

Vous avez dit : génie des procédés en 1998 ?

Jean-Claude Charpentier* directeur de l'École Supérieure de Chimie Physique Électronique de Lyon - CNRS, président du comité scientifique et technique de la Société Française de Génie des Procédés

Summary : *Process engineering in 1998 ?*

Being a key to survival in global markets including needs and challenges, chemical and process engineering will necessitate evolution in teaching and revolution in research. Indeed to control the quality and the cost of the products thanks to processes involving zero defect, zero pollution and zero accident, engineers and researchers in chemical engineering will have to develop concepts and methods necessitating an integrated systems approach for simultaneous and often coupled phenomena and processes, taking place with different scales of time (10^{-6} to 10^8 s) and length (10^{-8} to 10^5 m).

This will be obtained with the breakthroughs in molecular modelling, scientific instrumentation and powerful computational tools.

In collaboration with physicist, chemist and biologist pluridisciplinary theoretical developments must concern the product and formulation engineering and powder technology leading to a product with the desired property. Simultaneously methodologies should be orientated towards the acquisition of basic data and the conception of new integrated operation allowing for coupling or uncoupling elementary process (transfer - reaction - separation) or combining several functions into one unit opening the way to smaller and cheaper installations. Finally generic technologies for modelling, automatization and control of several processes should be adapted from other industries such as transport industries.

Mots clés : *Génie des procédés, génie de la formulation, propriété d'usage, matières molles, technologie des solides divisés, acquisition de données de base, nouveaux types de procédés.*

Key-words : *Chemical engineering, product engineering, end-use propertie, soft solids, powder technology, data bank acquisition, new types of process.*

Introduction

Face aux défis et menaces qu'affronte aujourd'hui l'industrie française et européenne en compétition avec les États-Unis et le Japon, notamment sur les secteurs où elle occupe encore la première place (chimie, mécanique et électricité), les entreprises sont amenées à améliorer leurs procédés pour maîtriser les coûts et la qualité des produits existants ou à concevoir de nouveaux procédés, plus compétitifs.

En effet, l'évolution de la demande du consommateur se concentre de plus en plus sur la valeur d'usage des produits, leur adaptation permanente à une demande, multiforme et changeante, ainsi que la fourniture de nouveaux services associés.

A cela, il faut ajouter une sensibilité accrue vis-à-vis de la protection de l'environnement et de la maîtrise des risques qui posent à l'industrie et à l'entreprise de nouveaux défis. Ainsi, la responsabilité éthique des entreprises, le jeu des réglementations, la conservation du renom de l'entreprise et son intégration dans les communautés avoisinantes influencent de plus en plus des décisions opérationnelles et en particulier celles qui concernent :

- le contrôle de la qualité de l'air, de l'eau et des sols environnants et le devenir des produits fabriqués dans le cadre de leur utilisation ultérieure,

- l'offre de possibilités de recyclage ou des traitements des résidus des produits après usage ainsi que de leurs emballages,

- l'arrêt du transport, voire du stockage et de l'utilisation de réactifs dangereux.

On peut comprendre que, dans ce contexte, il est impératif de remettre en

cause le vieux concept de sélection des procédés sur la base des seuls rendements et conditions économiques d'exploitation. A cela, il faut ajouter que le consommateur envisage difficilement de supporter les augmentations de coûts associés à cette nouvelle attitude, qui va conduire de plus en plus à rechercher des gains compensateurs au travers de sélectivités accrues ou de diverses économies liées au procédé.

Le génie des procédés, discipline-clé pour répondre à ces besoins et défis

Bon nombre des industries de transformation de la matière, notamment dans les industries chimiques et parachimiques (pétrole, pharmacie, agroalimentaire, textile, verre, sidérurgie, détergence, parfum, cosmétologie...) font appel au **génie des procédés**. Il concerne **l'ensemble des connais-**

* École Supérieure de Chimie Physique Électronique de Lyon, 43, bd du 11 Novembre 1918, BP 2077, 69616 Villeurbanne Cedex. Tél. : 04.72.43.17.02. Fax : 04.72.43.16.70. E-mail : jcc@cpe.fr

sances scientifiques et technologiques nécessaires aux transformations physico-chimiques et biologiques de la matière première en produits directement utilisables par le consommateur.

Cette discipline quantifie les relations complexes intimes entre les phénomènes de transport de matière, de chaleur et de quantité de mouvement et la cinétique chimique ou biochimique en relation avec les performances d'un réacteur fonctionnant dans des conditions que l'on voudrait optimales pour obtenir un produit finement ciblé. Possédant une méthodologie qui peut s'adapter ou appréhender tout système où l'ingénierie de réaction est nécessaire, le génie des procédés couvre ainsi des domaines faisant intervenir diverses technologies, rencontrées dans les industries pétrolières, de transports terrestres, métallurgiques, chimiques, pharmaceutiques, papetières et, bien sûr, dans les industries émergentes, biochimiques, agro-bio-alimentaires, électroniques et optoélectroniques, **toutes industries représentant des enjeux économiques considérables.**

Enseignement en génie des procédés : évolution ou bouleversement ?

L'enseignement du génie des procédés comporte des cours de thermodynamique, de physico-chimie, de catalyse, de phénomènes couplés de transport de matière, d'énergie et de quantité de mouvement, de cinétique chimique ou biologique, de génie de séparation, de génie de réacteur, d'automatique, de contrôle, de design et de technico-économie.

Mais devant les besoins et défis précités, comment va-t-il évoluer et quel type d'enseignement et de recherche va-t-il falloir prodiguer pour répondre au problème de société posé, à savoir fabriquer les produits existants et nouveaux avec des procédés zéro pollution, zéro défaut et zéro risque, et ce au plus vite et au meilleur coût ?

Comment va-t-il s'universaliser pour prendre en compte ou faire face à ce que l'on appelle aujourd'hui les hautes technologies ou les technologies émergentes (biotechnologies, micro-électro-

nique, micro-optoélectronique, nanotechnologies, matériaux avancés, polymères, composites, contrôle et sécurité de procédés...) tout en maintenant compétitives les technologies classiques pour les problèmes classiques et permanents (énergie renouvelables, fuels synthétiques, économies de matière premières) du **cycle infernal** - matières premières, énergies, procédés, déchets - avec les déchets constituant le matériau ou la matière première du cycle suivant ?

La réponse est que l'enseignement en génie des procédés subira **des évolutions et non pas de grands bouleversements** :

- **en thermodynamique chimique**, on se focalisera sur les solides et sur les propriétés physico-chimiques des grosses molécules et des macromolécules ;

- **en physico-chimie**, on s'orientera vers la science des interfaces et la nouvelle appréhension de la matière molle et des milieux complexes et on intégrera la physico-chimie dans toutes les opérations fluides-solides ;

- **en génie de la réaction chimique**, outre les réactions classiques de la chimie ou de la pétrochimie, on se focalisera sur la conception de réacteurs semi-continus, flexibles, appliqués à la fabrication de polymères spécifiques ou au dépôt de couches minces pour composants micro-électroniques ou micro-optoélectroniques ;

- **dans le design lui-même du couple produit-procédé**, on s'attachera plus à la notion de propriété d'usage, de qualité du produit (catalyseur, zéolite, polymères spécifiques, céramiques, pigments), au contrôle et à l'environnement du procédé qu'au produit ou au procédé lui-même. C'est ainsi que la notion même du vocable « génie des procédés » plutôt que « génie chimique » prendra sa pleine et entière acception.

La recherche en génie des procédés : évolution ou bouleversement ?

En amont de cet enseignement, les pistes conduisant à des recherches et développements technologiques prometteurs pour la recherche en génie des

procédés, consisteront à relever les défis industriels et économiques et à prendre en compte les contraintes imposées aux procédés par leur environnement naturel et social. Les ingénieurs seront de plus en plus confrontés avec de **nouvelles classes d'objets** et de **phénomènes pluridisciplinaires** qui demandent de nouvelles approches qui feront appel à la méthodologie, aux outils et aux techniques classiques davantage développées dans d'autres secteurs industriels (défense, automobile, aérospatial, médical).

Certes, le but des recherches de base en génie des procédés restera de développer des concepts, des méthodes et des techniques (procédés unitaires, transferts couplés, extrapolation à l'échelle industrielle), pour toujours mieux comprendre et pour concevoir et dessiner des procédés, par lesquels les matières premières et l'énergie sont changés en produits utiles et possédant la propriété désirée par le client.

Mais la complexité des phénomènes rencontrés dans les processus industriels va de plus en plus obliger l'ingénieur et le chercheur en génie des procédés à développer des concepts et des méthodes toujours nouveaux, nécessitant une **approche intégrée de phénomènes et de process simultanés et souvent couplés, intervenant à différentes échelles d'espace** (10^{-8} à 10^5 m) **et de temps** (10^{-6} à 10^8 sec) que l'on peut localiser sur la *figure 1* où se situent la majorité des phénomènes rencontrés dans les industries de procédés.

A titre d'exemple et plus spécifiquement, les *figures 2* et *3* décrivent les différentes échelles d'espace et les entités concernées et à prendre en compte lors des problèmes de recherche soulevés dans un cas particulier qu'est la polymérisation des oléfines (T. McKenna et R. Spitz, 1997).

Il en est de même pour les procédés d'élaboration et de traitement des matériaux métalliques (métaux, alliages, matériaux aux propriétés remarquables et à fonctions nouvelles comme les matériaux nanophasés ou les quasi-cristaux) pour lesquels les étapes de coulée et de solidification jouent un rôle important, notamment pour la qualité et donc pour la valeur d'usage de ces matériaux. Cela nécessite l'homogénéisation des matériaux à **différentes**

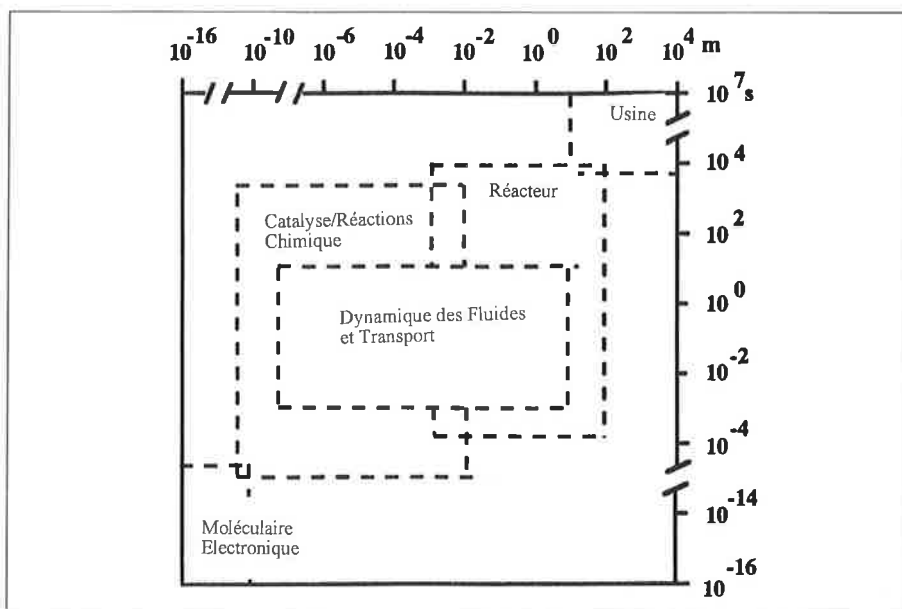


Figure 1 - Échelles d'espace et de temps dans les industries de procédés.

échelles, donc l'organisation des niveaux de complexité, depuis la micro-structure à l'échelle de la dendrite et du grain jusqu'à l'état de surface du produit brut de coulée, caractérisé par des macroségrégations et des mésoségrégations chimiques. La formation des ségrégations chimiques pendant la solidification nécessite une approche nouvelle, en termes de phénomènes de transport et de changement de phases couplés, et également en termes de couplage fort entre phénomènes se déroulant à des échelles très différentes, comme la mésoségrégation et la microségrégation.

Au départ, les notions ou **paradigmes de base du génie des procédés - procédés unitaires** (distillation, absorption, extraction, séchage, précipitation, granulation, pelliculage, fluidisation, transport pneumatique, filtration, cristallisation...), **transferts couplés de masse, de chaleur et de quantité de mouvement** - ont consisté, dans un premier temps, à considérer un réacteur

chimique comme une combinaison de chimie appliquée et de génie mécanique.

Dans un deuxième temps, **des outils plus fins** ont été introduits pour prendre en compte simultanément les notions de **temps de séjour, de temps de contact, de temps de diffusion, de temps de réaction, de temps de mélange, de couplage réaction-transfert** de matière....

De nouveaux concepts, méthodes et paradigmes sont maintenant nécessaires aux spécialistes pour analyser, dessiner et faire fonctionner de façon optimale des procédés avec des équipements qui conduisent très rapidement au produit possédant la propriété désirée. Cela nécessite des **modèles mathématiques** et des résultats utilisables et traitables par les meilleurs outils informatiques. Ainsi, le **traitement de l'information locale généralisé** nécessite et nécessitera, de plus en plus, à faire appel à l'outil **mécanique des fluides numérique** comme c'est déjà le

cas pour la combustion automobile, aéronautique et spatiale, notamment pour la connaissance, le contrôle, la stabilité des écoulements et l'étude et l'amélioration des transferts.

C'est pourquoi, en amont et en complément de ce qui est enseigné aujourd'hui, et qui, comme nous l'avons écrit, subira des évolutions, parmi les domaines de recherche qui doivent progresser et vont probablement conduire à de nouvelles théories et applications prometteuses, donc à des bouleversements ou des percées importantes, nous pouvons citer :

- à l'échelle nano, **la catalyse** et les états de surface, les synthèses asymétriques, la **modélisation moléculaire** et biomoléculaire et les **cinétiques** de cristallisation, d'enrobage ou d'agglomération ;

- à l'échelle micro, **les milieux complexes**, fluides non newtoniens, sels fondus, fluides supercritiques, dispersions polyphasiques et tous systèmes dont les propriétés sont contrôlées par les phénomènes interfaciaux comme les émulsions, colloïdes, gels, polymères hydro-solubles, **les milieux particuliers**, poudres, aérosols, suspensions, liquides visqueux et chargés, **les structures fractales des milieux poreux** et leurs influences sur les lois gouvernant le transfert de masse, de chaleur et sur les réactions chimiques et biologiques ;

- à l'échelle macro, la conception de nouveaux **fonctionnements** pour les équipements existants (opérations en régimes transitoires ou cycliques) ou la conception, avec la complicité des constructeurs, d'équipements fondés sur de nouveaux principes de couplage ou découplage entre les processus élémentaires (transferts, réaction, séparation) sans oublier les potentialités des procédés miniaturisés modulaires et décentralisés chez le consommateur.

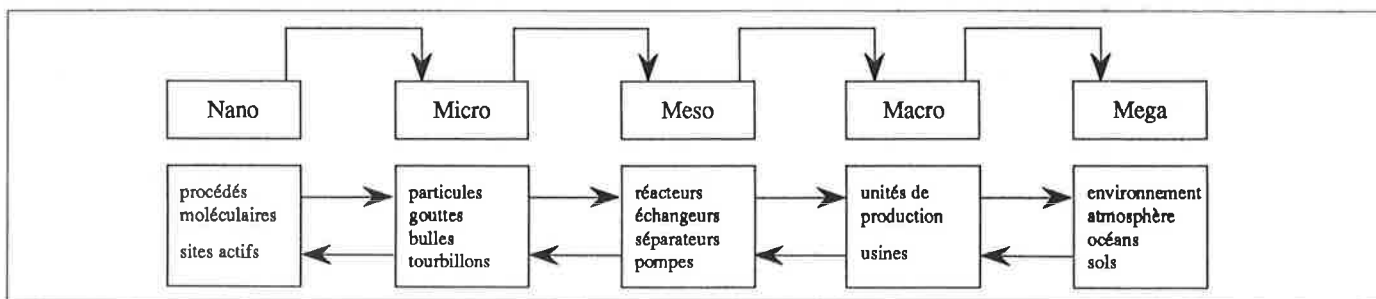
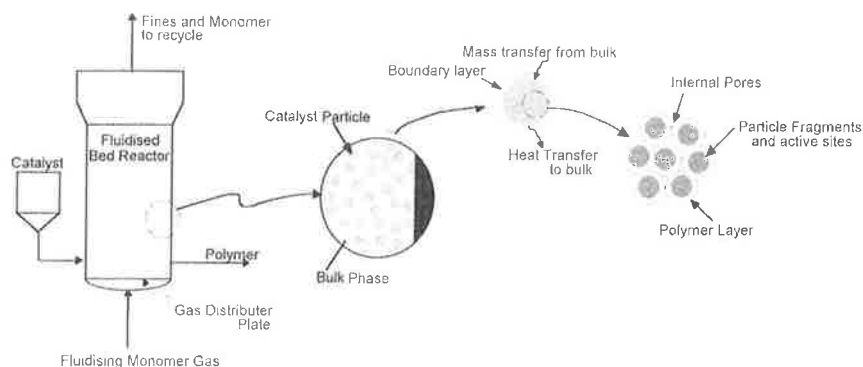


Figure 2 - L'organisation des niveaux de complexité apporte une nouvelle approche au génie des procédés.

PROBLEMS TO BE SOLVED AND RELATED LENGTH SCALES IN THE HETEROGENEOUSLY-CATALYSED POLYMERISATION OF OLEFINS.

Example: Fluidized Bed Reactor (Similar problems for SBR technology)



- **Reactor Scale (macroscale)** **Length scale: 1-10 m**
 - Describe hydrodynamics for non-reactive systems (cold flow)
 - Complications when simultaneous reaction & transfer.
- **Particle-Reactor interactions (mesoscale)** **Length scale: 100 μm**
 - Particle-Particle/Particle-wall interactions: melt down, blocking...
 - Exchange between bubble and emulsion phases in FBR
- **Particle as microreactor (microscale)** **Length scale: 10 μm**
 - Mass transfer from bulk phase.
 - Heat transfer to bulk phase.
- **Intraparticulate phenomena (nanoscale)** **Length scale: 100 nm**
 - Fragmentation of catalyst particles (morphology).
 - Diffusion of monomer/evacuation of energy at active sites.
 - Kinetics/molecular interaction.
 - Crystallization kinetics & other macromolecular properties.

Figure 3 - Schéma des échelles de longueurs caractéristiques de la polymérisation des oléfines sur des catalyseurs hétérogènes (T. McKenna et R. Spitz, 1997).

Mais la modélisation, la simulation et l'interprétation à ces différentes échelles nécessitent également des percées importantes dans l'obtention et le traitement de l'information. Nous pouvons citer :

– **le développement d'une instrumentation sophistiquée** conduisant à des progrès notables par la connaissance des interactions matière-rayonnement à l'instar, par exemple, de la résonance magnétique nucléaire (RMN) utilisée dans le monde médical. En effet, la RMN est un outil puissant qui donne accès à des informations à la fois à l'échelle microscopique et à l'échelle macroscopique et qui permet de caractériser et de suivre des phénomènes physiques et chimiques qui existent

dans un vaste domaine d'échelles de longueur et de temps. Ainsi, elle fournit des informations sur les structures et sur la dynamique de structures à l'échelle moléculaire ou micronique (vitesse d'agglomération des particules, taux de coalescence des bulles et des gouttes, vitesse de nucléation en cristallisation, taux de coagulation des colloïdes...), et l'imagerie RMN donne l'accès aux hétérogénéités structurales des matériaux et des milieux poreux et aux profils de concentration, de température et de vitesse d'écoulement dans ces milieux. Par suite, toujours grâce à l'analyse des images, on a accès localement aux transferts de chaleur, de matière et de quantité de mouvement.

De même, la tomographie d'impédance (résistive et capacitive) est une technique locale de caractérisation des écoulements et de contrôles en ligne des process qui va prendre de plus en plus d'importance.

Mentionnons également l'ellipsométrie spectroscopique ou monochromatique qui permet une caractérisation des surfaces en temps réel et *in situ*.

– **l'élaboration de capteurs intelligents** mesurant chaque paramètre, à tout endroit et à tout moment : techniques optiques telles que la spectroscopie à fluorescence à résolution espace-temps utilisant des sources lasers, et ce, appliqué à des milieux solides ou opaques. A quand la micro-électronique ou la nanoélectronique embarquée à bord des particules ou des sites catalytiques informant des valeurs locales des paramètres ? A quand le polymère piézo-électrique générant une faible turbulence à la surface d'une membrane en vue de son lavage et du décolmatage local permanent ? A quand le largage contrôlé des substances actives ?

– **l'utilisation des ordinateurs pour implémenter de nouvelles techniques relevant de l'intelligence artificielle.** Les systèmes experts sont déjà populaires aujourd'hui dans certains milieux industriels, mais cette constatation ne doit pas empêcher les chercheurs de se focaliser sur les phénomènes physiques, chimiques et biologiques extrêmes de base gouvernant le process ou le procédé. La logique floue va aider pour le contrôle des procédés tout comme les réseaux de neurones (à l'image du comportement d'un cerveau humain) pour diagnostiquer les défauts en ligne, pour analyser les tendances et pour concevoir et modéliser des produits et des procédés nouveaux. Toutefois, la complexité des phénomènes rencontrés que nous avons décrite est telle que cela nécessitera un grand nombre d'années avant qu'un ingénieur possède un modèle formel ou bien l'ensemble des paramètres expérimentaux nécessaires. C'est pourquoi l'approche numérique et non pas symbolique des réseaux de neurones, en tant qu'outil de modélisation empirique puissant, est promise à un développement technologique considérable. Mais, il ne faudra pas s'arrêter à cette étape, car l'automatisation des procédés nécessite de nouvelles percées

scientifiques en milieu réel, tout comme l'augmentation de la complexité nécessitera la création de nouveaux concepts utilisant les théories statistiques et processus stochastiques ;

– **sans oublier le traitement des images et des signaux pour la visualisation et la validation**, là encore pour des conditions de milieux réels granulaires ou opaques, et qui reste tributaire de la puissance des ordinateurs. C'est pourquoi la puissance, toujours en expansion des ordinateurs, jouera un rôle décisif.

Mais ne rêvons pas, nous continuerons à enseigner le génie des procédés avec sa méthodologie universelle, appliquée certes dans des conditions de plus en plus réelles et réalistes **appliquées et applicables !** N'oublions pas que l'ingénieur ou le chercheur en génie des procédés est un « **problem solver** » avant tout !

Pour réussir cette mutation industrielle, **le génie des procédés, quant à sa recherche, doit progresser simultanément sur 3 fronts.**

Sur le front des développements théoriques, c'est tout spécialement le « **génie de la formulation** », où nous ne disposons pas aujourd'hui de concepts et de paradigmes adéquats, et la « **technologie des solides divisés** » qui interviennent dans 70 % des procédés industriels de transformation de la matière. Cela concerne aussi bien la **création des solides** (cristallisation, granulation, précipitation, sédimentation, suspension, agglomération, enrobage, extrusion, compactage, mélange de poudres, formation d'aérosols) que la maîtrise de la morphologie des solides et de leur granulométrie qui conditionne les propriétés comme la coulabilité, la couleur, le toucher, la maniabilité, la cohésion, la friabilité, la rugosité, l'aptitude au relargage et à la dissolution, le moelleux après hydratation, la succulence ou l'odeur.

Sur le front des méthodologies, c'est tout spécialement le cas des méthodologies d'**acquisition des données de base** (notamment thermodynamiques et cinétiques) et de développement des **nouveaux types de procédés** qui seront nécessaires, notamment ceux qui permettent des découplages entre les processus élémentaires (transferts -

réactions - séparation) ou bien les couplages pour des réacteurs multifonctionnels (opérations discontinues et utilisation de systèmes flexibles et changeants).

En effet, les procédés combinés de réaction-séparation comme les distillations réactives, les séparations par membranes réactives ou par catalyse par transfert de phase offrent deux avantages majeurs : réduction de sous-produits non désirés et amélioration globale du rendement dues aux faibles valeurs des constantes d'équilibre. Un autre avantage capital des opérations combinées est la très importante diminution de frais d'investissement, typiquement de l'ordre de 10 à 20 % par rapport à ceux des installations traditionnelles.

Sur le front du développement de nouvelles technologies spécifiques ou génériques, il faut cibler d'autres industries comme la sidérurgie, la cimenterie, l'automobile ou l'aérospatial pour résoudre certains problèmes grâce à des transferts et adaptations de technologies et pour prendre en compte l'importance des matériaux et de la mécanique des solides dans la conception de certains réacteurs, par exemple du « réacteur-four ».

Ainsi, les sources de progrès potentiels sont à chercher dans les techniques d'automatisation, de contrôle et de conduite, dans les techniques liées à la mécanique des fluides, dans les techniques d'investigation et de mesure à différentes échelles d'espace et de temps, dans les techniques fines de modélisation et de visualisation sans oublier, bien sûr, l'application et l'implication des outils informatiques.

Il faut bien insister sur le fait que ces trois approches doivent être effectuées avec la participation très étroite de physiciens, de physico-chimistes, de biologistes, toxicologues et écotoxicologues, et de spécialistes de mesure en vue de formaliser les connaissances sur les mécanismes physiques, physico-chimiques, biologiques à différentes échelles d'espace et de temps, afin d'organiser les niveaux de complexité, mais cette fois sur l'ensemble des échelles concernées par la *figure 1*.

Pour en savoir plus :

– *Chemical engineering frontiers : research needs and opportunities*, Rapport

Amundson, National Academic Press, Washington D.C., 1987.

– Dudukovic M.P., Chemical Reaction Engineering - Current Status and future direction, *Chemical engineering education*, Fall 1987, p. 210.

– Pimentel G.C., Coonrad J.A., *Opportunities in chemistry : to day and tomorrow*, National Academic Press, 1987.

– Ottino J.M., *The Kinematics of mixing, stretching, chaos and transport* (Cambridge University Press), 1989.

– Gladden L.F., Nuclear magnetic resonance studies of porous media, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 1993, vol. 71, p. 657.

– Villermaux J., Future challenges for basic research in chemical engineering, *Chemical engineering science*, 1993, vol. 48, n° 14, p. 2525.

– J. Villermaux, Basic chemical engineering research : where are we going ?, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 1993, vol. 71, Part A, p. 45.

– Mashelkar R.A., Seamless chemical engineering science : the emerging paradigm, *Chemical Engineering Science*, 1995, vol. 50, n° 1, p. 1.

– Desmarescaux Ph., Barnay J.L., Nouveaux marchés, chimie nouvelle et génie des procédés, 5^e Congrès Français du Génie des Procédés, Lyon 19-21 septembre 1995, *Entropie*, 1995, n° 194, p. 10.

– Froment G., Le Génie des procédés catalytiques, 5^e Congrès Français du Génie des Procédés, Lyon 19-21 septembre 1995, *Entropie*, 1995, n° 194, p. 10.

– Sapre A.V., Katzev J.R., Core of chemical reaction engineering : one industrial view, *Ind. Eng. Chem. Research*, 1995, 34, p. 2202.

– Villermaux J., Future prospects for chemical research and technology, *Chemical Technology Europe*, 1996, vol. 3, n° 1, p. 21.

– Lerou J.J., Ng K.M., Chemical reaction engineering : a multiscale approach to a multiobjective task, *Chem. Eng. Sci.*, 1996, 51, 10, p. 1595.

– Woods D.R., Wasau D.T., Teaching of colloid and surface phenomena, *Chem. Eng. Education*, 1996, vol. 30, p. 190.

– Krieger J.H., Chemical engineering redefines itself in era of global change, *Chemical and Engineering News*, 1996, p. 10.

– Charpentier J.-C., Trambouze P., Process engineering and problems encountered by chemical and related industries in the near future : revolution or continuity ?, *International Conference on advances in chem. eng.*, Allied Publishers Ltd, New Delhi, India, 1996.

– McKenna T. F., Spitz R., Le génie de la polymérisation des oléfines : problèmes restant à résoudre, *Entropie*, 1997, n° 204, p. 31.

– Landau R., Education : moving from chemistry to chemical engineering and beyond, *Chem. Eng. Prog.*, 1997, vol. 93, n° 1, p. 52-65.

– Villadsen J., Putting structure in chemical engineering, Proceedings of an industry/university Conference, *Chem. Eng. Science*, 1997, vol. 52, n° 17, p. 2857.

– Srinivasan R., Hsing I.M., Berger P.E., Jensen K.F., Firebaugh S.L., Schmidt M.A., Harold M.P., Lerou J.J., Ryley J.F., Micromachined reactors for catalytic partial oxidation reactions, *AIChE Journal*, vol. 43, 1997, n° 11, p. 3059-3069.

– *Process intensification in practice*, Proceeding of the 2nd International Conference on process intensification. Ed. J. Semel, Antwerp, October 1997.