

ARCHÉTYPES ET PRATIQUES DE L'INNOVATION : LE CAS DES LITS FLUIDISÉS

L'apparition et le développement des lits fluidisés ont suivi des cheminements parfois fort différents selon les applications, cheminements qui obéissent à autant de processus d'innovation. Quelques exemples, relevés dans l'histoire du développement de ces procédés, montrent qu'à côté du développement organisé d'une innovation à des fins compétitives, quelques-unes des applications ou tentatives d'application des lits fluidisés doivent leur existence à la séduction exercée par cet état un peu particulier de la matière sur les responsables de programmes de R&D.

PAR ARNAUD DELEBARRE, PROFESSEUR, DÉPARTEMENT SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES ET ENVIRONNEMENT, ÉCOLE DES MINES DE NANTES

Cet article expose les éléments techniques et historiques de quelques exemples de développement des lits fluidisés dans diverses branches industrielles. Ces illustrations ont été choisies pour la diversité des parcours des innovations qu'elles proposent. En effet, l'apparition et le développement des procédés à lits fluidisés dans l'industrie ont suivi des cheminements parfois fort différents selon l'une ou l'autre de leurs applications. Alors que le principe même de fluidisation reste identique dans tous les cas, les motivations, les processus décisionnels ou les étapes qui ont porté ces applications varient sensiblement selon les cas. L'éventail de ces situations rend ces cas d'autant plus intéressants que leur variété ne semble pas avoir été dictée par celle des applications elles-mêmes, mais bien plutôt par le processus présidant au développement de l'innovation. Après avoir présenté les principes généraux de la fluidi-

disation et l'éventail de ses applications, cet article traitera ensuite des particularités de la mise en œuvre des procédés utilisant des matériaux granulaires et de leurs particularités dans le domaine de la physique et du génie des procédés. Dans une troisième partie, quelques exemples de développement de procédés sont détaillés, qui illustrent la variété des processus d'innovation.

FAUT-IL AVOIR PEUR DES LITS FLUIDISÉS ?

La fluidisation et les lits fluidisés

La fluidisation gazeuse est l'opération par laquelle les particules d'un solide divisé (on dit aussi un matériau granulaire ou plus simplement une poudre), sont mises en suspension par un gaz ou un liquide.

Lorsqu'un fluide traverse du bas vers le haut une couche de grains d'un matériau granulaire, il subit une force de frottement dont l'intensité augmente notamment avec la vitesse de passage entre les grains : on imaginera par exemple un récipient ayant un fond poreux rempli de sable et alimenté par de l'air qui traverse du bas vers le haut le fond poreux puis le lit de sable. La force de frottement est dirigée vers le haut et peut devenir d'intensité égale à celle du poids des particules du solide divisé. Lorsque c'est effectivement le cas, les grains voient leur poids équilibré par la force de frottement et acquièrent de ce fait la possibilité de se mouvoir au sein du récipient qui est traversé par le fluide, tout comme les molécules d'un fluide sont libres de se mouvoir dans une enceinte qui délimite un volume. Le lot de poudre ainsi parcouru par un fluide ascendant est alors dit *fluidisé* par opposition à l'état fixe qui précède la mise en fluidisation. Lorsqu'ils sont fluidisés, les grains du matériau granulaire se comportent à certains égards comme un fluide, d'où le terme de fluidisation et de lits fluidisés. Un solide divisé acquiert alors des propriétés d'écoulement qu'il n'avait pas lorsqu'il était à l'état fixe, propriétés qui s'apparentent à celles d'un fluide.

Les applications des lits fluidisés

Les applications industrielles utilisant la fluidisation

tirent notamment parti des propriétés suivantes :

- un comportement fluide qui facilite la manipulation lors des opérations contrôlées en continu et automatiquement ;
- un mélangeage rapide des solides qui assure des conditions isothermes dans le réacteur ;
- une charge en solides chauffés qui constitue un ballast thermique isotherme atténuant les fluctuations indésirables pour les réactions exothermiques ;
- une facilité de circulation permettant de transférer d'un réacteur à un autre de fortes quantités de chaleur ou de masse ;
- une extrapolation convenant aux grands réacteurs ;
- un bon transfert entre la phase gazeuse et la phase solide ;
- un coefficient d'échange de chaleur élevé entre un objet immergé et le lit de solides.

Même si certains font référence à des applications de la fluidisation dès le XVI^e siècle, il est généralement admis que la première application industrielle et commercialisée en lit fluidisé est le réacteur Winkler de gazéification du charbon (en 1926). Ces réacteurs sont restés en activité jusque dans les années 50, où le pétrole et le gaz naturel abondants et à bon marché l'ont détrôné. Le développement de la fluidisation a été ensuite important de 1940 à 1942 dans le domaine des unités de raffinage de produits pétroliers en lit fluide. Les compagnies pétrolières ou les ingénieries

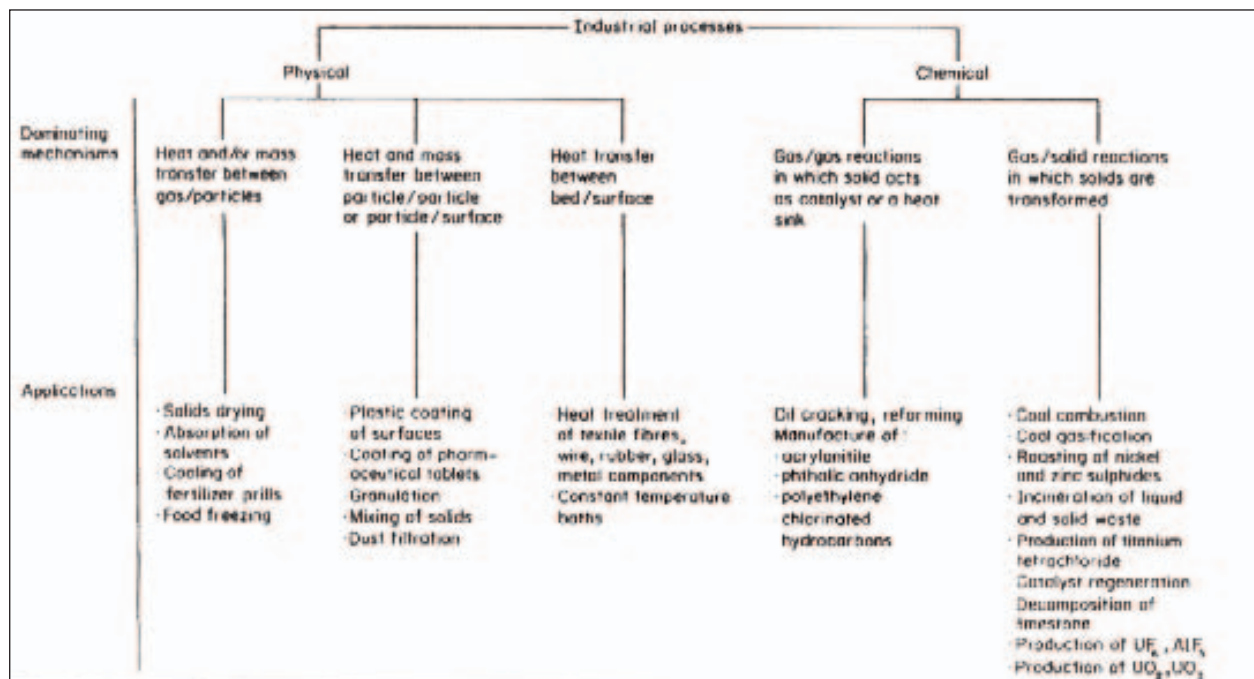


Figure 1 : applications physiques et chimiques de la fluidisation (d'après Geldart, 1986). On reconnaît notamment le séchage dans la catégorie des transformations physiques utilisant le bon transfert de chaleur, le raffinage et la synthèse dans la catégorie des réactions chimiques catalytiques et la combustion du charbon dans les réactions chimiques de transformation des solides.

spécialisées dans le développement de ces unités développèrent ensuite des procédés de traitement en lit fluidisé des résidus ou fractions lourds. L'utilisation des lits fluidisés s'est ensuite disséminée dans un grand nombre de directions et de transformations physiques et chimiques. Les principales applications industrielles de la fluidisation sont présentées à la figure 1 [Geldart, 1986]. Parmi ces applications, celles ayant connu un succès commercial certain, sont notamment :

- le raffinage de produits pétroliers ;
- le séchage (probablement l'application la plus développée) ;
- la production d'acrylonitrile ;
- le procédé Unipol de synthèse du polyéthylène ;
- la combustion de charbon ou de déchets.

Crainces et attraits pour la fluidisation

Des succès comme celui du procédé de synthèse du polyéthylène Unipol de Union Carbide, qui a supplanté rapidement tous ses concurrents, ou comme celui du procédé de raffinage PCLa, ont contribué efficacement à un certain attrait pour les lits fluidisés. Au contraire, d'autres tentatives d'adopter la fluidisation se sont parfois soldées par des échecs et constituent autant de repoussoirs pour cette mise en contact d'un fluide avec un solide. Ainsi l'épopée du procédé Hydrocol (réaction de Fischer-Tropsch) développé par Hydrocarbon Corporation dans les années 40, dont la première unité n'avait toujours pas atteint les performances escomptées, en 1957, avant d'être fermée pour cause de conjoncture économique défavorable.

C'est pourquoi, même si les avantages d'une application en lit fluidisé apparaissent clairement, notamment en démontrant un rendement ou une qualité de production améliorés, il y a toujours quelques réticences à abandonner un procédé maîtrisé pour l'inconnu. Il arrive, notamment, que les décisions cruciales de changement significatif et innovant de filière échoient à des personnes ayant acquis dans leur passé professionnel un savoir-faire technique important sur le procédé à remplacer. Elles sont donc, parfois, peu enclines à basculer vers un autre procédé qu'elles ne connaissent pas ou ne comprennent pas. Mais les exemples heureux de passage à la fluidisation, ou tout simplement le souhait de rester dans la course sans passer à côté d'une rupture technologique importante, conduisent ces mêmes décideurs à déve-

lopper des programmes de recherche et développement dont les objectifs sont généralement de démontrer – ou d'infirmer – la faisabilité de la fluidisation pour une production donnée.

Pour ceux qui, au contraire, auront fait le saut et capitalisent une première à l'échelle industrielle jugée satisfaisante, l'une des difficultés majeures qui se présentent à eux est l'extrapolation du procédé à un autre cas ou à une autre taille. En effet, les règles de l'art de l'extrapolation en fluidisation restent hautement empiriques (pour se contenter d'un euphémisme...). Ces heureux pionniers décident alors de comprendre de façon détaillée ce qui a permis le premier succès, et par conséquent conçoivent des programmes de recherche et développement ad hoc. D'autres se contentent de dupliquer l'existant à moindre risque et de juxtaposer des installations pour atteindre la production demandée.

LES SOLIDES DIVISÉS : UN ÉTAT DE LA MATIÈRE À PART, À PLUS D'UN TITRE

Les solides divisés constituent un état de la matière à part, à deux titres. Le premier est lié à la position parfois mal définie de la technologie des poudres par rapport aux branches des sciences et techniques. Le second est dû à l'état physique particulier que constitue un solide granulaire. L'une et l'autre de ces deux raisons entraînent que les connaissances et leur structuration soient encore médiocres ou, au mieux, récentes. Elles contribuent donc à la difficulté de mettre en œuvre la fluidisation en remplacement de procédés à lit fixe, et expliquent en partie pourquoi les applications de la fluidisation ont pu comporter à la fois de grandes réussites et d'autres, moins grandes.

Les solides divisés :

une place à part dans le Génie des Procédés

Au début du XX^e siècle, les connaissances de la technologie des poudres se trouvaient dispersées dans une multitude de savoir-faire industriels, allant de l'industrie minière jusqu'à l'agro-alimentaire. Le premier signe fort d'évolution de la discipline réside dans la publication de « *Micromeritics : the technology of fine particles* », en 1943, publication dans laquelle, pour la première fois, étaient rassemblées des connaissances dispersées jusqu'alors chez les mécaniciens du sol, les

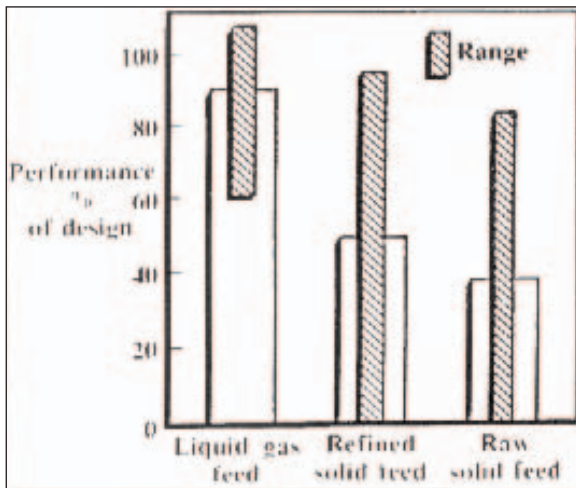


Figure 2 : performances obtenues par rapport à celles prévues d'installations industrielles en fonction de la nature de leur alimentation fluide, solides divisés raffinés ou solides divisés bruts (d'après Merrow, 1985).

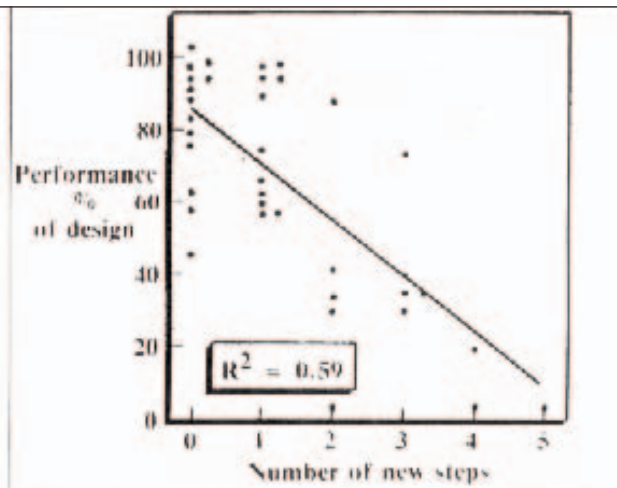


Figure 3 : performances obtenues par rapport à celles prévues d'installations industrielles en fonction d'étapes nouvelles introduites dans le procédé (d'après Merrow, 1985).

chimistes, les géologues ou les mineurs [J.-M. Dallavalle, 1943].

Les solides divisés ont, en effet, souvent souffert de la difficulté d'insérer la branche qui les étudie dans les schémas classiques des sciences et des techniques sauf, peut-être, en Allemagne où la technologie des particules est bien implantée dans le *Verfahrenstechnik*, issu de la mécanique des solides et de celle des fluides. R. Clift cite aussi les approches du génie civil et celle du génie chimique : grossièrement, explique-t-il, l'ingénieur en génie civil attend des particules qu'elles ne bougent ou ne changent pas, tandis que l'ingénieur des procédés souhaite qu'elles s'écoulent ou qu'elles modifient leurs propriétés physiques ou chimiques [Clift, 1996].

Le génie des procédés incorpore, plus ou moins difficilement et lentement selon les pays, la technologie des poudres. En France, la communauté du génie des procédés est relativement marquée par le génie chimique et a plutôt négligé cette discipline [Steinmetz, 1996]. Le premier congrès français, *Science et Technologie des Poudres*, s'est tenu en 1994 : seize communications sur quatre-vingt quatorze relevaient de laboratoires identifiés génie des procédés, la majeure partie provenant de la chimie du solide. Aux États-Unis, certains ont parlé de l'héritage de la négligence pour évoquer les faiblesses du domaine de la *particle technology* [Ennis *et al.*, 1994]. Steinmetz, citant Bridgewater, attribue ce retard au fait que, dans le développement des connaissances sur les interactions entre le produit et le procédé, le génie des procédés a été jusqu'alors obsédé par ce dernier [Steinmetz, 1996].

L'absence ou l'immaturation d'une approche structurée de la technologie des solides divisés au sein du génie des procédés est généralement reconnue, alors que les solides divisés constituent un état des matières premières ou des produits très répandu dans l'industrie. Ainsi, Ennis estime que la production de l'industrie chimique est, à 60 %, sous la forme de solides divisés (poudres, cristaux, granules, flocons, dispersions, boues et pâtes) et qu'elle utilise encore 20 % de matière sous cette forme comme additifs [Ennis, 1997]. Le manque de structuration de la technologie des poudres est d'autant plus flagrant que la production de solides à propriétés contrôlées apparaît de plus en plus comme un enjeu considérable pour nombre d'industries, à court et moyen termes. Produire directement les matériaux divisés ayant les propriétés adéquates et permettant un emploi immédiat sans prétraitement, semble, en effet, une voie prometteuse, que ce soit dans le domaine de la cristallisation [Laguérie *et al.*, 1994], dans celui du broyage ou de l'encapsulation [Clift, 1996].

Les solides divisés : un état de la matière à part

Les solides divisés sont aussi un état de la matière à part. Un milieu de solides particulaires diffère d'un solide massif car s'exercent en son sein des interactions de type interparticulaire mais aussi des interactions avec le fluide interstitiel. Il possède des comportements identiques à un liquide, notamment quand il est fluidisé, et il peut être, dans une certaine mesure, comprimé comme peut l'être un gaz. On a pu parler,

à son propos, de quatrième état de la matière. Les solides particuliers sont également relativement différents d'autres milieux dispersés, comme les systèmes gaz-liquide ou liquide-liquide, par leurs échelles de longueur et de temps. En effet, alors que des molécules ont des échelles de longueur et de temps qui sont souvent petites comparées à celles d'un élément d'un processus, ces mêmes échelles peuvent devenir grandes dans le cas du solide particulier et l'écoulement lui-même possède des échelles propres : par exemple, les bulles, dans le cas des lits fluidisés dits captifs et les essaims de particules, dans le cas des lits entraînés de la fluidisation rapide. C'est notamment pour cette raison que l'extrapolation des systèmes fluidisés reste mal résolue à l'heure actuelle. Alors que l'approche continue peut convenir à un milieu granulaire statique soumis à des contraintes, l'écoulement ne s'en satisfait plus. Les modèles donnent généralement des résultats prometteurs lorsqu'ils réussissent à décrire les interfaces. Cela se complique néanmoins un peu plus s'il existe un phénomène, à l'échelle de la particule, comme l'abrasion ou l'agglomération. Il y a alors trois niveaux d'échelles de longueur et de temps : celui du procédé, celui de la particule et celui correspondant à l'érosion ou l'adhésion des particules. La lenteur de la structuration de la technologie des poudres et son retard à être intégré au sein du génie des procédés évoqué précédemment sont d'ailleurs parfois attribués à la complexité de la physique évoquée [Steinmetz, 1996].

La matière divisée et l'innovation dans son domaine

Cette complexité et l'absence de réponses techniquement suffisantes à nombre de problèmes apparaissent d'ailleurs dans les performances comparées aux objectifs des installations traitant des solides divisés. Une enquête menée au début des années 80 auprès d'industriels nord-américains le montre : elle portait sur trente-cinq installations, construites entre 1963 et 1983, mettant en jeu une réaction de nature à transformer ou à créer une phase solide. Cette enquête conclut que les résultats d'une installation sont loin de ceux prévus, dès lors qu'elle traite des matières premières à l'état de solides divisés plutôt que de liquides ou de gaz (figure 2) [Morrow, 1985]. L'écart est d'ailleurs encore plus flagrant dans le cas de solides bruts. Ces unités n'ont, dans leur première année d'existence, pu fonctionner qu'à 67 % de leur capacité

nominale, alors que, pour l'ensemble de l'industrie chimique, on atteint environ 95 % dès la première année. Par ailleurs, l'innovation pour ce type d'unités est plutôt mal récompensée comme cette même enquête l'a montré. Une telle installation n'atteint que très peu les performances prévues dès lors que le nombre d'étapes nouvelles, c'est-à-dire d'étapes n'ayant pas de passé d'utilisation commerciale, est important (figure 3) [Morrow, 1985]. De plus, son temps de mise en régime d'exploitation sera d'autant plus important qu'elle comporte des étapes innovantes ou qu'elle traite de la matière divisée. Ainsi, une installation du procédé Fior de pré-réduction du minerai de fer en lit fluidisé aurait demandé douze ans avant d'atteindre son allure nominale [Delebarre, 1997].

INNOVATIONS – ABOUTIES ET INABOUTIES – EN LIT FLUIDISÉ

Dans ce paragraphe, quelques innovations caractéristiques fondées sur la fluidisation sont évoquées pour différents domaines d'application : raffinage de produits pétroliers, synthèse de produits chimiques, fabrication d'électricité et filières sidérurgiques alternatives. Ce paragraphe retrace les parcours de ces innovations en illustrant la diversité des pratiques d'innovation qui les sous-tendent.

Le craquage catalytique en lit fluidisé

L'une des premières applications importantes des lits fluidisés a été le raffinage par craquage catalytique du pétrole. Depuis 1937, le procédé Houdry, du nom de son inventeur, permettait de réaliser le craquage du pétrole par voie catalytique au lieu de la voie thermique, la plus utilisée mais de rendement décevant. Ce nouveau procédé comprenait, néanmoins, des manipulations lourdes, lors de la régénération du catalyseur, et présentait des difficultés de contrôle de la température du lit fixe de catalyseur.

E. Houdry incarne parfaitement l'entrepreneur du modèle schumpétérien. Il avait inventé la catalyse du craquage par de l'argile poreux à pression atmosphérique, procédé qui fournissait des produits avec de meilleurs indices d'octane. Il avait ensuite vendu l'idée à plusieurs compagnies pétrolières qui, en 1941, totalisaient quatorze installations à l'échelle industrielle fondées sur ce procédé. E. Houdry avait

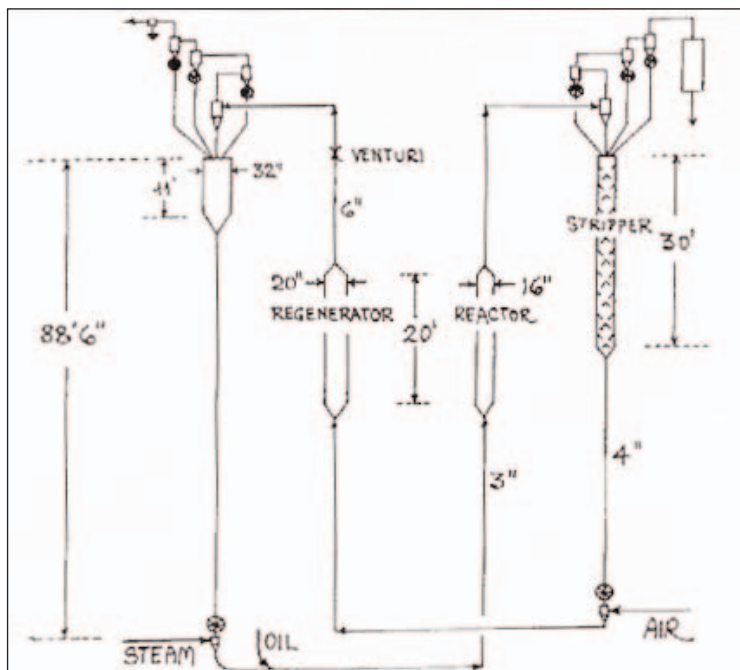


Figure 4 : le SOD Model I de craquage catalytique de 1940 d'après Squires, 1986) : le prototype qui a permis le lancement du procédé où l'on reconnaît le réacteur où a lieu le craquage, le réacteur de régénération du catalyseur et les échanges de catalyseur actif et passif entre ces réacteurs réalisés à l'aide de jambes verticales et horizontales.

su « amener une intuition, une découverte, un projet au stade commercial, pour surprendre ses concurrents et dégager des profits que viendront bien vite rogner les imitateurs en tous genres » [Akrich et al., 1988].

Effectivement, les compagnies pétrolières concurrentes de celles qui avaient adopté ce procédé ne tardent pas à se dire – et à vérifier – que la voie catalytique est supérieure à la voie thermique, en termes de qualité des fractions produites comme de rendement de l'opération. Elles entament alors des pourparlers avec E. Houdry, qui leur avait d'ailleurs proposé de participer au développement, propositions qu'elles avaient déclinées en leur temps. Ces compagnies pétrolières renoncent à un accord avec E. Houdry, considérant que le prix qu'il demandait pour son innovation était trop élevé. Elles décident alors de mettre au point un procédé, également catalytique, où le catalyseur serait régénéré en continu et au sein duquel les transferts thermiques seraient suffisamment efficaces pour assurer une température homogène du milieu réactionnel. Il fallait aussi que le nouveau procédé catalytique se démarque sensiblement de celui de Houdry et de ses revendications protégées par des brevets. Huit compagnies forment alors un consortium et décident, après plusieurs tentatives infructueuses sur la base d'un réacteur non fluidisé et de transferts du catalyseur par organes mécaniques, de développer un circuit de craquage-régénération

complètement pneumatique constitué de lits fluidisés et de lignes de transport, à partir d'expérimentations proposées et effectuées par le Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.).

Pressées d'arriver rapidement à une échelle commerciale convenable, afin de pouvoir transformer les produits pétroliers en carburant nécessaire pour l'aviation de guerre, elles fondent le « *Catalytic Research Associates* » (CRA) et débloquent de gros moyens : quatre cents personnes en propre au CRA sur le projet et six cents autres dans les compagnies associées. Cette puissance de moyens est associée à un management hautement réactif. Ainsi, il réoriente le procédé en très peu de temps et en plein montage du pilote pour passer de la conception initialement envisagée d'un « *snake reactor* » avec transferts mécanisés du catalyseur à celle du riser de fluidisation suggéré par les consultants du M.I.T. Le

consortium démarre l'installation-pilote en 1940 (figure 4), rapidement suivie par la première commerciale, en 1942. Des répliques furent ensuite construites, puis vinrent d'autres générations avec des améliorations substantielles. Le succès du raffinage catalytique en lit fluide demeure considérable puisqu'on dénombre actuellement trois cent cinquante unités de craquage en lit fluidisé [Reichle, 1992]. On voit, dans l'historique des retournements de situations de ce procédé et des interactions entre associés, que « *l'innovation est de plus en plus le fruit d'une activité collective et non plus seulement le monopole d'un homme inspiré et obstiné. Le court-circuit qu'il était seul à réaliser se transforme en une longue chaîne interactive qui va du laboratoire universitaire jusqu'aux services commerciaux des entreprises* » [Akrich et al., 1988].

La bataille pour la compétitivité de la production de fractions légères de produits pétroliers a donc généré une innovation qui a supplanté l'invention de E. Houdry, qui elle-même l'avait emporté sur la filière thermique en place jusqu'alors. Dans le cas du craquage du pétrole en lit fluidisé, l'innovation technologique a obéi à une nécessité dictée par des gains de compétitivité pour devancer la concurrence et gagner en rentabilité. L'innovation a été décidée et réalisée par l'entreprise et pour les intérêts de l'entreprise elle-même. Squires, qui raconte l'histoire de cette invention par le menu, indique combien l'état américain

s'est gardé d'intervenir dans ce projet (on était pourtant en temps de guerre et le carburant pour l'aviation représentait un enjeu stratégique) : « *distant bureaucrats were few and exercised a light hand* » [Squires, 1986].

La synthèse en lit fluidisé

Le succès des lits fluidisés dans le domaine du raffinage a bien vite conduit nombre d'autres branches de l'industrie à se convertir à cette forme de mise en contact des solides avec un fluide. Les deux raisons essentielles à cela étaient, d'une part, qu'il existait maintenant un savoir-faire en ingénierie de la fluidisation qui avait fait ses preuves dans l'industrie pétrolière et, d'autre part, que les qualités des lits fluidisés convenaient particulièrement bien aux types de réaction de l'industrie chimique de synthèse. Parmi les qualités des lits fluidisés mentionnées précédemment, celle qui a fortement contribué à leur développement et à leur succès a été, dans de nombreux cas, l'uniformité de la température du lit et, qui plus est, une température aisément contrôlable à un niveau choisi. Ce contrôle de la température du milieu réactionnel permet de s'accommoder de réactions explosives si elles sortent d'une gamme étroite de températures, d'optimiser le rendement de l'opération quand il est très sensible à la température, ou encore d'éviter les points chauds qui peuvent détériorer un catalyseur et conduire à sa désactivation. C'est pourquoi de nombreuses industries de synthèse ont cherché à valoriser ces propriétés thermiques qui conviennent particulièrement bien à leurs réactions souvent catalysées et fortement exothermiques ou nécessitant une plage de températures réduite.

La mise au point du craquage catalytique des produits pétroliers a donc été suivie par le développement de nombreux procédés de synthèse de produits chimiques, qui s'est étalé de l'immédiat après-guerre à aujourd'hui : le procédé Shewin-Williams-Badger pour l'anhydride phtalique; le Nihon Gosei pour l'acétate de vinyle. Le procédé Sohio, de fabrication de l'acrylonitrile en lit fluidisé à partir du propylène et de l'ammoniac, a été développé au début des années 1960. Il a obtenu un immense succès et l'on estime qu'actuellement 90 % sont produits par ce moyen. À la fin des années 1970, le procédé Unipol (figure 5) de synthèse du polyéthylène, développé par Exxon et Union Carbide, a rapidement remplacé tous

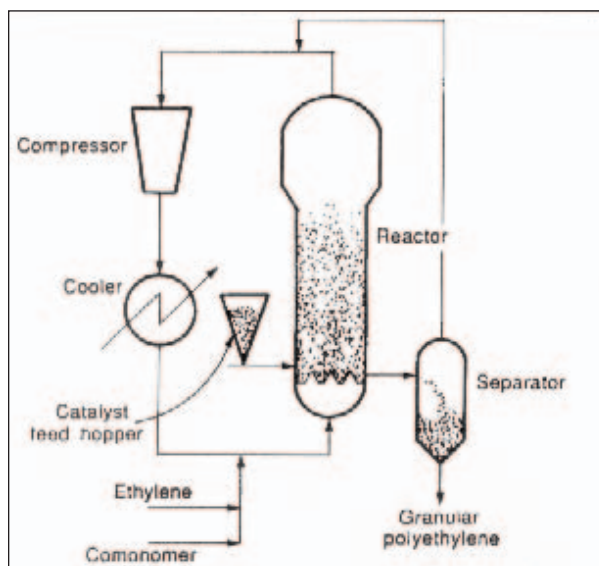


Figure 5 : le procédé Unipol de synthèse du polyéthylène à partir d'une croissance de la polymérisation d'éthylène et de butène sur un germe « catalyseur » (d'après Kunii et Levenspiel, 1991).

les procédés conventionnels. Dans tous ces cas, la prégnance des qualités de la fluidisation a suscité et motivé le remplacement de procédés antérieurs par des procédés à lit fluidisé.

La production d'énergie en lit fluidisé

La contrainte environnementale et les tensions sur l'approvisionnement en combustible sont à l'origine du développement de foyers et chaudières à lit fluidisé. En effet, le lit fluidisé offre, entre autres avantages, de pouvoir réaliser la combustion dans des conditions qui diminuent la production de polluants dans les fumées et, aussi, de pouvoir être alimenté par des combustibles, voire des déchets, qui ne sont pas valorisables dans des technologies plus anciennes. Aujourd'hui de nombreuses centrales thermiques de production d'électricité utilisent des foyers à lit fluidisé. Il est souvent admis que l'innovation est le fruit d'un transfert de résultats scientifiques dits académiques vers l'industrie, c'est-à-dire – en d'autres termes – de la valorisation par l'industriel d'une recherche dite fondamentale parfois financée sur deniers publics. Le cas du craquage en lit fluidisé évoqué plus haut est, pour une part, issu d'un transfert de résultats de recherches du M.I.T., ces recherches ayant été payées par les compagnies pétrolières privées associées dans le projet. La figure 6 illustre le résultat d'une enquête menée par le ministère français de l'Industrie, publiée en 1996. Cette enquête a consisté à évaluer, pour des



Figure 6 : forces des technologies sur les plans scientifique (barres de gauche) et industriel (barres de droite) pour neuf domaines de développement technologique (d'après Morice, 1997).

technologies jugées essentielles de neuf secteurs d'activité, les niveaux scientifique et industriel [Morice, 1997]. Cette figure montre que, hormis le secteur de l'énergie, c'est une habileté plus grande dans la recherche que dans le développement qui expliquerait le retard français en matière d'innovation.

Le fonctionnement de l'innovation dans le domaine de la combustion en lit fluidisé à des fins de production d'énergie ne semble pourtant pas avoir été aussi simple. La figure 7 représente le nombre de références présentes dans la base d'ouvrages scientifiques Chemical Abstracts et possédant à la fois les deux mots clés (et leurs dérivés) « fluidisation » et « combustion ». Ce nombre croît, à partir de 1975, avec une accélération à partir de 1980 jusqu'en 1985, et il oscille depuis autour de cinq cents travaux référencés par an. Ce même nombre de citations associant « fluidisation » et « combustion » rapporté au nombre de citations du mot « fluidisation », dénote aussi un accroissement à partir de 1975 : il passe alors de 15 % à 40 %, en 1985. Il a depuis une légère tendance à baisser. En plaçant également quelques-uns des événements majeurs du développement des lits fluidisés de production d'énergie, ce graphique montre, qu'en fait, les travaux dits fondamentaux ou scientifiques repris dans les publications ont plutôt suivi l'apparition des lits fluidisés à l'échelle commerciale qu'ils ne l'ont précédée. Ainsi, les lits fluidisés denses étaient déjà relativement développés en Chine [deux mille deux cents en 1985, Delebarre, 1985] et quelques exemplaires fonctionnaient déjà au Royaume-Uni tandis que les premières conférences sur le sujet n'avaient pas encore eu lieu. Un décalage identique

existe pour les lits fluidisés circulants. De plus, le transfert de résultats de laboratoires qui comprendraient ou expliqueraient des phénomènes, vers l'industrie qui les appliquerait, n'est pas nécessaire. Les mécanismes essentiels de transfert de chaleur ne sont actuellement pas encore connus et les modèles de simulation de l'hydrodynamique de ces réacteurs sont encore très loin d'une adéquation avec les mesures [Berruti, 1995], alors que l'installation la plus puissante du monde totalise tout de même 250 MW électrique et, qu'en 1997, Lee dénombrait deux cent trente-deux unités de lits fluidisés circulants de production de vapeur ou d'électricité [Grace, 1997]. Les bonnes performances des installations industrielles en lit fluidisé sont encore, pour partie, inexplicables. La construction des lits fluidisés a pris de vitesse les programmes de recherche et développement et a permis de proposer des solutions, sans que la compréhension des mécanismes existe, ou soit même jugée nécessaire. Le décalage entre le développement industriel et la recherche en lits fluidisés s'explique aussi par le fonctionnement même des mesures incitatives qui ont été prises dans l'optique d'un transfert du fondamental vers l'application. À la suite des chocs pétroliers, la consigne était de tirer parti de combustibles jusque-là délaissés et que les lits fluidisés se prêtent particulièrement bien aux combustibles réputés difficiles. Des instances, guidées par des experts, tentaient alors d'orienter l'allocation de moyens financiers à des domaines et des objectifs de recherche. Les experts susceptibles d'orienter les développements connaissent les travaux sur la fluidisation des Britanniques et des Chinois, qui avaient débuté dès les années

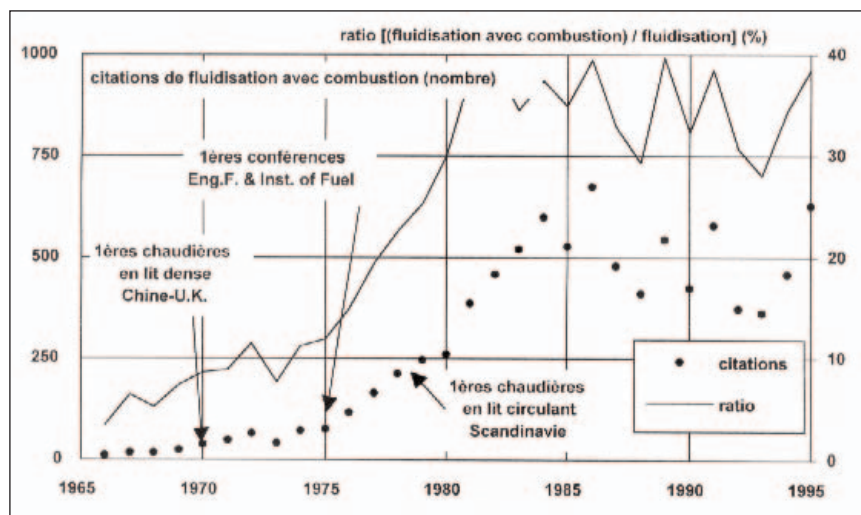


Figure 7 : citations au cours du temps du terme fluidisation associé à combustion dans la base «Chemabs» : nombre de citations par an (axe de gauche) et ratio de ce nombre au nombre de citations de fluidisation seul (axe de droite). Quelques événements marquants du développement de la production d'énergie en lit fluidisé sont également mentionnés (d'après Delebarre, 1997).

1960, pour trouver des débouchés à certains de leurs combustibles impropres aux technologies usuelles à l'époque. Dès lors, les experts susceptibles d'orienter les programmes de recherche ne faisaient que suggérer de développer cette technologie déjà existante. L'engouement des industriels et des laboratoires pour la combustion en lit fluidisé fut ensuite autant motivé par l'attrait commercial d'un marché potentiel que par celui des subventions des programmes régionaux, nationaux, ou supranationaux qui furent créés par les administrations conseillées par les experts. En clair, les aides n'ont fait qu'inciter à valoriser une technologie existante plus qu'à l'inventer et en conséquence ces aides ont aussi généré des vocations et activités de circonstances.

Le procédé CALIFE® de combustion en lit fluidisé

Un cas intéressant de développement du lit fluidisé est celui du procédé CALIFE® développé par le Cerchar (filiale de Charbonnages de France) pour la combustion de déchets et de charbons. Contrairement au cas des procédés de synthèse évoqués précédemment, où les qualités intrinsèques de la fluidisation et les faiblesses des procédés jusqu'alors utilisés emportaient la décision, il s'agit plutôt ici d'un effort tenace visant à trouver une application viable à une innovation technologique. En effet, l'intérêt d'une combinaison neuve n'est pas toujours évident et, bien souvent, la prégnance de l'objet prédomine toute méthode heuristique. Comme l'écrit

R. Thom [1990] : « *Il peut arriver que la combinaison soit exactement ce qu'on cherche a priori et qu'ainsi la tâche qu'on s'était proposée puisse, grâce à elle, être accomplie. En ce cas, l'intérêt est évident. Mais assez fréquemment, la nouvelle combinaison semble intéressante en vertu de sa forme propre – sans qu'on puisse en déduire immédiatement des propriétés agréables ou utiles. [...] Un nouveau monde s'offre à l'exploration – qui est quelquefois tout différent des motifs initiaux de la recherche* ».

La innovation apportée par le procédé CALIFE® de combustion

de déchets ou combustibles pauvres en lit fluidisé réside dans le rôle primordial détenu de la grille de fluidisation. La grille de fluidisation, appelée aussi distributeur, est le dispositif qui permet de répartir le fluide vers les solides divisés. La grille surmonte la boîte à vent qui est le caisson où arrive le fluide poussé par des ventilateurs ou des pompes. La qualité première d'une grille est d'assurer une arrivée uniforme du fluide au sein de la couche de solides afin que toutes les fractions du lit de solides croisent du fluide et qu'aucune ne reste immobile en cours de réactions. Le procédé CALIFE® est né de l'invention d'une conception originale de la grille de fluidisation constituée de pyramides inversées, alimentées en air de fluidisation par le bas (figure 8, page 28). Cette grille a été découverte par hasard, vers 1955, au cours d'essais de semi-carbonisation en lit fluidisé.

La boîte-à-vent du pilote qui était un simple cône inversé était recouverte d'une plaque perforée qui faisait office de grille de fluidisation. Des collages fréquents de charbon obstruaient les perforations de cette grille et obligeaient au démontage de cette plaque, si bien qu'un jour eut lieu un essai de fluidisation sans que la grille ait été remontée au-dessus du cône de la boîte-à-vent. L'essai se déroula de façon satisfaisante. Le procédé de fluidisation par grille à jet vertical était né (brevet déposé le 7/9/57) [Foch, 1958]. Le cône fut ensuite transformé en pyramide à base carrée pour faciliter la construction et, pour augmenter la surface de grille, plusieurs pyramides furent juxtaposées au lieu d'en agrandir une seule. Cette grille multijet a la particularité de ne pas avoir de

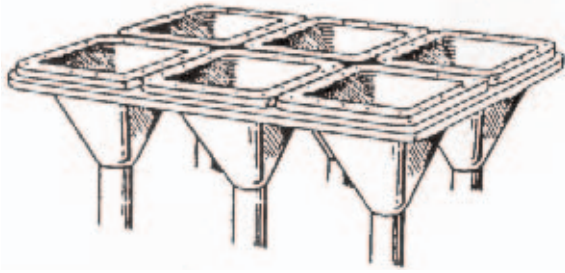


Figure 8 : la grille CERCHAR du procédé CALIFE® : des pyramides à base carrée et le sommet tourné vers le bas alimentées par celui-ci en air de fluidisation (d'après Delebarre, 1997).

zones mortes où les solides peuvent se déposer : elle évite donc une préparation de la granulométrie des produits et s'accommode de solides très dispersés. La grille à pyramides constitue une illustration modèle de la serendipité.

Cette grille de fluidisation a constitué pendant longtemps la signature de procédés proposés par Charbonnages de France (CdF) : semi-carbonisation, calcination de boues, combustion de schistes de terrils, combustion de charbon cendreux. Les propriétés de cette grille étaient certes indéniables mais elle a nécessité une quantité assez importante de recherche et de développement tant pour démontrer ses qualités que pour trouver les adaptations technologiques les plus appropriées à chaque application. Que ce soit pour l'alimenter en gaz fluidiseur, y ajouter un combustible ou un fluide refroidisseur complémentaires, ou encore pour dessiner les siphons de cette grille qui devaient empêcher les retombées de solides vers le ventilateur. Le second choc pétrolier, puis la promotion (éphémère) du charbon français, en 1981, redoubla l'acharnement des concepteurs et promoteurs de cette grille à lui trouver des applications dans ce domaine, tant ses qualités ou plus simplement son existence dans le patrimoine de l'entreprise semblaient rendre son usage incontournable. Un programme lourd d'étude de la combustion de charbons en lit fluidisé à des fins de production de vapeur ou d'électricité s'étendit de 1980 à 1990 environ. Une fois encore, les procédés imaginés par le Cerchar pour atteindre ces objectifs furent bâtis autour de cette grille et conduisirent à l'élaboration d'un design de chaudière équipée de cette grille : le procédé CALIFE®. Cependant, le développement des lits fluidisés de combustion pour la production de chaleur ou d'électricité se déroula principalement avec d'autres procédés, notamment le lit fluidisé circulant Lurgi, développé par Stein Industries, en France, et dont les centrales électriques de Carling (57) et Gardanne (13) constituent des premières, par le genre ou le

niveau d'extrapolation. On peut trouver le choix du procédé Lurgi étonnant, sachant que les unités de Carling et Gardanne impliquent fortement CdF dans leur montage juridique et financier. En exagérant à peine le trait, CdF a préféré choisir, pour ses propres besoins, un procédé différent du procédé qu'elle avait pourtant fait étudier et développer pendant de nombreuses années. Après ces arbitrages entre procédés, les chercheurs ayant travaillé sur le procédé CALIFE® se consolaient en apprenant qu'ils avaient œuvré pour l'introduction de la fluidisation dans le domaine de la production de l'électricité thermique. La grille Cerchar à pyramides multijets a, quant à elle, trouvé un débouché plus modeste dans le procédé L4F de combustion de déchets, dont quelques unités fonctionnent actuellement, alors que CdF a abandonné quelques-uns de ses brevets.

La sidérurgie en lit fluidisé

La production d'acier utilise généralement soit la filière du haut fourneau, soit celle du four électrique. Dans le premier cas, on utilise du minerai de fer et du coke comme matières premières; dans le second, on recycle des ferrailles. Dès le début des années soixante, des sidérurgistes ont considéré que le lit fluidisé était un réacteur susceptible de réaliser la transformation du minerai de fer en remplacement des filières classiques. C'est ce qu'on appelle la pré-réduction du minerai de fer ou sa réduction directe par du charbon. Ces voies visent à se passer de l'étape de fabrication du coke et de celle de l'aggloméré de fer, c'est-à-dire à supprimer deux ateliers de préparation des matières premières et également à éviter la pollution que ces ateliers induisent. Régulièrement, des programmes de recherche et développement prennent ou reprennent ces idées et les explorent par l'expérimentation ou le calcul. Ainsi, la fin des années quatre-vingts a vu de nombreuses décisions d'engagement de programmes un peu partout dans le monde que ce soit chez des sidérurgistes, des centres de recherches ou des ingénieries. Les procédés Dios, Hismelt, Circofer [Grace, 1997] illustrent cette activité qui est allée jusqu'à une installation pilote, de taille respectable, pour les deux premiers.

La décision de débiter une recherche ou de passer à une étape de pilote n'est pas toujours exempte d'idées reçues ou d'arguments irrationnels qui peuvent primer sur un simple examen technique. Ainsi, Squires

se lamente que le développement de nouveaux procédés soit devenu la « *danseuse d'un manager distant* » (« *pet idea of a distant manager* ») [Squires, 1986], tandis que Dry et Beeby écrivent, dans une récente monographie sur les lits fluidisés circulants, que l'avantage procuré par l'utilisation d'un lit fluidisé pour la calcination de l'alumine ou pour la pré-réduction du minerai de fer semble accessoire et fortuit (« *incidental* »), par comparaison avec d'autres filières n'utilisant pas la fluidisation [Grace, 1997]. Les décisions, parfois peu argumentées, doivent cependant être tempérées par les importantes lacunes de connaissances de la communauté scientifique à propos des lits fluidisés. Ainsi, certains programmes récents des sidérurgistes dans l'exploration de nouvelles voies relèvent à bien des égards de ce type de paternité et possèdent un déroulement à l'avenant. C'est aussi pourquoi beaucoup de ces tentatives se sont rapidement essouffées, la séduction ou l'effet de mode s'estompant ou les chercheurs capitulant devant les difficultés et le désintérêt du manager promoteur de l'idée. Il ne demeure aujourd'hui que quelques expérimentations sporadiques de pré-réduction en lit fluidisé, comme celle du procédé Circored de Lurgi.

L'insuccès de la fluidisation dans le domaine de la sidérurgie tient également à un point managérial particulier. Les décideurs, dans ce type d'entreprises, sont bien souvent issus du terrain technique. Ils y ont acquis dans leur passé professionnel un savoir-faire technique important sur le procédé qui serait destitué soit, dans la plupart des cas, le haut-fourneau. Le haut-fourneau est un procédé complexe qui suscite chaque jour de son fonctionnement une réunion d'échanges techniques, à laquelle participe un encadrement nombreux, jusqu'à un niveau hiérarchique élevé. Dans une salle constellée de diagrammes et d'enregistrements, on ausculte la marche de la machine. Ces cadres acquièrent alors une compréhension de ce procédé et lui restent attachés. De plus, il existe une telle identification entre la sidérurgie et le haut-fourneau que son remplacement

Gardanne : la plus grande centrale du monde (250 mW) à lit fluidisé circulant.

paraît impensable au sein d'une entreprise sidérurgique. Lorsque les cadres occupent ensuite des fonctions ouvrant sur des décisions engageant une rupture technologique, ils ont une propension à rejeter a priori le nouveau procédé. Le comité de pilotage d'un projet de développement d'un procédé alternatif au haut-fourneau sera ainsi tenu par des anciens « hauts-fournistes » qui ne comprennent pas le procédé novateur, à plus forte raison s'il s'agit de fluidisation dont le principe est fort différent de celui du haut-fourneau. C'est pourquoi nombre de sidérurgistes continuent d'investir de l'argent en recherche et développement pour des procédés dont ils ne veulent pas et qu'ils rejettent régulièrement après quelques années de dépenses. Ne pas innover, en matière de procédés, est aussi une attitude managériale.

Decon/REA

RENONCER À L'INNOVATION ?

L'apparition et le développement des lits fluidisés ont suivi des cheminements parfois fort différents selon les applications, cheminements qui obéissent à autant de processus d'innovation. Quelques exemples, relevés dans l'histoire du développement des procédés à lit fluidisé, montrent qu'à côté du développement organisé d'une innovation à des fins compétitives, l'imitation d'un procédé considéré comme une réussite ou l'acharnement à valoriser un objet ou un concept restent des moteurs forts d'innovations, plus ou moins heureuses. Ainsi, quelques unes des applications ou tentatives d'applications des lits fluidisés doivent leur existence à la séduction exercée par cet état de la matière un peu particulier, qui se répand parmi les décideurs et responsables de programmes de recherche et de développement. Le rapport de l'entreprise – et en particulier de son management – à l'innovation a ainsi une grande influence sur les succès et échecs des lits fluidisés au sein de l'industrie.

Le cas du développement de la production d'énergie en lit fluidisé montre comment une innovation peut se développer sans que les concepteurs n'éprouvent le

besoin de posséder les résultats fondamentaux et plus généralement sans qu'ils ne jugent nécessaire de comprendre. Ce n'est en effet pas nécessaire puisqu'ils savent calculer une installation et prédire son fonctionnement et ses rendements. Pour plagier R. Thom, « *prédire n'est pas comprendre* » [Thom, 1993], et c'est pourquoi la recherche fondamentale réalisée parallèlement aux développements de ces installations ne leur est pas absolument nécessaire. En revanche les incidents qu'essuient parfois ces installations industrielles avant, pendant et après leur réception, montrent que cette attitude peut conduire à des situations délicates sans pour autant qu'il soit prouvé que la recherche fondamentale soit utile pour leur résolution. Alors que les contraintes environnementales et le marché des matières premières ont été les moteurs de la mutation de la production d'électricité thermique, les mêmes facteurs n'ont pas eu raison jusqu'à présent de la filière sidérurgique classique.

Ainsi, dans les applications sidérurgiques de la fluidisation, les remises en cause sont telles qu'elles découragent souvent les tentatives alternatives et conduisent à bouder l'innovation. Cette non-innovation peut d'ailleurs constituer une source de bon fonctionnement social de l'entreprise, en évitant que les changements ou les innovations ne heurtent les individus [De Conninck, 1994]. La protection de l'environnement joue un rôle de plus en plus marqué, mais aussi de plus en plus contradictoire, en matière d'innovation : parfois moteur, comme pour la production d'électricité, parfois résistant, lorsque le principe de précaution est invoqué. Ainsi R. Thom conseille de décourager l'innovation qui corrompt durablement et encourage l'innovation artistique [Thom, 1990] tandis que H. Curien pense que le principe de précaution et la transparence qu'il impose, pourraient mettre les innovateurs du génie des procédés en position d'assiégés permanents [Curien, 1999]. ■

BIBLIOGRAPHIE

- AKRICH M., CALLON M. et LATOUR B., « A quoi tient le succès des innovations », *Annales des Mines, série Gérer & Comprendre*, juin 1988, 4-17.
- BERRUTI F., CHAOUKI J., GODFROY L., PUGSLEY T. et PATIENCE G., « Hydrodynamics of Circulating Fluidized Bed Risers : a Review », *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 73 (1995), 579-602.
- CLIFT R., « Powder technology and particle science », *Powder Technology*, 88 (1996), 335-339.
- CURIEN H., « Les nouvelles tendances du génie des procédés », *Les Echos*, 16 février 1999.
- DALAVALLE J.M., *Micromeritics: the technology of fine particles*, Pitman Publishing, New York, 1943.
- DE CONNINCK F., « Le temps raccourci : quand les changements prennent de vitesse le temps d'une vie », *Problèmes économiques* n°2.391, septembre 1994, 22-27.
- DELEBARRE A. et PUFF R., « Compte Rendu de Mission en République Populaire de Chine », *document interne Cerchar*, octobre 1985.
- DELEBARRE A., « Acquis et lacunes d'une innovation : le cas des lits fluidisés », *Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches*, Institut National Polytechnique de Lorraine, septembre 1997.
- ENNIS B. J., GREEN J. et DAVIES R., « The legacy of neglect in the U.S. », *Chemical Engineering Progress*, avril 1994, 32-43.
- ENNIS B. J., « Unto dust shalt thou return », *Powders and Grains* 97, Behringer & Jenkins (Eds), Blakema, Rooterdam, 1997.
- FOCH P. et GEOFFROY J., « Développement de la carbonisation par fluidisation à la Station Expérimentale de Marienau », *31^e Congrès International de Chimie Industrielle* (1958), Liège, Belgique.
- GELDART D., *Gas Fluidization Technology*, Geldart Ed., Wiley & Sons, 1986.
- GRACE J.R., AVIDAN A.A. et KNOWLTON T.M. (Eds), *Circulating Fluidized Beds*, Blackie Academic and Professional, Chapman & Hall, London (1997).
- KUNII D. et LEVENSPIEL O., *Fluidization Engineering*, Butterworth-Heinemann Eds, Boston, 1991.
- LAGUÉRIE C., BISCANS B. et GABAS N., « Elaboration de produits à propriétés d'usage : le rôle déterminant des processus d'initiation », *3^{ème} Congrès de Génie des Procédés*, Compiègne, septembre 1991.
- MERROW E.W., *Linking R&D to Problems Experienced in Solids Processing*, *Chem. Eng. Prog.*, (1985), 14-22.
- MORICE G., « La France mise enfin sur l'innovation », *Science & Vie*, n°952, janvier 1997.
- REICHLÉ A.D., « Fluid Catalytic Cracking Hits 50 Year Mark on the Run », *Oil Gas Journal*, 90 (20) (1992), 41-48.
- SQUIRES A.M., « The story of fluid catalytic cracking: the first circulating fluid bed », *Circulating Fluidized Bed Technology*, P. Basu (Ed), Pergamon, New York, (1986) 1-19.
- STEINMETZ, « Diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches », Institut Polytechnique de Toulouse, septembre 1996.
- THOM R., « Sur le problème de l'innovation », *Encyclopaedia Universalis*, Symposium, *Les Enjeux* (1990), 353-355.
- THOM R., *Prédire n'est pas expliquer*, Flammarion, Paris (1993).