

# Vous avez dit le génie des procédés moderne « vert » ?

## Ou comment produire « durablement » des molécules aux enjeux environnementaux et économiques

Jean-Claude Charpentier

<b>Résumé</b>	Pour répondre aux besoins des industries chimiques et annexes qui doivent satisfaire à la fois les demandes économiques changeantes et rester mondialement compétitives, un génie chimique et des procédés moderne doit appréhender à la fois la demande des marchés pour des produits à propriétés d'usage définies aux nano- et micro-échelles de temps et d'espace, et les contraintes sociales et environnementales des procédés industriels aux échelles méso et macro de production. Cela requiert une démarche scientifique comportant une approche système intégré multidisciplinaire et multi-échelle de longueur et de temps, appliquée aux différents processus moléculaires et de transferts, complexes, simultanés et souvent couplés qui interviennent aux différentes échelles de la chaîne de production chimique : c'est-à-dire bien comprendre comment les phénomènes à une échelle déterminent les propriétés et comportements à l'échelle supérieure et ce, depuis l'échelle moléculaire jusqu'aux échelles du site de production. Cette approche scientifique moderne du génie chimique et des procédés, appelée « approche verte du génie des procédés », est fortement mobilisée sur l'intensification des procédés et sur le génie du couple produits/procédés verts afin de produire beaucoup plus et mieux en consommant beaucoup moins, et de produire plus durable avec des technologies innovantes conduisant à une meilleure utilisation des matières premières et de l'énergie.
<b>Mots-clés</b>	<b>Génie des procédés vert, futur du génie chimique, approche multi-échelle, couple produits/procédés verts, intensification des procédés, génie du produit.</b>
<b>Abstract</b>	<b>Did you say “green” modern process engineering? Or how to sustainably produce molecules responding to environmental and economic challenges</b> To respond to the changing needs of the chemical and related industries in order both to meet today's economy demands and to remain competitive in global trade, a modern chemical and process engineering is vital to satisfy both the market requirements for specific nano and microscale end-use properties of products, and the social and environment constraints of industrial meso and macroscale processes. Thus an integrated system approach of complex multidisciplinary, non-linear, non-equilibrium processes and transport phenomena occurring on different time and length scales of the chemical supply chain is required. That is, a good understanding how phenomena at a smaller length-scale relates to properties and behaviour at a longer length-scale is necessary, from the molecular scale up to the production scales. This modern approach of chemical and process engineering, named “green process engineering”, is strongly oriented on process intensification and on the couple green products/processes to produce much more and better in using much less, with the help of technical innovation and sustainable technologies for efficient mass and energy utilization.
<b>Keywords</b>	<b>Green process engineering, future of chemical engineering, multiscale methodology, green product/process couple, process intensification, product design and engineering.</b>

Aujourd'hui, l'industrie chimique et les industries connexes (pétrochimie, industries de santé, cosmétiques, alimentaire, environnement, textile, papier, verres, bitume, sidérurgie, nucléaire, matériaux de construction, électronique) font face à des exigences et des contraintes sans précédent. En parallèle, la connaissance chimique croît aussi rapidement et le taux de découvertes augmente chaque jour. Maintenant, la chimie est associée aux sciences de la vie, de l'information et de la communication, à celles de l'instrumentation. Par suite, le génie chimique, et plus généralement le génie des procédés, doit répondre à deux impératifs : produire beaucoup plus en consommant beaucoup moins, et produire plus durable. Mais comment ?

### Globalisation et conscience sociétale : deux exigences majeures pour le génie des procédés

Face à la globalisation des marchés, à l'accélération des partenariats et de l'innovation, *connaître les produits et les*

*procédés* qui seront *compétitifs* dans l'actuelle économie mondialisée est la *première des exigences* adressées à la recherche en génie chimique et plus généralement en génie des procédés. De fait, si au début des années 70 la durée de demi-vie d'innovation de produit (temps d'accès au marché) était d'environ dix ans, une année est souvent considérée

aujourd'hui comme un temps long, conséquence de la compétition croissante qui règne sur le marché. En outre, si plus de 14 millions de composés chimiques peuvent être synthétisés et 100 000 trouvés sur le marché, seulement quelques pourcents d'entre eux se trouvent dans la nature ; la plupart doivent donc être délibérément conçus, formulés, synthétisés et fabriqués pour répondre au besoin de l'humanité, pour tester une idée ou bien encore pour satisfaire notre soif de connaissance. En effet, un grand nombre des demandes du XXI<sup>e</sup> siècle concerne le développement de biomatériaux, la préparation de nanoparticules, le relargage de médicaments, les bionanotechnologies, la conversion de la biomasse, l'utilisation des liquides ioniques et systèmes aqueux biphasiques, la dynamique de relaxation des composés moléculaires complexes, la fabrication de microréacteurs polyphasiques pour des réactions sélectives (fluoruration).

Toutes ces demandes sont clairement focalisées sur des exigences sociétales, comme la séquestration du CO<sub>2</sub>, la combustion chimique en boucle, le reformage et l'oxydation catalytique partielle du méthane pour produire du gaz de synthèse ou la synthèse du biodiesel en carburant ou la production d'hydrogène. La plupart de ces sujets sont répertoriés dans des « feuilles de route » publiées depuis une dizaine d'années, tels les douze principes de la chimie verte [1], les douze principes de l'ingénierie verte [2], les douze grands défis pour l'ingénierie énoncés par l'Académie nationale américaine d'ingénierie en 2008 (NAE), la feuille de route de l'ICChemE en 2007 [3], ou bien encore la feuille de route européenne pour l'intensification des procédés en 2007 (ERPI [4]). Ces documents attirent l'attention sur une inquiétude globale planétaire où le génie des procédés devra jouer un rôle crucial – durabilité, santé, sécurité et environnement, énergie, eau, nourriture et boisson, génie des biosystèmes, énergie solaire, fusion nucléaire, etc. – et militent pour faire évoluer le génie des procédés vers un *génie des procédés moderne volontairement concerné par le développement durable* [5-9]. Ainsi, les procédés existant et les nouveaux procédés devront être progressivement adaptés aux principes de la « chimie verte ».

La *seconde exigence* est directement liée à la *demande évolutive des marchés* qui conduit à un double défi. Dans les pays en développement où la main d'œuvre est bon marché, les contraintes locales dans la régulation de la production sont moindres et par conséquent, les coûts de production sont faibles et très compétitifs. Les pays industrialisés connaissent quant à eux une croissance rapide de la demande client pour des produits à propriétés d'usage ciblées, et en même temps des contraintes issues du public et des médias portant sur les procédés dans les domaines de la sécurité et de l'environnement, combinées avec des outils de réglementation comme l'analyse du cycle de vie du produit « du berceau à la tombe » (voire par exemple la norme européenne REACH pour les produits chimiques [10]).

Pour répondre à une telle demande sociétale de développement durable (durabilité) et offrir une contribution au combat contre la destruction environnementale et le comportement non durable de la production mondiale actuelle – voir la *figure 1* qui montre que seulement un quart des richesses extraites de Dame Terre se retrouve sous forme de produits

Seul 25 % en poids de ce qui entre dans le tuyau sort sous forme de produits et services

Besoin d'améliorer l'efficacité des procédés de production d'un :

Facteur 4 (von Weizsacker, 1998)

Facteur 10 (Schmidt-Bleek, 1993)

Facteur 20 (AllChemE, 2001)

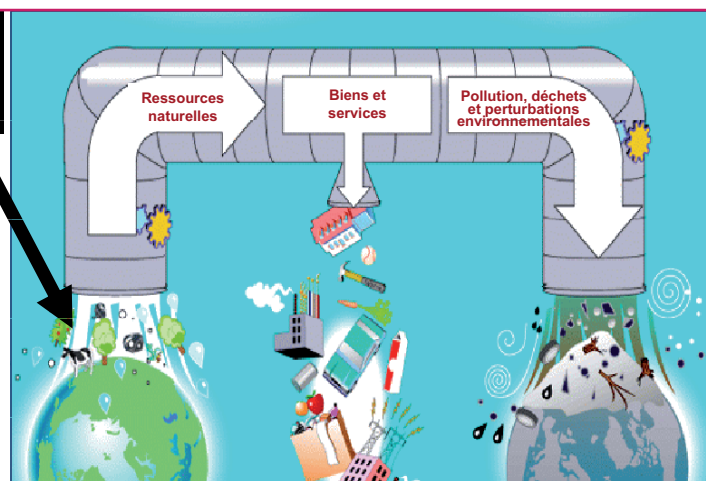


Figure 1 - Comportement non durable de l'humanité.

Source : World Research Institute, 2005.

et de services –, la chimie et le génie des procédés sont désormais confrontés à de nouveaux défis qui portent sur des systèmes complexes, à la fois à l'échelle des molécules, à celle des produits et à celle des procédés.

## Les nouveaux défis lancés au génie des procédés : l'intensification des procédés

Pour les produits de commodités et les produits intermédiaires à forts tonnages (ammoniac, acide sulfurique, carbonate de calcium, éthylène, aldéhydes, méthanol, éthanol, benzène, butadiène, amines...), qui représentent encore aujourd'hui un secteur majoritaire de l'économie (40 % des marchés) et pour lesquels les brevets ne portent pas habituellement sur les produits, les procédés ne peuvent plus être durablement sélectionnés sur les seuls critères de l'exploitation économique « comptable ». Au contraire, il faut établir une compensation avec à la fois une sélectivité accrue et des économies liées au procédé lui-même. Le défi est de produire d'énormes quantités au moindre coût ; le problème devient alors complexe parce que des facteurs tels que la sécurité, la santé, les aspects environnementaux – qui incluent la raréfaction des matières premières et de l'énergie, le recyclage des produits et sous-produits, ainsi que la demande de technologies non polluantes – doivent être pris en compte, car le client achète un procédé qui ne pollue pas (ou peu) et qui est parfaitement sécurisé et automatisé.

De plus, il ne faut pas oublier que les capacités de production mondiale doivent s'accroître d'un facteur 6 d'ici à 2050, si l'on suppose un taux de croissance de l'économie mondiale de 4 % par an. Ainsi, tendre vers des équipements pour une production à l'échelle mondiale pourra bientôt nécessiter un changement partiel ou total de technologie, en sachant que les technologies actuelles ne peuvent plus être mises en œuvre dans l'esprit « *on construit toujours plus gros* » si l'on doit appréhender des capacités de production encore jamais rencontrées dans les industries chimiques et connexes. On est ainsi confronté à la nécessité « d'intensification des procédés » de production, conduisant à un changement dans les technologies afin d'extrapoler de manière fiable de nouveaux procédés, en passant d'une échelle intermédiaire à une très grande échelle pour laquelle nous n'avons pas d'expérience antérieure. Cela nécessite

une approche intégrée multi-échelle de temps et de dimension dans les principes de conception des procédés, c'est-à-dire d'adapter la structure, l'architecture et les équipements du procédé aux conditions des transformations physico-(bio)chimiques, plutôt que d'adapter la chimie et les conditions opératoires aux équipements existants et à leurs limites inhérentes d'utilisation – voir le projet européen IMPULSE, qui regroupe huit sociétés industrielles et de services et douze centres de recherche académiques, dont le but est d'obtenir une amélioration radicale des productions à grande échelle grâce à une intégration ciblée au sein des unités de production d'équipements innovants de petites tailles et microstructurés pour fournir les conditions opératoires locales requises pour la transformation chimique [11]. Les unités de production à grande échelle pourraient ainsi être créées par intégration et interconnexion d'éléments divers, localement structurés à petite échelle au sein d'unités de macroproduction à grande échelle [12-13].

Par ailleurs, la chimie fine, la chimie de spécialités et la production de principes actifs et de matériaux hautement spécialisés avec les industries correspondantes (santé, cosmétiques, agroalimentaire) mettent en jeu l'interface chimie/biologie. Elles impliquent également l'« upgrading » et la conversion des bruts lourds pétroliers et des intermédiaires, la conversion des produits dérivés du charbon ou des gaz de synthèse en fuel, hydrocarbures et produits oxygénés.

Pour un consommateur qui n'apprécie généralement plus (ou pas seulement) un produit pour ses spécifications techniques, mais plutôt pour ses critères de qualité (morphologie, couleur, esthétique, stabilités chimique et biologique, dégradabilité, activité thérapeutique, propriétés de surface/colloïdales, propriétés sensorielles...) et pour ses fonctions (adhésion, lavage, assainissement...), le contrôle de ces valeurs d'usage, l'expertise dans la conception du procédé, l'ajustement continu aux demandes changeantes du consommateur, et la rapidité de la réaction et de la réponse aux conditions du marché sont les éléments économiques dominants qui doivent être pris en compte par le génie des procédés moderne. Pour les produits où la valeur ajoutée est une nanostructure spécifique, le consommateur paiera un surcoût pour une telle fonction, qu'elle soit dans un aliment, une poudre de lavage, une peinture ou dans un enduit. Le facteur-clé pour la production de produits pharmaceutiques ou cosmétiques n'est pas le coût, mais le temps d'arrivée sur le marché, c'est-à-dire la rapidité de la découverte et de la production de ces produits. Ces produits à haute valeur ajoutée, à court temps de vie et à grandes marges bénéficiaires, conçus « sur mesure » pour le consommateur en ce qui concerne leur formulation et leur fabrication, requièrent aussi une intensification des procédés avec de nouveaux équipements dont la conception dépasse le seul objectif de produire un unique produit de bonne qualité et à bas coût. Au contraire, le besoin exprimé aujourd'hui porte sur des équipements de production polyvalents, de petites dimensions, facilement lavables, désencrassables, désinfectables, transformables et opérationnels pour d'autres fabrications (productions flexibles, procédés continus ou en batch, conceptions modulaires). Il peut même arriver que ces produits ne soient pas fabriqués dans des équipements adaptés, mais au contraire dans le premier équipement disponible au moment désiré.

Les considérations précédentes sur la demande et la conception des produits désirés et de leurs procédés de production intensifiés doivent être prises en compte dans la définition et l'évolution scientifique du génie des procédés moderne.

## Une approche multi-échelle de temps et d'espace nécessaire à une recherche en génie des procédés orientée « intensification des procédés et formulation et production de produits ciblés »

Le but du génie des procédés est le développement de concepts, de méthodologies et de technologies pour mieux comprendre, concevoir, dessiner et faire fonctionner de façon optimale les procédés de transformations physico-chimiques et biologiques de la matière première et de l'énergie en des produits utiles au consommateur.

Mais comme nous l'avons souligné précédemment, l'accent mis aujourd'hui sur l'élaboration des propriétés d'usage de certains produits nécessite l'utilisation d'une large variété de technologies incluant notamment le nouveau rôle des microtechnologies, c'est-à-dire l'utilisation de micromélangeurs, de micro-échangeurs de chaleur et de matière, et de réacteurs microstructurés pour l'intensification de certains procédés de production. En effet, 60 % de tous les produits vendus par les industries chimiques et connexes sont des solides cristallins, amorphes ou polymères. Ces matériaux doivent avoir une forme clairement définie pour posséder les qualités d'usage souhaitées. Il en va de même pour les produits pâteux et les émulsions. Cette production concerne globalement des matériaux hautement spécialisés, des principes actifs et des produits de chimie de spécialité qui sont en fait beaucoup plus complexes en termes de structure moléculaire et de microstructures que les produits traditionnellement fabriqués par la chimie lourde.

Voilà pourquoi le génie des procédés moderne est concerné par le développement de procédures systématiques (approche systémique) pour la compréhension, la conception et le fonctionnement optimal de tous les processus complexes qui interviennent aux différentes échelles d'espace et de temps rencontrées dans ce que l'on définit comme la chaîne de production chimique (« chemical supply chain », figure 2). Cela va des échelles nano (voir pico) et micro pour les processus moléculaires, les clusters, les particules et les couplages entre réactions (bio)chimiques et phénomènes de transport et de transferts de matière et de chaleur, jusqu'aux échelles méso, macro et méga des unités

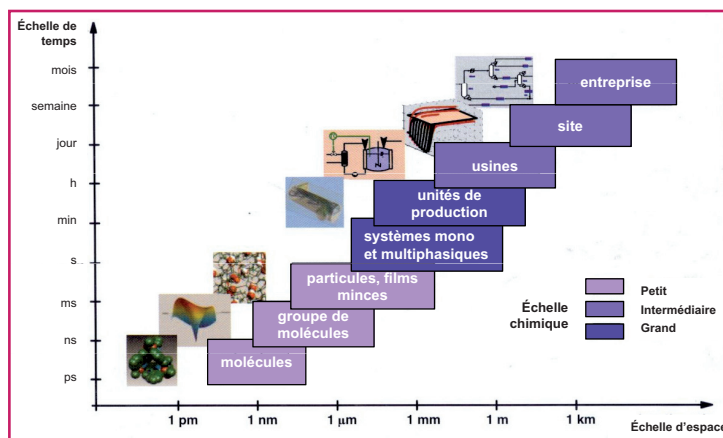


Figure 2 - Les multi-échelles de la chaîne de production chimique.

La chimie et le génie des procédés doivent maintenant développer des procédures systématiques pour la compréhension, la conception et le fonctionnement optimal de tous les processus complexes qui interviennent aux différentes échelles de la « chaîne de production chimique », allant des échelles nano et micro (synthèse et caractérisation à l'échelle moléculaire, couplage chimie-transfert) jusqu'à l'échelle industrielle (procédés continus ou en batch).

et du site de la production industrielle du produit, avec des procédés continus ou en batch, bien contrôlés et non pollués. Il faut donc *comprendre et décrire les relations entre les événements intervenant aux échelles nano et micro pour mieux convertir les molécules en produits utiles aux échelles du procédé continu ou en discontinu de production industrielle.*

Pour répondre à ces enjeux, une nouvelle approche systèmes complexes, que j'ai dénommée « Génie du triplet Processus-Produit-Procédé » (G3P) [14], est donc nécessaire. Elle intègre des phénomènes complexes multidisciplinaires, non linéaires et hors équilibre, se produisant aux différentes échelles de temps et de longueur intervenant pour la mise en œuvre du procédé, afin de comprendre comment des processus physico-(bio)chimiques et de transfert à une échelle donnée sont reliés à des propriétés et à un comportement à une échelle supérieure (figure 3). C'est ce que l'on appelle organiser les niveaux de complexité des différentes échelles de temps et de longueur rencontrées et couvertes par cette approche intégrée multi-échelle des procédés.

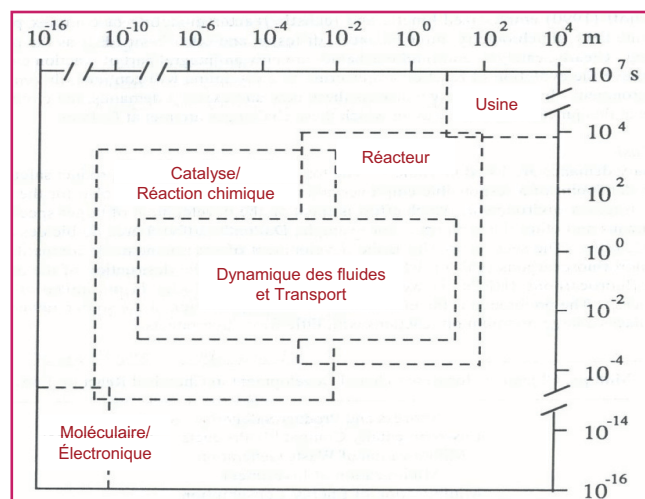


Figure 3 - Organiser les niveaux de complexité dans les échelles de temps et d'espace couvertes par l'approche intégrée multi-échelle.

Prenons l'exemple du génie des procédés biotechnologiques avec l'élaboration de catalyseurs biologiques pour fabriquer des médicaments individuels (figure 4). Les enzymes, qui sont des catalyseurs biologiques, sont des molécules de protéines qui accélèrent significativement la réaction biochimique dans la cellule. Sachant qu'une enzyme à la nano-échelle moléculaire peut être façonnée sur mesure pour produire un produit final particulier aux échelles méso et macro du produit et du procédé, cela ouvre des opportunités considérables pour appliquer le contrôle au niveau génétique. Ce contrôle est exercé pour faire de meilleurs biocatalyseurs et de nouveaux produits, ou encore pour développer de nouveaux médicaments et de nouvelles thérapies, ainsi que des équipements biomimétiques, l'ensemble répondant à des problèmes sociétaux. En outre, des avancées en génomique signifient que des produits chimiques personnalisés ont la possibilité de voir le jour dans un avenir proche. Ainsi, cette approche multi-échelle en biochimie et bioprocédés, qui inclue l'organisation des niveaux de complexité (figure 4), présente un fort potentiel pour lier des outils de marketing, de modélisation et d'optimisation afin de créer la substance active optimale adaptée à chaque client ou à chaque produit.

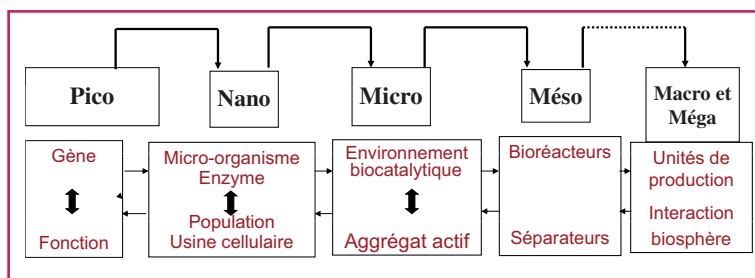


Figure 4 - Biochimie et génie biochimique.

Organisation des niveaux de complexité avec une approche intégrée multi-échelle des phénomènes et des processus simultanés et couplés, allant du gène, possédant structure et fonction connues, jusqu'au produit (écoproduit) avec la propriété d'usage désirée [14].

Prenons un autre exemple : celui de la conception des membranes artificielles, des membranes fonctionnalisées et des réacteurs membranaires (utilisés dans les industries alimentaires, pharmaceutiques, biomédicales, de traitement des eaux, etc.). Une analyse approfondie des matériaux et la caractérisation des structures et des propriétés, ainsi que la modélisation de leur conception et de leur élaboration aux échelles moléculaires et nano, deviennent essentielles pour un contrôle parfait des performances du procédé et pour la connaissance approfondie des fonctions membranaires, c'est-à-dire pour l'intensification du procédé membranaire. En d'autres termes, comment est-il possible avec des informations disponibles limitées de relier raisonnablement les performances du procédé à la macro-échelle industrielle aux phénomènes locaux à la micro-échelle des pores de la membrane et aux phénomènes concernant la nano-échelle des interactions soluté-soluté ou soluté-barrière ? Cela a justifié la création du réseau de laboratoires d'excellence européen « NanoMemPro » [15], qui a pour but de développer les applications macroscopiques des membranes par l'exploration et l'amélioration des propriétés des matériaux aux échelles nano [16]. Cet exemple souligne encore l'importance d'une approche intégrée multi-échelle et multidisciplinaire qui consiste à organiser les échelles de complexité, en traduisant les processus moléculaires en lois phénoménologiques macroscopiques pour élaborer et contrôler la propriété d'usage et la fonctionnalité requises du produit fabriqué à l'aide de procédés batch ou continus.

On pourrait ajouter l'exemple de l'élaboration et de la production d'un aliment nécessitant également le contrôle des caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques aux échelles nano et micro, qui déterminent le goût et la qualité aux échelles macro et méga de la chaîne de production et de transport souvent lointain de ces produits. De plus, les aspects hygiène du procédé, incluant désencrassement, lavage et désinfection, nécessitent aussi des solutions qui doivent être mises en œuvre à la méso-échelle de l'équipement pour surmonter les défis rencontrés aux échelles micro et nano des spores bactériens et du revêtement de surface.

Ainsi, en plus des paradigmes de base et irremplaçables du génie chimique que sont les opérations unitaires (distillation, absorption, séchage, cristallisation, fluidisation, etc.), les transferts couplés de chaleur, de matière et de quantité de mouvement et les fondamentaux et outils traditionnels du génie chimique (thermodynamique, catalyse, génie de la séparation, simulation, optimisation et contrôle des procédés, considérations technico-économiques...), cette approche multi-échelle G3P, qui peut être considérée comme le « troisième paradigme » du génie des procédés [17] est donc un atout supplémentaire considérable pour le développement et le succès de cette science de l'ingénieur

qu'est le génie des procédés, en termes de concepts et paradigmes, à la fois pour l'intensification des procédés et pour le génie du produit (conception, formulation, fabrication et production des produits ciblés).

Et il faut souligner que cette approche intégrée multi-échelle est maintenant réalisable grâce aux développements technologiques considérables obtenus dans l'instrumentation scientifique analytique, dans les techniques instrumentales non invasives couplées avec le traitement du signal et de l'image, et aux avancées informatiques qui permettent le développement et l'application de modèles descriptifs pour la conduite en régime transitoire ou permanent à l'échelle considérée : molécule, structure du catalyseur, site, état de surface et dynamique du fluide local, particule de catalyseur, unité de production, usine, et toute la chaîne de production [18].

### **Le développement durable : un moteur pour quatre pistes simultanées et complémentaires de développement de la recherche du génie des procédés moderne « vert »**

Au carrefour de la chimie et du développement durable, pour répondre aux enjeux précédents de demande de procédés qui devront être progressivement adaptés aux principes de la « chimie verte », et en prenant en compte les avancées méthodologiques et technologiques précitées, quatre objectifs principaux, parallèles et simultanés, sont mis en jeu et font l'objet de recherches intensives et de développements méthodologiques et technologiques notables pour le génie des procédés moderne [7].

### **Le contrôle total multi-échelle du procédé pour augmenter la sélectivité et la productivité : nano- et microfaçonnage sur mesure de matériaux à structure contrôlée**

Cet aspect nécessite « l'intensification » des opérations et l'utilisation d'outils de conceptions nano- et microtechnologiques précises [19]. Par exemple, en ingénierie moléculaire, au lieu d'utiliser des supports poreux en catalyse hétérogène, des matériaux fonctionnels avec des propriétés ciblées sont maintenant conçus et fabriqués. En effet, la maîtrise simultanée de la composition et de la fonctionnalité d'un catalyseur est impérative pour le succès d'un procédé catalytique, et la possibilité de contrôler sa microstructure et sa composition chimique permet de maîtriser l'activité, la sélectivité et la stabilité du catalyseur. Ainsi en contrôlant, *via* la synthèse de nanostructures, la dimension des pores ou des cristallites et en manipulant la stœchiométrie et la composition chimique, il est maintenant possible de fabriquer de nouvelles structures aux échelles moléculaires et supramoléculaires. On peut mentionner la synthèse contrôlée en milieux aqueux de nanoparticules de métaux (nanosphères, nanobâtes, nanocubes, nanotétrapodes, nanoprismes), nanoparticules qui peuvent servir elles-mêmes de blocs de construction pour la synthèse de matériaux avancés (par analogie avec les atomes ou molécules formant les constituants de base de la matière), et qui trouvent aujourd'hui de nombreuses applications, notamment grâce à leurs nouvelles propriétés de surface/stabilité colloïdale, leur biocompatibilité et leur faible toxicité. Citons la synthèse contrôlée des nanoparticules d'or qui ont de nombreuses applications en photonique, en

stockage de l'information, pour les systèmes de détection optiques et électroniques, en thérapeutique et diagnostique, et bien sûr en catalyse [20].

De plus, au niveau plus élevé de la micro-échelle, le contrôle des températures et des compositions locales au moyen d'alimentation et d'échanges de chaleur programmés conduit à une plus grande sélectivité et une plus grande productivité que dans l'approche classique qui impose des réactions et des processus de transferts à l'échelle du volume global confiné. Mais trouver des moyens pour apporter l'énergie au bon endroit afin d'améliorer le procédé durablement en lui fournissant un flux local « informé » d'énergie qui puisse être utilisé de manière intelligente (en utilisant par exemple des transducteurs ultrasoniques, des faisceaux lasers ou des sondes électrochimiques pour promouvoir les transferts ou la réaction) reste encore souvent un défi et ouvre des perspectives dans un proche avenir [21-22].

### **L'intensification des procédés : conception de nouvelles technologies et de nouveaux équipements s'appuyant sur des principes scientifiques, sur de nouveaux modes opératoires ou sur de nouvelles méthodes et échelles de production**

L'intensification des procédés, comme nous l'avons vu, fait appel à des technologies complexes qui remplacent des équipements et procédés de production de grande dimension, gourmands en énergie, chers et polluants, par des dispositifs combinant des opérations multiples dans un même appareillage ou bien par des équipements plus petits, moins coûteux, plus efficaces, plus sécurisés et moins polluants. Ainsi l'intensification des procédés comporte une composante développement durable très forte, avec des diminutions de la consommation des matières premières et d'énergies et de la production de déchets. Elle peut conduire également à une diminution des coûts de production de l'ordre de 30 %.

L'objectif est clairement de produire beaucoup plus (et mieux) en utilisant beaucoup moins. Cela signifie produire plus et mieux dans de plus petits volumes, avec une meilleure efficacité et une plus grande sélectivité, en utilisant moins d'énergie et de matières premières, moins de solvants et avec des coûts de transport réduits. C'est typiquement une approche développement durable que s'est appropriée aujourd'hui le génie des procédés moderne.

### **Intensification des procédés avec des réacteurs multifonctionnels**

Cette intensification peut être obtenue en utilisant des réacteurs multifonctionnels qui couplent ou découplent dans un même équipement des processus élémentaires (transfert-réaction-séparation) pour accroître la productivité ou la sélectivité par rapport au produit désiré et pour faciliter la séparation des sous-produits indésirables (par exemple distillation catalytique, extraction ou absorption réactive, cristallisation réactive, réacteurs membranaires, monolithes, garnissages catalytiques structurés, etc.). La réduction ainsi obtenue du nombre d'équipements unitaires conduit à une diminution des coûts d'investissement et à une meilleure utilisation de l'énergie. De plus, l'amélioration de la sélectivité des produits conduit à une réduction de la consommation des matières premières et donc des coûts de fonctionnement. Cependant, l'utilisation de ces technologies hybrides est aujourd'hui limitée par les problèmes qu'elle soulève au niveau du contrôle et de la simulation et qui conduisent à des

défis intéressants en modélisation dynamique et en conduite et contrôle de procédés fortement non linéaires.

### **Intensification des procédés avec des nouvelles méthodes de production industrielle**

L'intensification des procédés peut aussi être obtenue par de nouvelles méthodes de production ou bien en opérant avec de nouveaux milieux réactionnels reposant aussi sur des principes scientifiques : inversion des sens d'écoulement des fluides pour réaction-régénération dans le même équipement, fonctionnement en régime transitoire, cyclique, pulsé pour augmenter les contacts entre phases [23], ou bien fonctionnement dans des conditions extrêmes de température et de pression, ou fonctionnement avec technologies ultrasons, micro-ondes, rayonnements lumineux ou sous champ magnétique [21], ou bien encore avec l'utilisation de solvants néotériques, *i.e.* fluides supercritiques, liquides dilatables contenant des gaz comprimés, liquides ioniques, liquides fluorés, ces derniers cas relevant des pratiques de la chimie verte [24].

### **Intensification des procédés avec des réacteurs microstructurés (microfluidique)**

Dans d'autres cas l'intensification des procédés peut être réalisée en utilisant des équipements qui font appel à la micro-ingénierie et à la microtechnologie. En effet, il est à prévoir que dans certains cas, les modes de production actuels seront de plus en plus concurrencés par une production décentralisée, modulaire et miniaturisée. Ces technologies qui conduisent à l'utilisation de microréacteurs, micromélangeurs, micro-séparateurs, micro-échangeurs de chaleur, micro-analyseurs et réacteurs microstructurés, contribuent déjà aujourd'hui de manière significative aux domaines de la chimie et du génie chimique [25-28]. Elles ont des applications en chimie combinatoire, en criblage et expérimentation à haut débit pour tester rapidement les catalyseurs et principes actifs et en mesures analytiques avec équipement portable (on peut citer en France ces développements chez Rhodia, IFP Énergies nouvelles ou Sanofi Aventis). Les expérimentations dans les équipements conventionnels de plus grande dimension sont limitées en effet par le coût élevé des réactifs ou par des problèmes de sécurité que l'on ne rencontre pas avec les petits volumes mis en œuvre et avec les conditions inhérentes de sécurité dans des microréacteurs ou séparateurs. Ces technologies sont particulièrement avantageuses dans le cas de certaines applications pharmaceutiques où les productions annuelles ne sont que de quelques tonnes.

Mais ces technologies « microfluidique » ont également des applications en production aux échelles pilote et industrielle. De fait, les micromélangeurs et réacteurs microstructurés, possédant une architecture sous forme de micro-canaux parallèles interdigitaux, de chenilles ou de feuillets superposés (et de nombreuses autres microstructures sophistiquées) qui facilitent le micromélange et les phénomènes de transfert de matière et de chaleur, sont maintenant utilisés également comme outils de production industrielle. Ils permettent d'avoir accès à une large gamme de débits de fluides allant de quelques litres par heure, que l'on rencontre dans les industries pharmaceutiques, cosmétiques, alimentaires, pour la synthèse de produits de spécialités ou pour la génération de crèmes, de mousses ou d'émulsions, jusqu'à plusieurs dizaines de m<sup>3</sup> par heure, pour les industries pétrochimiques, par exemple pour la production de polymères [27], le reformage catalytique à la vapeur avec diminution des émissions polluantes et la synthèse Fischer-Tropsch pour convertir la biomasse en carburants [29], ou les industries de

chimie fine en synthèse organique, par exemple pour la production de produits oxygénés comme l'oxyde de propylène ou le peroxyde d'hydrogène [30-32]. On peut rapporter les résultats récents (2009) du projet européen IMPULSE cité plus haut qui concernent des exemples industriels d'emploi de réacteurs microstructurés pour la production de biens de consommation (Procter & Gamble avec la mise en œuvre d'oxydations de SO<sub>2</sub> avec prototype sur site industriel pour fabriquer des tensioactifs, produire des émulsions contrôlées et encapsuler des parfums, améliorant la qualité des produits et diminuant les frais d'investissement et de fonctionnement), pour la production de produits pharmaceutiques (Glaxo-SmithKline avec la mise en œuvre d'une hydrogénation en continu avec un prototype de démonstration conduisant à de meilleurs rendements, sélectivité et sécurité qu'en technologie conventionnelle, *i.e.* cuve agitée), et pour la production de produits de chimie de spécialité (Solvent Innovation et Evonik-Degussa avec la production en continu de liquides ioniques en améliorant la qualité et la sécurité des produits et en réduisant l'emploi de solvants).

Il faut également souligner que l'un des principaux avantages de l'utilisation des réacteurs microstructurés est qu'un grand nombre de procédés discontinus peuvent être conduits en continu en utilisant ces nouvelles technologies qui s'avèrent beaucoup plus souples que les procédés traditionnels. L'intégration des réacteurs microstructurés au sein des installations existantes est ainsi facilitée.

Voilà pourquoi, en ce qui concerne l'intensification des procédés due à l'utilisation de microréacteurs, il convient de souligner la tendance actuelle en Europe, aux États-Unis, en Inde et dans le monde asiatique, intitulée « de la conception du microréacteur à la conception du procédé utilisant le microréacteur ». Elle consiste à utiliser partiellement ou totalement des dispositifs microstructurés dans un schéma de production pour réaliser en continu (et non plus en batch) non seulement des synthèses de biens de consommation, de chimie de spécialité ou pharmaceutiques, mais aussi pour la production commerciale de plusieurs tonnes par heure incluant des déshydrogénations, des oxydations, des alkylations...

### **L'intensification des procédés : une voie d'avenir pour le génie des procédés moderne ?**

De nombreuses nouvelles technologies ont été et sont en train de se développer dans les industries chimiques et parachimiques conduisant à des améliorations (procédés propres, sécurisés et efficaces), notamment dans des installations de raffinage et pétrochimiques. La *figure 5* présente une vision de ce à quoi pourrait ressembler l'usine du futur qui pratique l'intensification des procédés en utilisant des réacteurs multifonctionnels et des mélangeurs et réacteurs microstructurés [33]. Elle est comparée avec un complexe pétrochimique traditionnel. Il semble qu'aujourd'hui certaines améliorations en ce sens existent avec la construction de complexes industriels de raffinage et pétrochimiques très propres et très efficaces, comme l'illustre la *figure 6* qui présente un complexe pétrochimique Tamoil localisé en Suisse comprenant notamment une unité de craquage catalytique en lit fluidisé pour produire de l'essence à partir de bruts très lourds (conversion profonde : 16 000 bpsd<sup>(1)</sup>).

Cependant, plusieurs obstacles importants devront encore être surmontés avant que l'intensification des procédés soit plus largement répandue. Il faudra prouver par exemple que la maturité et la compétitivité économique de ces nouvelles technologies sont comparables à celles des technologies conventionnelles. Voilà pourquoi, malgré tous



Figure 5 - Vision de l'usine du futur utilisant les technologies d'intensification des procédés (à droite), à comparer avec une usine actuelle (à gauche) : une économie de 30 % en matières premières, énergies et coûts opératoires. Courtesy of DSM.



Figure 6 - Unité de craquage catalytique en lit fluidisé de production d'essence à partir de coupes pétrolières lourdes (raffinerie Tamoil, Collombey, Suisse). Courtesy of Axens-IFP Energies nouvelles.

ces avantages, les possibilités d'utilisation des procédés de séparation multifonctionnels sont à peine exploitées à l'échelle industrielle en pétrochimie, à l'exception de la distillation catalytique (Shell Global Solutions [34-35]). C'est souvent à cause de l'absence de méthodologie générale de conception et d'un « know how » détaillé du procédé.

De plus, le conservatisme des sociétés propriétaires d'installations de production en discontinu ne permettra pas d'accepter facilement une solution de production en continu offerte par l'utilisation de dispositifs microstructurés. Même si la miniaturisation est une approche prometteuse pour réaliser cet objectif ! Et ce, dans une approche et un état d'esprit de durabilité, c'est-à-dire de « génie des procédés vert ».

Cependant, nous avons rapporté de nombreux exemples en chimie fine et de spécialités, montrant que les technologies d'intensification des procédés sont en plein développement et constituent une voie d'avenir pour ce génie des procédés durable.

**La fabrication des propriétés d'usage : formulation et fabrication du produit avec une attention particulière pour les fluides complexes et la technologie des solides (le couple produits/procédés verts)**

En réponse, comme nous l'avons vu précédemment, à la demande du marché pour des produits sophistiqués, (nano/

micro) structurés qui combinent plusieurs fonctions ou propriétés d'usage, ces technologies de fabrication concernent principalement des milieux complexes comme les liquides non newtoniens – incluant gels, polymères hydro-solubles, colloïdes, dispersions, émulsions, microémulsions et suspensions – pour lesquels la rhéologie et les phénomènes interfaciaux jouent un rôle majeur. Elles concernent également la conception et la fabrication des particules solides et des solides divisés que l'on utilise dans 70 % des industries chimiques et connexes, qui requièrent la création et le contrôle de la distribution des tailles des particules dans des opérations telles que la cristallisation, la précipitation, la pulvérisation, la génération d'aérosols et de nanoparticules, mais aussi le contrôle de la morphologie et de la forme finale des particules dans des opérations de calcination, agglomération, compaction et encapsulation. Ces technologies concernent également les solides formulés pour accomplir des opérations intelligentes comme un relargage contrôlé de composants ou de principes actifs.

Dans ces domaines, les coûts combinés de fabrication et de R & D constituent 30 à 35 % du coût du produit, partagés approximativement à parts égales entre ces deux postes, d'où l'importance des collaborations quotidiennes entre de nombreuses firmes industrielles et des partenaires universitaires dans des programmes de recherche-développement portant sur des thèmes multidisciplinaires et multi-échelles d'espace et de temps. Il faut admettre que cela a conduit à de nombreux progrès effectués ces dernières années dans le domaine de la formulation du produit et du contrôle de son procédé de production, en utilisant comme nous le verrons plus loin les méthodes scientifiques du génie des procédés (modélisation et simulation moléculaire pour obtenir la propriété d'usage, simulation, modélisation des processus de cinétique chimique et des phénomènes de transport et de transferts et extrapolation à différentes échelles de la chaîne de production, depuis l'échelle de la molécule jusqu'à celle du laboratoire). Et puisque la ou les propriétés d'usage de produits structurés formulées à l'échelle moléculaire peuvent être altérées par le procédé de production du produit aux échelles du laboratoire et/ou de l'unité industrielle, il est clair que le procédé de production ne peut pas être découplé du procédé de formulation du produit.

Cela souligne encore une fois le besoin de conception simultanée aux échelles du produit et du procédé pour ces produits structurés à valeur d'usage ciblée, et ce, dès la conception à l'échelle moléculaire [36].

Ainsi pour la fabrication de la propriété d'usage d'un produit, on peut alors parler non seulement de formulation ou de génie du produit, mais plus exactement et explicitement, de génie des procédés vert concerné par ce qu'il faut intituler le « couple produits/procédés verts » afin de produire durablement des molécules aux enjeux économiques et environnementaux. En fait, la fabrication de la propriété d'usage du produit relève du génie des procédés moderne « vert » qui est totalement et explicitement concerné par et focalisé sur le couple – produits verts obtenus avec des procédés verts – ; ce que l'on peut résumer sous le vocable « génie des procédés vert ».

Mais comment les opérations peuvent-elles être extrapolées de l'échelle du laboratoire à celle des installations ? Peut-on obtenir le même produit en conservant ses propriétés ?

Quel est le rôle de la conception des équipements dans la détermination des propriétés du produit ? L'ensemble de ces questions ne trouve de réponses que par le biais de la modélisation et de la simulation qui concerne une autre piste de développement de recherche en génie des procédés.

**L'application des méthodes de modélisation et de simulation informatique du génie chimique aux situations réelles : depuis l'échelle moléculaire jusqu'à celle du site de production incluant le contrôle et la sécurité du procédé durable**

Nous avons insisté précédemment sur la nécessaire approche intégrée multidisciplinaire et multi-échelle pour gérer la complexité des phénomènes rencontrés dans la modélisation du triplet processus moléculaire-produit-procédé utilisée pour extrapoler depuis les échelles des nano- et microstructures des valeurs d'usage des produits jusqu'à la méso-échelle de l'équipement de production de ces produits. Mais la tâche du génie des procédés est aussi de concevoir et d'implémenter le système complet de production jusqu'aux échelles macro et méga de l'ensemble des unités de production et de leur environnement. Ce système complet comporte à la fois les procédés individuels et l'ensemble des unités nécessaires à la production du produit désiré et l'intégration de ces procédés individuels dans le site global de production, en termes de matériaux, d'énergie et de services et logistiques qui doivent aussi prendre en compte les demandes du consommateur et plus largement de la société. Naturellement, il est aujourd'hui totalement irréaliste et utopique de penser qu'avec un seul outil de simulation, on pourrait simuler simultanément tous les phénomènes physico-chimiques, hydrodynamiques et de transfert intervenant à toutes les échelles de temps et d'espace rencontrées dans les unités et le site de production (figure 7) – par exemple concevoir une raffinerie à partir des équations de Schrödinger !

Mais c'est l'objectif du génie des procédés d'analyser et de modéliser la complexité des phénomènes à l'échelle considérée pour fournir des résultats nécessaires à la compréhension et à la modélisation des phénomènes intervenant à une échelle supérieure dans l'équipement ou le réacteur considéré pour la production du produit. En partant de l'échelle moléculaire, il est nécessaire de trouver des méthodes et des outils de simulation pour l'intégration fonctionnelle des différentes étapes et échelles du procédé

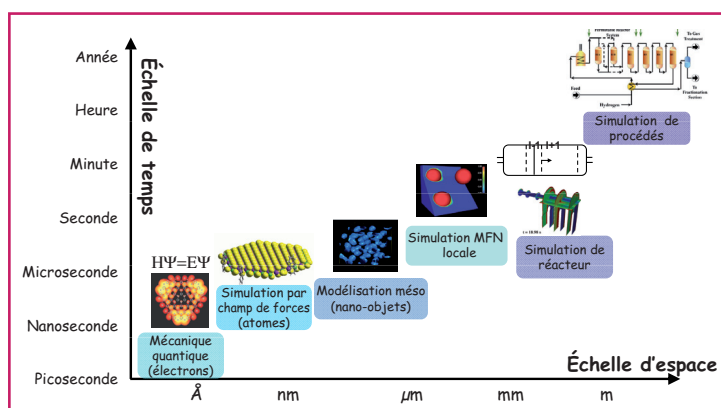


Figure 7 - Les échelles de simulation et de modélisation en génie des procédés.

MFN : mécanique des fluides numérique.

individuel, puis pour l'intégration des procédés individuels de production dans le complexe industriel. Cela nécessite des simulations informatiques capables de concevoir des étapes individuelles, de structurer le procédé dans son ensemble et de placer le procédé individuel de production du produit dans l'ensemble du contexte de production industrielle.

**Modélisation des propriétés moléculaires et physiques aux échelles nano- et microscopiques**

Les énormes avancées récentes dans le domaine des sciences fondamentales moléculaires, dans la puissance de calcul des ordinateurs, dans les algorithmes numériques, conjuguées avec le très grand développement des méthodes de simulation du comportement des matériaux et fluides complexes, jouent un rôle croissant pour la modélisation en génie des procédés.

L'informatique a ouvert le chemin de la modélisation des propriétés physiques et moléculaires aux échelles nano- et microscopiques, et la modélisation moléculaire joue un rôle très important pour le développement des recherches en génie du produit et des procédés associés [37].

Illustrons cela avec la conception moléculaire assistée par ordinateur (CAMD) pour formuler un produit désiré qui est un domaine prometteur dans cette voie. Elle fournit la solution optimale du problème inverse, à savoir : trouver à partir de bases de données et à l'aide de codes de calcul et d'outils de simulation un composé ou un mélange possédant une série de propriétés préalablement définies [38]. Elle est par exemple appliquée avec succès pour la recherche et le choix de nouveaux solvants « verts » utilisés pour certaines réactions dans les industries pharmaceutiques et de chimie de spécialités (Akzo Nobel, AstraZeneca, Britest Ltd, GSK, Syngenta Crop Protection – voir [39]).

Et puisque plus généralement nous sommes intéressés par les propriétés des produits contenant des ingrédients requis et par les procédés pour les fabriquer, la solution de tels problèmes inverses est cruciale pour la formulation des produits. Mais comme il existe de nombreux degrés de liberté, notamment dans les formulations des interactions moléculaires, les temps de calcul sur ordinateur deviennent rapidement excessifs. Aussi en confrontant la modélisation moléculaire avec la réalité, il semble s'établir un consensus selon lequel la simulation et les techniques assistées par ordinateur pour la conception de produits sont utiles dans une première approche, mais les mesures expérimentales sont encore essentielles pour la conception finale. Et à partir des résultats combinés de la théorie moléculaire, de la simulation informatique et des mesures expérimentales, une meilleure compréhension des relations structures/propriétés se développe qui, couplée avec la science du génie chimique et des procédés aux échelles microscopiques (hydrodynamique, transferts de matière et de chaleur), forme aujourd'hui la base de la conception des nouveaux matériaux et procédés [40-41]. C'est ainsi qu'on a vu apparaître récemment la notion de « laboratoire virtuel de conception produit/procédé », que l'utilisateur peut consulter pour tester ses idées de conception d'un nouveau produit à l'aide d'outils de simulation informatique, avant de faire ses expériences pour valider le produit qu'il a conçu. On peut générer ainsi des alternatives de conception de nouveaux produits ou de mélanges pour le couple produit/procédé répondant à la qualité définie *a priori* pour le produit ou le mélange. Avec ce laboratoire virtuel, il s'en suit que des efforts expérimentaux dans le développement de nouveaux produits et procédés associés peuvent être drastiquement diminués et la



recherche peut être focalisée sur un petit nombre de produits alternatifs avec des économies de temps et de ressources. On en trouve des applications pour des produits formulés comme les pesticides et les revêtements de surfaces [42].

### Modélisation dynamique des procédés aux échelles macroscopiques

Par ailleurs, aux échelles macroscopiques, la modélisation dynamique des procédés est également de plus en plus développée. La raison en est que pour être compétitif dans la production de produits ciblés, livrés juste à temps sur le marché à un consommateur dont les besoins changent constamment, cela demande une analyse et une optimisation de la chaîne de production et du temps pris par chaque opération individuelle et/ou dans chaque équipement (échangeurs, réacteurs, pompes, cuves de stockage...). On utilise pour cela les techniques de conception de procédés assistée par ordinateur (CAPE) pour la simulation dynamique des événements en temps réels, techniques qui prennent en compte l'approche multi-échelle d'espace et de temps, ainsi que la compatibilité et l'interconnexion des logiciels de simulation correspondants qui proviennent de différents utilisateurs. Par exemple, on peut citer le programme européen CAPE-OPEN intitulé « Next generation computer aided process engineering open simulation environment » dont le but est de proposer des standards de compatibilité entre les outils de modélisation et les logiciels de simulation de procédés [43-44]. Cela a conduit à la constitution d'un réseau de laboratoires européens œuvrant avec cette approche intégrée de simulateurs et qui standardisent les échanges des modèles de simulation relatifs aux différentes échelles de temps et d'espace de la chaîne de production chimique [45-46].

### Conclusions - Du génie chimique au génie des procédés durables : le génie des procédés moderne « vert »

Nous avons vu que les industries chimiques et connexes sont confrontées à de nombreux défis dans le cadre de la globalisation des marchés et du développement durable.

Pour les industries « pilotées par les procédés » telles que la chimie de base et les intermédiaires chimiques, la pétrochimie, la sidérurgie, les verres et la papeterie, il est nécessaire de poursuivre des recherches sur l'intensification des procédés pour obtenir des procédés innovants, non polluants, parfaitement sûrs et produisant des produits zéro défaut. Pour les industries « de procédés à devenir » produisant les spécialités chimiques, pharmaceutiques et des matériaux hautement spécialisés, dominés par la synthèse et le contrôle d'une propriété d'usage, les technologies qui se développent portent simultanément sur la conception du produit et sur celle de son procédé de fabrication qui, non seulement évoluent rapidement, mais doivent être bien synchronisés car mutuellement dépendant pour des chances de succès d'une production d'un « produit first on the market ». Il faut aussi se mobiliser sur l'intensification des procédés par des recherches portant simultanément sur la formulation et l'ingénierie de production du produit en n'oubliant pas qu'une fois utilisé, le produit doit être sécurisé et ne pas impacter l'environnement (analyse du cycle de vie du produit, du berceau jusqu'à la tombe). C'est le génie des procédés concerné par le couple produits verts/procédés verts, c'est-à-dire le génie des procédés vert.

Ainsi pour satisfaire les demandes du consommateur et les tendances des marchés, les deux types d'industrie requièrent de la part du génie chimique et des procédés une démarche scientifique comportant une approche système intégré multidisciplinaire et multi-échelle de longueur et de temps, appliquée aux différents processus moléculaires et de transport et transferts, complexes, simultanés et souvent couplés qui interviennent aux différentes échelles de la chaîne de production chimique (depuis l'échelle moléculaire jusqu'à celle du site de production). Cette approche moderne du génie chimique et des procédés – l'approche verte du génie des procédés –, fortement mobilisée sur l'intensification des procédés et le génie du couple produit/procédé pour produire beaucoup plus en consommant beaucoup moins et produire plus durable, doit aider à satisfaire les exigences croissantes environnementales, sociétales et économiques et adoucir la transition vers la durabilité en produisant « durablement » des molécules aux enjeux environnementaux et économiques.

Ainsi aujourd'hui, le génie des procédés moderne, à savoir le génie des procédés vert, est complètement inclus dans l'objectif « transformer des molécules en argent » [23], c'est-à-dire raccourcir le temps d'accès au marché : une donnée fondamentale pour la création de la richesse dans le cadre de la globalisation et de la durabilité, avec pour but final une utilisation efficace de l'énergie et des ressources en matières premières au moyen de technologies innovantes.

De trop nombreux congrès de chimie et de génie chimique et des procédés se sont polarisés dans la dernière décennie sur les faiblesses et les menaces (la chimie et les industries connexes font peur !). Mais au contraire aujourd'hui, chercheurs, industriels, clients et consommateurs doivent être confiants. En partageant le gâteau du génie chimique et en mettant en jeu les forces du génie des procédés moderne (vert) qui met en exergue l'intensification des procédés et le génie du couple produit/procédé par l'approche intégrée multi-échelle molécule-produit-procédé, nous trouvons un gâteau à la fois plus riche et plus grand qu'escompté.

### Note et références

- (1) bpsd : nombre de barils que l'unité peut traiter par jour après déduction des jours d'arrêts pour entretien.
- [1] Anastas P.T., Warner J.C., *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford University Press, 1998.
- [2] Anastas P.T., Zimmerman J.B., Design through the 12 principles of green engineering, *Environ. Sci. Technol.*, **2003**, 37(5), p. 94A.
- [3] IChemE Roadmap for 21<sup>st</sup> Century Chemical Engineering, R.-U., 2007.
- [4] de Vries W., *European Roadmap for Process Intensification*, 2007, www.senternovem.nl/mmfiles/Report%2520%2527European%2520Roadmap%2520for%2520Process%2520Intensification%2527\_tcm24-258503\_tcm24-271299.pdf
- [5] Bertrand J., Mavros P., The changing face of chemical engineering research, *Chemical Engineering Research and Design*, **2005**, 83, p. 1.
- [6] García-Serna J., Pérez-Barrigón L., Cocero M.J., New trends for design towards sustainability in chemical engineering: green engineering, *Chemical Engineering Journal*, **2007**, 133, p. 7.
- [7] Charpentier J.-C., Modern chemical engineering in the framework of globalization, sustainability, and technical innovation, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **2007**, 46(11), p. 3465.
- [8] Dudukovic M.P., Relevance of multiphase reaction engineering to modern technological challenges, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **2007**, 46(25), p. 8674.
- [9] Dudukovic M.P., Frontiers in reactor engineering, *Science*, **2009**, 326, p. 698.
- [10] REACH (Regulation, Evaluation, Authorization of Chemicals) : [http://ec.europa.eu/environment/chemicals/reach/reach\\_intro.htm](http://ec.europa.eu/environment/chemicals/reach/reach_intro.htm).
- [11] IMPULSE, Integrated Multiscale Process Units with Locally Structured Elements : [www.impulse-project.org](http://www.impulse-project.org).
- [12] Jenck J., Agterberg F., Droscher M.J., Products and processes for a sustainable chemical industry: a review of achievements and prospects, *Green Chem.*, **2004**, 6, p. 544.
- [13] Matlosz M., Microprocess engineering, process intensification and multiscale design, *VDI Berichte*, **2008**, 2039, p. 77.
- [14] Charpentier J.-C., The triplet "molecular process-product-process" engineering: the future of chemical engineering?, *Chemical Engineering Science*, **2002**, 57, p. 4667.
- [15] [www.nanomempro.euromemhouse.com](http://www.nanomempro.euromemhouse.com).
- [16] Rios G., Belleville M.-P., Paolucci-Jeanjean D., Membrane engineering in biotechnology: quo vamus?, *Trends Biotechnol.*, **2007**, 25(6), p. 242.

