

# Apport du génie des procédés aux enjeux sociétaux

dans le contexte « demandes du marché et de la société versus offres technologiques », c'est-à-dire encore dans le contexte « de la matière première à la mise sur le marché du produit à haute valeur ajoutée »

Jean-Claude Charpentier

Allant du pétrole à la pharmacie en passant par le verre, le ciment, le bitume, le papier, le textile, la peinture, la cosmétique, l'alimentaire ou la chimie, les industries de procédés chimiques et parachimiques sont en rapide évolution (voir *figure 1* pour l'année 2002). **Leurs marchés exigent une adaptation permanente de l'offre à la demande sociétale.** Ainsi, les notions de service au client, de création de valeur pour l'actionnaire, de leadership sur les marchés et d'acceptation par le public, jouent un rôle de plus en plus stratégique pour ces industries confrontées à un double défi : humain, et scientifique et technologique :

pour les pays en voie de développement et d'industrialisation, la main d'œuvre est de moindre coût et les réglementations locales (environnement, sécurité) sont moins contraignantes ;

pour les pays industrialisés, les demandes des consommateurs sont pressantes et changeantes, et les contraintes justifiées et très fortes de la part du public portent sur les questions d'environnement, d'image auprès du public et de maîtrise des risques industriels pour le couple produit-procédé.

Dans ce cadre, les **industries chimiques et parachimiques**, et plus généralement les **industries de procédés** européennes et **notamment françaises**, en compétition avec les industries nord-américaines et japonaises, sont confrontées à deux autres défis :

- pour la production des commodités et des intermédiaires : recherche de procédés innovants en sélectionnant les procédés, non seulement sur la base d'économies d'exploitation, mais sur la base de gains compensatoires résultant d'une sélectivité accrue et d'économies de matière et de chaleur au sein du procédé. Cela requiert la réduction des pertes en matières premières et en énergie et le recyclage des produits et des sous-produits, et la maîtrise des risques liés aux conditions de production et de manipulation des produits chimiques et leur degré d'acceptabilité par la société civile ;

- pour la chimie de spécialités (pharmacie, cosmétique, alimentaire...) caractérisée par des objectifs (marchés, vente, compétition) dominés par la propriété d'usage du produit (solides divisés, solides mous, mélanges et fluides complexes), les éléments dominants concernent l'expertise et la compétence pour ajuster des procédés à une demande variée et changeante de la part du consommateur et la rapidité de réponse aux conditions des marchés.

Dans tous les cas, le génie des procédés apporte une aide précieuse pour relever ces défis puisqu'il concerne l'ensemble des connaissances scientifiques et technologiques nécessaires aux transformations physico-chimiques et biologiques de la matière première et de l'énergie en un produit finement ciblé pour le consommateur. Mais il faut souligner par exemple qu'aujourd'hui 60 % des produits vendus par une entreprise chimique sont cristallins, polymères ou sous forme de solides amorphes qui doivent répondre aux normes standards.

Il en va de même pour les produits pâteux ou émulsifiés. **Les procédés pour les fabriquer de façon maîtrisée** nécessitent une connaissance des phénomènes physico-(bio)chimiques, de transferts et de transports intervenant aux différentes échelles de temps et d'espace de la chaîne de production (*figure 2*).

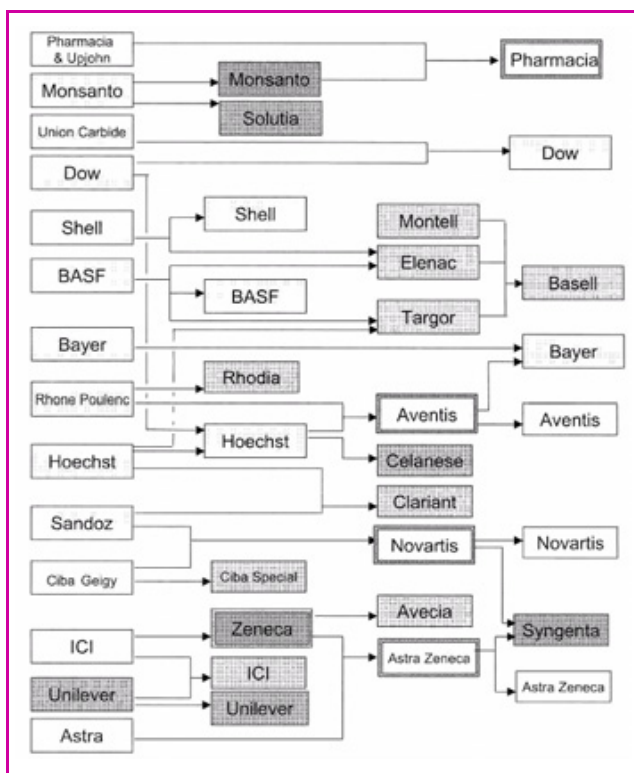


Figure 1 - Restructuration des industries chimiques (selon Felcht, 2002).

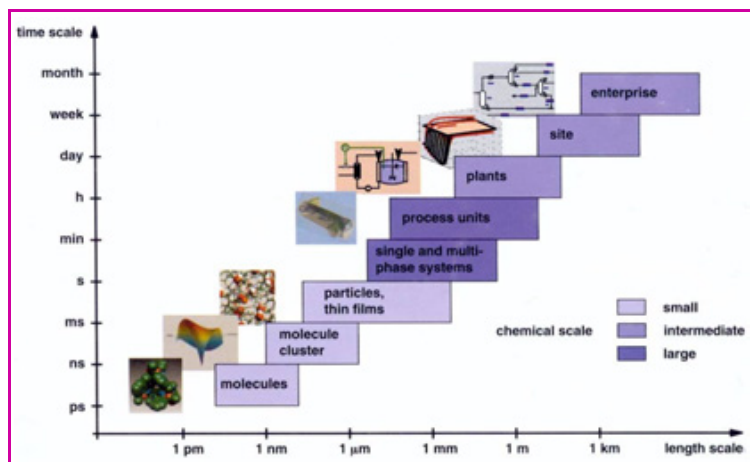


Figure 2 - Échelles de la chaîne de production (« the supply chain »).

Ainsi, la traduction des processus moléculaires en lois phénoménologiques macroscopiques pour créer et maîtriser, par des procédés performants et sûrs, les propriétés d'usage et la fonctionnalité des produits, constitue l'approche actuelle du génie des procédés, ce que j'appelle le génie du triplé « Processus moléculaires-Produit-Procédé (G3P) ». C'est une approche pluridisciplinaire systèmes intégrés multiéchelles d'espace et de temps. Portée par la puissance croissante des outils informatiques, cette approche est rendue possible grâce aux énormes avancées en modélisation moléculaire, en instrumentation scientifique, dans les nanotechnologies et dans le traitement de l'information (signal et image). Et elle doit conduire à une meilleure connaissance et à la maîtrise des risques industriels pour une chimie et une parachimie sûres et durables.

De ce fait, les enseignements et recherches en génies chimique et des procédés sont menés dans quatre directions en rapport avec les enjeux sociétaux :

1. **Augmenter la productivité et la sélectivité à l'aide d'opérations intelligentes et d'un contrôle multiéchelle des processus** : cela conduit à intensifier les processus élémentaires par apport localisé d'un flux « informé » d'énergie ou de matière et nécessite l'utilisation de microtechnologies pour un **transfert d'informations homme-procédé** (dans les deux sens). Cela demande des modèles mathématiques élaborés (mais pas trop) et des réseaux de nano- et micro-capteurs locaux, un fin contrôle informatique des processus élémentaires de cinétique et de transfert de matière, de chaleur et de quantité de mouvement, et des connaissances en imagerie en milieux réels, opaques et granulaires. On peut citer la nanoconception sur mesure (« nanotailoring ») de structures catalytiques contrôlées aux échelles moléculaires ou supramoléculaires *via* des synthèses nanostructurales (figure 3). Il est aujourd'hui possible de concevoir et réaliser des matériaux structurés aux propriétés contrôlées aux échelles nano et micro.

2. **Conception de nouveaux équipements basés sur des principes scientifiques, de nouveaux modes de fon-**

**ctionnement opératoires** et de nouvelles techniques de production (« **process intensification** ») : **séparateurs hybrides multifonctionnels** totalement contrôlés qui couplent ou découplent les processus élémentaires, transfert-réaction-séparation (distillation réactive, cristallisation réactive, technologies membranaires, garnissages structurés...), et **miniaturisation, modularisation et décentralisation** pour les modes de production, notamment pour les produits dangereux. Ainsi, la réduction du nombre d'équipements unitaires conduit à une diminution des coûts d'investissement et à des économies d'énergie significatives. De plus, l'amélioration de la sélectivité en produits désirés conduit à une économie d'utilisation des matières premières et par suite, à une réduction des coûts opératoires (figure 4). Globalement, des réductions de coûts d'investissements et opératoires de l'ordre de 10 à 20 % peuvent être obtenues en optimisant ainsi les procédés.

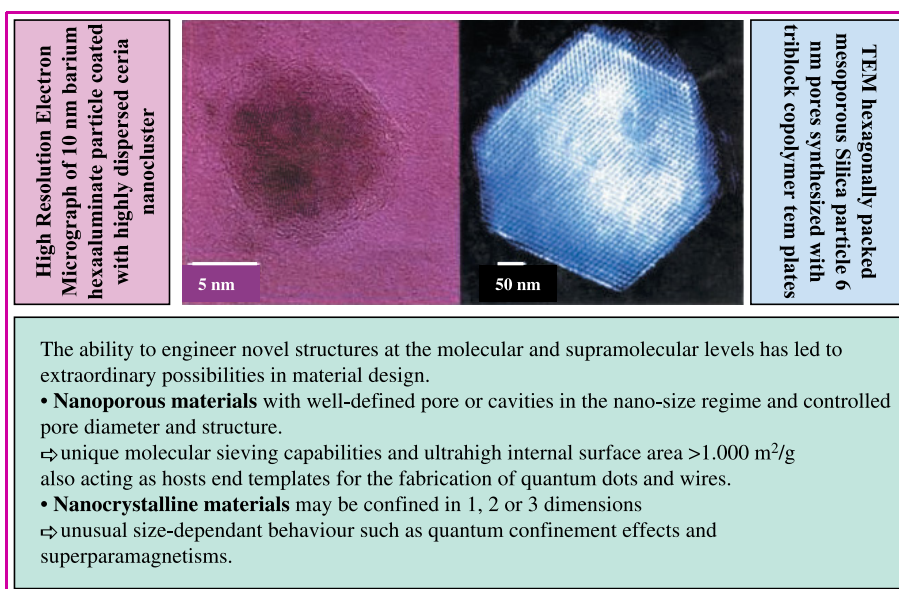


Figure 3 - Nanoconception de matériaux à structure contrôlée (Ying Y.J., *AIChE Journal*, 2000).

Mais la question se pose aujourd'hui de savoir si l'usine chimique du futur se miniaturisera à l'image des unités de production des industries de l'information et de la communication : la réponse proviendra inévitablement de la poussée au changement due à la demande sociétale en procédés plus sûrs et moins polluants pour remplacer certains complexes industriels actuels qui produisent des tonnes de déchets par tonne de produits utiles.

3. Appliquer la méthodologie du génie chimique à la **formulation et au génie du produit** (« product design and engineering ») : fabriquer la ou les propriété(s) d'usage pour des produits sophistiqués qui combinent plusieurs fonctions à la mésoéchelle du consommateur exigeant quant à la **sécurité** et à la **qualité** et les propriétés de ces produits et quant à l'analyse de leur cycle de vie. Ces dernières doivent être construites à partir de structures solides ou d'émulsions liquides contrôlées aux nano- et micro-échelles (goût, odeur, couleur, biocompatibilité, maniabilité, granulométrie...). Il est important de souligner que les coûts d'élaboration de ces produits sont du même ordre de grandeur que les dépenses affectées aux recherches-développements, représentant elles-mêmes 30 à 35 % du coût global.



Figure 4 - L'usine du futur (DSM Magazine, n° 83).

**4. Appliquer la modélisation et la simulation** à toutes les échelles espace-temps à des situations réelles et à des exploitations *in situ*, i.e. le contrôle en temps réel : depuis l'échelle moléculaire jusqu'à celle du grand complexe industriel. Cela comporte la simulation du comportement à l'échelle de l'ensemble des unités du complexe (figure 4). Ainsi, il est permis d'optimiser la production à l'aide d'une simulation dynamique des procédés avec des outils et techniques pour **diagnostiquer et contrôler en temps réel les risques liés aux conditions de production, de manipulation et de stockage de produits chimiques**, ou bien pour contrôler en temps réel les risques d'emballement de réacteurs. Et cela permet plus généralement d'assurer la sécurité des hommes et des procédés.

**Il est bien évident que les enseignements prodigués et les recherches menées en génie des procédés dans ces quatre voies sont totalement sensibilisés au développement et à la diffusion de la culture du risque pour améliorer la valeur et l'image de la chimie en France**, et plus généralement pour aider à **répondre à un certain nombre d'enjeux sociétaux**, pour ne citer que celui du développement durable, avec ses trois composantes **business**, comportant une meilleure conversion et sélectivité de la matière et de l'énergie pour obtenir le produit désiré par le consommateur, **environnementales** et **sociétales** (sécurité des produits et des installations).

C'est ainsi qu'en recherche, en formation initiale ou en formation continue dans la plupart des grandes écoles de chimie et de génie des procédés françaises, en plus des domaines de base traditionnels (thermodynamique,

cinétique, transferts d'extensités, théorie des réacteurs, automatique et contrôle de procédés), les recherches et/ou les enseignements sur la culture du risque concernent les domaines suivants :

- **le risque électrostatique** (notamment dans les procédés industriels et/ou pour les caractéristiques de sécurité des produits) ;
- **l'explosion de poussières et liquides inflammables** (quels risques, quelle accidentologie et quelles préventions et protections pour les poussières ?) ;
- **la calorimétrie**, un **outil indispensable à la sécurité** (par ex. pour le contrôle de l'emballement des réacteurs) ;
- **l'analyse thermique**, un outil lors du stockage d'un produit ;
- **la sécurité de la manipulation des poudres** ;
- **le retour d'expériences accidentelles en chimie fine concernant la sécurité des installations** : a) étude du procédé ; b) intégration des paramètres de sécurité et mise en place des parades nécessaires à la prévention du risque dans la conception et la réalisation des installations ; c) exploitation rigoureuse des installations ; d) facteur humain dans la sécurité des installations, avec le respect de la qualité des consignes et des modes opératoires, la formation et l'expérience des opérateurs ; e) obtention du produit (ciblé par le consommateur) ;
- **l'analyse** multiéchelles d'espaces et de temps **du cycle de vie des produits...**

Voilà des exemples parmi d'autres illustrant l'apport que l'on peut attendre du **génie des procédés aux enjeux sociétaux** et ce, dans le contexte actuel « demande du marché et de la société versus offres technologiques » ; l'offre technologique étant elle-même totalement tributaire des avancées scientifiques, notamment des avancées pluridisciplinaires en sciences du génie des procédés, sciences de l'ingénieur s'il en est !



#### Jean-Claude Charpentier

est directeur de l'École Supérieure de Chimie Physique Électronique de Lyon\* et président de la Fédération Européenne de Génie Chimique.

\* CPE Lyon, 43 bd du 11 Novembre, BP 2077, 69616 Villeurbanne Cedex.

Tél. : 04 72 43 17 02. Fax : 04 72 43 16 70.

Courriel : charpentier@cpe.fr

<http://www.cpe.fr>

Retrouvez la SFC et L'Actualité Chimique sur la toile

<http://www.sfc.fr>