Quelles recherches fondamentales en génie chimique ?

Par J. Villermaux * et P. Le Goff **
*(*Directeur du Laboratoire des sciences du génie chimique, CNRS-ENSIC, 1 rue Grandville, 54042 Nancy Cedex ; ** Professeur au L.S.G.C., Directeur du C.P.I.C.).*

J. Villermaux

P. Le Goff

Il est coutumier d'entendre présenter le génie chimique comme l'ensemble des *techniques d'application* des résultats obtenus dans les recherches fondamentales de chimie et biochimie. Nous serions en quelque sorte les «plombiers des chimistes» !

Ceci sous-entendrait qu'il n'existe pas de recherche fondamentale en génie chimique.

A la vérité, les *sciences pour l'ingénieur*, ou *sciences des systèmes industriels* (dont le génie chimique fait partie) se placent en *parallèle* avec, et non pas après, les sciences de la matière (physique, chimie, biologie...) comme l'illustre l'organigramme ci-après.

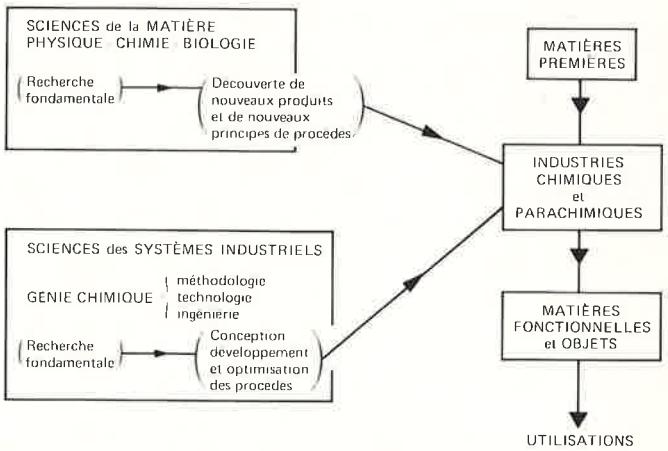


Figure 1. Organigramme des liaisons entre recherches fondamentales et industries chimiques.

Rappelons que, dans les «sciences de la matière» on distingue les sciences de compréhension (acquisition de connaissances nouvelles sur la structure et la dynamique des édifices moléculaires) et les sciences d'action (découverte de nouveaux produits, de nouvelles réactions de synthèse, de nouvelles méthodes de fractionnement, etc.).

Dans les systèmes industriels, où il n'est pas toujours nécessaire de comprendre pour savoir faire (heureusement d'ailleurs, car bien des procédés actuels n'existeraient pas !), le technicien a souvent pré-

cédé l'ingénieur, qui lui-même a précédé le chercheur. Celui-ci se trouve donc confronté à un ensemble d'objets créés par l'homme pour son industrie, objets dont il s'agit de comprendre le fonctionnement pour les rationaliser et en imaginer de meilleurs. L'attitude scientifique de base est la même que dans les sciences de la matière, mais elle s'exerce ici sur des objets artificiels.

On distingue ainsi, dans les «Sciences des systèmes industriels» :

● Les sciences de compréhension (recherche fondamentale) : acquisition de connaissances nouvelles sur les systèmes industriels :
– analyse systémique de leur structure,
– recherche des lois d'interaction entre les éléments qui les composent,
– modélisation en tant que recherche de représentations cohérentes et intelligibles :
Ces démarches s'exercent à trois niveaux : processus élémentaires, «unités d'opération» ayant pour fonction de réaliser une opération particulière (broyeur, échangeur, réacteur...) et grands ensembles associant plusieurs unités d'opération, (atelier de fabrication, usine, centrale, réseau interconnecté...).

● Les sciences d'action : conception, réalisation et optimisation des procédés de transformation des matières premières en matériaux et objets, destinés à satisfaire les besoins humains, tenant compte de tous les facteurs scientifiques, techniques, économiques, sociaux, etc... On retrouve ici la modélisation en tant qu'instrument de prévision, d'extrapolation et de commande des systèmes.

Depuis un siècle, et dans le monde entier, des efforts considérables ont été faits en recherche fondamentale sur les sciences de la matière, en en particulier sur la compréhension des mécanismes d'interaction entre atomes et/ou molécules.

Par contre, les recherches fondamentales sur les sciences des systèmes industriels n'ont guère démarré que depuis une quinzaine d'années aux États-Unis et sont encore presque inexistantes en France.

Et pourtant, à notre avis, c'est en grande partie, grâce à cette «Science générale des systèmes» que l'on parviendra à résoudre les grands problèmes de notre civilisation :
– limitation des ressources naturelles,
– crise de l'énergie - crise de l'alimentation,
– protection de l'environnement,
– transferts de technologie au tiers-monde...

Mais les connaissances actuelles de technologie et d'ingénierie ne suffiront pas. Il faut dès maintenant rechercher des concepts nouveaux, des méthodes originales, qui conduiront au développement de procédés industriels entièrement nouveaux dans deux ou trois décennies.

Nous pensons donc qu'un axe prioritaire doit être la *recherche fondamentale sur les méthodes* du génie chimique. Nous parlerons de **méthodologie** du génie chimique, par opposition aux deux autres facettes : ingénierie et technologie.

Un deuxième axe prioritaire doit être la *collaboration* entre sciences des systèmes et sciences de la matière. Par exemple, entre la découverte d'un nouveau procédé (de synthèse, d'isomérisation, de polymérisation) faite dans un laboratoire de chimie organique appliquée et le développement puis l'optimisation de ce procédé, faits par application des méthodes du génie chimique, il y a nécessairement continuité de pensée et d'action.

Nous ne parlerons ici que du premier axe de recherche fondamentale.

I. La méthodologie du génie chimique (recherches fondamentales sur les méthodes)

Il est évidemment impossible de dresser l'inventaire des recherches à entreprendre et d'établir un programme de travail détaillé... sinon ce ne serait plus de la recherche fondamentale ! Tout au moins peut-on citer les grands axes qui ont le plus de chance de conduire à des percées scientifiques ou techniques, un jour ou l'autre.

En voici quelques exemples :

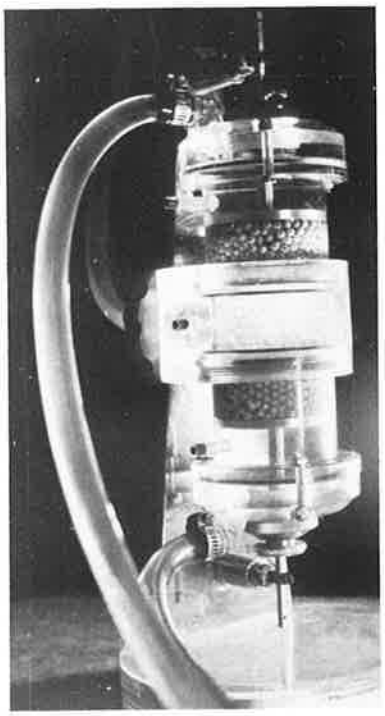
I.1. La réduction des «frottements généralisés»

● On sait que toute transformation d'énergie thermique en énergie mécanique est théoriquement limitée par le rendement de Carnot et que le rendement réel des machines thermiques se situe généralement aux environs des deux-tiers du rendement de Carnot, soit entre 10 % et 40 %.
● Dans un récent article intitulé «Les rendements d'utilisation de l'énergie, par et pour les êtres humains» (1) l'un de nous a montré que l'énergie mécanique ainsi produite, est ultérieurement *extrêmement mal utilisée* par l'homme :

Les rendements de presque toutes les opérations mécaniques sont inférieures à 1 %, et souvent de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-8}. Et ceci se vérifie autant pour les opérations de *transport* d'objets ou de fluides, que pour les *transferts* de matière entre phases, le *mélangeage* et la séparation des mélanges, le *broyage* de solides, et la *dispersion* de fluides en gouttes ou en bulles, etc...

Autrement dit, la presque totalité de l'énergie noble fournie à l'opération est dégradée en chaleur et n'est pas réellement utilisée pour atteindre l'objectif désiré par l'homme.

Les conclusions qui s'en déduisent sont :
● Le rendement des machines thermiques doit être considéré comme satisfaisant : il n'est pas prioritaire d'entreprendre des recherches fondamentales dans ce domaine. On ne pourrait espérer que gratter encore quelques points de rendement par rapport au rendement-limite de Carnot.
● Par contre, on doit considérer comme prioritaires, toutes recherches consistant à *réduire les frottements*, en donnant à ce terme le sens généralisé de la thermodynamique, c'est-à-dire la *diminution de la vitesse de création d'entropie* dans toutes les opérations qui consomment de l'énergie noble (mécanique, électrique, chimique, etc...).



Cellule électrochimique de concentration en continu de solutions diluées, pour la récupération des métaux lourds.

I.2. La science des séparations et des réactions

Presque tous les procédés de transformation permettant d'obtenir des matières fonctionnelles à partir des ressources naturelles font

appel à un enchaînement plus ou moins complexe d'opérations de fractionnement et de réactions chimiques (cf. figure 2). Les techniques actuelles reposent sur un certain nombre d'opérations unitaires maintenant bien comprises, pour l'essentiel : distillation, extraction liquide-liquide, filtration, réaction catalytique en lit fixe, absorption et réaction gaz-liquide, etc... Toutefois, la nécessité d'une mise en œuvre plus rationnelle et plus fine des matières premières laisse prévoir le développement de méthodes de séparation et de réaction sélectives, spécifiques et bien intégrées du point de vue énergétique : il est clair qu'un réacteur plus sélectif rend inutile un fractionnement poussé en aval. Inversement, l'existence d'une technique de séparation souple et efficace permet de s'affranchir de conditions réactionnelles trop sévères. Ce problème doit donc être vu dans son ensemble.

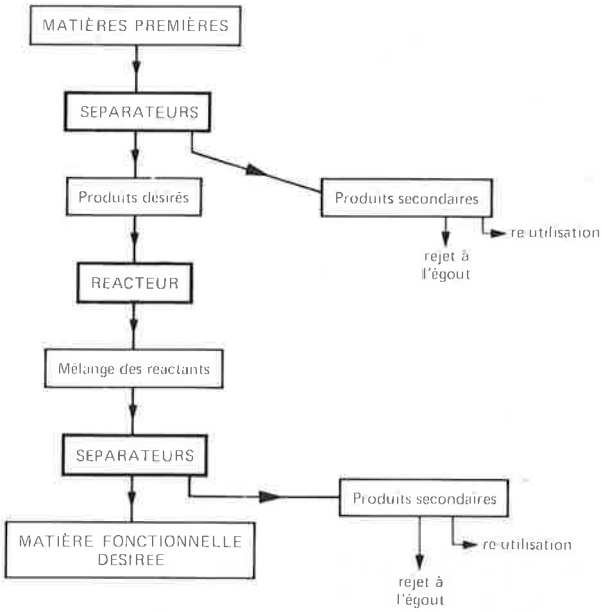


Figure 2. L'enchaînement classique : séparation → réaction → séparation.

● Un gain en *sélectivité* entraîne une économie sur les séparations effectuées *en aval* du réacteur.

● Un gain en *spécificité* et en *résistance à l'empoisonnement* du catalyseur entraîne une économie sur les séparations effectuées *en amont* du réacteur.

L'inventaire de tous les phénomènes physicochimiques et/ou biologiques pouvant donner lieu à de nouvelles méthodes de séparation ou de réaction est loin d'être terminé.

● La mise en œuvre des nouveaux agents chimiques imaginés par les physicochimistes (catalyseurs supportés, enzymes, membranes, adsorbants sélectifs).

● L'utilisation de conditions extrêmes (plasmas, réacteur solaire, réacteurs nucléaires...) ou inversement de conditions biomimétiques (voir le paragraphe I.4. ci-dessous).

● La manipulation de milieux exotiques (liquides fortement non-newtoniens, superacides ou superbases, sels fondus, milieux polyphasés, colloïdaux...), ...tous ces facteurs appellent le développement de nouveaux types de contacteurs, réacteurs et séparateurs où la mise au contact des phases, les temps de séjour, les conditions physiques, la texture du milieu seront soigneusement contrôlés et extrapolables. Un effort de recherche fondamentale en génie des séparations et en génie de la réaction chimique doit donc être entrepris dans ces domaines.

I.3. La science de la modélisation et l'approche systémique

Parmi les sciences pour l'ingénieur, le génie chimique a été l'un des premiers à connaître sa «révolution systémique», qui consiste à abandonner l'approche analytique trop détaillée des phénomènes au profit d'une vision plus globale s'intéressant aux comportements et s'appuyant sur des analogies et des relations phénoménologiques. Tout l'y préparait : l'usage de corrélations entre groupements adimensionnels, mettant en évidence l'homologie fondamentale entre phénomènes d'apparence dissemblables (transferts de matière, de quantité de mouvement et d'énergie par exemple), le caractère multidisciplinaire des problèmes relevant du génie chimique, mais aussi la nécessité de quantifier des systèmes flous dont le comportement n'est déterministe qu'en première approximation et dont la complexité intrinsèque défie l'analyse fine (dispersion dans les écoulements ruisselants par exemple). A cet égard, la contribution des sciences du génie chimique au développement des techniques de modélisation est certainement déterminante à tous les niveaux, depuis les processus élémentaires (réseaux de réactions chimiques) jusqu'aux grands systèmes (raffinerie de pétrole).

Un 1er exemple : la distribution des temps de séjour

Un magnifique exemple d'approche systémique a été donné par Danckwerts dans les années 1950, introduisant le concept de «distribution de temps de séjour» (DTS). Lorsqu'un fluide s'écoule dans un appareil de forme très compliquée, il est vain de vouloir décrire l'écoulement en intégrant les équations de la mécanique des fluides. Cette tâche inextricable fournirait d'ailleurs, avec le champ de vitesse en tout point, une information surabondante dont l'ingénieur ne saurait que faire. Danckwerts a montré qu'on pouvait rassembler l'essentiel de l'information sur l'écoulement, dans une courbe de distribution, facilement mesurable avec un traceur, qui indique la fraction du débit de fluide, ayant séjourné pendant un temps donné à l'intérieur de l'appareil. La DTS suffit pour de nombreux calculs pratiques, c'est aussi un excellent accès au modèle mathématique de l'écoulement dans l'appareil.

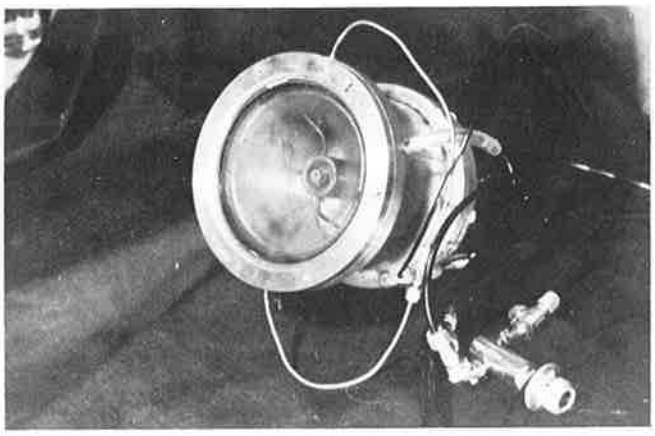
Nous avons cité cet exemple car nous pensons que la démarche de Danckwerts peut et doit être répétée dans de nombreux autres domaines du génie chimique. Là où l'on ne voit actuellement qu'une association très complexe de phénomènes élémentaires nécessitant des systèmes d'équations gigantesques, il existe certainement un concept nouveau du type DTS qui condenserait l'information utile à l'ingénieur. Une telle recherche de simplification est certes difficile (pourquoi faire simple quand on peut faire compliqué ?), mais constitue, à notre sens, un axe *prioritaire*.

Un 2e exemple :

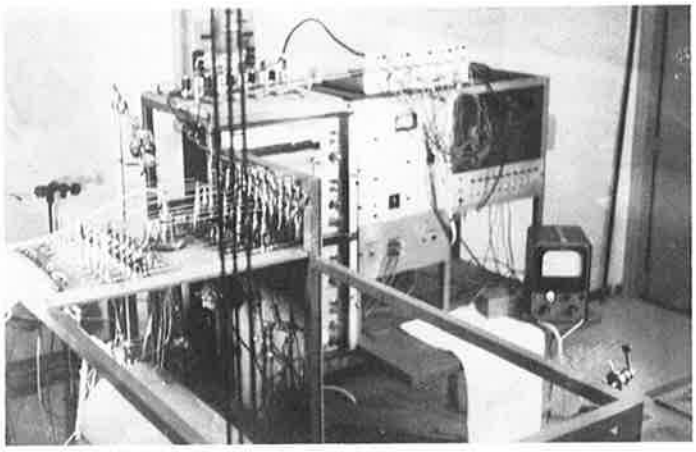
Un autre exemple fera mieux comprendre cette nécessité : si l'on demande actuellement à un ingénieur de génie chimique de prévoir le flux de transfert de chaleur entre un objet placé dans un écoulement et le fluide environnant, il demandera d'abord quelles sont la densité ρ, la chaleur spécifique C_p, la conductibilité thermique λ et la viscosité μ du fluide, puis il se renseignera sur une dimension caractéristique d de l'objet et sur la vitesse moyenne u du fluide. A partir de ces grandeurs, il calculera un critère de Prandtl $Pr \equiv \mu C_p/\lambda$ puis un critère de Reynolds $Re \equiv \rho\, ud/\mu$. Notre ingénieur sait que le coefficient de transfert de chaleur global h, entre l'objet et le fluide est calculable à partir d'un critère de Nusselt $Nu \equiv hd/\lambda$ et qu'il existe *nécessairement* une relation du type $Nu = f(Re, Pr)$. S'il ne la connaît pas, ou qu'il ne la trouve pas dans les livres parce que l'objet a une forme inhabituelle, il saura exactement quelles expériences faire sur une petite maquette de laboratoire pour établir, au moyen de quelques points et avec un fluide usuel la forme mathématique de la relation cherchée.

Supposons maintenant que nous demandions au même ingénieur de prévoir a priori les transferts de matière entre phases dans un réacteur à trois phases gaz-liquide-solide destiné à traiter industriellement un fort débit de liquide organique par un gaz sous pression en présence d'un catalyseur. Il risque d'être beaucoup plus embarrassé et de ne pas savoir quelles sont les questions pertinentes à poser au sujet du système et quelles sortes d'expériences doivent être faites pour fournir la réponse.

Là encore, comme dans bien d'autres domaines actuellement voués à l'empirisme éclairé, d'importants efforts de modélisation sont nécessaires pour dégager les groupements de paramètres significatifs (généralement 2 ou 3), pour établir une hiérarchie entre les modèles, étudier leur sensibilité aux paramètres, donner des règles permettant d'aborder l'étude rationnelle des systèmes complexes, bref pour que la modélisation, clé de toutes les opérations de représentation, de changement d'échelle, d'optimisation et de commande, cesse d'être un art pour devenir une science. Nous reviendrons ci-dessous sur certains de ces points à propos des recherches en ingénierie.



Maquette d'un réacteur chimique à énergie solaire concentrée : Réalisation d'un choc thermique sur un mélange gazeux en écoulement rapide.



Maquette d'un réacteur tubulaire à "commande répartie". En vue de maximiser le rendement et/ou la sélectivité du réacteur, on optimise la répartition des points d'introduction des réactants, le long du tube.

Réduction des frottements généralisés, progrès dans le génie des séparations et des réactions, développement de l'approche systémique et de la modélisation, quels objectifs ces recherches de base peuvent-elles se fixer ?
Nous en proposons ci-dessous trois, qui nous semblent particulièrement importants.

I.4. La science des procédés doux et propres

Comme on l'a rappelé au paragraphe I.1., toute centrale énergétique qui produit 1 kWh d'énergie noble (par ex. : électrique) produit aussi fatalement 2 kWh d'énergie thermique de bas niveau, rejetée dans la mer, dans l'atmosphère et donc finalement dans l'espace. Et ceci sera toujours vrai, même pour les futures centrales solaires.

L'un de nos objectifs à long terme est donc de repenser fondamentalement tous les procédés de fabrications chimiques, pour les adapter à cette situation. Il faudra découvrir de nouveaux procédés qui ne nécessiteront que 30 % au plus de l'énergie sous forme noble (mécanique ou électrique) et donc 70 % au moins sous forme thermique à bas niveau, ou mieux encore sous forme photochimique solaire directe.

Par exemple, la fabrication industrielle des engrais par fixation de l'azote atmosphérique devra ressembler à la chaîne «douce» végétaux → fumier, plutôt qu'aux procédés «durs» actuels.

Plus généralement, il s'agira de développer des procédés «doux et propres», qui opéreront à pression et température aussi proches que possible de l'ambiante, afin d'utiliser les rejets thermiques ainsi que les effluents et déchets des procédés voisins.

Bien entendu, la découverte des principes de ces nouveaux procédés sera essentiellement le fait des chercheurs fondamentalistes en chimie, en biochimie, en biophysique, etc. Mais la mise en œuvre de ces procédés fera sans doute appel à de nouvelles techniques, et à des appareils complètement différents de ceux existant actuellement.

A titre d'exemple, on sait dès maintenant produire en laboratoire de l'hydrogène par photo-dissociation de l'eau par irradiation solaire... mais on n'a pas la moindre idée de ce que pourra être un jour un réacteur industriel, *économiquement rentable,* basé sur ce principe.

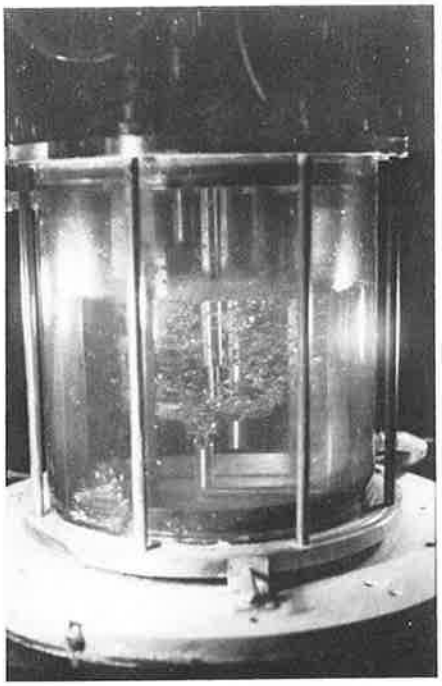
En résumé, dans ces programmes à long terme, les recherches fondamentales en génie chimique doivent être menées en même temps que les recherches fondamentales en chimie et en association avec elles : elles sont au moins aussi importantes...

I.5. La science des grands systèmes quasi vivants

L'apparition de micro-ordinateurs à bon marché, va probablement entraîner un bouleversement de la conception des procédés industriels : chaque appareil, muni de son micro-ordinateur, deviendra un système *auto-adaptatif,* qui s'adaptera aux rythmes de fluctuations des ressources et des besoins, *exactement comme un système vivant.* L'optimisation se fera en temps réel, et pour chaque appareil élémentaire.

De plus, tous ces appareils élémentaires seront fortement interconnectés, par des circuits de matière, d'énergie et d'information. Déjà maintenant, une usine entière se comporte comme un macro-système vivant avec des centaines de grandeurs d'entrée et de grandeurs de sortie, le tout étant simulé sur ordinateur. Mais cette interconnexion maximale des opérations unitaires, ces multiples bouclages ont aussi de nombreux inconvénients (accumulation des impuretés, vieillissement accéléré, rigidité des structures, etc...) qui nécessiteront pour être éliminés de longues recherches de base.

Jusqu'à présent on considérait souvent, par simplification, que tout système ouvert fonctionnait en régime stationnaire (au moins en moyenne). La tendance actuelle est de considérer que tout procédé, toute activité urbano-industrielle est un système qui naît, qui vit et qui meurt. Un mot a même été créé pour cela; la **térotechnologie** est la science de l'optimisation dynamique des systèmes vieillissants : il faut tenir compte à la fois de l'usure mécanique et chimique des machines, des catalyseurs, des matériaux... etc... mais aussi de



Un réacteur gaz-liquide : Mesure de la puissance dépensée pour disperser le gaz en fines bulles.

l'augmentation des connaissances et du savoir-faire des ingénieurs et des techniciens responsables du procédé. L'une compense l'autre, mais en partie seulement et il faut rechercher la solution optimale globale, en tenant compte des opérateurs humains autant que des machines elles-mêmes.

Les mots clés sont donc :
- Capteurs d'informations physico-chimiques en ligne,
- Instrumentation,
- Interconnexion optimale,
- Traitement automatique de l'information,
- Modélisation des grands systèmes flous et aléatoires,
- Simulation et optimisation dynamiques.

I.6. La science des interactions homme-machine

Une opération industrielle quelconque ne doit plus seulement être considérée comme une opération technique de traitement de la matière et de l'énergie. C'est aussi une *opération humaine et sociale.*

La quantité de travail humain n'est plus la seule grandeur à prendre en compte, sa **qualité** compte aussi. L'opération «consomme» diverses richesses que l'on peut rassembler sous le vocable de *«bien-être matériel»* (sécurité, hygiène et pénibilité du travail, nuisances à l'environnement). Et simultanément, elle «produit» une certaine quantité de ce même bien-être (salaires, satisfaction du travail bien fait, implantation d'œuvres sociales...).

Dans la prochaine décennie, il faudra sans doute repenser tous les procédés industriels pour y supprimer le travail posté et revaloriser les diverses tâches.

De plus, l'implantation en zone urbanisée d'usines considérées, à tort ou à raison, comme dangereuses ou insalubres, pose des problèmes *psychologiques,* actuellement bien plus difficiles que les problèmes techniques.

Chaque décision technique que prend un ingénieur doit donc désormais tenir compte, non seulement des coûts actuels (et futurs) des matières premières, de l'énergie, de la main d'œuvre, des capitaux... mais aussi de nombreux autres facteurs humains et sociaux, que l'on ne sait presque pas encore quantifier.

La recherche dans ce domaine ne peut certainement résulter que d'une collaboration des spécialistes du génie chimique avec des psychologues, des sociologues et des ergonomistes, et d'une concertation avec les travailleurs eux-mêmes ayant pour objet d'apporter une réponse technique à leurs aspirations.

C'est une voie encore presque vierge à explorer.

II. Recherches en ingénierie et en technologie

Rappelons que, par définition, l'*ingénierie* chimique est cette fraction du génie chimique qui s'occupe de transposer les résultats de la recherche de laboratoire jusqu'à l'échelle industrielle.

Ainsi les «sociétés d'ingénierie» sont les entreprises qui calculent les dimensions des appareils, construisent les ateliers, les mettent en route, puis assurent leur fonctionnement optimal et leur automatisation.

La *technologie* chimique, quant à elle, s'occupe de la réalisation des appareils eux-mêmes, de leur structure mécanique, et de leurs matériaux de construction.

Les recherches en ingénierie et en technologie ne peuvent être qualifiées de «fondamentales» ; mais en quoi consistent-elles ?

II.1. L'ère des «petites maquettes froides» est révolue

Jusqu'aux environs de 1965-70, la majeure partie de la recherche universitaire en génie chimique a porté sur l'étude des opérations unitaires, et plus précisément sur le fonctionnement de *«petites maquettes froides»,* c'est-à-dire d'appareils destinés à *simuler* le fonctionnement des appareils industriels réels.

Ces maquettes étaient par exemple faites de cuves ayant une capacité de l'ordre de quelques litres à une centaine de litres, ou encore de colonnes ayant un diamètre de l'ordre de quelques centimètres jusqu'à deux ou trois décimètres.

Le qualificatif de «froides» signifie que l'on n'y effectuait généralement pas la réaction chimique réelle, ni même le processus de séparation réel, mais qu'on les remplaçaient par des processus physiques ou chimiques, plus simples, plus faciles à mesurer, opérant à température et pression ambiante... etc.

Ces nombreuses recherches, surtout effectuées dans le monde anglo-saxon ont conduit à des dizaines de milliers de publications, des milliers de thèses de doctorat, des centaines de livres de synthèse. Ils constituent un *corps de doctrine* relativement complet et cohérent, et à de nombreuses *corrélations empiriques,* très utiles pour les applications industrielles.

Certes, des recherches doivent encore être effectuées dans ce domaine, en particulier sur les systèmes polyphasés ou les milieux exotiques, comme nous l'avons signalé plus haut. Mais l'*avenir à long terme du génie chimique n'est pas là.*

Les recherches en ingénierie doivent désormais se situer, soit en amont, soit en aval, soit à plus grande échelle, soit par couplage avec un phénomène nouveau, soit «ailleurs» notamment en tenant compte de l'environnement humain et socio-économique, comme exposé ci-après.

Pour illustrer cette opinion par un exemple concret, considérons toutes les études faites en laboratoire universitaire sur les écoulements de fluides à travers des lits fixes ou fluidisés de particules et sur les mesures des coefficients de transfert de matière et de chaleur dans ces systèmes. On doit, à notre avis, considérer que ces coefficients sont désormais connus avec une précision suffisante, qu'il est inutile de poursuivre de telles recherches, pour gagner une décimale dans les valeurs des coefficients. Les recherches à effectuer doivent, maintenant se placer :

a. Pour une part *en amont* : comprendre le mécanisme de la turbulence et des instabilités intrinsèques aux fluides diphasés - analyse entropique du système comme exposé plus haut en (I.1.).

b. Pour une part *en aval* : étudier les nouvelles applications de la fluidisation, par exemple la combustion des déchets, le traitement des produits alimentaires.

c. Pour une part *à plus grande échelle,* c'est-à-dire sur des maquettes froides de dimensions industrielles (jusqu'à plusieurs mètres de diamètre (et donc dépassant les moyens habituels des laboratoires universitaires).

d. Pour une part *dans des couplages* avec des phénomènes nouveaux : par exemple utiliser un lit fluidisé comme électrode, ou comme récepteur de rayonnement intense (réacteur photochimique)... etc.

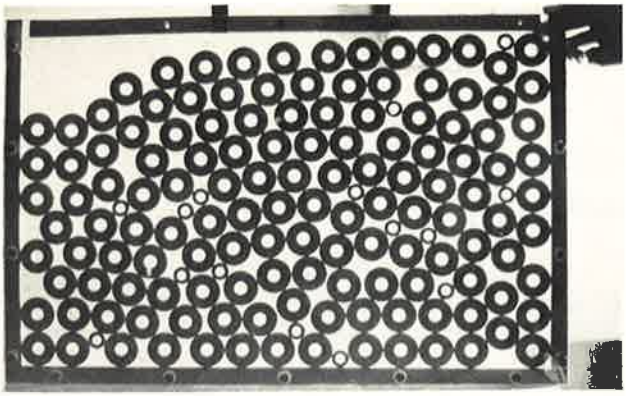
e. Pour une part *en dehors des intervalles de variation classiques des paramètres* du génie chimique industriel, par exemple pour des temps beaucoup plus courts ou plus longs, pour des particules beaucoup plus fines ou plus grossières, pour des énergies beaucoup plus élevées ou plus faibles, de manière à pouvoir étendre les résultats à d'autres phénomènes ou à d'autres disciplines, (voir réf. 2).

f. Pour une part enfin *ailleurs,* notamment en hydrogéologie et en exploitation des gisements pétroliers, où la maîtrise des écoulements de fluides polyphasés à travers des milieux poreux peut avantageusement tirer partie des connaissances acquises en génie chimique.

Nous développerons dans des publications ultérieures, plusieurs exemples de recherches de ce genre notamment dans le domaine des applications du génie chimique hors de son domaine classique.

II.2. Des modèles utiles à l'ingénieur

Au cours de ces deux dernières décennies, et grâce aux facilités du calcul électronique, un très grand nombre de systèmes physico-



Modèle géométrique d'un mélange binaire de sphères, destiné à établir de meilleurs modèles analytiques des milieux poreux utilisés en génie chimique.

chimiques et d'opérations du génie chimique ont été modélisés, à partir des bilans fondamentaux de matière, chaleur et quantité de mouvement, incluant les équations cinétiques, et les équations d'état. Toutes sortes de conditions géométriques, et de conditions initiales ont été envisagées. Il n'y a plus de limite dans la rigueur des résolutions, ni dans la précision des solutions obtenues. La seule limite est la puissance de l'ordinateur et le temps de calcul.

On obtient ainsi les *modèles de connaissance rigoureuse,* qui comblent d'aise les chercheurs fondamentalistes.

Mais pour beaucoup de praticiens et d'industriels, ces modèles sont trop sophistiqués et inutilement précis, étant donnée l'indétermination sur de nombreux coefficients et paramètres. Les ingénieurs se contenteraient volontiers de modèles plus grossiers, mais plus faciles à utiliser, adaptés en tout cas aux informations dont on dispose en amont, et à l'usage que l'on veut en faire en aval.

On peut désormais développer de tels modèles, que nous qualifions de *«simplissimes»*. En effet, du fait même que l'on connaît la solution rigoureuse de chaque problème, et cela grâce précisément aux ordinateurs, on doit maintenant rechercher le modèle le plus simple possible (c'est-à-dire le modèle caractérisé par le plus petit nombre de paramètres) qui permet d'obtenir pour le même problème une solution approchée, *avec une marge d'erreur connue et imposée à l'avance.* Nous pensons que la recherche des modèles simplissimes pour la plupart des problèmes industriels est un objectif important, pour la prochaine décennie.

II.3. Technologie mécanique pour l'industrie chimique

L'industrie chimique fait appel à des techniques mécaniques fonctionnant dans des conditions de plus en plus sévères : très hautes ou très basses pressions et températures, fluides corrosifs hyperacides ou hyperbasiques ou superoxydants, suspensions de particules corrodantes, etc. Pour construire et surtout maintenir en bon état des pompes, des échangeurs, des débitmètres, opérant dans de telles conditions, l'industrie chimique aurait besoin de spécialistes que, malheureusement aucun établissement français ne forme plus. Autrefois, les ingénieurs des Arts et Métiers constituaient le corps des ingénieurs d'entretien des usines chimiques, mais ils se sont en partie détournés de ces tâches. De plus, aucune école d'ingénieurs mécaniciens n'a développé d'important laboratoire de recherche dans ce domaine.

La puissance de l'industrie mécanique allemande et ses grands succès à l'exportation, tiennent sans doute, pour une grande part, à son important corps de «Verfahrens Ingenieur», que l'on peut traduire par «ingénieurs des procédés». Schématiquement, on peut dire que ce seraient des ingénieurs des Arts et Métiers, à l'ancienne mode, avec en plus, quelques connaissances de chimie des matériaux et de thermodynamique chimique.

Il conviendrait certainement d'encourager des recherches interdisciplinaires faisant collaborer des spécialistes de mécanique des fluides, de sciences des matériaux, et de génie chimique.

Conclusion générale et bibliographie

On peut définir le génie chimique comme :
«La Science de la mise en œuvre des procédés de transformation des matières premières en produits fonctionnels».

Or, face à l'épuisement et à l'enchérissement des ressources naturelles, et face à l'augmentation fatale des besoins à satisfaire, des tâches considérables, se posent aux ingénieurs et aux chercheurs qui sont en amont, pour augmenter le rendement global de ce grand «réacteur» que constitue l'ensemble des industries de transformation de la matière.

Sans doute certains décideurs politiques auraient-ils tendance à encourager les améliorations technologiques à court terme *aux dépens* de la recherche fondamentale à plus long terme. A la vérité, les deux sont évidemment indispensables et ceci est particulièrement vrai en génie chimique.

Encore faut-il ne pas confondre recherche fondamentale et recherche abstraite. La dernière décennie a vu fleurir un excès de «génie chimique sur ordinateur» et de publications académiques, simples exercices d'école sur des principes connus. Dans certains domaines, comme la commande automatique des processus, ou la dynamique des réacteurs catalytiques, l'écart est tel entre l'avance des théories abstraites et l'attente des praticiens que ceux-ci risquent de se détourner des scientifiques, coupés du réel et du possible. N'entend-on pas déjà quelques voix s'élever pour dire qu'il faut «arrêter la science abstraite» et appliquer concrètement les connaissances disponibles ? Erreur d'appréciation qui confond la recherche fondamentale et les jeux scolastiques sur ordinateur qui encombrent encore trop de publications. Loin de s'arrêter, la recherche de base en génie chimique va probablement connaître une évolution dialectique vers plus de sophistication et plus de simplification.

Sophistication à bon escient grâce à l'acquisition de données physicochimiques toujours plus nombreuses et à la puissance quasi illimitée des moyens de calcul, comme on peut le constater par exemple dans le raffinement actuel de certains modèles cinétiques de réseaux réactionnels.

Simplification simultanée des approches grâce à l'introduction des concepts unificateurs dont nous avons longuement parlé.

Il n'en reste pas moins que les solutions réellement neuves viendront d'un effort accru de recherche fondamentale. Pour illustrer ce fait en citant un dernier exemple, revenons au cas des broyeurs dont on sait que le rendement énergétique est de l'ordre de 1 %. Il faut certes faire tous efforts pour porter le rendement des broyeurs *actuels* à 2 % ou à 3 %... Mais pour obtenir 20 % ou 50 % de rendement il faudra sans doute faire appel à des broyeurs de principe complètement nouveau et non-imaginables aujourd'hui. Or, pour atteindre un jour cet objectif, il n'y a pas d'autre voie que de lancer dès maintenant un vaste programme de recherche fondamentale orientée, notamment vers les modèles théoriques de la rupture des solides, et vers de l'expérimentation sophistiquée (par exemple : cinématographie de la propagation des craquelures dans un monocristal transparent écrasé sous microscope !)... sans d'ailleurs que l'on ait jamais la garantie que cela conduise au fameux broyeur à haut rendement !...

On pourrait mettre en cause ici la recherche fondamentale, et l'accuser de n'avoir elle-même qu'un rendement inférieur à 1 %. Mais l'évolution naturelle ne procède pas autrement en essayant inlassablement des combinaisons d'où jaillissent, de temps à autre les mutations qui, passées au crible de la sélection naturelle, donnent naissance à des systèmes supérieurs, mieux armés et mieux adaptés.

(1) P. Le Goff, Les rendements d'utilisation de l'énergie par et pour les êtres humains, *Revue générale de Thermique*, janvier 1977.
(2) P. Le Goff, Investigation méthodique des voies de recherche en génie chimique, *Chimie et Industrie - Génie Chimique,* 1963, **90**, 6, p. 157-163.