure ayant l'apparence d'un document officiel de l'Occupational Safety and Health Administration américaine, chargée de la prévention des risques pour la santé au travail, la firme reprend, elle aussi cet argument de non dangerosité des formaldéhydes en raison de leur présence dans la nature : « *formaldehyde is a simple compound made of carbon, hydrogen and oxygen. It is found everywhere and is produced naturally by plants, animals and humans as part of the normal life* » (Dupont, p.3)⁸. Etabli sous forme de questions-réponses, il est écrit : « *How do i minimize exposure to formaldehyde in my jobs ?* » (Dupont, Ibid., p.8). Il s'en suit alors une page de recommandations concernant l'aération des espaces des unités de production dans lesquelles sont utilisés les formaldéhydes et la limitation de la diffusion de poussières par l'installation de protections autour des machines. R. Vincent, ingénieur chimiste à l'INRS, nous confirmait l'utilité d'installations de ce genre mais rappelait qu'elles n'empêchaient pas complètement la diffusion de particules de formaldéhydes et bien entendu, ne réglaient pas le problème de leurs émissions dans les produits finaux.

D.1.3.3. La certification des produits à faible émission

Les firmes s'appuyant sur une stratégie de certifications de leurs produits à faibles émissions de formaldéhydes sont principalement des firmes productrices de panneaux de bois, c'est-à-dire en aval des filières. A ce titre, nous avons identifiés Advachem, Chimica Pomponesco, Fantoni et Kronochem (qui dispose également d'accords avec AkzoNobel qui est aussi sur une stratégie de substitution des phénols d'origine fossile par des tannins). La stratégie de ces firmes repose sur deux axes. D'une part, elles développent des systèmes permettant de produire des panneaux de bois (ou isolants dans le cas de Fantoni) à faibles émissions. Par exemple, Advachem a déposé un brevet en 2011 (Advachem, 2012) qui constitue une partie de son portefeuille d'activité (ECHA,

⁸ Ce document n'est pas daté non plus.

2012). Dans cette optique, Kronochem développe également un discours installant une gradation entre les différentes qualités de ses produits. La firme se définit comme productrice de produits non toxiques par différenciation. En effet, elle raconte son développement depuis 1985 comme un « *journey to low emission products* »⁹. L'histoire de la firme est racontée par la réussite de la production de produits atteignant ou dépassant des standards présentés comme contraignants.

Le second axe tient en la certification des produits et des *process* de production. Par exemple, la firme Frati, productrice de panneaux de bois, affiche neuf certifications sur ses produits. Ainsi, Frati se positionne comme un producteur de produits à forte consommation soutenables, garantis par des certifications diverses. Ce modèle économique se rapproche de celui de Fantoni. Cette firme italienne est spécialisée dans la production de panneaux d'isolation sonore. Dans son catalogue de présentation des produits, il est fait mention pour chacun de la faible émission de COV sans toutefois revendiquer un aussi grand nombre de certifications que Fratti.

D.1.4. CONCLUSIONS INTERMEDIARES

Dans le cas des firmes traitées précédemment, il s'agissait, à la différence de DuPont et Momentive, d'assumer la responsabilité, dans le discours, de l'émission et de leur diminution des formaldéhydes. La problématique des formaldéhydes n'est alors pas travaillée dans la définition du modèle économique non pas comme une contrainte, mais utilisée comme une opportunité comme en témoigne la différenciation opérée par les dernières firmes étudiées. La variété des discours a plusieurs implications. Tout d'abord, nous pouvons l'interpréter par les différentes positions occupées dans les filières. En n'étant pas directement en contact avec les consommateurs finaux des panneaux de bois ou des résines, les industries de la chimie n'ont pas besoin, pour vendre leurs formaldéhydes, d'un discours de développement soutenable aussi construits que pour les industriels de l'aval des filières. Puis, cette variété des positions confirme notre hypothèse que la position de Formacare, par définition, partagée par ses membres, est un compromis entre une variété de stratégie face à l'évolution de la réglementation. L'entrée par l'organe collectif des producteurs de formaldéhydes donne donc du sens dans la définition d'une trajectoire, mais, elle ne saurait être suffisante pour comprendre la forme d'une trajectoire technologique, comme en témoigne la variété des positions décrites. Enfin, nous l'avons montré, les discours de soutenabilité des firmes s'alimentent, et alimentent en retour, le patrimoine productif des firmes porteuses de ces patrimoines.

Ce premier résultat a deux conséquences. Premièrement, si l'on réfléchit en terme d'innovations incrémentales et radicales, quelles sont-elles ? Si l'on compare les entreprises de la chimie en amont et en aval des filières, il semblerait qu'à l'aune de la problématique des formaldéhydes, la distinction entre ces deux types d'innovation ne permette pas d'éclairer l'analyse car il s'agit d'une part, d'un résultat explicatif *a posteriori* et d'autre part, très relatif aux technologies étudiées. En tant qu'absence d'innovation technologique, la stratégie d'implantation de la production dans des zones géographiques ne disposant pas de réglementations environnementales contraignantes, fait apparaître, *a posteriori*, la stratégie de développements de dispositifs de captages ou de rétention des émissions devient une innovation radicale. Mise à part la possibilité de production d'un discours facilement entendable pour des commandes de politiques publiques, ce résultat, si on l'admet, ne nous indique que très peu de choses quant aux dynamiques de transition.

Si l'on considère les innovations dans une acception plus large, la stratégie adoptée par des firmes comme Formox peut alors être considéré comme une innovation. Cette question du statut des innovations participe de la discussion des *lock-ins*. La fonction des innovations radicales est de lever les *lock-ins*, mais, la distinction entre innovations incrémentales et radicales étant relative au niveau d'analyse de la technologie, cette lecture perd de son opérabilité pour répondre à la problématique de l'analyse du changement. Dès lors, et il s'agit d'après nous d'un résultat

⁹ <http://www.kronospan-worldwide.com/environment/our-journey-to-low-emission-products/>, consultée le 17/02/2015

intermédiaire de cette étude de cas, l'endogénéisation dans l'analyse de la dynamique économique des *lock-ins* est permise par l'approche en termes de patrimoines productifs, qui permet de travailler en systémique, sur des niveaux d'analyses variés et de décrire les compromis au sein d'une filière.

E. VERS DES PRODUITS BIOSOURCES ?¹⁰

Nous avons montré dans la section précédente comment une partie de l'industrie des formaldéhydes tente de mettre en forme l'espace dans lequel va être interrogée la production et l'usage des formaldéhydes. Mais cette espace n'est pas traité de la même façon par d'autres pans de l'industrie déjà installés ou qui essaient d'entrer dans la production de panneaux, colles et résines, non sur la base des formaldéhydes, mais sur la base de leur substitution. La première partie de cette dernière section est consacrée à la trajectoire de l'usage des tanins. La seconde partie est consacrée à l'usage de la lignine.

E.1. LA TRAJECTOIRE DES TANINS

E.1.1. DES TANINS POUR LE TEXTILE A LA PRODUCTION DE MOUSSES ISOLANTES

Historiquement, les tannins ont été utilisés dans le textile pour le tannage et la préservation du cuir. Dès le Moyen-Age, la technique de fractionnement nécessaire à la production de tannin a été mise au point (Dean, 2004). Beaucoup plus tard, nous pouvons trouver des traces de recherches en cours sur les tannins (Freudenberg, 1977). Dans son article, l'auteur évoque ses premières recherches en 1916 sur les tannins et les lignines. Dans sa « Contribution à l'histoire industrielle des polymères en France », J.-M. Michel rappelle que les tannins ont été très largement utilisés dans la production de la soie à la fois dans le bassin lyonnais et dans le Massif Central. La firme Gillet était spécialisée dans la production de ces tannins qui venait d'abord du châtaigner puis d'Argentine et de l'exploitation du quebracho, du campêche, du mimosa et du mirobolam et en exportait dans le monde entier dès 1906. Il est à noter que la firme Gillet s'est installée comme société chimique. Peu après l'Armistice de 1918, la firme Gillet a regroupé toutes ses activités chimiques, comme la production de chlore, dans une filiale, Progil. Une part de l'activité de cette firme était la production de tanins de châtaigniers. En 1960, elle en fabriquait la moitié de la production française. La firme avait trois débouchés : le textile, les panneaux de bois et la cellulose papetière. Parallèlement, Progil produisait des tanins synthétiques, c'est-à-dire des condensats de formol avec des sulfones, c'est-à-dire, un aldéhyde. Progil possédait également une filiale fondée en 1922 spécialisée dans la production de résines et colles synthétiques à base de formol issues de tanins de châtaigniers. Ainsi, l'usage industriel des tanins s'est poursuivi jusqu'aux années 60. Dans la littérature en chimie, A. Pizzi, considéré comme le « pape » de la chimie des tanins pour les adhésifs et résines, relève quelques travaux fondateurs entre 1938 et 1958 (Pizzi, 2000). Cette dernière contribution est particulièrement éclairante car Pizzi écrit que lorsqu'il débuta ses travaux sur les tanins comme adhésifs, il ne restait qu'une firme australienne qui les utilisait, avec sa propre formulation.

Durant les années 90, cet auteur a poursuivi ses travaux sur la formulation des résines et adhésifs à base de tanins et le développement de technologies de compression et de moulage pour une variété d'applications, qui rentrent toutes aujourd'hui, dans le champ de voies possibles pour la substitution des formaldéhydes. Bien que ceux-ci aient été utilisés, la recension des travaux issus du projet Biofoambark nous indique qu'il s'agit effectivement de cette trajectoire qui est suivie. L'objectif du projet évoqué est de développer des mousses isolantes biosourcées et

¹⁰ Les résultats présentés ici sont issus de notre participation au projet Biofoambark (Wood-Wisdom Era-net) durant un séjour de recherche au nova-Institut en mai-juin 2014. Bien qu'il s'agisse du fruit d'un travail mené avec M. Carus et A. Raschka, nous restons seuls responsables des positions défendues ici.

produites sans formaldéhydes. Dans ce projet, les tanins ont été retenus car leur structure moléculaire est très proche de celle des phénols d'origine fossile utilisés habituellement. Par ailleurs, ils ont la caractéristique d'être très réactifs. Le point de départ de ce projet est de tenter de valoriser les écorces d'arbres issues d'exploitations forestières qui ne sont utilisées, pour l'instant que pour le chauffage. En s'appuyant sur l'extraction des tanins, l'objectif est de provoquer leur réaction avec un aldéhyde, à l'image des techniques pour les résines et colles à base de formol. A cette première production serait ajoutée une seconde transformation : les écorces détanisées seraient alors utilisées pour produire du gaz. Afin de remplacer les formaldéhydes, il est annoncé dans le descriptif du projet que le glycérol et le furfural pourraient servir d'aldéhyde biosourcé en remplacement du formaldéhyde, s'inscrivant alors dans le contexte de la bioraffinerie. En effet, ces deux produits sont des co-produits de la production de carburants biosourcés. Ainsi, la chaîne de valeur proposée est la suivante :

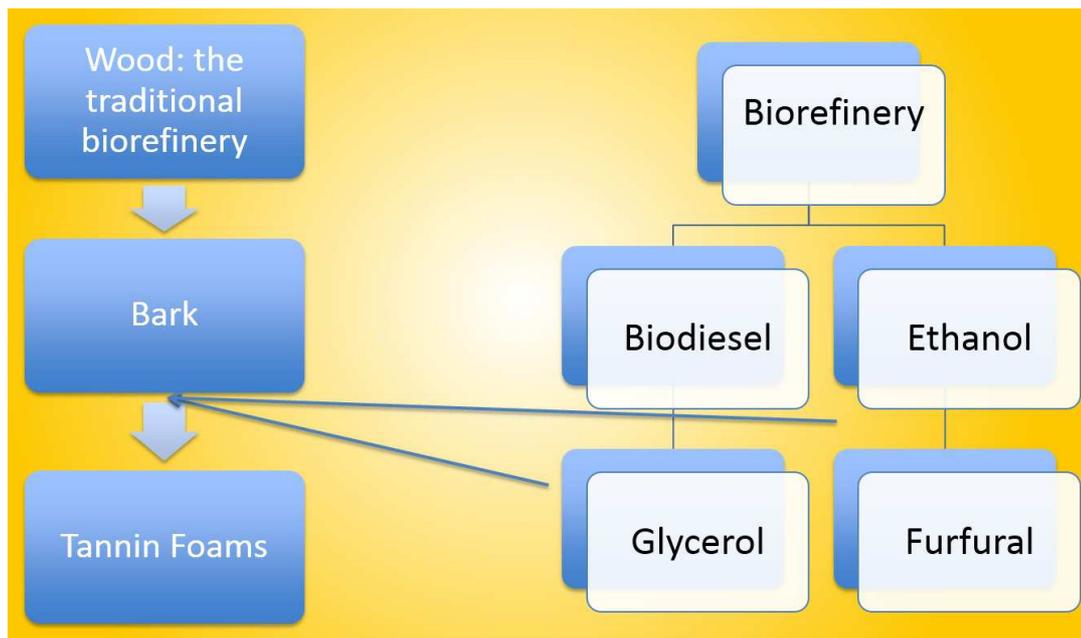


Figure 2: Représentation de la chaîne de valeur à l'origine du projet Biofoambark (d'après Raschka et al., 2014)

Testée durant la présentation de l'évaluation technico-économique, cette représentation a été approuvée. En effet, elle permet de produire un récit sur un produit s'inscrivant dans la démarche de la bioraffinerie et qui appelle, du fait de la simplicité de la représentation, une analyse de coûts qui pourront ensuite être optimisés et donner lieu au développement d'une filière, comme en témoigne la représentation suivante :

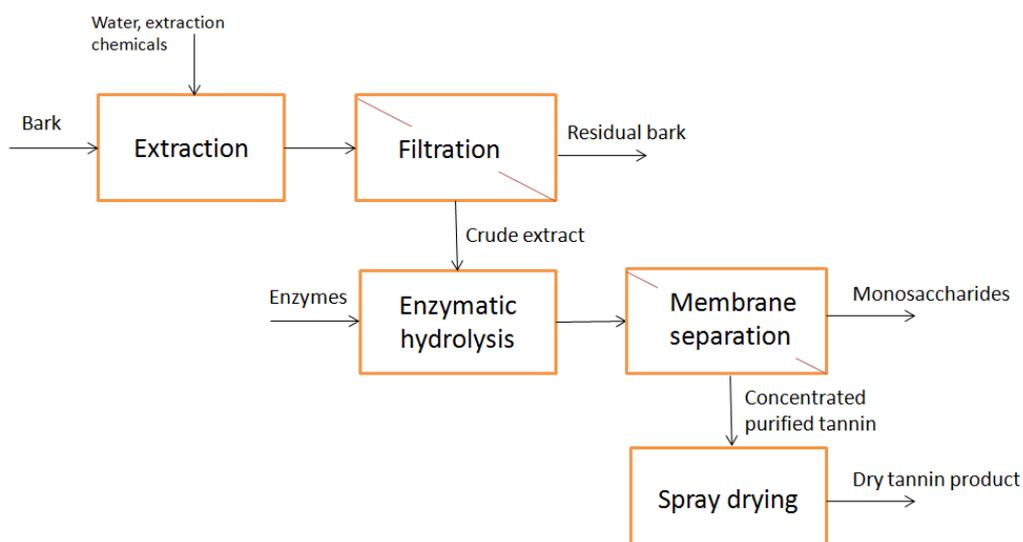


Figure 3 : Représentation des étapes clés dans l'extraction des tanins (schéma du VTT, documents internes au projet)

Cet extrait de la description du projet abonde en ce sens : « *Besides the environmental performance also a techno-economical study for the new technology and the bark/tannin supply chains as well as a study on market potentials will be conducted. The collected data and the investigated scenarios will help to define the most competitive technologies and chain supplies for European tannin foams based on sustainability and techno-economic criteria.* »¹¹. La demande adressée est claire : il s'agit de fournir une modélisation des coûts de production pour un *process*. Toutefois, une présentation issue du projet invite à reconsidérer la question des coûts pour le développement de ces produits (Winter & Laborie, 2014).

Cette évolution d'usages traditionnels des tanins, ancrés sur l'usage de ressources locales (qu'elles soient extraites de la nature ou du travail), vers la production de biens ancrés dans une problématique de transition relève d'une problématisation de l'espace alternative à celle portée par l'industrie de la chimie. Dans ce projet, la production de mousses isolantes s'inscrit dans la description d'une bioraffinerie de l'écorce d'arbres, issues de la récupération de déchets de l'exploitation forestière, dans une représentation de filière intégrée. La question des coûts est à la fois incontournable, au sens où, de notre point de vue, elle est la pierre angulaire du discours portant sur l'adoption des technologies, dans le prolongement de la réflexion issue des rendements croissants d'adoption, et d'autre part, masque l'enjeu de reproduction des pratiques des firmes au sein des filières.

E.1.2. LES COÛTS : VERITABLES *LOCK-INS*?

Dans la présentation de Winter et Laborie (2014), les auteurs sont revenus sur les différents verrous technologiques fondant les travaux des groupes de travail du projet : le type de ressources, l'extraction des tanins, la formation de la mousse, la possibilité de production de gaz et l'analyse de cycle de vie des produits. Ce n'est qu'à la fin de la présentation qu'est évoquée l'analyse en termes de coûts et seulement par l'intermédiaire du *green premium price*. Ce concept est mobilisé par le nova-Institute sous deux angles. Le premier, qui s'inspire de la gestion, vise à étudier si les consommateurs sont prêts à payer un supplément pour un produit « haut de gamme ». Le second, et c'est de cette façon dont il est travaillé au nova-Institute (Carus et al., 2012), vise à promouvoir l'identité verte d'un produit par la justification d'un prix plus élevé par son origine biosourcée. Ainsi, il s'opère un glissement vers une assimilation entre coûts et prix de vente, qui transforme une contrainte que serait un éventuel coût plus élevé en une opportunité : « *for the tannin-based foams an opportunity for 'green premium' might be given : 10-20% higher prices* » (Winter

¹¹ <https://www.biofoambark.uni-freiburg.de/Project%20Description/OBJ>, consultée le 23/02/2015

& Laborie, *Ibid.*, 2014). Dès lors, si dans le développement du projet, le coût n'est pas le facteur limitant la production de nouvelles mousses isolantes, il est nécessaire de se tourner vers les deux autres facteurs pointés par Cecere et al. (2014) qui sont les technologies et les acteurs. En effet, la présentation de Winter & Laborie présente l'objectif du projet comme suit : « *Core objective of Biofoambark : Development of insulating rigid foams based on bark tannins from European softwood species* » (Winter & Laborie, *Ibid.*, 2014). Plus loin, la perspective du projet est encore plus claire : « *Original (tropical) tannin formulations and kinetics have to be adapted* » (Winter & Laborie, *Ibid.*, 2014). Dès lors, l'hypothèse que la question du coût est centrale dans la transition est fortement affaiblie. Le véritable problème posé par les coûts est leur comparaison dans le cas de substitution terme-à-terme. La façon dont le problème des coûts est posé relève en réalité de la comparaison avec des produits d'origine fossiles destinés à être substitués. L'hypothèse sous-jacente est donc qu'il n'y a d'innovation de produits qui ne puissent s'extraire du système productif existant dans cette représentation. Les pistes suggérées par Cecere et al. (2014) et par l'étude de la substitution des formaldéhydes laissent penser que ce qui se cache derrière la mise en avant des coûts, relève de l'articulation entre les technologies et les acteurs qui les portent par leurs efforts pour maintenir les modes de production associées aux technologies.

E.1.3. RELIRE LES VEROUS TECHNOLOGIQUES DANS LA PERSPECTIVE DES PATRIMOINES PRODUCTIFS COLLECTIFS

Notre nouvelle hypothèse suggère de s'intéresser à la façon dont les acteurs cherchent à lever les verrous technologiques constitutifs des *lock-ins*. Pour cela, nous proposons de lister les publications issues du projet Biofoambark afin de pointer les points critiques dans le développement des mousses de tanins. A partir des documents internes au projet, les grandes étapes de la production de la mousse de tanins sont l'exploitation de forêts (dans le cas du projet, d'espèces européennes) puis le découpage en rondins et la récupération des écorces, la préparation des écorces, l'extraction des tanins à partir d'eau chaud puis la formulation (avec des phénols issus des écorces, un aldéhyde et un catalyseur) qui produit la mousse de tanins. La première catégorie de travaux publiés dans le cadre du projet relève de la réalisation d'analyses de cycles de vie et d'évaluation des ressources disponibles :

Title	Brief summary
Gonzalez-Garcia, S., et al. (2013). "The influence of forest management systems on the environmental impacts for Douglas-fir production in France." <u>Science of the Total Environment(461-462): 681-692.</u>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Not so much cultivated in Europe, France is the first producer 2) High environmental impact that is compensated by increase of the biomass productivity
Gonzalez-Garcia, S., et al. (2013). "Cradle-to-gate life cycle inventory and environmental performance of Douglas-fir roundwood production in Germany." <u>Journal of Cleaner Production 54: 244-252.</u>	Logging activities and fossil fuel requirement are the environmental hotspots
Gonzalez-Garcia, S., et al. (2014). "Divergences on the environmental impact associated to the production of maritime pine wood in Europe : French and Portuguese case studies." <u>Science of the Total Environment(472): 324-337.</u>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Intensive vs. Extensive scenario for maritime pine (large industrial use) 2) Environmental effects and yields differs in function of the local conditions and productions decisions
Gonzalez-Garcia, S., et al. (2014). "Cradle-to-Gate Life Cycle Assesment of forest operations in Europe : environmental and energy profiles." <u>Journal of Cleaner Production 66: 188-198.</u>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Twelves different scenarios with the most representative tree species in the most producing countries 2) Logging operations are the environmental hotspots (in every scenarios)
Gonzalez-Garcia, S., et al. (2013). "Environmental evaluation and comparison of Douglas-Fir wood productionin french and german stands." <u>Forest Ecology and Management in press.</u>	Thinning steps and final cutting are the environmental hotspots, but conditions depend mainly on the system considered by the study

Figure 4 : Résumé des publications portant sur les analyses de cycle de vie et la disponibilité des ressources (Béfort, 2014)

Title	Brief summary
1) Garcia, D. E., et al. (2013). "Hydroxypropyl tannin derivatives from <i>Pinatus Pinaster</i> ." <i>Industrial Crops and Products</i> 49 : 730-739.	Modification of tanin « <i>seemingly inexpensive, simple, effective and efficient</i> » (p. 738)
2) Lacoste, C., et al. (2013). "Pine tannin-based rigid foams : mechanical and thermal properties." <i>Industrial Crops and Products</i> 43 : 245-250.	1) Three formulations: pine/pine+formaldehyde/mimosa+formaldehyde 2) Mimosa+F has a better resistance but pine a better insulation => Aim is to prove the utility of pine with a non toxic aldehyde
3) Lacoste, C., et al. (2013). "Bioresourced pine tannin/furanic foams with glyoxal and glutaraldehyde." <i>Industrial Crops and Products</i> 45 : 401-405.	1) In a previous paper, authors show the need of an aldehyde to improve the resistance of the foam 2) Explore two solutions: glyoxal vs. Glutaraldehyde => Glyoxal offers the best properties
4) Lacoste, C., et al. (2014). " <i>Pinus Pinaster</i> tannin/furanic foams : PART I. Formulation." <i>Industrial Crops and Products</i> 52 : 450-456.	Influence of surfactants. Explore the process with <i>Pine Pinaster</i>

L'analyse de ce premier groupe de publications nous indique que le choix des espèces d'arbres à utiliser et le mode de gestion des forêts sont des points abordés dans chacune des publications. Toutefois, c'est bien le premier point qui traverse chacune des publications à l'exception de l'avant-dernière. Dans un entretien mené en décembre 2014, A. Pizzi nous expliquait que d'après lui, le développement limité de l'usage des tanins était essentiellement lié à un problème de ressources (de connaissance et de disponibilité) et le manque d'unités de production de taille suffisante. Si l'on poursuit le travail de classification des publications du projet, il s'avère qu'elles portent toutes sur la détermination du meilleur type d'écorces à formuler avec un aldéhyde (dont une variété est testée).

Title	Brief summary
<p>5) Kemppainen, K., et al. (2014). "Spruce bark as an industrial source of condensed tannins and non-cellulosic sugars." <u>Industrial Crops and Products</u> 52: 158-168.</p>	<p>1) Good tannin availability 2) Large amount of sugar 3) Lignin</p> <p>=> Propose an « on-site » biorefinery centered around tanning production and co-product valorization to ensure the economic viability, but also, to improve phenolic content of the product => need to find a « compromise » between these two assumptions</p>
<p>6) Garcia, D. E., et al. (xxx). "Substitution pattern elucidation of hydroxypropyl <i>Pinus Pinaster (Ait.) bark polyflavonoids derivatives by ESI(-)-MS/MS.</i>" <u>submitted.</u></p>	<p>Characterization of <i>Pinus Pinaster</i></p>
<p>7) Cop, M., et al. (2014). "Curing characterization of spruce tannin-based foams using the advanced isoconversional method." <u>BioResources</u> submitted.</p>	<p>1) Bark has to be considered as a feedstock and no longer as a waste 2) Need to understand transition phenomena to obtain desired properties 3) 4 different formulations</p> <p>Need help for this one too</p>
<p>8) Garcia, D. E., et al. (xxx). "Polyphenolic resins prepared with maritime pine bark tannin and natural bulky-aldehydes." <u>submitted.</u></p>	<p>Formulation of several resins based on on <i>Pinus Pinaster</i> to test several aldehydes</p>

Figure 5 : Résumé des publications portant sur les formulations de mousses de tanins (d'après Béfort, 2014)

Afin de bien saisir la dynamique que permet de pointer ce projet de recherche, il faut avoir à l'esprit qu'y participe la firme Ledoga. Cette firme italienne a été fondée au milieu du 19^{ème} siècle dans le Piémont à partir de châtaignier. Elle fait aussi partie d'un groupe, producteur de furfural qui peut être utilisé comme aldéhyde dans la production de mousses de tanins, qui a développé l'exploitation de tanins de quebracho en Argentine. Dans son portefeuille de brevets, Silvateam, le groupe dont fait partie Ledoga, produit également des panneaux de bois. Dans leur intervention, Winter & Laborie (2014) précisent que l'objectif est de pouvoir produire des mousses isolantes aux caractéristiques similaires que celle utilisées en Europe, tout en utilisant une technique maîtrisée depuis la première moitié du 20^{ème} siècle, et encore très répandue en Amérique du Sud. La prise de position de Ledoga sur cette trajectoire des mousses de tanins peut être déduite de brevets déposés avec A. Pizzi (var. ref.) mais aussi de la participation matérielle à des thèses encadrés par ce dernier (comme Tondi, 2009 par exemple). L'intérêt pour Ledoga réside aussi dans une stratégie de différenciation par un produit sans formaldéhyde dans la concurrence avec les autres producteurs de panneaux de bois italiens bâtissant une stratégie de certifications « faibles émissions ».

Ainsi, plutôt qu'une question de coûts en tant que tels, il s'avère que les *lock-ins* correspondraient plutôt aux contraintes que les firmes se fixent dans leurs stratégies de reproduction de leurs patrimoines productifs collectifs (où les coûts peuvent être un des verrous que les firmes se construisent). Ici, nous pouvons identifier des contraintes « externes » qui sont la limitation de l'usage des formaldéhydes, la concurrence sur la ressource et dans la production de panneaux de bois. Toutefois, des contraintes « internes » sont fixées : fournir des performances équivalentes ou supérieures et s'inscrire dans une trajectoire technologique existante comme en témoignent les résumés des articles.

E.2. LA VOIE LIGNINE

La dernière trajectoire technologique existante est celle de l'usage des lignines. La fonction des lignines pour les colles et résines est similaire à celle des tanins dans le sens où elles contiennent des phénols. La poussée récente pour l'usage des lignines dans la production de matériaux s'inscrit dans le contexte d'émergence de la bioraffinerie. Institutionnellement, cette matière première a été reconnue dans les premiers exercices de prospective comme StarColibri ou plus récemment par le projet Biocore qui s'est terminé en 2014. La lignine est le deuxième polymère (après la cellulose) présent dans la biomasse et environ 90-95% de la production mondiale de lignine est brûlée pour la production d'énergie. La connaissance de la lignine est relativement ancienne car les premiers travaux ayant montré son existence datent de 1890. Malgré cela, la caractérisation fine de la lignine n'a été réalisée qu'à la fin des années 1990. Dans ce contexte, deux grands types d'usage s'affrontent. D'une part, l'industrie papetière produit de grandes quantités de lignine qui sont des co-produits destinés à être valorisés par un procédé Fisher-Tropsch. Lors d'un colloque de politique industrielle qui s'est tenu en 2012, un représentant de la société papetière finlandaise UPM expliquait que ce procédé était innovant et largement maîtrisé car connu depuis la deuxième Guerre Mondiale. Ce procédé repose sur le fractionnement des macro-molécules de la lignine en atomes de carbone en vue de produire des carburants d'origine végétale. Cette démarche s'inscrit dans l'extension des portefeuilles de produits des firmes papetières par la valorisation de déchets désormais traités comme des co-produits. Cette vision relève de la construction politique de filières de la bioraffinerie centrées sur une bioraffinerie dédiée en priorité à la production de carburants et avec les co-produits de cette production, le développement de matériaux biosourcés. La grande problématique de cette filière réside dans le coût élevé que représente le fractionnement de la lignine. Celle-ci constitue la structure même de la plante. Par conséquent, cela suppose de grandes quantités d'énergie pour déconstruire la plante, augmentant largement le coût de production. La solution envisagée serait de disposer d'unités de production de grande taille mais les différentes crises de la chimie industrielle nous indiquent que les investissements nécessaires pour permettre la rentabilité, hors crise, de ces produits à faible ajoutée fait peser une forte incertitude sur les firmes spécialisées dans ces productions (Galambos et al., 2007).

Parallèlement à cette vision, des approches centrées sur l'usage des fonctionnalités de la plante sont développées. La revue de littérature de Laurichesse et Avérous (2014) s'inscrit clairement dans cette seconde trajectoire. Ils décrivent la lignine ainsi : « *lignin is recognized as a highly branched polymer with a variety of functional groups: aliphatic and phenolic hydroxyls, carboxylic, carbonyl and methoxyl* » (Laurichesse et Avérous, *Ibid.*, p.1268). L'idée est donc de séparer les fractions de la lignine contenant ces fonctions afin d'obtenir les fonctionnalités attendues pour la production de polymères. Dans le cas de la production de mousses et résines biosourcées sans formaldéhydes, il s'agit alors d'isoler les fonctions phénoliques de la matière. Nous avons identifié deux grands acteurs porteurs de cette stratégie. Le premier est la firme Chimie Industrielle des Matières Végétales (CIMV) et le second le FCBA (centre de recherche collectif des exploitants forestiers et producteurs de matériaux à base de bois). Dans une intervention en 2010 lors d'une rencontre du pôle de compétitivité AXELERA, da Silva Perez et al. (chercheurs au FCBA) soulignent le paradoxe que la lignine est présente en grande quantité naturellement et que 50 millions de tonnes de lignines sont extraites par an mais que le marché de la lignine ne représente que 805

000 tonnes par an. Toute la lignine qui n'est pas utilisée est utilisée en pellets pour du bois de chauffage. Ce faisant, les auteurs pointent le problème posé par la conception de la lignine comme co-produits de l'industrie papetière et proposent de renverser cette vision : « *La lignine n'est ni un sous-produit, ni un déchet de l'industrie papetière !!* » (da Silva Perez et al., *Ibid.*). Cette prise de position forte témoigne de la tentative de formalisation d'un modèle de filière alternatif par le FCBA et CIMV. Une note de 2011 issue du projet Panneaux Verts financé par l'ADEME précise que « *de nouvelles formulations d'adhésifs basées sur une chimie verte mettant en œuvre des résidus de l'industrie papetière ont été développées au cours de ce projet* » (Petit-Conil et Tapin-Lingua, 2011, p.2). Ce projet réunissait le FCBA, CIMV, l'équipe de recherche de Pizzi et le producteur de pâte à papier TEMBEC. Il est donc notable que le FCBA s'oppose aussi vivement à ne faire que de la valorisation des déchets de l'industrie papetière. Nous pouvons déduire du soutien du CIMV à cette position en raison du produit qu'ils offrent. La CIMV offre des procédés permettant de produire des lignines à des niveaux de pureté très élevées tout en préservant ses fonctionnalités, permettant des valorisations macro-moléculaires. La présentation de da Silva et al. (2011) s'oriente très clairement en ce sens.

Les travaux menés dans le projet Panneaux Verts se sont aussi focalisés sur le choix de la matière première à utiliser par des tests réalisés conjointement entre la CIMV et le LERMAB (laboratoire de l'équipe de recherche de Pizzi). La question qui a guidée cette opération a été de déterminer les espèces européennes dont la teneur en phénols est la plus élevée. Le résultat principal a été de pointer la réactivité limitée de la lignine. Ce problème a été résolu par l'usage de glyoxal. Ainsi, les filières fondées sur la lignine et les tanins partagent des problématiques similaires en amont quant à l'origine des produits utilisés. Le projet Panneaux Verts a conduit les acteurs impliqués dans la production de résines et colles biosourcées non émettrices de formaldéhydes à tester des solutions techniques mélangeant tanins et lignines. Etant donnée la nature différente de ces matières premières (qui sont utilisées pour leur contenu en tanins), il est nécessaire de procéder à un traitement différencié des matières premières (hexamine pour les tanins et glyoxal pour la lignine). Cette différence de traitement nécessaire pour les deux matières premières introduit une nouvelle problématique dans la réflexion sur la transition qui vise à déterminer s'il va exister une hybridation entre les deux voies technologiques. Le projet Panneaux Verts illustre une exploration d'une possible hybridation tout en fournissant aux acteurs des voies tanins et lignine de renforcer leurs trajectoires respectives sous la « bannière » d'un modèle de filière alternatif à celle fondée sur le fractionnement par les industries papetières de leurs propres déchets. Par conséquent, la question que se posent les acteurs n'est plus strictement technologique. Les acteurs économiques s'interrogent sur les relations qu'ils entretiendront dans une division du travail en construction, dans le cadre de patrimoines productifs existant. Il est possible de relire les projets de recherche sur les tanins et les lignines comme la recherche pour les acteurs économiques du renouvellement de leurs patrimoines productifs collectifs. Par conséquent, les stratégies d'innovation et de production de connaissances relèvent d'un choix stratégique suite à l'identification de verrous technologiques. Cette lecture nous permet de revenir vers les modèles de filières dessinées par les acteurs des tanins et des lignines. Plutôt qu'un modèle unique de filières, il se dessine une variété de filières que les acteurs essaient de préserver. Ainsi, l'innovation constitue une clé d'entrée vers l'analyse de stratégies de constructions de relations économiques.

F. UNE VARIETE DE TRAJECTOIRES TECHNOLOGIQUES POUR UNE VARIETE DE PATRIMOINES PRODUCTIFS COLLECTIFS

Dans cette contribution, nous avons proposé d'interroger le cadre d'analyse des innovations environnementales proposée notamment par Oltra et Saint-Jean. Cette analyse vise à identifier les facteurs permettant le développement d'innovations radicales à même de lever les *lock-ins* existants. Ces derniers sont décrits par Cecere et al. (2014) comme étant constitués par des coûts, des acteurs et des technologies dont l'articulation est à décrire. Nous avons proposé d'endogénéiser les *lock-ins* afin de montrer que les dynamiques de transition sont animées par les

stratégies de reproduction développées par les acteurs. La description des trois grandes trajectoires technologiques nous a permis de pointer que la question des coûts relevait plutôt de l'avantage que de la contrainte. Les modélisations proposées dans le projet Biocore par exemple repose sur une estimation en fonction des outils de production nécessaires. Cela suppose que les firmes concernées révèlent le détail du *process* de production, y compris sur des produits qui ne sont pas brevetés ou ne le seront peut-être jamais. Dès lors, ces informations sont stratégiques et les différents témoignages de responsables de l'évaluation économique pour des projets de ce type nous ont expliqués la grande réticence des industriels à révéler leurs outils de production pour permettre des simulations. Autant que les capacités de production, les estimations de coûts de production ont donc portée limitée et participe du discours de la firme que de la définition d'un modèle économique. En tant que discours, les coûts nous révèlent plutôt par « transparence » le positionnement de la firme. Du point de vue théorique, il n'est pas possible de définir *a priori* quels vont être les rendements d'adoption d'une technologie, ni quels vont être les effets rebonds (Nieddu et Vivien, 2012). L'argument du coût de production repose sur la comparaison entre des coûts pour une technologie en cours de développement et une autre largement optimisée. Bien que l'on ne puisse pas déterminer les rendements d'adoption, la grande majorité des innovations ne pourra pas immédiatement concurrencer une technologie adoptée de longue date au niveau des coûts.

Le second type de comparaisons auquel participe l'économie évolutionniste réside en la comparaison d'innovations afin de déterminer laquelle est une innovation radicale. Cette approche procède d'une analyse externe des technologies. Le cadre d'analyse systémique évolutionniste repose sur le triptyque institutions – forme de la demande – régime technologique afin de mettre en évidence des régimes sectoriels d'innovation. Ce n'est donc pas la diversité interne, mais externe (d'un secteur à l'autre) qui anime l'analyse évolutionniste du changement technique. Bien que cette analyse soit nécessaire, elle trouve sa limite dans son application à l'analyse des processus de transition. Dans notre cas, la comparaison du point de vue évolutionniste standard nous conduirait à qualifier les trajectoires fondées sur les tanins et les lignines comme des innovations radicales au regard des stratégies fondées sur la problématisation des enjeux industriels liés à l'interdiction progressive des formaldéhydes. Cependant, nous avons montré que dans cette trajectoire certaines pourraient être plus radicales que d'autres. De même, les stratégies de produits à faibles émissions de formaldéhydes pourraient être considérées comme radicales en comparaison de produits biosourcés utilisant des quantités supérieures de formaldéhydes. En tant qu'analyse systémique, le système est présent dans chaque partie du système, comme un hologramme. Par conséquent, nous avons analysé les trajectoires technologiques en fonction des institutions, des formes de la demande et des régimes technologiques. Dans chacun des cas, nous avons montré que la forme de la trajectoire était héritée du passé. Dès lors, nous avons mis en évidence pour chacune des trajectoires des patrimoines productifs collectifs. Pour cela, nous avons, volontairement, abandonné la distinction entre innovations radicales et incrémentales pour décrire le processus de construction du changement technique. Ainsi, nous avons considéré l'innovation comme une entrée analytique. Dès lors, l'innovation est analysée en dynamique avec l'ensemble des éléments du système.

Cette approche nous permet de proposer de comprendre les *lock-ins* comme la formalisation des contraintes que se donnent les acteurs dans le but de préserver leurs patrimoines productifs collectifs. Si l'on revient aux *lock-ins* dans leurs trois dimensions (coûts, acteurs et technologies), nous pouvons déterminer les contraintes que se fixent chacun des acteurs des trajectoires étudiées. Dans le cas de la première trajectoire, les discours des acteurs montrent leur volonté de maintenir les technologies existantes, au sein de filières existantes. Par exemple, quand DuPont produit des documents expliquant comment bien utiliser ses formaldéhydes, il s'agit bien de renouveler la relation entretenue avec ses clients en aval pour que les technologies soient maintenues. Dans le cas des tanins, les acteurs se fixent comme contraintes l'adaptation des formulations existantes, fondées sur l'usage de bois disponibles en Amérique du Sud, avec des essences d'arbres disponibles en Europe. La contrainte est alors multiple : adaptation des formulations sans formaldéhydes à de nouvelles matières premières, introduisant une

concurrence entre producteurs. Dans le cas du projet Biofoambark, nous avons pu constater la concurrence entre les producteurs finlandais et italiens. De même, il existe une concurrence en France sur l'usage du bois et de la lignine entre des producteurs de résineux et de châtaigniers.

Nous l'avons montré avec la Bakélite, dans les deux cas, il s'agit bien de préserver le patrimoine productif collectif de la production de résines. Au-delà des trajectoires technologiques, c'est bien ce point commun que l'on retrouve entre chacun des acteurs. Cette étude de cas, par la discussion sur la théorie évolutionniste qu'elle permet de mener nous invite à chercher à définir une approche systémique de l'innovation. Le cadre évolutionniste sectoriel revendique cette perspective systémique mais les dynamiques économiques sont en partie neutralisées car supposées être uniquement liées à l'évolution des technologies. Nous proposons d'adopter une lecture fondée sur le préalable que l'innovation est nécessaire pour les acteurs économiques mais que ces acteurs travaillent à innover le moins possible, pour préserver leurs patrimoines productifs. L'analyse de la régulation de la transition ne doit donc pas porter s'inscrire dans une perspective normative mais sur une recherche cherchant à pointer les patrimoines productifs dont les acteurs sont porteurs. Les efforts de reproduction par la production de nouveauté portés par les acteurs sont intégrés dans ces patrimoines. Ce premier résultat en implique un deuxième qui suggère que les dynamiques de transition sont animées par la définition d'espaces par les acteurs. Ces espaces sont constitués de contraintes (que les acteurs s'imposent ou qui leur sont imposées par la réglementation, la concurrence etc.) et d'opportunités. Ces deux éléments sont bien entendus indissociables et doivent être considérés en systémique. Ces espaces prennent des formes particulières que l'on peut déterminer en interrogeant la façon dont les acteurs se positionnent, notamment par la définition de rapports internes aux arènes dans lesquelles ils s'affrontent et coopèrent. Le troisième résultat est que la concurrence dans la transition porte à la fois sur la définition des formes de l'espace, notamment délimitées par des institutions et les compromis qui constituent les produits. Ainsi, cette concurrence multi-niveau est elle-même constitutive de la formation de ces espaces économiques.

Par conséquent, cette approche intéresse directement les réflexions en termes de Régulation Sectorielle et Territoriale car elle permet de relier des dynamiques de transitions industrielles à un secteur en formation. En discutant le cadre évolutionniste d'un point de vue régulationniste, nous avons montré qu'il était possible de considérer les rapports sociaux d'innovation dans une approche ne cédant pas aux *success stories technologiques* mais en mobilisant l'entrée par la technologie comme une partie du système étudié, animée par des dynamiques propres comme chacune des autres parties du système, mais aussi comme le révélateur de dynamiques profondes animant ce système.

Bibliographie:

- ACQUIER A., 2009, « Développement durable : sept idées reçues à réviser », *L'Expansion Management Review*, N° 132, 1, p. 110-117.
- AMABLE B., 2002, « La théorie de la régulation et le changement technique », dans *Théorie de la régulation : l'état des savoirs*, 2^{de} édition, La Découverte (Recherches), p. 236-244.
- AMABLE B., 1997, *Les Systèmes d'innovation à l'ère de la globalisation*, Paris, Economica, 401 p.
- ARORA, A., LANDAU, R., ROSENBERG, N. (dirs.), 1998, *Chemicals and long-term economic growth: insights from the chemical industry*, New York, Wiley, 564 p.
- ARTHUR W.B., 2011, *The nature of technology: what it is and how it evolves*, 1. Free Press pbk. ed, New York, Free Press, 246 p.
- BAEKELAND L.H., 1911, « Recent Developments in Bakelite. », *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, 3, 12, p. 932-938.
- BAEKELAND L.H., 1909, « The Synthesis, Constitution, and Uses of Bakelite », *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 1, 3, p. 149-161.
- BARRERE C., 1978, « A propos de la régulation », *Revue Issues*, 1, p. 58.
- BARRERE C., 1981, « La régulation capitaliste en question », *Revue Issues*, 11, p. 25.
- BARRERE, C. (dir.), 2005, *Réinventer le patrimoine: de la culture à l'économie, une nouvelle pensée du patrimoine?*, Paris, France, L'Harmattan (Collection Gestion de la culture et du secteur non lucratif), 337 p.
- BARRERE C., KEBABDJIAN G., WEINSTEIN O., KEBABDJIAN G., 1984, « L'accumulation intensive, norme de lecture du capitalisme? », *Revue économique*, 35, 3, p. 479.
- BARRERE C., KEBABDJIAN G., WEINSTEIN O., 1984, « L'accumulation intensive, norme de lecture du capitalisme? », *Revue Economique*, 35, 3, p. 479-506.
- BARTOLI H., 1991, *L'économie multidimensionnelle*, Economica, 527 p.
- BAS C. LE, LATHAM W., VOLODIN D., s. d., « Productivité et mobilité des inventeurs prolifiques : une approche comparative des systèmes d'innovation de quatre grands pays asiatiques (Chine, Corée, Japon, Taiwan) », *Revue de la Régulation*, 15.
- BASF, s. d., « Glyoxal. The Sustainable Solution for Your Business ».
- BÉFORT N., 2014, « Synthesis on BIOFOAMBARK and methodological propositions ».

BELIS-BERGOUGNAN M.-C., OLTRA V., SAINT JEAN M., 2004, « Trajectories towards clean technology: example of volatile organic compound emission reductions », *Ecological Economics*, 48, 2, p. 201-220.

BÉLIS-BERGOUGNAN M.-C., LÉVY R., 2010, « Sharing a common resource in a sustainable development context: The cas of a wood innovation system », *Technological Forecasting and Social Change*, 77, 7, p. 1126-1138.

BENKO G., LIPIETZ A., 2002, « De la régulation des espaces aux espaces de la régulation », dans *Théorie de la régulation* : l'état des savoirs, 2^{de} édition, La Découverte (Recherches), p. 293-303.

BERGH J.C.J.M. VAN DEN, 2007, « Evolutionary thinking in environmental economics », *Journal of Evolutionary Economics*, 17, 5, p. 521-549.

BIJKER W.E., 1995, *Of bicycles, bakelites, and bulbs: toward a theory of sociotechnical change*, Cambridge, Mass., MIT Press.

BODET C., LAMARCHE T., 2007, « La Responsabilité sociale des entreprises comme innovation institutionnelle. Une lecture régulationniste », *Revue de la Régulation*, 1.

BOYER R., 2009, « Feu le régime d'accumulation tiré par la finance », *Revue de la Régulation*, 5.

BOYER, R., SAILLARD, Y. (dirs.), 2002, *Théorie de la régulation: l'état des savoirs*, Nouv. éd. complétée, Paris, Découverte (Collection « Recherches »), 588 p.

BROUILLAT E., OLTRA V., SAINT-JEAN M., 2013, « Les trajectoires de l'éco-innovation dans l'industrie. Un premier bilan des recherches », *Economie Appliquée*, LXVI, 4, p. 83-115.

CARUS M., EDER A., BECKMANN J., 2014, « GreenPremium prices along the value chain of bio-based products », *Nova Paper*, 3, p. 12.

CECERE G., CORROCHER N., GOSSART C., OZMAN M., 2014, « Lock-in and path dependence: an evolutionary approach to eco-innovations », *Journal of Evolutionary Economics*, 24, 5, p. 1037-1065.

CHASSAGNON V., BAS C. LE, 2013, « Avant propos - Matériaux pour l'analyse des éco-innovations », *Economie Appliquée*, LXVI, 4, p. 81-82.

CORIAT B., DOSI G., 1995, « Evolutionnisme et Régulation - Différences et convergences », dans *Théorie de la régulation* : l'état des savoirs, La Découverte (Recherches), p. 500-510.

CORIAT B., DOSI G., 2002, « Evolutionnisme et régulation : différences et convergences », dans *Théorie de la régulation* : l'état des savoirs, 2^{de} édition, La Découverte (Recherches), p. 500-510.

DEAN J., 2004, « Dyes in mediaeval Europe. Part two: Yellow, blue, green and black », *Journal of Weavers, Spinners and Dyers*, 211, p. 9-12.

DESMOULIN-CANSELIER S., LECA N., 2011, « REACH : une réglementation durable pour la chimie », dans MAXIM L. (dir.), *La chimie durable : au-delà des promesses*, CNRS Editions, p. 157-168.

EUROPEAN CHEMICALS AGENCY, 2012, « Response to comments document (RCOM) to the Opinion proposing harmonised classifications and labelling at EU level of Formaldehyde »,.

FARHI R., MOREL C., CHERON J., 2006, « Matières plastiques & adjuvants hygiène et sécurité ».

FORMALDEHYDE COUNCIL, 2005, « The Economic Benefits of Formaldehyde to the United States and Canadian Economies », Formaldehyde Council.

FRANCIS G., 2012, « Method of Reducing the Emission of Formaldehyde from Formaldehyde Laden Wood Products »,.

FREUDENBERG K., 1967, « The Beginnings of my Work on Lignin », *Wood Science and Technology*, 1, p. 161-190.

GALAMBOS, L., HIKINO, T., ZAMAGNI, V. (dirs.), 2007a, *The global chemical industry in the age of the petrochemical revolution*, Cambridge ; New York, Cambridge University Press, 529 p.

GALAMBOS, L., HIKINO, T., ZAMAGNI, V. (dirs.), 2007b, *The global chemical industry in the age of the petrochemical revolution*, Cambridge ; New York, Cambridge University Press, 529 p.

GARCÍA D.E., GLASSER W.G., PIZZI A., OSORIO-MADRAZO A., LABORIE M.-P., 2013, « Hydroxypropyl tannin derivatives from *Pinus pinaster* (Ait.) bark », *Industrial Crops and Products*, 49, p. 730-739.

GARCÍA D.E., GLASSER W.G., PIZZI A., LACOSTE C., LABORIE M.-P., 2014, « Polyphenolic resins prepared with maritime pine bark tannin and bulky-aldehydes », *Industrial Crops and Products*, 62, p. 84-93.

GARCÍA MARRERO D.E., GLASSER W.G., PIZZI A., PACZKOWSKI S., LABORIE M.-P.G., 2014, « Substitution pattern elucidation of hydroxypropyl *Pinus pinaster* (Ait.) bark polyflavonoid derivatives by ESI(-)MS/MS: Substitution pattern elucidation », *Journal of Mass Spectrometry*, 49, 10, p. 1050-1058.

GONZÁLEZ-GARCÍA S., BONNESOEUR V., PIZZI A., FEJOO G., MOREIRA M.T., 2013, « The influence of forest management systems on the environmental impacts for Douglas-fir production in France », *Science of The Total Environment*, 461-462, p. 681-692.

GONZÁLEZ-GARCÍA S., DIAS A.C., FEJOO G., MOREIRA M.T., ARROJA L., 2014, « Divergences on the environmental impact associated to the production of maritime pine wood in Europe: French and Portuguese case studies », *Science of The Total Environment*, 472, p. 324-337.

GONZÁLEZ-GARCÍA S., KROWAS I., BECKER G., FEJOO G., MOREIRA M.T., 2013, « Cradle-to-gate life cycle inventory and environmental performance of Douglas-fir roundwood production in Germany », *Journal of Cleaner Production*, 54, p. 244-252.

GONZÁLEZ-GARCÍA S., MOREIRA M.T., DIAS A.C., MOLA-YUDEGO B., 2014, « Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of forest operations in Europe: environmental and energy profiles », *Journal of Cleaner Production*, 66, p. 188-198.

HIRANO K., ASAMI M., 2013, « Phenolic resins—100years of progress and their future », *Reactive and Functional Polymers*, 73, 2, p. 256-269.

KEMPPAINEN K., SIIKA-AHO M., PATTATHIL S., GIOVANDO S., KRUIUS K., 2014, « Spruce bark as an industrial source of condensed tannins and non-cellulosic sugars », *Industrial Crops and Products*, 52, p. 158-168.

KOSSMEHL G., 2010, « Bakelite Conquers the World », *Kunststoffe International*, 2010, p. 6-9.

LACOSTE C., BASSO M.C., PIZZI A., LABORIE M.-P., CELZARD A., FIERRO V., 2013, « Pine tannin-based rigid foams: Mechanical and thermal properties », *Industrial Crops and Products*, 43, p. 245-250.

LACOSTE C., BASSO M.C., PIZZI A., LABORIE M.-P., GARCIA D., CELZARD A., 2013, « Bioresourced pine tannin/furanic foams with glyoxal and glutaraldehyde », *Industrial Crops and Products*, 45, p. 401-405.

LACOSTE C., PIZZI A., BASSO M.-C., LABORIE M.-P., CELZARD A., 2014, « *Pinus pinaster* tannin/furanic foams: PART I. Formulation », *Industrial Crops and Products*, 52, p. 450-456.

LAGRIFFOUL A., 2013, « Évaluer et gérer les substances chimiques soulevant une problématique environnementale », *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 71, 3, p. 24.

LAURICHESSE S., AVÉROUS L., 2014, « Chemical modification of lignins: Towards biobased polymers », *Progress in Polymer Science*, 39, 7, p. 1266-1290.

LINK M., KOLBITSCH C., TONDI G., EBNER M., WIELAND S., PETUTSCHNIGG A., 2011, « Formaldehyde-Free Tannin-Based Foams and their Use as Lightweight Panels », *Bioresources.com*, 6, 4, p. 4218-4228.

LORDON F., 2009, « Après la crise financière : « réguler » ou refondre ? », *Revue de la Régulation*, 5.

MAXIM, L. (dir.), 2011, *Chimie durable: au delà des promesses*, Paris, CNRS éd.

MICHEL J.-M., s. d., « Contribution à l'histoire industrielle des polymères en France : RVA-Progil. Le groupe Gillet »,.

MOMENTIVE, 2012, « Formaldehyde - Product Stewardship Summary »,.

NIEDDU M., 2000, « Science et dynamiques économiques, le cas des biopolymères », *Sciences de la Société*, 49, p. 87-104.

NIEDDU M., GARNIER E., BLIARD C., 2014, « Patrimoines productifs collectifs versus exploration/exploitation: Le cas de la bioraffinerie », *Revue économique*, 65, 6, p. 957.

NIIR PROJECT CONSULTANCY SERVICES, BOARD OF CONSULTANTS & ENGINEERS, 2007, *Phenolic resins technology handbook*, Delhi, India, NIIR Project Consultancy Services.

OLTRA V., SAINT JEAN M., 2009a, « Variety of technological trajectories in low emission vehicles (LEVs): A patent data analysis », *Journal of Cleaner Production*, 17, 2, p. 201-213.

OLTRA V., SAINT JEAN M., 2009b, « Sectoral systems of environmental innovation: An application to the French automotive industry », *Technological Forecasting and Social Change*, 76, 4, p. 567-583.

OLTRA V., SAINT JEAN M., 2003, « The dynamics of environmental innovations: three stylised trajectories of clean technologies », *Cahiers du GRES*, 2003-3, p. 21.

OLTRA V., SAINT-JEAN M., 2007, « Incrementalism of environmental innovations versus paradigmatic change: a comparative study of the automotive and chemical industries », *Cahiers du GRES*, 2007-19, p. 22.

PETIT-CONIL M., TAPIN-LINGUA S., 2011, « Panneaux Verts - Développement de colles issues de ressources renouvelables et à faible impact sur la santé et l'environnement pour la fabrication des panneaux de particules et de fibres », Note de synthèse, ADEME.

PILATO, L. (dir.), 2010, *Phenolic Resins: A Century of Progress*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.

PIZZI A., 1982, « Pine Tannin Adhesives for Particleboard », *Holz als Roh- und Werkstoff*, 40, p. 293-301.

PIZZI A., 2000, « Tannery row - The story of some natural and synthetic wood adhesives », *Wood Science and Technology*, 34, p. 277-316.

PUTNAM S.W., GRAHAM J.D., 1993, « Keeping Pace with Science and Engineering », dans NATIONAL RESEARCH COUNCIL (dir.), *Keeping Pace with Science and Engineering: Case Studies in Environmental Regulation*, Washington D.C., The National Academies Press, p. 189-220.

RASCHKA A., BÉFORT N., DOMMERMUTH B., 2014, « Techno-economic evaluation of BIOFOAMBARK », *BiofoamBark Meeting*.

RENNINGS K., MARKEWITZ P., VÖGELE S., 2013, « How clean is clean? Incremental versus radical technological change in coal-fired power plants », *Journal of Evolutionary Economics*, 23, 2, p. 331-355.

REUSS G., DISTELDORF W., GAMER A.O., HILT A., 2000, « Formaldehyde », dans WILEY-VCH VERLAG GMBH & CO. KGAA (dir.), *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Weinheim, Germany, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

SENE M.-L., 2008, « Etat des lieux sur l'utilisation du formaldéhyde en Aquitaine », Direction Régionale du Travail, de l'Emploi et de la Formation Professionnelle (DRTEFP) d'Aquitaine.

SILVA PEREZ D. DA, TAPIN-LINGUA S., PETIT-CONIL M., 2010, « Valorisation énergétique et (macro)moléculaire des lignines »,.

TAPIN-LINGUA S., BERTAUD F., PETIT-CONIL M., 2010, « Projet Panneaux Verts: Colles biosourcées pour la production de panneaux »,.

TAPIN-LINGUA S., BERTAUD F., PETIT-CONIL M., s. d., « Projet Panneaux Verts: Colles biosourcées pour la production de panneaux »,.

TOBIASON F.L., 1990, « Phenolic Resin Adhesives », dans *Handbook of Adhesives*, Springer, p. 316-340.

TONDI G., 2009, *Développement de résines de polycondensation à base de tanins pour produits industriels écologiques et innovants - Mousses rigides et produits de préservation bois (sous la dir. de A. Pizzi)*, Thèse de doctorat, Nancy, Université Henry Poincaré Nancy I, 238 p.

TONDI G., PIZZI A., 2009, « Tannin-based rigid foams: Characterization and modification », *Industrial Crops and Products*, 29, 2-3, p. 356-363.

WAGNER M., LLERENA P., 2011, « Eco-Innovation Through Integration, Regulation and Cooperation: Comparative Insights from Case Studies in Three Manufacturing Sectors », *Industry & Innovation*, 18, 8, p. 747-764.

WAGNER R.A., COKOVIC A., TRACHSLER H., LEPEDAT K., 2015, « Resin composition for the manufacture high gloss laminated panels »,.

WILEY-VCH VERLAG GMBH & CO. KGAA (dir.), 2000, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Weinheim, Germany, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

WINTER H., LABORIE M.-P., 2014, « Biofoambark - Bark Valorization into Insulation Foams and Bioenergy »,.

YOKOTA H., 2014, « Hiroki Yokota, Capacités dynamiques et diversité des modèles de firmes japonaises: une étude de cas et une illustration à partir de l'analyse historique de l'industrie automobile », *Revue de la Régulation*, 15.

ZANINI C., GERBAUDO E., ERCOLE E., VENDRAMIN A., FORNI M., 2012, « Evaluation of two commercial and three home-made fixatives for the substitution of formalin: a formaldehyde-free laboratory is possible », *Environmental Health*, 11, 1, p. 59.

2010, « Green Adhesives: Options for the Australian industry - summary of recent research into green adhesives from renewable materials and identification of those that are closest to commercial uptake. », *Forest & Wood Products Australia*.

2014, « Concept of sustainability as key marketing strategy », *Focus on Powder Coatings*, 2014, 12, p. 7.