

CAHIER DE RECHERCHE N° 9

**Les bifurcations de trajectoires technologiques dans les industries de process :  
le cas de l'industrie du raffinage dans les décennies quatre-vingt et quatre-  
vingt-dix**

Juin 1996

Bernard BOURGEOIS

## **Résumé**

Comment analyser la dynamique technologique d'une industrie de process maintenant vieille d'un siècle, le raffinage ? Plus précisément comment rendre compte des changements techniques intervenus dans ces quarante dernières années ? On propose de partir de la notion de trajectoire technologique en enrichissant son acception traditionnelle pour tenir compte des relations systémiques entre les nombreuses innovations principales qui ont marqué l'histoire technique du raffinage. On essaie ensuite d'apprécier les avancées de la période récente en s'appuyant sur la notion de variété technologique en distinguant variété génétique propre au secteur, et variété acquise importée des autres secteurs. L'objet de l'article est de montrer que deux facteurs - le changement des relations utilisateurs - fournisseurs et les avancées considérables des technologies de l'information et de la communication - sont à l'origine d'une accélération de la variété acquise qui compense partiellement le ralentissement de la variété génétique.

## **Abstract**

How can we analyse the technological dynamic of a hundred years old process industry, namely the refining industry, and more precisely, how can we convey the technological changes which have occurred during the 40 previous years ? We first enriched the traditional notion of technological trajectory by taking in account the systemic relations between the numerous main innovations which have marked the refining technology history. Then we appraise the recent progresses by considering the notion of technological variety broken up into sectorial genetic variety and acquired variety imported from other sectors. The paper aims at proving that two factors, the changing relation between users and suppliers, and the dramatical advances of the information and communication technologies - are the background of the speeding up of the acquired variety, which partly compensates for the slowing down of the genetic variety.

## Introduction

Pour un grand nombre d'observateurs, deux tendances lourdes influencent la dynamique technologique des industries de process depuis une quinzaine d'années<sup>1</sup>.

La première est d'origine technologique avec l'émergence, puis la forte expansion d'une industrie entièrement nouvelle : celle des "technologies de l'information et de la communication" (TIC); C. Freeman (1990), y voit même l'émergence d'un nouveau paradigme technico-économique, dont les outputs diffusent à travers tout le système économique, y compris les industries de process.

La deuxième se situe dans le domaine des relations inter-industrielles. Alors que, jusqu'à récemment les utilisateurs de technologie dans ces industries de process contribuaient fortement à leurs approvisionnements technologiques, il est de plus en plus avéré que cette tendance est remise en cause par le développement de la sous-traitance, voire de la sous-traitance partenariale.

Ces deux tendances ont des conséquences importantes sur la dynamique technologique de ces industries de process, interprétable en termes de trajectoire et de bifurcation en reprenant des concepts développés par Dosi, Nelson <sup>2</sup>. Quelles bifurcations ont été induites par ces tendances dans le déroulement de trajectoires technologiques des industries de process, dont certaines sont déjà vieilles d'un siècle ? Pour répondre à cette question, on se centrera sur les évolutions de l'industrie du raffinage soumise à des contraintes concurrentielles fortes sur ses marchés matures. On montrera que la maturité économique de cette industrie ne s'accompagne pas d'une maturité technologique, ce que l'on est généralement tenté de faire en pronosticant un déclin technologique qui serait inscrit dans la fin du cycle de vie d'une industrie.

---

<sup>1</sup>Je remercie Dominique Finon, et l'atelier "Energie et changement technique" dirigé par Jean Marie Martin pour toutes leurs suggestions d'amélioration.

<sup>2</sup>Par trajectoire technologique, on entend selon Dosi, Nelson (1994) "the path of improvement taken by that technology, given technologist's perceptions of opportunities, and the market and other evaluation mechanisms that determined what kind of improvements would be profitable" (p.161). Les changements techniques et économiques survenant dans une industrie donnée sont donc le résultat d'interactions entre des connaissances techniques et scientifiques d'une part, et des opportunités de profit sur des marchés ; mais elles sont par définition mises en oeuvre dans les limites du paradigme technologique correspondant, caractérisé par les trois éléments suivants : " First, it refers to the set of understandings about particular technologies that are shared by firms and engineering communities about its present and innate limitations. Second and relatedly, it embodies the prevailing views and heuristics on "how to make things better " ; and third, it is often associated with shared ideas of "artefacts " which are there to be improved in their performances and made cheaper in their production." (op.cit. p.161)

Depuis une quinzaine d'année, cette bifurcation se manifeste principalement par l'augmentation de la variété technologique sous l'effet de "demand pull" et de "technology push" (§1). La pression du "demand pull" résulte des modifications de l'environnement de sélection, d'une part celle des conditions compétitives des produits liés du raffinage sur leurs marchés respectifs, d'autre part celle des préférences sociales vis-à-vis de la préservation de l'environnement qui se traduit par une complexification des produits mis sur le marché.

Le premier phénomène s'est caractérisé par le "blanchiment du baril", c'est-à-dire par un accroissement de la conversion des coupes pétrolières lourdes et moyennes et, partant, de la complexité des raffineries. Le second qui l'a relayé dans les années quatre-vingt, se manifeste par la sévèrisation des normes environnementales, que ce soit pour la qualité des produits ou le contrôle des impacts du raffinage<sup>3</sup>.

L'augmentation de la variété sous l'effet du "technology push" trouve en partie sa source dans l'importation de savoirs génériques externes à l'industrie (§2), et est animée par l'externalisation de la création technologique du côté des fournisseurs, ou des associations utilisateurs-fournisseurs (§3).

L'analyse de cette bifurcation et de la spécificité des sources de l'innovation qui l'accompagne nécessite un affinement des concepts.

En premier lieu, on propose de complexifier la notion simple de trajectoire technologique, caractérisée par l'émergence d'une innovation radicale suivie de plusieurs innovations incrémentales, en se référant au concept de "grappe technologique" issu des travaux de Schumpeter et reprécisé récemment par Zimmerman (1995). Dans le cas du raffinage, on identifie la grappe technologique comme une combinaison de technologies d'architecture d'unités de raffinage<sup>4</sup>, résultant elles-mêmes de la combinaison de techniques "élémentaires" de procédés de raffinage, et de technologies d'exploitation<sup>5</sup> qui assurent

---

<sup>3</sup>Ce que Gaessler (1994) exprime dans les termes suivants : "*Il est intéressant d'observer comment au cours de son histoire, le raffinage s'est construit par strates successives pour apporter chaque fois la réponse adaptée à l'évolution soit de la demande, soit des spécifications. Le schéma de raffinage s'est enrichi à chaque étape de nouvelles unités complémentaires sans remise en cause fondamentales des investissements antérieurs. Ces strates successives sont toujours là et contribuent toujours pour une part importante à la satisfaction des besoins.*" (J.P. Gaessler, 1994 p. 60).

<sup>4</sup>Par procédé de raffinage, on entendra dans un sens large avec Enos (1994 p.2) "*the physical and chemical relationships governing the transmutation of elements, the pieces of equipment and other inputs in which these transmutations take place, and the sum of knowledge that is necessary in order to organize and conduct the activities* ", c'est-à-dire une combinaison de savoirs scientifiques et techniques, d'équipement matériel ou artefact technique, et de connaissances organisationnelles pour gérer efficacement ce procédé.

<sup>5</sup> terme plus approprié dans le cas du raffiange que celui de "technique d'utilisation" employé par Zimmerman dans un contexte différent.

l'intégration de ces unités parmi lesquelles les systèmes d'information et de gestion. Deux raisons justifient ce choix. D'abord on ne trouve pas, dans l'histoire technologique du raffinage une innovation radicale unique, mais, selon la définition conventionnelle que l'on en retient, un nombre pouvant aller d'un minimum très abstrait de deux<sup>6</sup> à un maximum d'une trentaine, très proche de la réalité empirique<sup>7</sup>. Ensuite ces innovations "radicales" ont été en général beaucoup plus souvent complémentaires que substituables, même si des cas de substitution s'observent entre procédés fonctionnant en cycle discontinu et ceux de cycle continu, ou entre procédés thermiques et procédés catalytiques.

En deuxième lieu, on propose de considérer entre les deux types d'innovation radicale ou majeure d'une part, incrémentale d'autre part un type intermédiaire que l'on appellera "innovation principale". La justification de cette adjonction réside dans le mode de production ordinaire de l'innovation de procédés de raffinage. Dans la réalité industrielle du secteur, mais à l'exception notable d'une dizaine de très grandes compagnies pétrolières intégrées, les sociétés de raffinage ne peuvent apporter que des améliorations incrémentales aux procédés de raffinage existants<sup>8</sup>. Les nouvelles générations de procédés de raffinage qui s'inscrivent dans l'évolution de "familles" existantes de procédés relèvent de cette catégorie intermédiaire. Deux caractéristiques les distinguent des innovations incrémentales : des délais de mise au point de six à dix ans contre un à deux pour celles-ci, des frais très importants de recherche & développement en général insupportables pour des sociétés ordinaires de raffinage qui ne contrôlent qu'une à trois raffineries.

En troisième lieu, on reprend au plan sectoriel le concept de variété technologique utilisé au plan macroéconomique par le courant évolutionniste qui

---

<sup>6</sup> On identifie alors la distillation atmosphérique comme le procédé générique de séparation des hydrocarbures contenus dans le pétrole et le craquage catalytique comme représentatif des procédés de conversion-transformation.

<sup>7</sup> Dans ce cas, chaque "famille" distincte de procédés de raffinage est censée apparaître après une "innovation radicale" ; en suivant une nomenclature établie à partir d'un classement des procédés de raffinage défini par Heinrich (1994), on arrive à ce nombre (cf Annexe). Il est clair que dans ce contexte le caractère "radical" de l'innovation est plus ou moins affirmé, donc plus ou moins éloigné du sens habituel accordé à ce terme. Les "familles" de procédés sont définies dans ce papier par les procédés de la nomenclature Heinrich à trois chiffres.

<sup>8</sup> Ce qui constitue cependant une source importante d'améliorations techniques et de productivité quand on cumule ce mouvement dans le temps (Enos, 1994).

en fait une des sources de la croissance économique <sup>9</sup>. On fera l'hypothèse que, dans le cadre de ce processus général la variété technologique est généralement croissante à l'échelon d'un secteur industriel mais cette croissance est cependant inégale selon les stades de développement de la trajectoire technologique de cette industrie, liés de près ou de loin aux étapes de son cycle de vie.

La variété technologique peut fluctuer sous l'effet de cinq processus (Saviotti et Magni, 1995) :

- 1 - l'accroissement des membres d'une population existante de techniques sans en changer les caractéristiques (naissance) ;
- 2 - la "mort" ou disparition des membres d'une population existante, qui entraîne également un changement quantitatif ;
- 3 - un processus de changement qualitatif par innovation incrémentale qui modifie les caractéristiques des membres d'une population ; les performances de certains membres de la population sont améliorées par rapport à celles des autres, d'où des changements dans l'adéquation (fitness) de cette population, aux besoins ;
- 4 - l'émergence de nouvelles populations techniques, ayant des caractéristiques différentes des populations existantes, soit par émergence de produits entièrement nouveaux, soit par spécialisation à l'intérieur des populations techniques existantes ;
- 5 - le processus de "transfert et diffusion de techniques", c'est-à-dire tous les processus conduisant à la diffusion de nouvelles connaissances techniques.

Appliquant cette grille à l'analyse de l'évolution des techniques du raffinage on regroupera les quatre premiers processus qui relèvent de la variété "génétique" spécifique du développement des technologies propres au raffinage en les distinguant d'un cinquième processus qui relève d'une variété acquise ou transmise.

En quatrième lieu, les fondements analytiques de la notion de bifurcation qui caractérise un phénomène se situant entre le développement de trajectoires existantes et l'émergence de trajectoires nouvelles ont été peu développés dans la

---

<sup>9</sup>Saviotti (1994) définit la variété comme "the number of distinguishable types of actors, activities, and outputs required to characterize an economic system" (p. 27). A l'échelon macro-économique, le développement économique peut se caractériser par deux tendances complémentaires : celle d'une augmentation de la variété économique et celle d'une augmentation de la productivité. La variété économique peut être évaluée par "the number of actors, activities and types of output". La variété technologique est un sous-ensemble de cette variété économique globale, pour lequel "activities and the types of output of an economy are technologically based" (op. cit. p. 29).

littérature. L'analyse de la dynamique technologique, fondée sur le jeu relatif des deux types de variété technologique, et appliquée à une industrie de process telle que le raffinage pétrolier permet d'approfondir le contenu de cette notion. On sait que le concept de trajectoire combine stratégie d'acteurs et artefacts, ou bien encore mécanismes économiques, structure d'organisation industrielle et dynamique technique. Il en est de même du concept de bifurcation. Les développements suivants, ont alors pour objectifs :

- de justifier l'usage de ce concept dans une analyse historicisée en termes de cycle de vie d'une industrie ;
- de démontrer que la bifurcation d'une trajectoire peut s'interpréter en référence à la dynamique de variété de population technologique et se manifester par un accroissement plus rapide de la variété transmise par rapport à la variété génétique ;
- de repérer une relation entre la dynamique d'organisation industrielle et la dynamique de bifurcation de trajectoire, avec l'externalisation des sources principales de création technologique.

## **1. Bifurcation et modification de la variété technologique : de la variété génétique à la variété transmise**

On repérera les mouvements relatifs de la variété génétique et de la variété transmise en montrant que la variété génétique, présente des signes manifestes de ralentissement, alors que la variété acquise, issue notamment de l'importation des TIC dans le raffinage, connaît une forte accélération.

### **1. 1. Le ralentissement de la croissance de la variété génétique**

Pour caractériser le mouvement des divers types d'innovations qui ont marqué, de l'après-guerre à nos jours, le changement technique de raffinage, on se limitera à la technologie des procédés raffinage; on effectuera notamment une analyse temporelle sur la période 1947-1994 des procédés sélectionnés par des professionnels américains du raffinage pour la revue *Hydrocarbon Processing* : dans un numéro dédié , intitulé "*Refining Process Handbook*." <sup>10</sup>. Etant donné que le choix des différents procédés commercialisés s'opère dans un cadre concurrentiel de plus en plus international, et que les nouveaux procédés de conversion et d'épuration et dépollution sont en général d'abord adoptés aux Etats-Unis, on

---

<sup>10</sup>L'objectif assigné par l'éditorialiste de la revue (1974) aux experts industriels est que leur choix permette la réalisation d'un "*directory of refining technology*" comprenant "*up-to-date of processes that are important to the modern petroleum refiner for making fuels, lubricants, asphalts and waxes* "

peut considérer cette sélection comme représentative de la technologie mondiale disponible, même si un biais américain n'est pas à écarter<sup>11</sup>.

### 1.1.1. Le ralentissement de la fréquence des innovations radicales de procédés depuis les années quarante

En repérant l'émergence d'une innovation radicale de procédé par celle du premier procédé dans une nouvelle "famille" ou sous-famille de la nomenclature technologique de Heinrich<sup>12</sup> l'apparition des principales familles et sous-familles dans le raffinage se situe principalement entre 1860 et 1940 :

- distillation atmosphérique en discontinu en 1860, en continu en 1910, distillation sous-vide en 1900, raffinage au solvant en 1900-1910,
- finition et élimination des composés indésirables par adoucissement (oxydation des mercaptans) des fractions légères en 1887, par hydrotraitement en 1900,
- amélioration des propriétés des produits avec le réformage thermique en 1930, le réformage catalytique et l'alkylation en 1941, l'isomérisation en 1942,
- conversion par craquage thermique en discontinu en 1913 et en continu en 1922, puis par craquage catalytique en discontinu en 1938, en continu en 1942.

Depuis la fin de la 2ème guerre mondiale, deux seules innovations radicales de procédés sont apparues :

- une nouvelle sous-famille de conversion en 1958, avec le craquage sous hydrogène, avec le premier procédé d'hydrocraquage (H-Oil) vendu par HRI et Cities Service : cette famille de procédés combine les

---

<sup>11</sup>A partir des fiches publiées relatives à chacun des procédés sélectionnés, les principaux paramètres suivants sont repris dans notre base de données MIDOIL-Procédés : champ technologique d'après une nomenclature empruntée pour l'essentiel à Heinrich (1994), nom du procédé, nom de la compagnie offrant le procédé, procédé vendu sous ou sans licence, en association entre deux compagnies ou par une seule compagnie. De 1972 à 1994, les données suivantes ont été rajoutées : nombre d'installations commerciales, coût d'investissement (ordre de grandeur), et informations complémentaires sur les caractéristiques institutionnelles. Des modifications de deux natures différentes (exclusion-addition) ont été apportées au fichier original, dans le but de garantir une homogénéité de périmètre technologique (interférences possibles avec des procédés pétrochimiques et de traitement des gaz), ainsi qu'un "lissage" dans le choix des procédés jugés représentatifs de la technologie moderne du raffinage. Dans la suite du texte, ce fichier sera dénommé MIDOIL Procédés.

<sup>12</sup>On exclut par définition tous les procédés relevant de la chimie/pétrochimie et du traitement des gaz.

avantages de la conversion des coupes lourdes en coupes légères, avec ceux d'une désulfuration partielle des produits obtenus.

- une nouvelle sous-famille de techniques d'amélioration des propriétés des produits en 1980, celle de synthèse d'éthers par réarrangement moléculaire avec intervention de coréactifs à partir d'isobutènes ou d'oléfines : ces éthers (MTBE, éther méthyl-tertiobutylique ou ETBE) ont pour fonction d'offrir au raffineur une base de carburants à indice d'octane très élevé en substitution au plomb tétraéthyle.

### 1.1.2. Le ralentissement de la fréquence des innovations principales de procédés.

On repère les fluctuations des innovations principales de procédés en se référant aux taux d'"apparition" et "de disparition" des nouveaux procédés de raffinage, calculé à partir des données des informations contenues dans le fichier MIDOIL-Procédés précité.

Par "apparition", il faut entendre la première apparition d'un procédé dans la sélection opérée par les experts de la profession et par "disparition", il faut entendre une sortie de la sélection bi-annuelle, ce qui ne signifie pas forcément la fin de la vie commerciale du procédé. Les taux annuels d'apparition et de disparition<sup>13</sup>, calculés en rapportant leur nombre à celui de l'ensemble des procédés sélectionnés, sont utilisés afin de neutraliser l'effet de la réduction par deux du nombre de procédés retenus pour des raisons éditoriales dans le *Refining Process Handbook*. On peut, en simplifiant, dégager deux sous-périodes d'apparition de nouveaux procédés (voir graphique 1) :

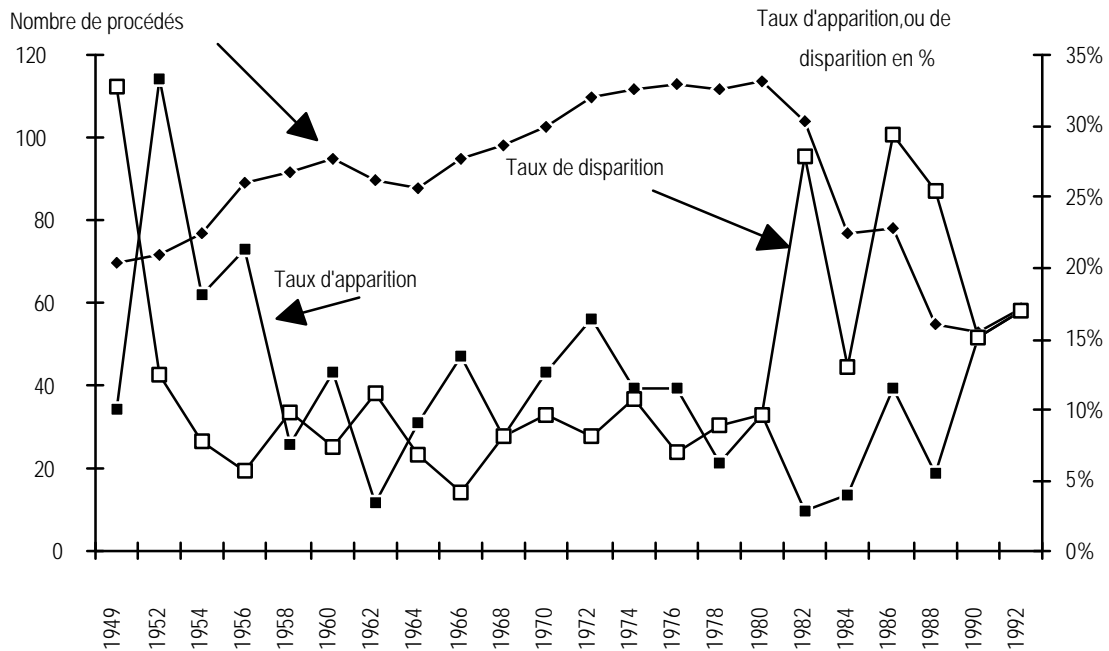
- de 1949 à 1982, une baisse importante de 30% vers un plateau de 5-10% du taux d'apparition de nouveaux procédés,
- de 1984 à 1992, une reprise de ces innovations principales à un niveau de l'ordre de 10 à 15%.

Les variations des taux de disparition sont dépendantes des contraintes éditoriales mentionnées. Même si les critères d'exclusion de l'échantillon bi-annuel ne sont pas explicités, les exclusions sont souvent liées au déclin de l'adoption de ces procédés par les raffineurs dans l'année ou les deux années précédant la sélection.

### **Graphique 1: Taux de naissance et de disparition des procédés de raffinage 1949-1992**

---

<sup>13</sup>On entend par taux d'apparition le rapport du nombre des nouveaux procédés au nombre de procédés sélectionnés, et par taux de disparition le rapport du nombre des procédés disparus de la sélection au nombre de procédés sélectionnés.

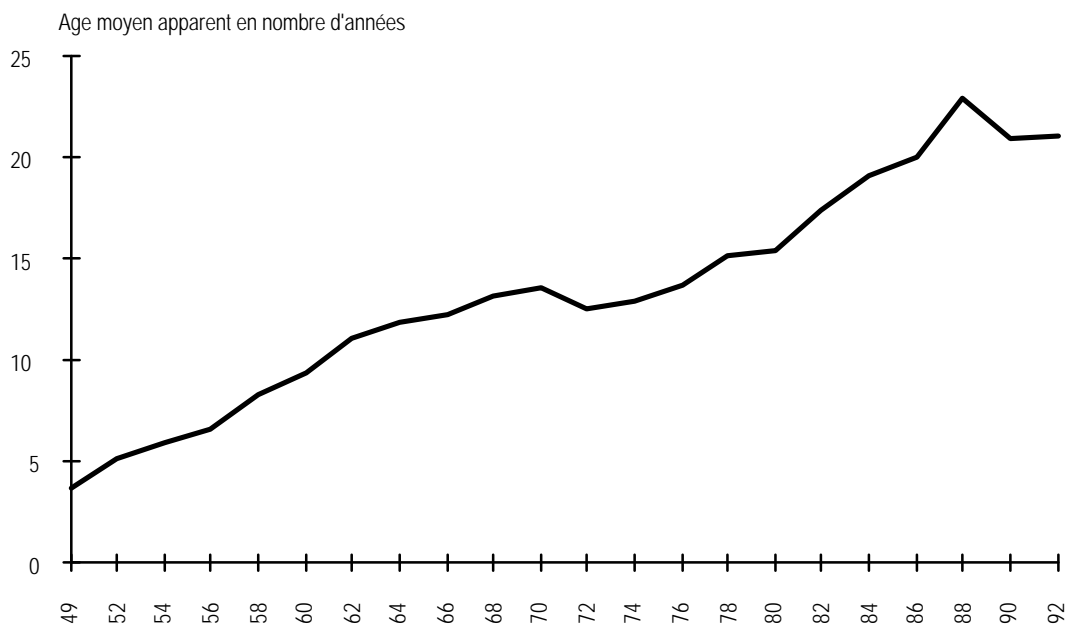


Source : IEPE, Fichier Midoil-Procédés.

On peut apprécier la résultante des naissances et disparitions en calculant un “âge moyen apparent” des procédés sélectionnés, d’abord en établissant l’âge de chaque procédé pour chaque année d’observation<sup>14</sup>, puis en faisant en moyenne arithmétique de l’âge de tous les procédés pour cette même année.

<sup>14</sup>on a rajouté par hypothèse deux années supplémentaires pour tenir compte d’un délai forfaitaire de commercialisation entre la réalisation du premier prototype et la vente de la première unité commerciale.

## Graphique 2 : Age moyen des procédés de raffinage, 1949-1992



Source : Fichier Midoil-Procédés.

On observe une croissance de l'âge moyen des procédés qui traduit le poids croissant des procédés les plus anciens dans la sélection malgré le rajeunissement partiel apporté chaque année par les nouveaux procédés. En 1992, dernière année de référence, 9 procédés sur les 59 sélectionnés par les experts avaient un "âge moyen apparent" de 47 ans : trois procédés de craquage thermique largement supplantés, mais pas complètement, par le craquage catalytique apparaissent dans cette liste ; on compte aussi trois procédés de craquage catalytique (FCC Orthoflow, Flexicracking et Fluid Catalytic Cracking), deux procédés d'alkylation, dénommés "HF (pour acide fluorhydrique) alkylation", enfin un procédé d'hydrotraitement (Hydrofining).

On notera toutefois qu'il n'a pas été possible de prendre en compte les nouvelles générations ou variantes d'un procédé donné : pourtant ces dernières s'apparentent d'avantage, par l'importance des changements apportés, à des innovations principales qu'à des simples innovations incrémentales<sup>15</sup>. Il n'a pas été possible également de décompter l'apparition des nouveaux catalyseurs zéolithes qui apportent aux procédés catalysés un surcroît de performances et dépassent donc le stade des innovations incrémentales.

Malgré cette limite qui contribue à augmenter l'âge moyen, on admettra la tendance d'un vieillissement de la population des procédés de raffinage entre 1988 et 1992. On remarque aussi un léger déclin de cet âge moyen apparent à partir des années 1988-1990 : pour en comprendre les raisons, il faut mener

<sup>15</sup>On peut donner ainsi l'exemple du procédé Flexicracking d'Exxon Research Engineering qui, de 1972 à 1994, fait l'objet au moins de trois versions différentes.

l'analyse à un niveau plus désagrégé, celui des familles et sous-familles technologiques. La nécessité d'offrir des produits pétroliers moins polluants, qui s'affirme au début de la décennie quatre-vingt, suscite des besoins de nouveaux procédés chez les raffineurs américains contraints à des modifications productives substantielles pour la fabrication des futurs carburants "reformulés". Cette tendance se traduit, par exemple, par l'apparition en 1980 du premier procédé de synthèse d'éthers, suivi dans les années suivantes de nombreux autres procédés concurrents.

### 1.1.3. L'accroissement des innovations incrémentales de procédés : quelques hypothèses.

Dans son *Critical survey* sur l'économie du changement technique, C. Freeman (1994) rappelle que de très nombreuses innovations incrémentales "*go unrecorded and unarticulated in the general process of tacit knowledge, accumulation, learning by doing, using and interacting*" (p.476), tout en ajoutant que, grâce aux revues techniques, aux travaux historiques sur les firmes et surtout aux statistiques de brevets, des progrès importants pourraient être réalisés dans le repérage de ce type d'innovation concernant le raffinage. Malgré un accroissement indéniable de l'information disponible, le repérage et la mesure des innovations incrémentales se heurtent à deux obstacles : d'abord un problème d'accès à l'information puisque les améliorations marginales apportées par le raffineur lui-même au procédé acheté ne sont pas en général rendues publiques ; ensuite l'absence, sauf exception, de prise de brevets sur ces améliorations.

Il est donc difficile d'échapper à un repérage indirect. Pour des procédés par hypothèse très proches et sous des conditions de concurrence forte entre fournisseurs, on peut supposer qu'en tendance, la durée de vie d'un procédé révèle plus ou moins l'intensité d'innovation incrémentale qui lui est apportée par le fournisseur/licencieur. Dans cette mesure, l'accroissement de l'âge moyen de la sélection des procédés serait un signe de l'accroissement du poids des innovations incrémentales par rapport à celui des innovations principales (en baisse) et de la quasi-disparition des innovations radicales.

Enos, l'historien des techniques de raffinage, rappelle que les innovations incrémentales cumulées sur une longue période sont génératrices d'améliorations importantes. De son côté l'Institut Français du Pétrole (1996) identifie les améliorations suivantes dans des techniques déjà éprouvées :

- l'utilisation des catalyseurs trimétalliques et la généralisation des lits circulants dans le reformage,
- l'utilisation de catalyseurs plus sélectifs, notamment pour obtenir davantage de propylène dans le craquage catalytique,
- des progrès dans les catalyseurs d'isomérisation, et dans l'alkylation pour la production des carburants,

- l'amélioration de l'hydroconversion des distillats sous des conditions opératoires moins sévères,
- des catalyseurs plus performants dans la conversion et l'hydrodésulfuration des résidus sous l'effet notamment de catalyseurs plus performants.

On remarque le rôle des catalyseurs dans ces améliorations. Ils sont eux-mêmes, en tant qu'une des technologies élémentaires du raffinage, le champ d'un phénomène de réduction de variété génétique avec raréfaction des innovations principales, avec cependant maintien de changements incrémentaux.

La spécialisation des catalyseurs utilisés dans le raffinage amène à considérer les connaissances et les savoir-faire nécessaire comme spécifique du domaine pétrolier. En simplifiant, la variété technologique des catalyseurs a augmenté jusqu'au début des années quatre-vingt-dix sous l'effet de deux facteurs : le nombre de procédés de raffinage qui sont catalysés tend à augmenter depuis 1947 au détriment de ceux qui ne le sont pas, grâce à l'augmentation du nombre de catalyseurs offerts à la vente. Selon le recensement biennuel du *Worldwide Catalyst Report* de la revue *Oil and Gas Journal*, depuis 1984, leur nombre (700) augmente plus ou moins régulièrement jusqu'au début des années quatre-vingt-dix (environ 1200), avant de diminuer vers un niveau de 950 environ en 1995. De plus leur utilisation a été accrue dans certains procédés par les possibilités de changement de catalyseurs en cours de fonctionnement pour s'adapter au changement de la charge, ou pour obtenir une production légèrement différente. Dans le même temps, les vendeurs de catalyseurs ont cherché à augmenter les divers types de performances des catalyseurs<sup>16</sup> ou à en diminuer les coûts.

La nature des changements techniques dans les catalyseurs peut être identifiée, en reprenant la distinction entre innovations principales et innovations incrémentales. Jusqu'en 1990, le progrès technique se caractérise par plusieurs innovations principales : l'apparition d'une famille de catalyseurs nettement plus performants, tels les catalyseurs zéolithes au début des années soixante, ou l'application des catalyseurs à une nouvelle famille de procédés de raffinage, tels les catalyseurs de procédés de produits oxygénés. Il n'y a plus eu depuis d'autre innovation principale concernant les catalyseurs<sup>17</sup>. Les autres changements de formes, d'imprégnation, de dimensions,... peuvent être considérés comme des changements incrémentaux. Une indication partielle et indirecte de ces

---

<sup>16</sup> Les trois plus importantes sont l'activité du catalyseur, appréciée par le pourcentage de conversion par unité de poids du catalyseur et par unité de temps, la sélectivité du catalyseur repérée par le pourcentage des activités des deux réactions qui peuvent se produire simultanément, et la longévité d'un catalyseur caractérisée par la quantité de matière transformée avant la "mort" du catalyseur par unité de masse du catalyseur.

<sup>17</sup> On met à part le développement des bio-catalyseurs, qui se situe encore à échelle expérimentale.

changements est donnée par l'étendue de la gamme commerciale des catalyseurs offerts aux raffineries par les fabricants. On a mentionné précédemment la réduction de cette gamme commerciale depuis 1990. Cette diminution peut paraître paradoxale puisque le marché des catalyseurs croît avec la complexité du parc de raffinage et les impératifs de la dépollution. En fait, la concurrence entre fournisseurs est telle que le nombre d'offres et de produits a diminué dans ces quatre dernières années.

Au sein même de l'industrie du raffinage, le dynamisme de l'activité d'innovation a donc changé de caractéristiques. Si la fréquence d'apparition d'innovations radicales et principales a décliné, les procédés s'améliorent sensiblement sous l'effet d'innovations incrémentales multiples.

Plus important apparaît être au cours des dernières années l'effet de l'augmentation de savoirs génériques, notamment dans le domaine des TIC (Technologies de l'Information et de la Communication), et de leur incorporation dans la technologie d'ensemble du raffinage.

## **1.2. L'accélération de la variété transmise : l'incorporation des technologies de l'information et de la communication dans les technologies du raffinage.**

Les processus de traitement des hydrocarbures dans une raffinerie, un site pétrochimique ou une usine de traitement des gaz, ont des caractéristiques communes : ils génèrent des risques d'explosion et de toxicité des fluides liquides ou gazeux manipulés (depuis 1963, le coût des sinistres dans les industries d'hydrocarbures double approximativement tous les dix ans) ; de plus ils sont mis en oeuvre dans des unités industrielles de grande taille unitaire, donc présentant des risques financiers considérables. Pour faire face à ces contraintes d'exploitation, les industries de raffinage, et plus largement les industries de procédés de traitement chimique, se sont dotées à leur origine de systèmes de conduite faiblement automatisés de leurs unités. Mais la multiplication de paramètres de contrôle par unité de raffinage, et du nombre d'unités de raffinage à piloter, a entraîné une augmentation impressionnante du nombre de données, d'informations, de signaux à traiter.

De plus, les raffineries sont obligées de changer plus souvent le réglage de leurs unités du fait de leur nouvel environnement de sélection qui les ont conduit à adopter une politique flexible d'approvisionnement en pétroles bruts de qualité très différente, et un nouveau régime d'exploitation des équipements existants afin de respecter, sur une gamme plus large de produits, des spécifications plus sévères.

En bref, les besoins de conduite assistée et d'automatisation dans le raffinage ont fortement augmenté au cours de ces vingt dernières années, du fait des impératifs de flexibilité statique et dynamique (Cohendet, Llerena, 1992). Ces impératifs ont conduit les raffineurs à incorporer de plus en plus largement les TIC que ce soit pour l'exploitation des procédés de raffinage qu'au stade de leur conception. Les modalités de leur incorporation seront examinées aux niveaux

des technologies élémentaires, des technologies d'architecture<sup>18</sup> et des technologies d'utilisation.

### 1.2.1. L'incorporation des TIC dans les technologies élémentaires.

Plutôt qu'une analyse exhaustive de l'incorporation des TIC dans toutes les technologies élémentaires constitutives de la technologie des procédés de raffinage, on identifiera ce phénomène sur deux d'entre elles, qui paraissent jouer un rôle décisif dans les performances de ces procédés : les catalyseurs et le contrôle régulation d'une unité de raffinage.

- Les catalyseurs

Le processus de conception des catalyseurs subit actuellement des changements importants. En effet, l'objectif à moyen et long terme des scientifiques et technologues est "de parvenir à mettre au point un catalyseur, à partir des connaissances acquises sur ses propriétés chimiques et physiques" (Shell S.B.S., 1986). Et, si cette perspective ne s'est pas encore vraiment concrétisée du fait de la complexité des catalyseurs et des cinétiques de réaction catalytique, les premiers jalons ont été posés grâce à l'informatique ; grâce aux progrès réalisés dans la modélisation moléculaire du pétrole et du gaz, on utilise de plus en plus la simulation sur ordinateur pour définir les formes géométriques optimales des catalyseurs qui permettront d'obtenir la réaction catalytique désirée avec la plus grande sélectivité possible. Van Santen (1996) cite le cas concret d'un nouveau catalyseur réalisé pour le déparaffinage catalytique, qui a été conçu à partir de différents gabarits (*templates*), eux-mêmes définis comme "*using graphical, geometric and steric modelling of the sites adopted by a guest molecule representative of the products and intermediates of a desired reaction*" (op. cit., p. 39).

- Les systèmes de contrôle - régulation d'une unité de raffinage

L'industrie du raffinage est connue comme étant celle dans laquelle les systèmes de contrôle-régulation pour la conduite des différentes unités de raffinage ont été les plus développés<sup>19</sup>. Chacun des éléments de cette chaîne de contrôle/régulation a bénéficié de nombreuses améliorations qui s'inscrivent dans une tendance à l'automatisation croissante permise par l'usage extensive des TIC.

---

<sup>18</sup> Zimmerman(1995) définit les technologies d'architecture comme des technologies opérant la combinaison des technologies élémentaires dans une activité de production.

<sup>19</sup> En simplifiant, un système de contrôle/régulation comprend : 1/ un capteur mesurant une ou plusieurs grandeurs sur les flux de sortie d'un équipement simple ou complexe comme une unité de raffinage, 2/ un transducteur transformant la grandeur physique en un signal analogique ou numérique, 3/ un dispositif de régulation/automatisation des flux d'entrée, ou de fonctionnement de l'unité de raffinage, donnant des signaux appropriés à un actionneur, 4/ un actionneur qui module les transferts d'énergie à partir de signaux reçus du dispositif précédant, et qui a pour effet de maintenir le fonctionnement de l'unité de raffinage autour d'un point de consigne, 5/ un circuit reliant ces différents éléments du système.

Codage des grandeurs physiques intervenant dans l'automatisation et leur traitement par fonction de transfert, linéaire ou non,

Filtrage par logiciel du bruit et des valeurs erratiques (traitement dans les capteurs ou en association avec eux),

Transformation des informations au moyen de lignes de communication (transmission asynchrone en série des bits composant les informations sur des lignes et plus en plus rapides),

Traitement des variables d'état pour réaliser les conditions optimales de stabilité et de performance des systèmes bouclés,

Gestion des alarmes et des signaux de service.”

Source : Van d'en Broeck, op. cit. p. 518.

Les spécialistes de contrôle-régulation de la revue *Hydrocarbon Processing* identifient quatre étapes dans l'histoire de cette technologie. Au début de l'histoire du raffinage, des systèmes de régulation de base (*Basic Front Line Regulatory*) plus ou moins artisanaux sont exploités ; ils ont pour fonction de maintenir le système régulé en stabilité autour de points de consigne prédéterminés relatifs à la pression, à la température, aux débits... A partir des années soixante-dix sont introduits les systèmes avancés de régulation. Dans ces systèmes, les points de consigne sont déterminés par des algorithmes de type prédictif à boucle de rétroaction, régulant une ou plusieurs variables du procédé. La troisième étape voit émerger les systèmes de régulation avec dispositif hiérarchique (*Supervisory*), dans lequel les ordinateurs de procédés calculent et transmettent les valeurs de consigne en tenant compte des données comptables et d'exploitation de l'unité. Enfin, dernière étape, les systèmes de contrôle avec optimisation ajoutent aux systèmes de régulation l'incorporation d'objectifs de gestion économique de l'unité et/ou de la raffinerie pour le calcul "optimisé" des valeurs de consigne<sup>20</sup>. Les baisses de coût et les augmentations de performance des TIC ont donc permis cette évolution vers des systèmes automatisés qui intègrent simultanément un grand nombre de données techniques, et une combinaison de données techniques et économiques pour le calcul et la modification automatique de valeurs optimales de consigne.

Progressivement, chacune des unités de raffinage a été équipée de dispositifs de contrôle-régulation avancé, puis de contrôle optimisé. A partir de 1990, les sociétés spécialisées dans l'instrumentation et le contrôle, ou bien dans les logiciels et les matériels de contrôle ainsi que les sociétés d'engineering-

---

<sup>20</sup> (Source : d'après *Hydrocarbon Processing Magazine*, 1995, p. 25).

construction sont capables de fournir des systèmes de contrôle avancé pour les multiples unités de raffinage<sup>21</sup>.

### 1.2.2. L'incorporation des TIC dans les technologies d'architecture des unités de raffinage.

La construction d'une nouvelle unité de raffinage, ou sa modernisation (*revamping*) comprend des activités de conception d'ensemble du procédé, de calcul et de spécifications détaillées des appareils, équipements, matériaux, ainsi que les activités d'implantation de l'unité, de conception du raccordement aux installations générales, de coordination et de contrôle de la construction, et enfin du démarrage de l'unité.

Des TIC peuvent appuyer la réalisation de chacune de ces activités : CAO, simulation, utilisation de systèmes experts... Ici encore, comme dans le cas des catalyseurs, les progrès obtenus dans la puissance et le coût des nouveaux ordinateurs ont notamment permis pour les activités de conception le passage à la simulation dynamique des fonctionnements réels des réacteurs chimiques. Ce type de simulation permettant le traitement de plusieurs milliers d'équations non-linéaires était encore inenvisageable il y a dix ans, du fait de l'absence d'outils informatiques et mathématiques adaptés. Les progrès dans la simulation dynamique permettent une meilleure représentation des régimes transitoires, et, par là une amélioration dans la phase de conception (*design*) de l'ingénierie, dans celle de spécification détaillée des composants, puis dans le démarrage et le fonctionnement des unités. (J.R. Cassata et al., 1995).

### 1.2.3. L'incorporation des TIC dans les techniques d'exploitation

L'exploitation coordonnée de plusieurs unités de raffinage avec leurs installations annexes (utilités, stockage, laboratoire, bâtiments généraux) a subi un progrès en trois étapes d'automatisation et informatisation. D'abord on étend les procédures de contrôle-régulation avancé d'une unité de raffinage à plusieurs, puis à l'ensemble des unités des production, stockage, mélangeage, etc... Petit à petit, la totalité des unités est coordonnée en temps réel par des systèmes avancés. Ensuite on met en place des systèmes d'information et d'automatisation d'abord isolément, puis de manière coordonnée pour un ensemble de tâches (voir tableau 2) :

#### **Tableau 2 - Liste des tâches gérées par système informatisé**

---

<sup>21</sup> Absorption, alkylation, aromatiques, process discontinu (*batch process*), mélangeur, reformage catalytique, cogénération, coker, déparaffinage, craquage catalytique fluide, chaudière, séparateur, fours, hydrocracking, hydrotraitement, isomérisation, lubrifiant, polymérisation, compresseur de réfrigération, craqueur de résidus, système de production/distribution de vapeur, parc à réservoirs, "utilities".

Gestion de la maintenance,

Gestion des bacs de réception du pétrole brut et des stockages,

Automatisation des utilités et des stockages intermédiaires,

Surveillance des émissions de polluant et des appareils correspondant de mesure,

Gestion du laboratoire d'analyses et mesure,

Ordonnancement de la production et établissement du plan.

Enfin, dans une troisième étape, on interconnecte les systèmes de contrôle-régulation avancé ou optimisé des unités de raffinage avec les systèmes d'information développés pour automatiser la gestion économique de la raffinerie. Mais on en est encore actuellement au stade des objectifs, tant les changements techniques, commerciaux et surtout organisationnels sont importants. L'éventail des TIC concernées s'étend des bases de données, logiciels, systèmes-experts, jusqu'aux ordinateurs reliés entre eux par des lignes de communication à grand débit<sup>22</sup> (*field bus*).

Les enjeux d'économies cumulées de l'ensemble de ces dispositifs pourraient atteindre de 0,8 à 1,8 \$ par baril, soit entre la moitié et les deux-tiers de la marge nette "normale" d'une raffinerie de 100 000 barils par jour ou 5 Mt./an (Amos, Truesdale, Tucci, 1995).

## **Conclusion**

Si le repérage systématique de la variété technologique, génétique et transmise, pour l'ensemble des artefacts techniques composant la grappe technologique du raffinage, est un objectif hors de portée, l'analyse précédente révèle malgré tout deux tendances générales : d'une part un ralentissement de l'augmentation de la variété génétique, d'autre part une augmentation rapide de la variété transmise. Cette seconde tendance ne met pas en cause les fondements du paradigme scientifique sous-jacent au raffinage, comme le soulignent les spécialistes sur l'évolution du paradigme du génie des procédés : *"si les innovations qui sont demandées aux ingénieurs doivent conduire à des remises en cause profondes des modes de conception et d'exploitation, elles ne sauraient toucher au coeur*

---

<sup>22</sup> La terminologie pour qualifier ce troisième échelon est loin d'être stabilisée puisque les termes suivants semblent désigner la même réalité d'interconnexion des deux systèmes : "Manufacturing execution-system (MES)", "Manufacturing operations management systems (MOMS)", "Production planning systems (PPS)", "Computer integrated manufacturing (CIM)", "Production management systems".

*même des mécanismes et de l'intimité du procédé.*" (Charpentier, 1996, p.128). Le changement dans la direction et la nature du progrès technique porte sur la production d'artefacts nouveaux ou améliorés en affectant surtout les manières de concevoir ces objets techniques, ce qui contribue à perpétuer la vitalité technologique d'un secteur mature ; il affecte aussi leurs modes d'exploitation et la coordination technique et économique de leur usage intégré.

## **2 - Les nouveaux acteurs dominants de la création technologique dans le raffinage : des utilisateurs vers les fournisseurs.**

L'industrie du raffinage est une des industries de process dans lesquelles la participation des firmes du secteur à la création technologique a été la plus active, en raison de l'existence de problèmes spécifiques de production sans solution simple. L'offre technologique venait en majorité de l'intérieur des groupes pétroliers. Le déplacement récent de l'essentiel de la création technologique vers les fournisseurs, ou les partenariats fournisseurs-utilisateurs constitue une rupture marquée qu'il convient d'expliquer.

### **2.1. La domination initiale de la création technologique interne**

La création technologique ayant été concentrée historiquement aux États-Unis où l'industrie du raffinage a connu le développement le plus intense et le plus précoce, on se centrera sur l'offre américaine de technologies de raffinage cas exemplaire du craquage catalytique, technique générique d'une famille de procédés de conversion pétrolière, dont l'émergence a été analysée par Enos (1962).

Dans les années vingt, trente et quarante, la création technologique provient en grande majorité des départements de recherche ou des filiales ingénierie des grands groupes pétroliers (par exemple Research and Development de Standard Oil of Indiana ou Esso Research and Engineering Co). Universal Oil Products (UOP), une firme contrôlée directement par cinq majors jusqu'en 1944, assure le développement mutualisé des procédés et leur diffusion auprès d'autres sociétés.

Des tentatives de monopolisation technologique ont eu lieu de la part de certaines grandes sociétés pétrolières; mais les petits raffineurs américains ont pu cependant accéder à une partie de ces technologies, notamment grâce à une politique délibérée de l'UOP de baisse de ses taux de royalty pour les licences de ses procédés dans les années trente. Cette politique s'explique par l'extraordinaire croissance du marché des produits pétroliers des années trente aux années soixante, qui ont permis, de baisser les taux de redevance, et plus encore de laisser une place suffisante à l'activité de firmes spécialisées dans la vente de procédés. La viabilité économique initiale de telles firmes est liée en effet à l'extension de leur marché, donc à l'accès d'un nombre croissant d'utilisateurs à ces nouvelles technologies. UOP a été ainsi transférée en 1944 à un trustee de l'American Chemical Society, puis vendue au public. D'autres et plus rares sociétés émergentes, comme Houdry Co, se sont constituées autour du

développement d'un nouveau procédé comme celui du cracking catalytique inventé par Eugène Houdry, et ont pu se développer en se spécialisant dans la vente d'autres licences.

Les compagnies d'ingénierie ont également profité de la très forte expansion du marché des produits pétroliers pour développer une expertise de plus en plus reconnue dans la construction des unités de raffinage, en particulier pour les techniques qui ne sont plus soumises aux contraintes d'une licence.

L'évolution de l'offre technologique depuis les années soixante-dix manifeste un renforcement de cette tendance à l'externalisation de la création technologique.

## **2.2. Les changements de contribution des fournisseurs et des utilisateurs à l'offre technologique du raffinage**

En simplifiant le processus d'évolution, il semble que les grandes compagnies pétrolières (une dizaine), l'UOP, quelques grandes compagnies américaines d'engineering (5 à 6) et groupes chimiques internationaux, avec des fournisseurs spécialisés de taille plus modeste, ont structuré l'essentiel d'une offre technologique en expansion jusqu'au début des années soixante-dix. Depuis les années quatre-vingt, de nombreux changements interviennent. Les contributions relatives des différents acteurs à cette offre se modifient, avec un déclin marqué des compagnies pétrolières et des groupes chimiques, compensé par une augmentation des ventes par les sociétés technologiques et les compagnies d'engineering, c'est-à-dire par une substitution partielle des "utilisateurs" par les "fournisseurs".

### 2.2.1. La vente des procédés de raffinage

A partir des données de la base Midoil Procédés de l'IEPE couvrant la période de 1972 à 1994, on a repéré les changements de contribution des différentes catégories d'acteurs à l'offre de procédés de raffinage ainsi que la croissance de la part des associations de compagnies dans cette même offre (Tableau 3). Cinq catégories d'acteurs sont considérées :

Les entreprises pétrolières, les agences ou instituts de recherche professionnels (dont l'UOP et l'IFP constituent les deux entreprises clés), les sociétés para-pétrolières (dont les grandes sociétés d'engineering), les groupes chimiques et autres, et enfin les associations de partenaires de deux catégories.

Entre 1972 et 1994 la part de l'offre technologique<sup>23</sup> des compagnies pétrolières, initialement de 40% a diminué de moitié. La contribution des compagnies chimiques a disparu. En revanche la part des grandes compagnies

---

<sup>23</sup> définie par le quotient du nombre de procédés vendus par les compagnies pétrolières sur le nombre total de procédés sélectionnés par les experts de la revue H.P.I.

d'ingénierie augmente de 26,4% à 38,2%, et celle des associations de partenaires de 9,1% à 20%. Le développement de ces associations est donc un phénomène important.

Le nombre de ces associations augmente plus particulièrement entre les sociétés technologiques spécialisées et les compagnies para-pétrolières ou les sociétés d'engineering, ainsi qu'entre ces mêmes sociétés technologiques spécialisées et les compagnies pétrolières. Par contre, les associations du début de période entre compagnies chimiques et autres acteurs ont disparu dans la décennie quatre-vingt-dix.

**Tableau 3 : Comparaison de la répartition de l'offre de procédés de raffinage par types d'acteurs en 1972 et 1994**

	1972	1994
Compagnies pétrolières	44, 40 %	12, 21,8%
Agences technologiques publiques ou privées	17, 15,4 %	10, 18,2 %
Compagnies parapétrolières	29, 26,4%	21, 38,2 %
Compagnies chimiques et autres	6, 5,5%	1, 1,8%
Association de deux acteurs	10, 9,1%	11, 20%
Procédés sans licencieur	4, 3,6 %	0, 0%
Nombre de procédés totaux considérés	110, 100%	55, 100 %

Source : IEPE, Fichier Midoil-Procédés

A ce changement de structure des offreurs de procédés de raffinage se combinent des changements dans la spécialisation de chacune de ces quatre catégories d'acteurs, que l'on repère par un coefficient de spécialisation relative pour une dizaine de familles procédés<sup>24</sup>.

- Pour les compagnies pétrolières, on repère leur disparition de quatre familles (isomérisation, réformage catalytique, synthèse d'éthers, et cristallisation), un déclin de leur présence dans l'hydrotraitement, mais une accentuation relative dans la conversion catalytique, et à un moindre degré dans la conversion thermique et l'extraction/raffinage par solvant. Les sociétés technologiques spécialisées se maintiennent dans chaque famille, mais avec une accentuation de la spécialisation dans les familles de conversion catalytique, alkylation, adsorption, et un déclin relatif dans les procédés d'hydrotraitements, et ceux d'extraction/raffinage par solvant.

---

<sup>24</sup>Cet indicateur est défini par le rapport suivant : le numérateur est le rapport entre le nombre de procédés de la famille *i* vendus la catégorie *j* et le nombre de tous les procédés vendus par la catégorie *j*. Le dénominateur est défini par le rapport entre le nombre de procédés de la famille *i* vendus par les quatre catégories d'acteurs et le nombre de tous les procédés vendus par tous les acteurs.

- Les compagnies para-pétrolières se distinguent par une augmentation de spécialisation dans la conversion catalytique et la conversion thermique, et une moindre exposition dans l'hydrotraitement, l'absorption et la cristallisation.

**Tableau 4 : Comparaison de la spécialisation relative des quatre catégories d'acteurs dans les dix familles de procédés de raffinage entre 1972 et 1994**

Catégories	Compagnies pétrolières		Sociétés technologiques		Compagnies para-pétrolières		Compagnies chimiques	
	1972	1994	1972	1994	1972	1994	1972	1994
Procédés d'élimination des composés indésirables : hydrotraitements et adoucissements.	0,453	0,176	0,348	0,056	0,241	0,080	0,167	1
Procédés de conversion catalytique (craquage catalytique, vaporéformage et hydroconversions).	0,226	0,353	0,174	0,278	0,103	0,24	0,25	0
Procédés de conversion thermique (craquage thermique, cokéfaction, oxydation partielle, gazéification des résidus lourds).	0,019	0,176	0	0	0,069	0,2	0	0
Procédés d'extraction / séparation par solvant.	0,094	0,176	0,13	0,056	0,379	0,08	0,083	0
Procédés d'amélioration des carburants (isomérisation, oligomérisation du propylène).	0,057	0	0,087	0,167	0	0,12	0,167	0
Procédés de réformage catalytique.	0,075	0,118	0,174	0,167	0,034	0	0	0
Procédés d'alkylation.	0,019	0	0,043	0,111	0,069	0,08	0	0
Procédés de synthèse d'éthers (MTBE).	0	0	0	0	0	0,2	0	0
Procédés d'adsorption.	0,019	0	0,043	0,167	0,069	0	0,25	0
Procédés de cristallisation.	0,038	0	0	0	0,034	0	0	0

Source : IEPE Fichier Midoil-Procédés.

Les comptages sont effectués sur les seuls procédés vendus sous licence.

### 2.1.2. La vente de catalyseurs

Comme pour les procédés de raffinage l'ensemble des sociétés pétrolières perd du terrain dans le domaine de conception, et de la vente de catalyseurs. En dépit d'un accroissement du marché mondial des catalyseurs pour le raffinage entre 1990 et 1996 (de 1,19 Mrd à 1,69 Mrd de \$ selon des estimations de HPI Market Data), une forte tendance à la concentration se manifeste.

- Le nombre d'offres par famille de catalyseurs diminue à peu près partout, sauf dans l'isomérisation, l'hydrorefining, la récupération de soufre, les adoucissements, et dans les promoteurs de combustion.

- Le nombre de producteurs (entre 12 et 15) a tendance à diminuer par acquisitions, fusions ou créations de co-entreprises, surtout depuis la fin des années quatre-vingt<sup>25</sup>. La société la plus active dans le mouvement d'acquisitions est l'UOP, suivie par Union Carbide.
- Plusieurs compagnies pétrolières sortent de ce secteur malgré l'importance d'une expertise interne forte des raffineurs dans ce domaine : Arco en 1991, BP et Unocal en 1995. Seules Shell Chemical et Exxon Research Engineering font exception. Ce retrait s'effectue au profit du para-pétrolier et des sociétés technologiques (UOP, IFP).

### 2.2.3. Un environnement de sélection défavorable à la création technologique des utilisateurs.

L'environnement de sélection des entreprises du raffinage, notamment américain et ouest-européen, change depuis le début de la décennie quatre-vingt. L'intensification concurrentielle sur un marché mature requiert des stratégies orientées vers la recherche de baisse des coûts fixes, de flexibilité, de rentabilité financière, avec des horizons de référence raccourcis. Dans ce contexte, un niveau élevé de dépenses internes de R&D est difficile à maintenir, alors que les nouvelles technologies peuvent être transférables rapidement et être sous-traitées. Les innovations dans l'exploitation des unités de raffinage avec l'incorporation des TIC auraient pu redonner aux sociétés de raffinage une certaine pré-éminence dans le mouvement technologique, compte tenu de leurs compétences spécifiques d'exploitants. Mais des exemples déjà nombreux aux Etats-Unis montrent que des sociétés de raffinage ont franchi un nouveau seuil en sous-traitant non seulement la conception de leurs systèmes internes d'information, mais aussi l'exploitation de ces systèmes.

## **2.3. L'approfondissement en cours des tendances à l'externalisation et à la concentration de la création technologique.**

Les tendances mises à jour devraient se renforcer sous l'incidence de l'accroissement de la concurrence sur le marché des équipements de raffinage et de l'accroissement de la complexité technologique. Ce contexte valide de façon croissante le modèle de réseau comme source de l'offre technologique, avec le développement des associations entre les grandes sociétés technologiques et les sociétés d'ingénierie ou les compagnies pétrolières.

### 2.3.1. Un nouveau spectre de compétences maîtrisables par des fournisseurs mondiaux spécialisés.

L'intensité concurrentielle entre les offreurs de technologie dans un marché d'équipements devenu plus étroit accroît la tendance à la concentration de l'offre

---

<sup>25</sup> Criterion Catalysts résulte de la fusion en 1988 des activités catalyse de Shell Chemical et d'American Cyanamid, Acreon Catalysts de celle d'Engelhard et Procatalyse, etc....

technologique autour de trois groupes d'acteurs principaux : 1-les deux détenteurs de licence de procédés pouvant offrir la gamme complète des procédés de raffinage (UOP, IFP), 2)-les quatre ou cinq principales compagnies pétrolières ayant développé depuis l'origine une activité spécifique de R&D (Exxon, Mobil, RD Shell, Texaco), 3)-quatre ou cinq grandes compagnies d'engineering (Foster Wheeler, Pullman Kellog, Stone and Webster, Fluor Daniel. (source: d'après Barbier et al., 1995). Ces différents acteurs pourraient se regrouper dans un avenir peu éloigné en deux réseaux mondiaux autour des deux grandes sociétés technologiques, dans la mesure où elles sont les seules avec deux ou trois compagnies pétrolières internationales, à détenir les compétences "d'architecturation" nécessaires à la conception et la mise en oeuvre de nouvelles unités complexes de raffinage.

En outre les sociétés technologiques spécialisées dans la vente des licences de procédés ont un avantage décisif sur les compagnies pétrolières : du fait de leur marché mondial<sup>26</sup>, leurs capacités de *learning by doing* sont par définition bien supérieures à celles des compagnies pétrolières. De plus, avec le développement de la sous-traitance, les prestataires de services et d'équipements sont en mesure d'initier un processus de learning by using en leur faveur.

Les compagnies pétrolières créatives antérieurement de technologie ont donc perdu leur avantage de bénéficier seul du "learning by using", dès lors que la sous-traitance s'est largement développée. De plus, en matière d'incorporation des TIC, elles ont le handicap de ne pas disposer de compétences génériques, les solutions techniques qu'elles ont pu trouver étant trop largement spécifiques pour pouvoir être indistinctement transférables et valorisables.

L'avantage de l'expérience accumulée dans l'offre de procédés performants et surtout éprouvés devient décisif vis-à-vis de la demande des compagnies de raffinage qui cherchent la performance moyenne la plus élevée sur une période la plus longue possible.

### 2.3.2. Le modèle de réseau devenu la forme dominante d'organisation de la R&D.

L'industrie du raffinage n'échappe pas au rôle croissant des sources externes d'informations dans le développement des nouveaux produits et procédés au travers du développement de la nouvelle forme d'organisation industrielle que constitue le réseau de coopération. Celle-ci est fondée sur la recherche de complémentarités technologiques entre clients et fournisseurs, et du raccourcissement des délais de l'innovation, par le partage d'objectifs stratégiques communs<sup>27</sup>. Dans l'amont pétrolier en exploration et production "*les parapétroliers*

---

<sup>26</sup> Qui est pour les très grosses unités, par exemple du type craqueur catalytique fluide, limité à moins d'une dizaine d'exemplaires par an.

<sup>27</sup> Voir, par exemple, C. Freeman, 1991.

ont réussi, au prix parfois de vigoureuses restructurations, à s'imposer comme les partenaires stratégiques des compagnies pétrolières en matière d'offre technologique " (Institut Français du Pétrole, 1996a).

Dans le raffinage, les détenteurs de licence semblent être les acteurs dotés des compétences d'architecture nécessaires pour structurer à terme le réseau des fournisseurs spécialisés comme l'ont été les majors du parapétrolier. Entre ces "têtes de réseau" et les compagnies pétrolières, des projets technologiques en partenariat devraient se développer. Quant au rôle des grandes sociétés d'engineering-construction, il restera central pour les technologies "banalisées" non soumises au brevet ou à des licences : ces sociétés disposent en effet d'avantages concurrentiels indéniables du point de vue des compétences d'architecture, et de l'expérience accumulée. Mais, pour les nouvelles technologies protégées par des licences, des associations avec les détenteurs de licence seront nécessaires.

## **Conclusion**

L'analyse de l'évolution de la dynamique technologique du raffinage montre que des évolutions importantes dans deux des composantes de la trajectoire peuvent conduire à une bifurcation. La dynamique de variété de population technologique connaît un accroissement plus rapide de la variété transmise que de la variété génétique notamment au niveau des innovations principales. D'autre part la modification de l'organisation industrielle conduit à une externalisation relative de la création technologique. Plusieurs prolongements analytiques pourraient être recherchés en partant de ces constats.

En premier lieu la typologie des trajectoires technologiques sectorielles proposée par Pavitt (1984) paraît devoir être affinée. Le cas du raffinage montre en effet un enchaînement de trajectoires : à la première fondée sur l'exploitation des effets d'échelle (*scale intensive*), relayé par une seconde fondée, la science (*science-based*) avec la R&D, la science et l'ingénierie comme sources du processus technologique, succède dans les années quatre-vingt une trajectoire fondée de plus en plus sur les "fournisseurs dominants" (*supplier dominated*). En d'autres termes, les caractéristiques et les déterminants des trajectoires sectorielles changent de nature.

En second lieu une articulation serait à établir entre les bifurcations de trajectoire et l'évolution des paradigmes scientifiques. Ainsi, l'évolution de la technologie d'ensemble du raffinage suggère l'existence d'un phénomène d'élargissement successif du paradigme initial du génie chimique qui concerne les autres industries de process. En effet ce génie chimique a d'abord bénéficié de l'apport du génie des procédés, puis, plus récemment, du génie industriel et de la productique par l'incorporation croissante des TIC.

Des analogies entre l'industrie du raffinage, l'industrie chimique, voire les industries manufacturières d'assemblage, pourraient sans doute être établies quant à la nature des bifurcations de trajectoire.

## Références

Amos J.D., Truesdale P.B., Tucci R., 1995, "Planning for refinery computer applications for nineties", *Hydrocarbon Technology International*, p.137-142.

Barbier J.C., Hennico A., Virondaud C., Bonnifay P., 1995, "Refining : licensing trends and opportunities", *Hydrocarbon Technology International*, Spring 1995, p.57-60.

Cassata J.R., Gandhi S.L., Ray S.A., 1995, "Dynamic simulation : the technology of today and the future", *Hydrocarbon Technology International*, Winter 1995-96, p.79-83.

Charpentier J.C., 1996, "Génie des procédés : les problèmes posés par les industries chimiques et parachimiques pour les années à venir. Un bouleversement ou une continuité?", *Instantanés Techniques*, juin 1996, p.125-129.

Cohendet P., Llerena P., 1992, "Flexibilité et technologie", p.159-172, in : Prades J., dir, *La technoscience, les fractures des discours*, L'harmattan, Paris (Collection Logiques sociales).

Dosi G., Nelson R.R., 1994, "An introduction to evolutionary theories in economics", *Journal of evolutionary economics*, vol. 4 n\_ 3, p.153-172.

Enos J.L., 1962, *Petroleum progress and profits : a history of process innovation*, The M.I.T. Press, Cambridge, Massachussets, 336 p.

Enos J.L., 1994, *Evaluation of improvements in petroleum refining technology : incentives, research & development outcomes*, Oxford Institute for Energy Studies, February, 28p. (EE 18).

Freeman C., 1994, "The economics of technical change : critical survey", *Cambridge Journal of Economics*, 18, 463-514.

Freeman C., 1990, "Technical innovation in the world chemical industry and changes of techno-economic paradigm", chapter 4, p. 74-91 in : C.Freeman and L. Soete, eds, *New explorations in the economics of technical change*, Pinter Publishers, London, New-York, 262 p.

Freeman C., 1991, "Networks of innovators : a synthesis of research issues", *Research Policy*, vol. 20, p. 499-514.

Gaessler J.P., 1994, "La réponse du raffinage", *Pétrole et Techniques*, n° 387, avril, p. 58- 68.

*Hydrocarbon Processing Magazine*, 1995,

*HPI market data*, 1996.

Institut Français du Pétrole, 1996a "Les développements technologiques récents dans l'aval pétrolier", *Panorama 1996*, Paris.

Institut Français du Pétrole, 1996b "Le nouveau rôle des parapétroliers et des équipementiers", *Panorama 1996*, Pavillon Gabriel, Paris, 25 janvier 1996.

Pavitt K., 1984, "Sectoral patterns of technical change : towards a taxonomy and a theory", *Research Policy*, vol.13, p.343-374.

R.D. Shell, 1986, "Les catalyseurs dans l'industrie pétrolière et la pétrochimie", *Technologie Shell*, février.

Saviotti P.P., 1994, "Variety, economic and technological development", p. 27-48, in : Yuichi Shionoya and Mark Perlman, Eds, *Innovation in technology industries and institutions : studies in Schumpeterian perspectives*, University of Michigan Press

Saviotti P.P., Mani G.S., 1995, "Competition, variety and technological evolution : a replicator dynamics model", *Journal of Evolutionary Economics*, vol 5, n°4, p.369-393, 24p.

Van D'en Broeck D'Obrenan J., 1990, "Automatisation", in : *Encyclopedia Universalis*, p. 518, Paris.

Van Santen R.A., 1996, "Theoretical catalysis", *Revue de l'IFP*, janvier-février, p.39-42.

Zimmerman J.B., 1995, "Le concept de grappes technologiques : un cadre formel", *Revue Economique*, vol. 46, n° 5, septembre, p.1263-1295.

## **ANNEXE Nomenclature complétée des procédés de raffinage d'après Heinrich**

1- Séparation	1.1 Distillation	1.1.1-Distillation primaire		
		1.1.2-Distillation sous vide		
		1.1.3-Autres distillations (Azéotropique,...)		
	Fraction-  nement	1.2-Absorption des gaz de raffinerie avec H <sub>2</sub> S par les amines- ou par du phosphate		
		1.3 Extraction	1.3.1 -Desphaltage du résidu sous vide, ou de diesel, extraction au solvant (propane, butane, pentane) du gazole, ou d'aromatiques (BTX) via SO <sub>2</sub>	
			1.3.2 Extraction par solvant des bases lubrifiantes, des paraffines,...	
			1.3.3 -Dessalage du pétrole brut	
			1.3.4-Récupération de produits légers- Fractionnement direct	
			1.3.5-Autres extractions (par réfrigération, par H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> des composants soufrés, par séchage, déshydratation,...)	
		1.4-Cristallisation Ex.déparaffinage au propane, puis cristallisation		
1.5-Absorption	1.5.1-Purification de l'hydrogène (PSA)- absorption/séparation sur tamis moléculaire			
	1.5.2-Autres procédés de purification-Centrifugation, filtration,...			
	1.5.3-Absorption + extraction de charges lubrifiantes déjà déparaffinées			
1.6 Autres procédés de séparation (ex: Raffinage chimique par champs électriques)				
2-  PRO   CEDES   DE   TRANS   FOR   MA   TION	2.1 Procédés  d'amélioration  des propriétés	2.1.1.0-avec réarrangement moléculaire: Réformage thermique		
		2.1.1-avec réarrangement moléculaire : Réformage catalytique		
		2.1.2-avec réarrangement moléculaire : Isomérisation		
		2.1.3-avec intervention de coréactifs: alkylation avec H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HFL		
		2.1.4-avec intervention de coréactifs: synthèse d'éthers (MTBE ou ETBE) à partir d'isobutène, ou de TAME à partir d'oléfines		
		2.1.5-avec intervention de coréactifs : oligomérisation du propylène pour essence		
	de	2.1.6-avec adjonction d'additifs (Acides gras+alkali+bases pétrolières=bases pour les graisses)		
		de	2.2 Procédés  de  conversion  thermique	2.2.1 Procédés  de  conversion  thermique
	2.2.1 1 Par voie thermique: viscoréduction-craquage thermique des Résidus Atmosphériques (R.A.) et des Résidus Sous Vide(RSV)			
	2.2.1.2-Par voie thermique : cokéfaction (coke électrode ou coke combustible) à partir des résidus sous-vide / brut lourd-(delayed coking -fluid coking)			
	2.2.1.3- Par voie thermique : vapocraquage -pétrochimie-production d'éthylène/ propylène ex GPL,naphtas			
	2.2.1.4- Par voie thermique : Oxydation partielle ou gazéification des résidus lourds			
	conversion	de conversion  catalytique	2.2..1.5-Réformage thermique et craquage thermique	
2.2.2 Procédés  de conversion  catalytique				
2.2.2.1-Par voie catalytique -Craquage catalytique fluide FCC ex DSV-RA-DAO ou le RCC (Residue Cat Cracking) ex RAT-Distillats Sous Vide		2.2.2.2-Par voie catalytique:vaporéformage-		
2.2.2.3-Par voie catalytique : hydroconversions- procédés de transfo. des DSV en prod. plus légers ou de prépa.des charges pour conv.		2.2.2.4-Par voie catalytique à lit fixe		
finition élimination  des composés indésirables	2.3-Procédés de			
	2.3.1-Hydrotraitements = amélioration des produits de la D.P ou de la conversion pour réduire la teneur en soufre, les aromatiques, les oléfines, et accroître le cétane			
	2.3.2-Adoucissements = transformation des mercaptans en disulfures par oxydation avec présence de soude pour réduire la teneur en soufre des fractions légères de la DP ou des craquages (GPL,kérosène ou autres produits légers)			
	2.3.3-Moulage-packaging, storage			
2.3.4 Raffinage sans hydrogène, au chlore				
de de l'environnement	2.4-Procédés de de	2.4.1 Traitement des gaz	2.4.1.1-Traitement des gaz acides - 1-Lavage aux amines (MEA-DEA) pour production de H <sub>2</sub> S	
			2.4.1.2 Traitement des gaz acides - Unité Claus-extraction du soufre de H <sub>2</sub> S	
et traitement des effluents de raff.	des	2.4.2 Traitement des eaux de rejet -contenant des sels dissous-récupération - décantation -dessalage -envoi aux strippers des eaux usées - Recyclage des eaux épurées- purge s envoyées au traitement biologique		

Source: d'après Heinrich G.1994, "Introduction au raffinage", chap.10-p373-453 .- In : Wauquier J.P., dir.- **Le raffinage du pétrole-1-Pétrole brut- Produits pétroliers- Schémas de fabrication-** Technip, Paris.

# **Les bifurcations de trajectoires technologiques dans les industries de process : le cas de l'industrie du raffinage dans les décennies quatre-vingt et quatre-vingt dix-**

Cahier de recherche de l'IEPE- N°9 - Juin 1996

## **Introduction**

### **1. Bifurcation et modification de la variété technologique : de la variété génétique à la variété transmise**

#### **1. 1. Le ralentissement de la croissance de la variété génétique**

- 1.1.1. Le ralentissement de la fréquence des innovations radicales de procédés depuis les années quarante
- 1.1.2. Le ralentissement de la fréquence des innovations principales de procédés.
- 1.1.3. L'accroissement des innovations incrémentales de procédés : quelques hypothèses.

#### **1.2. L'accélération de la variété transmise : l'incorporation des technologies de l'information et de la communication dans les technologies du raffinage.**

- 1.2.1. L'incorporation des TIC dans les technologies élémentaires.
  - Les catalyseurs
  - Les systèmes de contrôle - régulation d'une unité de raffinage
- 1.2.2. L'incorporation des TIC dans les technologies d'architecture des unités de raffinage.
- 1.2.3. L'incorporation des TIC dans les techniques d'exploitation

## **Conclusion**

### **2 - Les nouveaux acteurs dominants de la création technologique dans le raffinage : des utilisateurs vers les fournisseurs.**

#### **2.1. La domination initiale de la création technologique interne**

#### **2.2. Les changements de contribution des fournisseurs et des utilisateurs à l'offre technologique du raffinage**

- 2.2.1. La vente des procédés de raffinage
- 2.2.2. La vente de catalyseurs
- 2.2.3. Un environnement de sélection défavorable à la création technologique des utilisateurs.

#### **2.3. L'approfondissement en cours des tendances à l'externalisation et à la concentration de la création technologique.**

- 2.3.1. Un nouveau spectre de compétences maîtrisables par des fournisseurs
- 2.3.2. Le modèle de réseau devenu la forme dominante d'organisation de la R&D.

## **Conclusion**