

Éditorial

Le premier programme du pôle de compétitivité Axelera a été centré sur l'intensification des procédés pour une véritable rupture technologique.

Mettre de nouveaux outils au service de la chimie pour concilier efficacité environnementale, performance de production et pertinence de l'offre, telle est la vocation de l'intensification des procédés. Enjeu majeur pour une industrie au cœur de toutes les filières, l'intensification des procédés revisite en profondeur les bases des procédés. Elle privilégie la mise en œuvre de nouvelles technologies, d'unités de fabrication plus compactes, plus discrètes et moins consommatrices en ressources (fossiles, eau, énergie, ...). Conduite dans le cadre d'un programme associant universitaires et industriels et financé par le FUI (*Fonds Unique Interministériel*), cette approche technologique a jeté les bases de l'usine du futur, symbole d'un changement d'échelle et d'une nouvelle façon de produire.

Trois ans de recherche ont déjà permis à Axelera de structurer les initiatives en un projet cohérent et baliser le chemin de l'éco-conception des produits et de l'éco-efficience des procédés avec des résultats concrets comme de nouveaux modes d'expérimentation capables de développer ces nouvelles technologies ou des prototypes d'équipements qui répondent aux nouveaux standards de production et préfigurent le passage au stade industriel.

Le succès de ce programme « Intensification des procédés » a permis de réaliser le cahier des charges fonctionnel de l'usine du futur et d'en concevoir les outils, mais aussi de fédérer une communauté scientifique autour de ce défi. Quelques-uns des résultats obtenus dans ce programme sont présentés dans ce numéro spécial de *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles*.

Je remercie l'ensemble des contributeurs à cette parution ainsi que Cécile Barrère-Tricca qui en a assuré la coordination et spécialement Louis Trépiéd pour tout le soutien qu'il a apporté à ce projet et Jean-Claude Charpentier, supporteur de la première heure de cette discipline, qui ont accepté d'introduire ce numéro spécial avec moi.

S. Jullian

*Président du Comité Scientifique d'Axelera
Directeur Scientifique d'IFP Energies nouvelles
sophie.jullian@ifpen.fr*

VOUS AVEZ DIT « INTENSIFICATION DES PROCÉDÉS », OU COMMENT PRODUIRE BEAUCOUP PLUS ET MIEUX EN CONSOMMANT BEAUCOUP MOINS ?

Les progrès effectués en recherche de base en génie chimique et en génie des procédés ont conduit à une meilleure compréhension et modélisation des phénomènes physico-(bio)chimiques et de transfert de matière et de chaleur intervenant aux différentes échelles de temps et de longueur de la chaîne de production chimique et pétrolière (depuis l'échelle de la molécule ou du site catalytique jusqu'aux échelles des unités et du site de production). Ainsi, il est possible aujourd'hui de concevoir de nouveaux modes opératoires avec des équipements existants ou de concevoir de nouveaux équipements fondés sur des principes scientifiques conduisant à de nouvelles méthodes et échelles de production : on utilise la notion d'« intensification des procédés ».

L'intensification des procédés pour répondre à une demande sociétale de durabilité

Pour répondre à une 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, la chimie et le génie chimique et, plus généralement, le génie des procédés, sont désormais confrontés à de nouveaux défis portant sur des systèmes complexes, notamment à l'échelle des molécules, à l'échelle des produits et à l'échelle des procédés.

En effet, pour la production *des produits de commodités et des produits intermédiaires*, 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, ce qui nécessite souvent des recherches plus avancées sur le procédé lui-même.

Le défi est de produire d'énormes quantités au moindre coût, mais des facteurs tels que la sécurité, la santé, les aspects environnementaux doivent être pris en compte, incluant des technologies non polluantes, parfaitement sécurisées et automatisées, la raréfaction des matières premières et de l'énergie, ainsi que le recyclage des produits et sous-produits (voir la réglementation REACH et les méthodes d'ACV appliquées aux procédés). De plus, tendre vers des équipements pour une production à l'échelle mondiale pourra bientôt nécessiter un changement partiel ou total de technologie, sachant que les technologies actuelles ne peuvent plus être mises en œuvre dans un esprit « *on construit toujours plus gros* », si l'on doit appréhender des capacités de production encore jamais rencontrées dans les industries chimiques et connexes. Aujourd'hui, les chercheurs et les industriels font donc face à une demande « *d'intensification des procédés* » de production conduisant à un changement dans les technologies afin d'extrapoler à très grande échelle et de manière fiable de nouveaux procédés, en passant d'une échelle intermédiaire à une très grande échelle pour laquelle il n'existe pas d'expérience antérieure.

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, cosmétique, agro-alimentaire) mettent en jeu l'interface chimie/biologie. Toujours en chimie de spécialités, les productions 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 fioul, hydrocarbures et produits oxygénés. Aujourd'hui, les objectifs du marché pour les produits à court temps de vie et à grandes marges bénéficiaires sont tels que les ventes et la compétitivité sont autant dominées par la propriété d'usage du produit que par ses critères de qualité et fonctions incluant performance et convenance. Et ces produits à haute valeur ajoutée 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...).

Quelles technologies pour répondre à cette demande d'intensification des procédés ?

L'intensification des procédés fait appel à des technologies plus ou moins complexes ou sophistiquées 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 dans un nombre moindre d'appareillages ou bien par des équipements plus petits, moins coûteux, plus efficaces, mieux contrôlés, plus sécurisés et moins polluants. Ainsi, l'intensification des procédés comporte une composante « développement durable » très forte avec les diminutions de la consommation de matières premières et d'énergie 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 approprié aujourd'hui le génie des procédés moderne.

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, réaction et adsorption, cristallisation réactive, réacteurs membranaires, monolithes, garnissages catalytiques structurés, etc.), mais aussi réaction et échange de chaleur, réaction et génération de puissance, 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 dans 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'elles soulèvent au niveau du contrôle et de la simulation, problèmes qui conduisent à des défis intéressants en modélisation dynamique et en conduite et contrôle de procédés fortement non-linéaires.

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, ou bien dans des conditions extrêmes de température et de pression, fonctionnement avec technologies ultrasons, micro-ondes, rayonnements lumineux ou sous champ magnétique, ou bien encore fonctionnement avec l'utilisation de fluides supercritiques, de liquides ioniques, de liquides fluorés, ces deux derniers cas de fonctionnement relevant des pratiques de la chimie verte).

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 *micro-technologie*. 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 micro-réacteurs, de micro-mélangeurs, de micro-séparateurs, de micro-échangeurs de chaleur, de micro-analyseurs et de réacteurs micro-structurés, contribuent déjà aujourd'hui de manière significative aux domaines de la chimie et du génie chimique. Elles ont des applications en chimie combinatoire, en criblage et expérimentation à haut débit pour tester rapidement les catalyseurs et en mesures analytiques avec équipement portable. En effet, les expérimentations dans les équipements conventionnels de plus grande dimension sont limitées 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 les conditions inhérentes de sécurité dans des micro-réacteurs ou séparateurs.

Ces technologies « microfluidiques » ont également des applications en production aux échelles pilote et industrielle. De fait, les micro-mélangeurs et réacteurs micro-structurés, possédant par exemple une architecture sous forme de micro-canaux parallèles interdigitaux, de chenilles ou de feuillet superposés qui facilitent le micro-mélange et les phénomènes de transfert de matière et de chaleur, sont maintenant utilisés également comme outils de production industrielle. Ils permettent d'utiliser une large gamme de débits de fluides allant de quelques litres/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 m³/heure, pour les industries chimique et pétrochimique par exemple pour la production de polymères ou de produits oxygénés.

Il faut souligner que l'un des principaux avantages de l'utilisation des réacteurs micro-structurés est qu'un grand nombre de procédés discontinus peut être conduit en continu en utilisant ces nouvelles technologies qui s'avèrent beaucoup plus souples que les procédés traditionnels. Et l'intégration des réacteurs micro-structurés au sein des installations existantes est ainsi facilitée.

Mais cela nécessite une approche intégrée multi-échelle de temps et de dimension dans les principes de conception des procédés, *i.e.*, adapter la structure, l'architecture et les équipements du procédé aux conditions locales des transformations physico-(bio)chimiques et de mélange plutôt que d'adapter la chimie et les conditions opératoires aux équipements existant et à leurs limites inhérentes d'utilisation (voir le projet européen *Integrated Multiscale Process Units with Locally Structured Elements – IMPULSE*, <http://moodle-impulse.inpl-nancy.fr/>) 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 micro-structurés pour fournir les conditions opératoires locales requises pour la transformation chimique. Ainsi, les unités de production à grande échelle pourraient être créées par intégration et interconnexion d'éléments divers, localement structurés à petite échelle au sein des unités de macro production à grande échelle.

Voilà pourquoi, en ce qui concerne l'intensification des procédés due à l'utilisation de micro-réacteurs, il convient de souligner la tendance actuelle en Europe, aux USA, en Inde et dans le monde asiatique, intitulée « de la conception du micro-réacteur à la conception du procédé utilisant le micro-réacteur ». Elle consiste à utiliser partiellement ou totalement des dispositifs micro-structurés 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 et autres.

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

De nombreuses nouvelles technologies ont été et sont en train de se développer dans les industries chimique, pétrochimique et parachimique, conduisant à des améliorations (procédés propres, sécurisés et efficaces), notamment dans des installations de raffinage et pétrochimiques. On présente sur la figure 1 une vision de rêve de ce à quoi pourrait ressembler l'usine du futur pratiquant l'intensification des procédés en utilisant des réacteurs multifonctionnels et des mélangeurs et réacteurs micro-structurés (Stanckiewicz et Moulijn (2000) *Chem. Eng. Progr.* 96, 22). Elle est comparée avec un complexe pétrochimique traditionnel. Mais ce n'est plus un rêve car il semble que quelques améliorations en ce sens existent aujourd'hui avec la construction de complexes industriels de raffinage et pétrochimiques très propres et très efficaces. Ainsi, pour illustrer ce propos, la figure 2 présente un complexe pétrochimique TAMOIL localisé en Suisse qui comprend notamment une unité de craquage catalytique en lit fluidisé (procédé IFP Energies nouvelles-Axens) pour produire de l'essence à partir de bruts très lourds (conversion profonde 16 000 bpsd).

On peut prendre un autre exemple de faisabilité industrielle d'intensification des procédés, celui concernant la production d'isooctène à partir du butène, en comparant, d'une part, une technologie utilisant une catalyse biphasique liquide-liquide avec sels de Ni et un solvant organique (procédé Dimersol) et, d'autre part, une technologie utilisant un liquide ionique non aqueux au lieu du solvant organique (procédé Difasol IFP Energies nouvelles-Axens). Avec le procédé Dimersol, la production d'isooctène est réalisée avec 4 réacteurs de 120 m³ alors que le procédé Difasol est réalisé dans un unique réacteur de 50 m³, avec une consommation de catalyseur divisée par un facteur 10 et un meilleur rendement en dimères.

On doit mentionner également les activités du pôle mondial de compétitivité AXELERA (www.axelera.org), dont un des programmes de recherche-développement dans le domaine chimie-environnement est ciblé intensification des procédés, avec comme thématique l'usine du futur.

Cependant, à l'avenir, plusieurs obstacles importants devront encore être surmontés avant que certaines nouvelles technologies nouvelles de l'intensification des procédés soient plus largement répandues. Il faudra prouver, par exemple, que la maturité et la compétitivité économique de ces nouvelles technologies sont comparables avec celles des technologies conventionnelles. Voilà

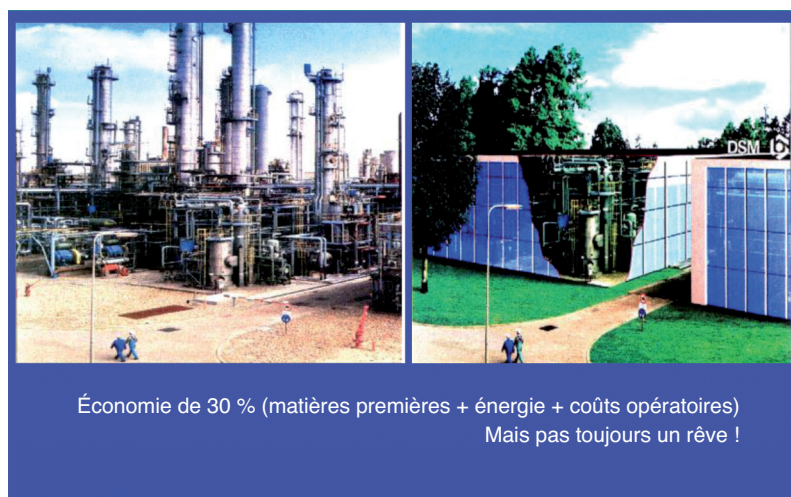


Figure 1

Une vision de l'usine du futur mettant en oeuvre l'utilisation des technologies de l'intensification des procédés (à droite), à comparer avec une usine actuelle (à gauche).



Figure 2

Unité FCC de production d'essence à partir de coupes pétrolières lourdes.

pourquoi, malgré tous leurs avantages, les possibilités d'utilisation des procédés de séparation hybrides sont à peine exploitées à l'échelle industrielle. Dans de nombreux cas, la cause en est l'absence de méthodologie générale de conception et d'un « *know how* » détaillé du procédé. Également, 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 micro-structurés. Même si la miniaturisation est une approche

prometteuse pour réaliser cet objectif ! Et ce, dans une approche et un état d'esprit de durabilité « i.e., génie des procédés moderne vert ».

En tout cas, on trouvera dans le présent numéro d'*Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles*, des contributions qui offrent des perspectives intéressantes et illustrent les considérations précédentes sur l'intensification des procédés. Elles s'inscrivent principalement dans la perspective d'utilisation de *réacteurs multifonctionnels* pour production de produits ciblés, de chaleur ou d'énergie ou bien dans la perspective d'une meilleure connaissance et appréhension des performances de *contacteurs polyphasiques micro-structurés* pour échange de chaleur ou pour criblage de catalyseur.

On trouvera également des articles entrant dans le cadre de la durabilité des procédés chimiques dans l'industrie pétrolière, avec la stabilité thermique de réacteurs chimiques et l'analyse du Cycle de Vie appliquée au procédé de reformage catalytique du naphta.

Pr. J.C. Charpentier

Ancien Président de la Fédération Européenne de Génie Chimique

Ancien Directeur de l'ENSIC, de l'ESCPE Lyon

et du Département Sciences pour l'Ingénieur du CNRS

Laboratoire Réactions et Génie des Procédés CNRS/ENSIC/INPL Nancy-Université

jean-claude.charpentier@ensic.inpl-nancy.fr

L'INTENSIFICATION DES PROCÉDÉS : UN ENJEU POUR LA CHIMIE

Le principe d'économie est un principe universel qui s'applique à l'ensemble des activités humaines. Le désormais célèbre mot d'ordre de l'intensification des procédés « faire plus avec moins » s'intègre parfaitement dans ce contexte général et les chimistes ont incontestablement fait le bon choix en se l'appropriant au point d'en faire un axe majeur de leurs stratégies de développement. Les Pouvoirs Publics, de leur côté, ont, dès le début, pris l'option de soutenir cette nouvelle façon de produire et décidé, dans le cadre des prémices des pôles de compétitivité en 2005, à l'occasion de ce qu'il est convenu d'appeler « l'appel à projets 0 », d'apporter leur soutien à une motivante opération du pôle AXELERA et des fondateurs de ce pôle : IFP Energies nouvelles bien sûr, mais également ARKEMA, RHODIA et le CNRS. Le projet, simplement appelé « intensification des procédés », est emblématique de cette nouvelle posture des industries chimiques. Fort de ses résultats, il a connu un vif succès dont on ne peut que se féliciter collectivement.

Sur le fond, de quoi s'agit-il ?

Il s'agit bien sûr de réduire la taille des installations de production grâce aux micro-réacteurs et aux outils micro-structurés. Sentant l'importance de cette approche, la DGCIS (Direction Générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services) a d'ailleurs conduit en 2006 une étude sur ce thème qui a mis en évidence un positionnement en retrait de notre pays par rapport à ses principaux compétiteurs. Et ceci appelle une question : intensifier un procédé est-ce encore de la chimie ? Certainement quand il s'agit du cœur des processus réactifs, de la séparation et de l'analyse des produits. Mais c'est aussi plus que cela : c'est une nouvelle conception de l'usine qui vise à optimiser en permanence l'ensemble des processus de production, avec bien évidemment la recherche d'économies d'énergie, la maîtrise des rejets pour une empreinte environnementale acceptable, mais également la revisite des flux-produits sur les sites et la redéfinition des postes de travail (en particulier sur les aspects HSE). On est sans aucun doute en présence d'une évolution technologique majeure grâce aux micro- (nano- ?) technologies, mais également face à une évolution des comportements, ce qui ne sera de plein effet qu'à l'issue d'importants efforts de formation : il n'y aura pas d'intensification des procédés, j'allais dire « durable », en l'absence d'une réflexion de fond sur « l'usine du futur », corrélat indissociable de l'intensification des procédés.

Face à cette évolution, quelles sont les missions des pouvoirs publics ? Ils doivent en premier lieu gérer des objectifs contradictoires : d'une part, veiller à la bonne intégration des sites de l'industrie chimique dans leur écosystème et le Grenelle de l'environnement a bien confirmé cette impérieuse nécessité, mais, d'autre part, notre industrie chimique doit rester compétitive ; mieux, elle doit gagner des parts de marché et faire de ces nouvelles obligations un avantage compétitif. C'est à ce carrefour que les procédés intensifiés prennent toute leur importance et que les pouvoirs publics positionnent leur action.

L'intensification des procédés est par essence une activité pluridisciplinaire qui ne peut donc trouver son régime de croisière que dans le cadre de recherches collaboratives. C'est la raison pour laquelle ce thème figure parmi les objectifs du programme de l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) « chimie durable - industries – innovation » et que, de son côté, le FUI soutient des actions collaboratives sur ce sujet. L'intensification des procédés fait également partie des technologies-clés 2015 du Ministère de l'Industrie. Comme cela est rappelé, il s'agit clairement d'un sujet à fort enjeu pour la compétitivité industrielle de la France dans la mesure où les systèmes intensifiés représentent une opportunité de maintien des activités industrielles et des compétences scientifiques liées à la chimie en France. Il y est également dit que l'enjeu pour les années à venir ne se situe pas tant dans le développement toujours plus évolué de nouveaux dispositifs intensifiés, que dans l'intégration de ces nouveaux dispositifs dans des procédés de production déjà existants (procédé multi-échelle, passage batch/continu). Ce point est important car il intègre l'innovation dans les procédés intensifiés comme un élément de progrès incrémental et non uniquement comme rupture dans une industrie à fort investissement capitalistique.

Enfin, il est à noter que la plate-forme Suschem-France a également intégré ce sujet en bonne place de sa feuille de route à l'issue d'un travail collaboratif très constructif.

Il est donc particulièrement opportun de voir un numéro spécial de la revue *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles*, traiter d'un sujet aussi prometteur, en le qualifiant d'ailleurs « d'éco-conception des procédés », renforçant par là-même son rôle sur la réconciliation de la chimie avec son environnement.

L. Trépied

*Chargé de mission au Bureau de la Chimie de la Direction Générale
de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services (DGCIS)*

louis.trepied@finances.gouv.fr



Editorial

The first programme of the Axelera competitiveness pole has focused on process intensification for radical technological disruption.

The purpose of process intensification is to place new tools at the service of chemistry in order to reconcile environmental efficiency, production performance and relevance of the offer. A major challenge for an industry at the hub of every technology, process intensification completely revisits the fundamentals of the processes. It favours the implementation of new technologies and manufacturing units that are more compact, more discrete and that consume fewer resources (fossil fuels, water, energy, etc.). Conducted as part of a programme associating university and industrial partners and funded by the FUI (*Fonds Unique Interministériel*), this technological approach laid the foundations for the plant of the future, symbol of a change of scale and a new way of producing.

Three years of research have already enabled Axelera to structure the initiatives in a single coherent project and mark out the path of product eco-design and process eco-efficiency with concrete results such as new experimentation modes capable of developing these new technologies or equipment prototypes which meet the new production standards and foreshadow the transition to the industrial stage.

Thanks to the success of this “Process intensification” programme, it has been possible to produce the functional specifications of the plant of the future and design its tools, but also federate a scientific community around this challenge. Some of the results obtained in this programme are included in this special issue of *Oil & Gas Science and Technology – Revue d’IFP Energies nouvelles*.

I would like to thank all contributors to this publication as well as Cécile Barrère-Trica, who was responsible for coordination, in particular Louis Trépied for all the support he gave this project, and Jean-Claude Charpentier, who supported this discipline from the outset and who agreed to write the introduction of this special issue with me.

S. Jullian

*President of Axelera Scientific Committee
Scientific Director of IFP Energies nouvelles
sophie.jullian@ifpen.fr*

DID YOU SAY “PROCESS INTENSIFICATION”, OR HOW TO PRODUCE MUCH MORE AND BETTER WHILE CONSUMING MUCH LESS?

Progress made in basic research in chemical and process engineering has led to a better understanding and modeling of the physical-(bio) chemical phenomena and mass and heat transfer occurring on different time and length scales of the chemical and oil supply chain (from the scale of the molecule or the catalytic site up to the scales of the production units and the site). Consequently, it is now possible to design new operating modes with existing equipment or design novel equipment based on scientific principles leading to new production methods and scales of production: This is mentioned as “*process intensification*”.

Process intensification to meet a societal request for sustainability

To respond to a societal request for sustainable development (sustainability) and to offer a contribution in the fight against environmental destruction and the most often non sustainable mankind of the today world production, chemistry and chemical engineering and more generally process engineering are faced with new challenges involving complex systems at the molecular-scale, at the product-scale, and at the process-scale.

For the production of *commodity and intermediate products*, which still currently represent a majority sector for the economy (40% of the markets), and for which patents usually do not concern the products but rather the process, these processes are no longer be selected based on economic exploitation alone. On the contrary, the compensation resulting from increased selectivity and savings linked to the process itself must be considered, which frequently needs further research on the process itself. The challenge is who can produce large quantities at the lowest possible cost, but factors such as safety, healthy, environmental aspects must be considered including perfectly safe and controlled non polluting technologies, the reduction of raw materials and energy losses, as well as the recycling of products/by-products recyclability: just mention the REACH European regulations for chemical products and the LCA methods applied to processes. Furthermore the trend towards global-scale facilities may soon require a total or more probably a partial change in technology, with the current technologies no longer capable of being built “*just a big bigger*”, if one has to handle throughputs never before seen in chemical and related industries. Researchers and industrialists are faced with a need of “*process intensification*” leading to a change in technologies to scale-up the reliability of new processes from the current semi-work scale to a vast scale where there is no previous experience.

In addition fine chemistry, new specialties, active material chemistry and related industries, and highly specialized materials with the corresponding industries (health, cosmetics, agriculture and food) involve the chemistry/biology interface. Still in the area of speciality chemistry, production also implies upgrading and conversion of heavy petroleum feedstocks and intermediates, conversion of coal-derived chemicals or synthesis gas into fuels, hydrocarbons or oxygenates. Today the market objectives for these products with short-lifetime and high-margin products are such that the sales and competitiveness are dominated by the end-use property of a product as well as its quality features and functions including performance and convenience. And these high-margin products which involve customer-designed or perceived formulation require also “*process intensification*” with new plants, which are no longer optimized to produce one product at good quality and low cost. Actually the need is for multipurpose systems and generic equipments, small in size, easily cleaned, disinfected, and easily switched over to other recipes (flexible production, small batches, modular set-ups).

Which technologies to meet this demand for process intensification?

Process intensification refers to more and less complex technologies that replace large, expensive, energy-intensive equipment or processes with ones that are smaller, less costly, more efficient plants, minimizing environmental impact, increasing safety and improving remote control and automation, or that combine multiple operations into a single apparatus or into fewer devices. Production cost reductions of 30% may be obtained.

The aim is clearly to produce much more (and better) while using much less.

That means producing more and better in smaller volumes, with better effectiveness and greater selectivity, reducing energy consumption and material usage, fewer solvents and with reduced transport costs. This involves a sustainable-related dimension which is now adopted by the modern chemical and process engineering.

This intensification can be obtained by using *multifunctional reactors* that couples or uncouples elementary processes (transfer - reaction - separation) within the same equipment to increase productivity and/or or selectivity, with respect to the desired product, and to facilitate the separation of undesirable by-products (for example catalytic distillation, absorption or extraction

with chemical reaction, reaction and adsorption, reactive crystallization, membrane reactors, monoliths, structured catalytic packings, etc., but also reaction and heat transfer, reaction and power generation, etc). The reduction thus obtained in the number of equipment units leads to a reduction in capital costs and better energy use.

Furthermore improved product selectivity leads to a reduction in raw material consumption and hence, operating costs.

However it should be mentioned that the use of these hybrid technologies is still limited by the resulting problems with control and simulation, which leads to interesting challenging problems in dynamic modeling, design, operation and strong non-linear control.

Process intensification can also be obtained by *new operating modes of production* also based on scientific principles (reversed flow for reaction-regeneration, unsteady operations, cyclic processes, pulsed operation to increase the contact between phases, extreme pressure and temperature conditions, ultrasonic and microwaves technologies, high gravity fields,...), or by *operating with new reaction environments* (use of supercritical fluids, ionic liquids, fluorinated liquids, the latter two cases being related to the green chemistry practices).

In other cases process intensification can be obtained by using *micro engineering and micro technology*. Currently production modes are increasingly challenged by decentralization, modularization, and miniaturization. These technologies, which lead to the use of microreactors, micromixers, microseparators, micro-heat exchangers, microanalyzers and structured microreactors are already involved in the fields of chemistry and chemical engineering. They have applications in combinatorial chemistry, high-throughput screening and experimentation to quickly test catalysts, and portable analytical measurement devices. Indeed experimentation at the conventional bench-scale level is limited by the high cost of the reagents and safety concerns which the small volumes and inherent safety characteristics of the microreactors or microseparators can effectively eliminate.

These “microfluidic” technologies also have applications in production at pilot and industrial scales. Actually micromixers and microstructured reactors, having for example microchannels architecture in the form of interdigital parallel microchannels, caterpillar, or microstructured mixers built up by replicative mixing foil sets to facilitate the micromixing and the heat and mass transfer phenomena are now applied to perform industrial productions.

They make it possible to use a broad range of flow ranging from a few litres/hour applied in pharmaceutical, cosmetics and food industries to carry out advanced synthesis of fine chemicals or speciality products, as well as for the generation of creams, foams and emulsions, to several tens of m³/hour encountered in chemical and petrochemical industries, *i.e.* for the production of polymers or oxygenates.

It should be stressed that one of the main advantages with the use of microstructured reactor technology is that a lot of industrial batch processes can be run continuously by using this technology which provides more flexibility compared to traditional plants. The integration of microstructured reactors within existing plants is thus facilitated.

However, this requires an integrated multi time and length scale approach in the process design principles, *i.e.*, to adapt the process structure, architecture and equipment to the local conditions of the mixing and the physical (bio)chemical transformations rather than to adapting chemistry and operating conditions to the existing equipment limitations (see the European project Integrated Multiscale Process Units with Locally Structured Elements – IMPULSE, <http://moodle-impulse.inpl-nancy.fr/>) whose aim is to obtain a radical improvement in large-scale production thanks to a targeted integration within production units of small-scale, microstructured innovative equipment to provide the local operating conditions necessary for chemical conversion. The large-scale production units could therefore be created by integration and interconnection of various elements, locally structured on a small scale within the large-scale macroproduction units.

Therefore concerning process intensification due to the use of microstructured reactors, it is clear to underline the today current trend in Europe, USA, India and Asia which can be called “from microreactor design to microreactor process design”. It leads to an appropriate integration of these intensified devices into complete production units to perform in continuous production (and not in

batch) not only syntheses for consumer goods, specialties or pharmaceuticals, but also for commercial productions up to of several tons per hour including dehydrogenation, oxidation, alkylation and others.

Process intensification: a promising avenue for the modern green process engineering?

Many new technologies have been and are being developed in chemical, petrochemical and related industries leading to improvements (clean, safe and efficient processes), in particular in refineries and petrochemical installations. Figure 1 shows a vision of how the future plant that



Figure 1

A vision of the future plant implementing process intensification technologies (on the right), compared with a current plant (on the left).

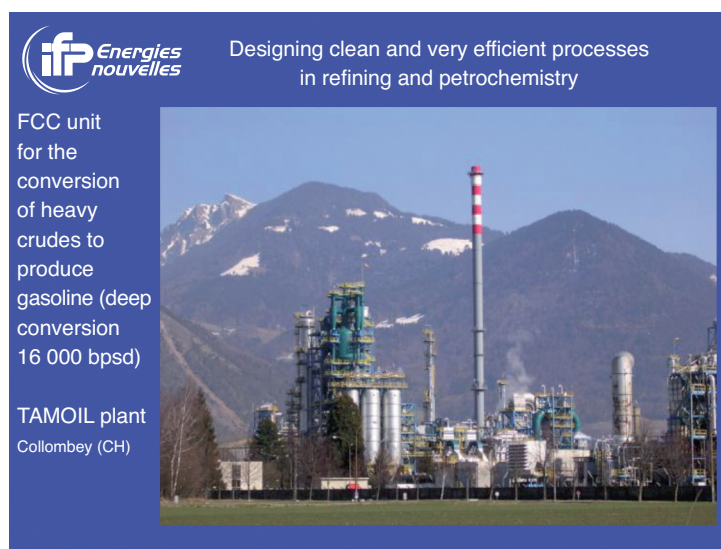


Figure 2

FCC Unit for production of gasoline from heavy oil cuts.

uses process intensification involving unit operation hybridation and microstructured mixers and reactors could look like (Stanckiewicz and Moulijn (2000) *Chem. Eng. Prog.* 96, 22). It is compared to a conventional petrochemical plant.

But it is no longer a dream since some improvements are already obtained, with the design of clean and very efficient processes in refining and petrochemical plants. To illustrate see figure 2 which shows a TAMOIL plant located in Switzerland, including a fluidized catalytic cracking (FCC) unit (process IFP Energies nouvelles-Axens) for the valorisation of heavy crude oil to produce gasoline in a quantity of 16,000 bpsd (*e.g.*, deep conversion).

We can take another example of the industrial feasibility of process intensification, that concerning the production of isooctene from butene, with a comparison between a technology using a biphasic liquid-liquid catalysis with Ni salts and an organic solvent (Dimersol process) and a technology using a non-aqueous ionic liquid instead of the organic solvent (IFP Energies nouvelles-Axens Difasol). With the Dimersol process the production of isooctene is carried out with four 120 m³ reactors whereas the Difasol process is carried out in a single 50 m³, with a catalyst consumption divided by a factor 10 and a better yield in dimers.

It is also worth noting the activities of the AXELERA mondial French competitiveness cluster (www.axelera.org): One of the R&D programmes in the chemistry-environment field is targeted process intensification, with the plant of the future as its theme.

However in the future several important obstacles will still have to be overcome before certain new technologies of process intensification are more widely adapted, such as the maturity and economic competitiveness of the new technologies, compared to the conventional technologies. Consequently, despite all its advantages, the possibilities of using hybrid separations are still barely exploited on industrial scale. In many cases, the cause is due to the lack of a general design methodology and a detailed “know how” of the process. Also the conservatism of plant owners using batch processes will not easily accept continuous processing solutions with microstructured devices. Even if the miniaturization is a promising approach to achieve this objective! And this with a sustainability approach in mind, “*i.e.* green modern process engineering”.

Whatever the case, one will find in the present issue of *Oil & Gas Science and Technology – Revue d’IFP Energies nouvelles* contributions which offer interesting perspectives and which illustrate the previous considerations on process intensification. They apply mainly to the perspective of using multifunctional reactors to produce targeted products, heat or energy or in the perspective of a better knowledge and understanding of the performance of *microstructured multiphase contactors* for heat transfer or catalyst screening.

There are also articles related to the sustainability of chemical processes in the oil industry, with the thermal stability of chemical reactors and the life cycle analysis applied to the catalytic naphtha reforming process.

Pr. J.C. Charpentier

Former President of the European Federation of Chemical Engineering

Former Director of the ENSIC, ESCPE Lyon and the Department of Engineering Sciences of CNRS

Laboratoire Réactions et Génie des Procédés, CNRS/ENSIC/INPL Nancy-Université

jean-claude.charpentier@ensic.inpl-nancy.fr

PROCESS INTENSIFICATION: A CHALLENGE FOR CHEMISTRY

The principle of economy is a universal principle that applies to all human activities. The now famous slogan of process intensification “do more with less” perfectly fits in this general context and chemists have undoubtedly made the right choice in appropriating it to the point of turning it into a major axis of their development strategies. Meanwhile, from the early

beginnings, the public authorities opted to support this new way of producing and decided at the start of the competitiveness clusters, in 2005, during the so-called “call for projects 0”, to lend their support to the AXELERA association, a motivating operation created by the cluster’s founding members, namely IFP Energies nouvelles of course, but also ARKEMA, RHODIA and CNRS. The project, which is simply called “process intensification”, is emblematic of this new standpoint by the chemical industries. On the strength of its results, it had a resounding success that can only be welcomed collectively.

What merits is this based on?

The aim is of course to reduce the size of production facilities through microreactors and microstructured tools. Sensing the importance of this approach, DGCIS (*General Directorate for Competitiveness, Industry and Services*) prompted a study, in 2006, on the theme, which highlighted a weak positioning in our country compared with its main competitors. Which prompts a question: Is process intensification still considered as chemistry? Certainly, when it concerns the core of reactive processes, separation and analysis of products. But it is also more than that: it is a new plant design that aims to permanently optimise the entire production process, clearly with the search for energy savings, control of discharges for an acceptable environmental footprint, and also by revisiting the flow of products on sites and the redefinition of jobs (especially regarding HSE aspects). We are undoubtedly in the presence of a major technological breakthrough owing to micro-(nano?) technologies, but, we are also faced with a change in behaviours, which will be in full effect only after extensive training efforts: there will be no process intensification, I was about to say “sustainable”, in the absence of a thorough examination of the “plant of the future”, inseparable correlate of process intensification.

Faced with this change, what are the duties of the public authorities? They must first deal with the conflicting objectives: on the one hand, ensure the successful integration of chemical industry sites in their ecosystem, as the Grenelle Environment Forum has confirmed this urgent need. But, on the other hand, our chemical industry must remain competitive, better still, it must gain market shares and make these new obligations a competitive advantage. It is at this crossroads that intensified processes take on their full importance and that the public authorities position their action.

Process intensification is inherently a multidisciplinary activity that can therefore only reach cruising speed within the context of collaborative research. That is the reason why this theme is among the objectives of the ANR (*Agence Nationale de la Recherche*) programme: “sustainable chemistry - industries - innovation” and why, in turn, FUI (*Fonds Unique Interministériel*) supports collaborative actions on this topic. Process intensification is also one of the key technologies of the Ministry of Industry for 2015. Given that this is clearly a matter of high importance for the industrial competitiveness of France, insofar as intensified systems represent an opportunity to maintain industrial activities and scientific expertise related to chemistry in France. It also said that the challenge for the future years does not lie in developing ever more advanced new intensified devices, but in their integration in existing production processes (multiscale process, batch/continuous processing). This is important because it includes innovation in intensified processes as an element of incremental progress and not just as a break in an industry with high capital investment.

Finally, it should be noted that the Suschem-France platform also integrated this subject high on its roadmap, after a period of very constructive collaboration.

It is, therefore, particularly appropriate to see a special issue of *Oil & Gas Science and Technology – Revue d’IFP Energies nouvelles* deal with such a promising topic, by calling it “eco-design of processes”, thereby strengthening its role in the reconciliation of chemistry with its environment.

L. Trépiéd

*In charge of R&D in the Chemical Division of the General Directorate
for Competitiveness, Industry and Services (DGCIS)
louis.trepied@finances.gouv.fr*