

Intensification et miniaturisation en génie des procédés

Laurent Falk, Jean-François Portha et Jean-Marc Commenge

Résumé Grâce à l'intensification des procédés et à la miniaturisation des équipements qui en découle, on entrevoit le concept d'usine chimique miniature et modulaire « miniplant » comme un des scénarios de l'industrie chimique du futur. Les principaux avantages sont une plus grande rapidité d'implantation sur site permettant de générer plus rapidement des revenus, la flexibilité des ateliers pouvant être reconfigurés en fonction des besoins, la possibilité de production sur place et à la demande, au plus proche du client... Au travers de quelques exemples dans les domaines de la chimie fine et de la pharmacie, de la sécurité et de l'énergie, cet article présente les intérêts d'un tel concept mais aussi les difficultés scientifiques, techniques et financières qu'il faut surmonter.

Mots-clés Intensification des procédés, miniaturisation, usine du futur, usine modulaire, fabrication additive.

Abstract **Process intensification and miniaturization**
The concept of process intensification, closely linked to miniaturization of equipment, is seen as one of the founding concepts of the plant of the future by developing new production methods, based on miniaturized and modular "miniplant". Among new business models that could be generated, there are onsite production, decrease in stocks, reduced transportation of raw materials and products, and manufacturing process flexibility... Applications and developments in fine chemistry, pharmaceuticals and energy sectors illustrate the main stakes of the concept without omitting scientific, technical and economic difficulties that have to be overcome.

Keywords Process intensification, miniaturization, plant of the future, modular plant, additive manufacturing.

L'un des enjeux majeurs de l'usine chimique du futur est de répondre aux défis importants que sont la réduction des coûts liés à la consommation des matières premières ou de l'énergie et des investissements, l'amélioration des conditions de sécurité, la meilleure qualité des produits et des performances environnementales accrues, la réduction des stocks et une plus grande flexibilité des capacités de production.

Parallèlement à ces enjeux du développement durable, on assiste à une évolution un peu contradictoire où le consommateur est en quête croissante d'une différenciation et d'une personnalisation du produit propre à ses besoins [1]. Ce besoin de personnalisation engendre une multiplicité accrue du nombre de produits et donc des technologies différenciantes de fabrication permettant la production de produits individualisés susceptibles de donner un avantage industriel et de répondre au besoin de progrès social. Il en résulte une difficulté accrue également pour le recyclage des matières et l'usage de matières biosourcées, en particulier de variabilité, si les filières de collecte, de tri et de séparation ne sont pas assurées convenablement.

Dans le domaine de l'énergie, l'utilisation grandissante des énergies renouvelables décarbonées (éolien et solaire) pose également le problème d'un éventuel marché de l'énergie prenant en compte le taux décarboné, avec une pénalité éventuellement variable, qui sera fortement volatile en fonction du temps et du lieu. Dans le cas de certaines filières industrielles où le coût énergétique dans le produit final est important, on peut prévoir qu'il sera nécessaire de concevoir des procédés intermittents et flexibles pouvant s'effacer

ou redémarrer rapidement (de l'ordre de la demi-heure) ou opérant à certaines périodes de l'année où l'offre est abondante et les prix plus bas. L'impact prévisible est une augmentation des coûts des procédés industriels.

L'usine chimique du futur en tant qu'intermédiaire entre les intrants et les sortants se positionne donc comme la « variable d'ajustement » devant répondre de façon flexible mais robuste à des contraintes de grande variabilité des flux (quantité et qualité) et de l'accroissement des réglementations, tout en assurant une cible de performances socio-technico-économiques. La question est de savoir si les technologies et les modes de production actuels permettent de répondre favorablement à ces grands enjeux.

À l'heure actuelle, une part très importante de la production chimique mondiale en volume, et bien plus importante en valeur, est faite en réacteurs agités en discontinu pour près de 97 % des synthèses organiques [2-3]. Ceci s'explique facilement car la cuve agitée classique offre une très grande flexibilité et polyvalence des ateliers. C'est aussi un outil de production, dont l'intensité capitalistique est relativement modérée, qui semble le plus facile à adapter à partir des recettes de fabrication élaborées en laboratoire. Il est frappant de remarquer que certains produits de grande technicité et de hautes valeurs ajoutées sont issus d'ateliers de fabrication mettant en œuvre des équipements relativement peu performants et qui présentent de nombreux inconvénients préjudiciables à la fois à la qualité des produits synthétisés, à l'environnement par une consommation excessive d'énergie ou de solvants, mais aussi à la sécurité des installations et des personnes. Par exemple, les cuves agitées possèdent des

performances thermiques limitées pour lesquelles la mise en œuvre de réactions exothermiques rapides demande souvent une dilution des réactifs qui nécessite par la suite une étape de séparation. Une consommation importante de solvants, dont le recyclage ne peut être total et qui induit donc des rejets environnementaux directs ou indirects, est bien sûr un premier élément négatif. L'usage de procédés de séparation des produits de réaction et de recyclage des solvants induit des consommations énergétiques d'autant plus grandes que la quantité de solvant est importante. Par ailleurs, les vitesses des réactions chimiques étant directement liées à la concentration des réactifs, la dilution contribue de fait à un ralentissement des cinétiques et donc à un allongement des durées de synthèse et des tailles des équipements qui entraînent une augmentation des coûts, mais aussi des consommations énergétiques. Enfin, les étapes d'extrapolation entre le laboratoire et l'atelier de production, en particulier pour de nouveaux produits, restent particulièrement délicates. L'utilisation d'équipements peu performants et difficilement extrapolables augmente les durées des phases d'industrialisation et de mise sur le marché des produits, et les coûts associés peuvent être particulièrement pénalisants dans un contexte de compétition économique marqué.

L'intensification au service de la miniaturisation

Il existe depuis plusieurs années un attrait important pour l'amélioration notable des méthodes de fabrication grâce à la substitution des équipements conventionnels par des équipements intensifiés et en transformant les ateliers discontinus en ateliers continus, dans lesquels on contrôle plus étroitement les conditions opératoires.

L'intensification des procédés consiste, par le développement de méthodes, de techniques et d'appareils adaptés, à concevoir des procédés plus performants, plus compacts et plus économiques, dont la capacité de production est de plusieurs fois supérieure à celle d'un procédé conventionnel. Les principes techniques mis en œuvre visent à s'affranchir des limitations de transfert de chaleur (évacuation et apport), et plus généralement des apports d'énergie, de transfert de matière, mais aussi à déplacer les limitations thermodynamiques (solubilités, équilibres réactionnels) qui limitent le rendement de transformation et/ou de séparation d'un procédé.

Les objectifs applicatifs ci-dessus ne sont pas nouveaux et relèvent bien entendu de la mission générale de l'ingénieur en génie des procédés, mais ils se présentent dans un contexte en constante évolution. L'intensification découle donc d'un besoin essentiel d'évolution du génie des procédés, particulièrement dans le contexte actuel de la mondialisation des échanges, d'une concurrence accrue et d'un réel souci lié au développement durable [4]. La réponse à ces objectifs demande une vision intégrée et complexe de l'ensemble des trois composantes principales du développement durable dites des « 3P » (profit, people, planet) ou « 3E » (économie, éthique, environnement).

Les grands principes de la miniaturisation par l'intensification

Les premiers travaux sur l'intensification des procédés dans le monde industriel remontent à la fin des années 1970,

lorsque la société ICI a en premier mis en avant que le concept d'intensification était un moyen efficace permettant la réduction des coûts d'investissement d'un système de production en développant la technologie HiGee qui permet de séparer des mélanges par centrifugation. Une application à très grande échelle de cette technologie a permis de remplacer des colonnes de séparation de 30 mètres de haut travaillant sous vide par des appareils rotatifs de 1,5 mètres de diamètre pour une même séparation.

Les concepts de l'intensification ont ensuite été théorisés dans les années 1980 par Colin Ramshaw, puis par Stan-kiewicz et Moulijn [5]. Une façon d'aborder l'intensification consiste à analyser les limitations d'un procédé de transformation et à mettre en œuvre les technologies et équipements appropriés. Les procédés de transformation de la matière et de l'énergie font intervenir de multiples phénomènes couplés à différentes échelles spatiales et temporelles. Les processus les plus lents ont les temps caractéristiques les plus élevés, ce qui traduit l'influence des phénomènes limitants. Les moyens d'action de l'intensification varient donc suivant la nature des processus limitants. Ces limitations sont de quatre types : **limitations de transfert de matière et de chaleur, limitations thermodynamiques, limitations énergétiques et limitations cinétiques.**

Limitation par les transferts de matière, de chaleur et mélange

En pratique, ces limitations peuvent être partiellement levées par une intensification des transferts obtenue en dégradant un surplus d'énergie mécanique, mais cette forme d'intensification est très pénalisante. Pour doubler le coefficient de transfert thermique dans la cuve agitée, il faut dépenser une puissance mécanique plus de dix fois plus importante en augmentant la vitesse d'agitation du mobile. Une alternative très intéressante car très efficace énergétiquement est de faire l'intensification par microstructuration. Pour cela, il est nécessaire de transposer la cuve agitée à un réacteur continu multi-tubulaire, dont les tubes sont refroidis par circulation d'un fluide caloporteur. Pour simplifier les choses, cet échangeur-réacteur peut être vu comme un simple échangeur thermique dont le fluide réactif s'écoule en régime laminaire dans des canaux cylindriques rectilignes et se refroidit par contact avec la paroi à température constante. Dans ce cas, le coefficient d'échange thermique est inversement proportionnel au diamètre du canal d'écoulement. Comme la surface d'échange par unité de volume réactionnel est également inversement proportionnelle au diamètre, le flux de refroidissement par unité de volume devient inversement proportionnel au carré du diamètre du canal. L'effet d'intensification est donc très important puisqu'il suffit d'une diminution du diamètre du canal d'un facteur 10 pour augmenter le flux volumique d'échange d'un facteur 100 !

Cet effet important d'intensification se retrouve dans de nombreux autres processus comme le mélange et le transfert de matière [6]. Grâce au développement considérable de la microfabrication, on peut réaliser des réacteurs, des mélangeurs et des contacteurs microstructurés de très faibles dimensions, de quelques millimètres à quelques centimètres. En contrôlant mieux les conditions d'écoulement et de transfert, les réactions secondaires parasites peuvent être supprimées, permettant ainsi d'obtenir des produits de très grande

pureté avec une grande sélectivité. Ces objets offrent de nouvelles possibilités pour les procédés de transformation en permettant une intensification sélective des processus physiques et chimiques : nouvelles voies de synthèse produisant moins d'effluents non valorisables, sécurisation d'installations à risque, diminution des taux de solvant, nouveaux matériaux et produits, etc.

Limitations thermodynamiques

Une limitation thermodynamique courante concerne les réactions chimiques équilibrées. Pour déplacer les équilibres réactionnels, on procède souvent à des excès stœchiométriques des réactifs qui induisent plusieurs problèmes dans les équipements conventionnels. Cela conduit à l'accélération des cinétiques réactionnelles ainsi qu'à des augmentations adiabatiques de température plus importantes qui peuvent être difficiles à gérer si les capacités de refroidissement des réacteurs sont insuffisantes. L'excès de réactifs nécessite également la séparation des produits en aval et le recyclage, pouvant conduire à des équipements de séparation importants et coûteux en investissement et en fonctionnement (énergie de séparation et de recyclage). Les équipements multifonctionnels dans lesquels on réalise en même temps la réaction et la séparation présentent l'avantage d'une diminution potentielle importante du coût des équipements et, grâce à l'intégration thermique, d'une consommation énergétique réduite [7]. L'exemple le plus emblématique est celui de la production d'acétate de méthyle par distillation réactive développée par Eastman Chemical Inc. qui permet de réduire non seulement l'intensité capitalistique des équipements par 5 (réduction du nombre des équipements de 28 à 3), mais aussi les coûts énergétiques du même facteur [5]. Il existe de nombreux autres principes, comme les réacteurs couplés à l'adsorption et à l'absorption, les réacteurs à membrane, les couplages réaction-cristallisation et précipitation [7].

Un autre type de limitation thermodynamique est lié à la solubilité des réactifs et des produits qui peut induire une diminution des vitesses de réactions et des sélectivités ou des efficacités de séparation. L'utilisation des liquides ioniques, dont le domaine d'application est beaucoup plus large que celui des simples solvants, entre dans ce cadre. Citons à titre d'exemple le procédé Difasol de dimérisation des oléfines proposé par IFP-Axens qui est un procédé diphasique mettant en œuvre une phase liquide ionique et la phase organique [8]. Par rapport au procédé homogène Dimersol, les liquides ioniques du procédé diphasique présentent l'avantage d'une solubilité des octènes beaucoup plus faible que celles des butènes. La réduction significative des réactions consécutives des octènes permet un gain de sélectivité de 68 à 75 %. Le procédé Difasol présente également l'avantage par rapport au procédé Dimersol d'une réduction d'un facteur 10 de la consommation en catalyseur, une compacité importante (quatre réacteurs de 120 m³ pour un réacteur de 50 m³), soit au final un gain économique de 15 % sur les coûts d'investissement (CAPEX) et de 20 % sur les coûts opératoires (OPEX).

Limitation par l'apport énergétique

Un autre mode d'intensification vise à apporter de l'énergie au système de manière non conventionnelle en jouant sur les modes d'apport (micro-ondes, ondes acoustiques), la localisation, la nature de l'énergie ou de la dissipation.

Dans un certain nombre de procédés mettant en œuvre des fluides diphasiques, la force de gravité est un paramètre important qui conditionne la mise en contact, l'écoulement ou la séparation des phases. Il est parfois nécessaire de disposer d'équipements de grande taille pour parvenir à des efficacités élevées. Une façon de diminuer la taille des équipements est d'augmenter le champ d'accélération gravitationnelle par la mise en rotation des fluides, comme cela est pratiqué en centrifugation. Mais l'application de ces champs centrifuges peut également être très bénéfique pour intensifier les transferts de masse et de chaleur par l'obtention de films liquides très minces, ou des aires interfaciales spécifiques très élevées. Il existe de nombreuses utilisations de la technologie des disques tournants pour des applications réactionnelles, les procédés d'absorption, d'extraction ou de distillation [9].

Limitations cinétiques

Il existe un certain nombre de systèmes réactionnels dont les cinétiques sont relativement lentes (temps caractéristique de réaction de l'ordre de plusieurs dizaines de minutes) et donc non limitées par les phénomènes de transfert de matière ou de chaleur. Les temps de séjour importants sont difficilement compatibles avec les réacteurs intensifiés et ces classes de réaction ont été, pendant un certain temps, éliminées du domaine d'action de l'intensification [10]. De manière classique, on peut bien sûr accélérer ces vitesses de réaction par une augmentation des températures ou des pressions de travail, ou même en augmentant les concentrations. Ces modes d'activation sont cependant délicats à maîtriser dans des réacteurs agités conventionnels car les vitesses de chauffe ou de refroidissement sont limitées (temps importants de montée et descente en température néfastes à la productivité). D'autre part, les synthèses complexes font souvent intervenir des réactions secondaires thermiquement activées qui sont préjudiciables à la sélectivité et aux rendements, et difficiles à maîtriser. Le passage du mode de production de batch à continu ouvre des voies nouvelles car il est possible de travailler dans de nouvelles fenêtres opératoires (fortes pression et température) sans occasionner un surcoût important des équipements, tout en améliorant de façon importante les rendements de réaction [11].

Lien entre intensification et miniaturisation

La performance de tout équipement (réacteur, échangeur de chaleur, échangeur de matière, séparateur) peut être représentée par son efficacité. Dans un réacteur, elle s'apparente à la conversion définie comme le rapport du débit ou de la quantité (masse ou mole) de matière transformée au débit ou à la quantité de matière disponible pour la transformation. Dans un échangeur de chaleur ou de matière, dans un séparateur, cette efficacité est le ratio de la quantité (*i.e.* débit) de chaleur ou de matière transférée à la quantité (ou au débit) de matière ou de chaleur potentiellement transférable.

En première approximation, dans de nombreux cas de procédés continus, l'efficacité est une relation asymptotique fonction du rapport entre le temps de passage (rapport du volume de fluide dans l'équipement par le débit volumique de fluide en entrée) et le temps caractéristique global t_{op} des processus qui gouvernent ce procédé. Le temps caractéristique est un indicateur de la vitesse à laquelle s'effectuent les transformations ou les transferts dans l'équipement ; il est d'autant plus petit que la cinétique ou la vitesse de transfert est grande.



Figure 1 - Réacteur photochimique (James Robinson Ltd). Comparaison des réacteurs de même capacité : discontinu conventionnel (droite) et continu intensifié (gauche) (www.chemspeceurope.com/content-images/main/Conferences/Continuous-Processing-to-make-better-particles_Ian-Laird_-RSC-Symposium-2011.pdf).

On conçoit donc aisément que plus le rapport du temps de passage au temps caractéristique est élevé, meilleure est l'efficacité de l'équipement.

On déduit de ces relations que, pour une efficacité donnée, le volume V de l'équipement est directement proportionnel au temps caractéristique du processus t_{op} et au débit de fluide Q [6].

Cette idée très simple montre que l'intensification des procédés, qui consiste à augmenter les vitesses des processus ou, autrement dit, à diminuer les temps caractéristiques, implique la diminution du volume des équipements pour un même débit traité, ou l'augmentation des débits traités pour un même volume d'équipement, voire une combinaison des deux cas précédents. Dans le cas de procédés limités par le transfert de matière ou de chaleur, les temps caractéristiques dépendent fortement, souvent par une relation quadratique, de la dimension caractéristique des canaux dans lesquels circulent les fluides. C'est pourquoi les microréacteurs, micromélangeurs et microéchangeurs présentent des performances étonnantes pour des volumes particulièrement faibles (figure 1).

Cette miniaturisation des équipements entraîne cependant plusieurs difficultés importantes, comme celle du risque de bouchage par l'introduction ou la formation de produits solides et une perte de charge très élevée, qui ont longtemps été vues comme un obstacle majeur à l'industrialisation de ces équipements très compacts. Les écoulements internes dans ces équipements sont souvent en régime laminaire. La perte de charge, estimée à partir de la relation de Poiseuille, est inversement proportionnelle au diamètre du canal d'écoulement à la puissance 4. Cette relation indique que passer la totalité du débit à traiter dans un canal unique se fait au prix d'une perte de charge et donc d'une consommation d'énergie très importante, contraire aux objectifs du développement durable dans lequel s'inscrit le principe d'intensification. L'alternative consiste à utiliser de nombreux canaux en parallèle afin de subdiviser le débit principal en sous-débits élémentaires, très faibles, permettant ainsi de compenser l'augmentation de perte de charge due à la réduction des diamètres des canaux. Dans un certain nombre de cas, la réduction du diamètre des canaux s'accompagne d'une intensification notable qui permet de réduire la longueur des canaux, ce qui conduit à des équipements multicanaux très courts,

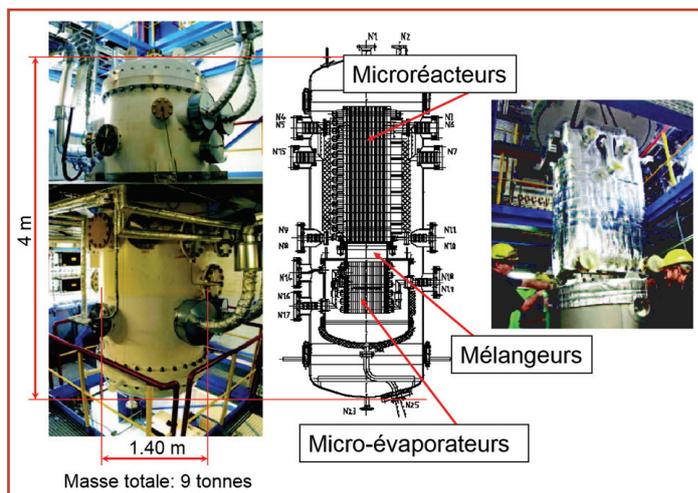


Figure 2 - Réacteur multi-structuré du projet DEMIS sur l'époxydation catalytique du propène [12].

avec une perte de charge très inférieure à celle d'un équipement conventionnel [6]. La nature applique ce principe depuis bien longtemps dans les organismes vivants, comme par exemple dans le système d'échange pulmonaire où environ 200 millions d'alvéoles offrent une surface d'échange de près de 100 m² pour quelques litres occupés.

Ce principe de structuration des écoulements a donné naissance au concept d'équipement micro- ou multi-structuré, qui correspond à des équipements de grandes tailles permettant de traiter des débits importants dans lesquels la structuration interne des écoulements permet l'intensification, la miniaturisation, mais une perte de charge modérée. L'exemple typique est le réacteur-échangeur à plaques ; un exemple industriel proposé par Degussa est le procédé DEMIS (« Demonstration project for the evaluation of micro-reaction technology in industrial systems ») d'époxydation catalytique du propène [12], dont les canaux sont inférieurs au millimètre (figure 2).

L'innovation potentielle importante apportée par la miniaturisation des procédés réside dans la possibilité d'extrapoler par multiplication et parallélisation des équipements, en s'affranchissant des nombreux problèmes classiques de l'extrapolation par augmentation d'échelle. Cette notion de parallélisation idéale, qui requiert toutefois une équidistribution parfaite des débits entre les échelles élémentaires, induit que si les conditions optimales de fonctionnement sur une partie élémentaire d'un équipement peuvent être déterminées en laboratoire, alors les conditions de fonctionnement du réacteur industriel sont identiques. Il suffit alors d'optimiser les conditions opératoires en laboratoire ou sur un petit pilote pour définir les conditions de fonctionnement du système industriel. On entrevoit que cette technique d'extrapolation en nombre (ou « numbering-up », par opposition au « scaling-up ») permettrait de faire un gain important sur les coûts et les temps de développement d'un procédé industriel.

Applications en chimie fine, en sécurité et dans les procédés pour l'énergie

Chimie fine

L'intensification nécessite souvent la transformation des ateliers de chimie fine du mode discontinu au mode continu et permet de fait une plus grande automatisation des modes

de production. On estime ainsi que le coût de la main d'œuvre par masse de produit manufacturé par un procédé continu hautement automatisé peut être réduit jusqu'à environ 50 % par rapport à un atelier batch [13]. L'intensification peut également permettre de réduire le nombre des étapes des synthèses, ce qui est aussi un facteur de réduction des coûts de manutention [10]. La société Corning, producteur de procédés intensifiés, estime que le taux de réduction des coûts de main d'œuvre peut atteindre environ 20 % [14]. Suivant les différents exemples rapportés en chimie fine, les gains apportés par l'intensification sont de l'ordre de 15 à 25 % en moyenne [10-11].

Sécurité des procédés

L'intensification intervient à plusieurs titres dans l'amélioration de la sécurité des procédés [15]. En premier lieu, l'augmentation importante des transferts thermiques permet de refroidir très efficacement les réacteurs chimiques et d'éviter la formation de points chauds et l'emballement des réactions [16]. La miniaturisation des équipements est également un des éléments clés de l'amélioration de la sécurité où la réduction des volumes permet de réduire la gravité des impacts en cas de fuite ou d'accident. Cette réduction des volumes se traduit par des volumes de stockage des réactifs et des produits plus faibles, une taille réduite des réacteurs et des tuyauteries, et donc une réduction de l'énergie potentiellement emmagasinée, et facilite le confinement.

À titre d'exemple, la rupture d'une canalisation de phosgène de 5 cm de diamètre nécessite la mise en place d'un périmètre de sécurité (20 ppm de chlore dans l'atmosphère) de 5,5 km ; en passant à un diamètre de 2,5 cm, la distance est ramenée à 700 m, et 1 cm à 80 m [17]. Pour des installations de petite taille, la solution du confinement dans un bunker devient possible car on réduit considérablement les coûts des bâtiments. Ceci permet d'assurer une sécurité passive très importante et c'est pourquoi on associe souvent les procédés intensifiés à des procédés intrinsèquement sûrs.

Une autre application concerne la synthèse directe à la demande de phosgène qui a permis de réduire les quantités de stockage de 25 tonnes à seulement 70 kg [17]. La société AET Group a mis au point une petite unité de synthèse de phosgène (4 à 40 kg/h) pour les applications en chimie fine sur place et à la demande immédiatement consommé dans un réacteur continu placé en aval, par réaction avec un deuxième réactif (par exemple avec un alcool pour faire des chloroformiates ou des carbonates, ou avec une amine pour faire un chlorure de carbamoylé, un isocyanate ou une urée) pour des applications de synthèses à façon [18] (figure 3).

Procédés intensifiés pour l'énergie

Les applications de l'intensification dans le domaine des économies d'énergie sont très importantes [15]. Rien que pour le Royaume-Uni et les Pays-Bas, on estime que le potentiel de réduction de la consommation d'énergie dans l'industrie chimique et connexe, grâce à l'intensification, est de près d'un million de tonnes équivalent pétrole [15]. Mais l'intensification offre également de nouvelles perspectives grâce à la microstructuration des écoulements (monolithe ou plaques structurées) et des dépôts catalytiques (dépôts en couche mince par « wash-coating ») avec la diminution considérable de la taille des réacteurs. Dans certaines applications, le processus limitant devient la réaction chimique elle-même et il est nécessaire d'améliorer la formulation et le dépôt de



Figure 3 - Module de génération de phosgène en continu et à la demande (AET Group [18]).

catayseur. Les sociétés Velocys et Oxford Catalysts ont ainsi développé de nouveaux catalyseurs Fischer-Tropsch pour des réacteurs microstructurés qui permettent d'accélérer les cinétiques d'un facteur 10 à 15 par rapport à des réacteurs conventionnels, permettant des conversions de l'ordre de 70 % par passe (contre 50 % pour un réacteur classique). La taille des installations de Fischer-Tropsch peut être réduite de près de 90 % par rapport à une installation conventionnelle [19]. Un intérêt direct concerne les installations GTL (« gas to liquid ») implantées par les sociétés TOYO et MODEC sur les plateformes offshore FPSO (« floating production storage and offloading units »).

Grâce à la réduction du coût des équipements, la miniaturisation des procédés catalytiques ouvre également des perspectives complètement nouvelles d'unités de petites capacités distribuées pour couvrir des besoins locaux en énergie (production, valorisation, stockage), mais aussi pour la production de gaz de synthèse, de méthanol ou d'hydrogène pour la chimie et les industries de transformation. Parmi les applications potentielles, on peut citer le développement intensifié de réacteurs de production d'hydrogène. Selon une étude réalisée par le projet européen Roads2HyCom [20], il existe un marché de production sur site et à la demande d'hydrogène de capacité comprise entre 30 et 800 Nm³/h pour lequel la conception de petites unités miniaturisées de production par reformage du méthane (procédé SMR) aurait un intérêt.

Concept de l'usine modulaire intensifiée

Le concept d'intensification étant étroitement lié au concept de miniaturisation des équipements, on entrevoit le développement de nouveaux modes de production qui génèrent de nouveaux modèles d'activités grâce aux concepts d'usine chimique miniature (« miniplant ») et modulaire [9, 21-23]. Sans être totalement nouveau, le concept de modularité que l'on rencontre dans l'industrie du pétrole est renforcé grâce à la compacité des équipements et ouvre des perspectives économiques nouvelles pour l'industrie chimique du

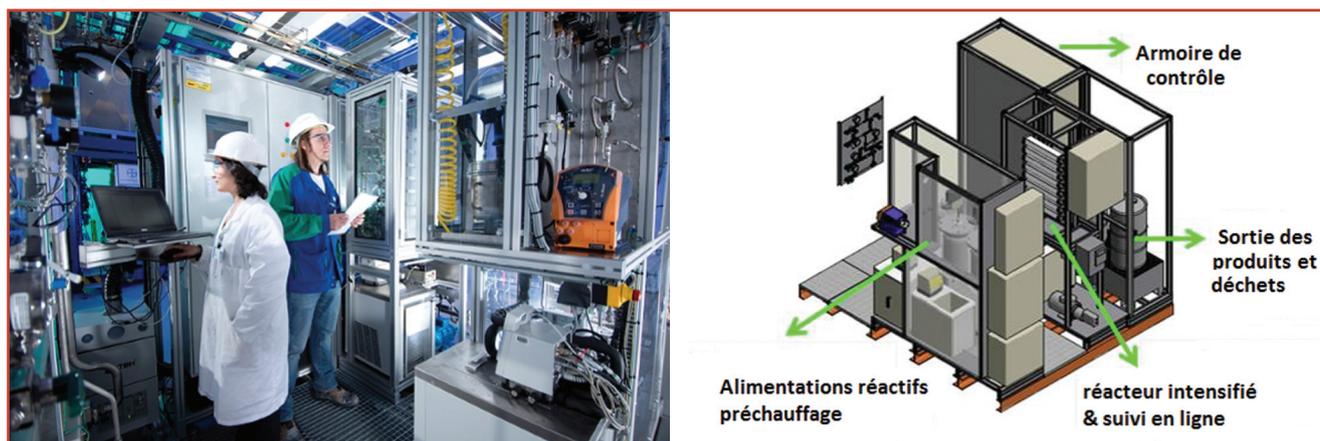


Figure 4 - Exemple d'un système modulaire de polymérisation monté sur skid [22].

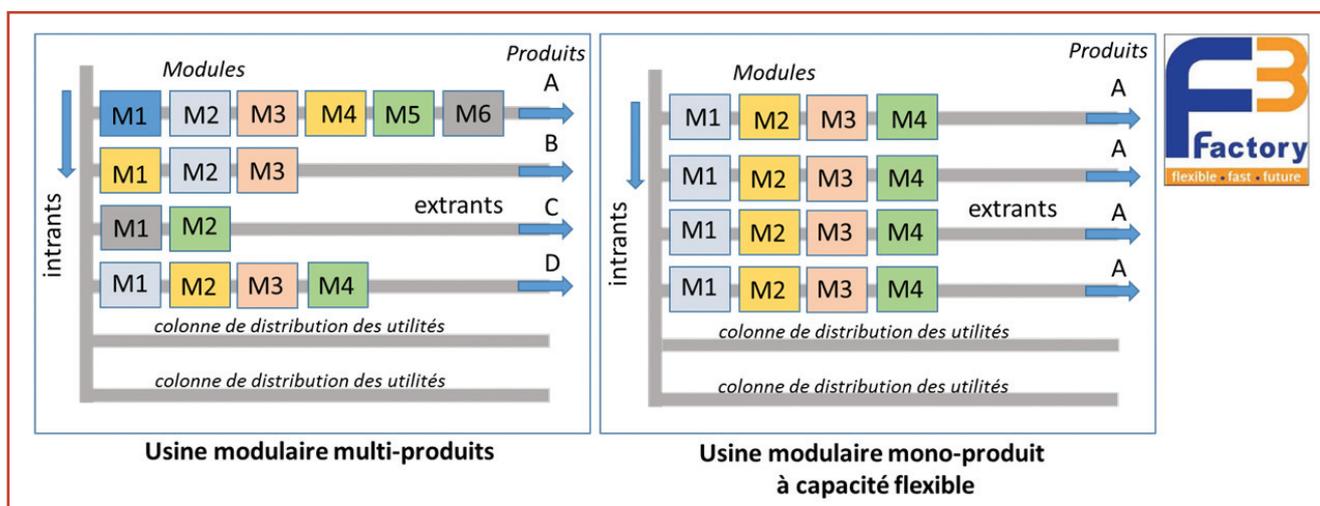


Figure 5 - Concept d'usines modulaires intensifiées développées dans le cadre du projet européen F3Factory [22].

futur. Cette modularité contribue à une meilleure flexibilité des ateliers, la possibilité de production sur place et à la demande, la diminution des stocks, la réduction du transport des matières premières et des produits par des circuits courts...

Les premiers concepts d'usines modulaires pour l'industrie chimique et pharmaceutique ont vu le jour dans les années 2000 et sont passés aujourd'hui au stade de la réalisation concrète. La figure 4 montre des réalisations de modules pour mini-usine développés dans le cadre du projet européen F3Factory, permettant de faire la production sur place et à la demande pour certaines campagnes de production [21].

L'usine modulaire permet d'associer un certain nombre de modules flexibles et interchangeable dont les dimensions et les connectiques doivent être standardisées afin de faciliter les procédures d'assemblage et d'interconnexion. L'objet du projet européen F3Factory [22] a porté sur la conception et la mise au point de tels modules basés sur des équipements intensifiés et automatisés qui sont assemblés sur une colonne vertébrale délivrant les utilités d'une plateforme dédiée (figure 5). L'intérêt d'une plateforme multi-partenaires est de partager les coûts d'investissement et de fonctionnement.

Cette conception est basée sur des modules réutilisables, fabriqués en grande série et non spécifiques, mais considérés comme des parties élémentaires fonctionnelles et polyvalentes qui peuvent être utilisées dans différents types de procédés. Pour une diminution maximale des coûts, chaque module répond à une norme (dimension, connectique,

débit...) afin de faciliter les procédures d'assemblage et d'interconnexion. Dans le cas d'une unité de synthèse d'alkylamine, une usine modulaire de 36 kt/an permettrait d'atteindre une capacité de production pourtant cinq fois supérieure à celle d'une usine conventionnelle avec des coûts globaux de production 10 % plus faibles [21].

L'intérêt économique de petites unités de production modulaire n'apparaît pas comme une évidence *a priori* car les règles classiques du développement industriel établissent que les coûts d'investissement sont proportionnels à la capacité de production, soit la taille des équipements à la puissance 0,6 [13]. Cet effet d'échelle favorise le développement d'unités de grande capacité et désavantage de fait l'utilisation des technologies intensifiées basées sur la duplication en nombre et la mise en parallèle des équipements et des systèmes périphériques (pompes, capteurs, organes de commande).

En réalité, dans cette approche comparative, il est nécessaire de tenir compte du fait que la capacité de production d'un équipement conventionnel n'est pas toujours proportionnelle à son volume, comme c'est le cas par exemple pour une réaction limitée par le transfert de chaleur où la productivité d'une cuve agitée discontinue est seulement proportionnelle au volume à la puissance 2/3. Dans ce cas, le coût des équipements devient donc proportionnel à la productivité à la puissance 0,9 (0,45 dans le cas de l'atelier batch de chimie fine), dénotant un effet d'échelle beaucoup moins marqué.

La société AET Group a ainsi développé un réacteur intensifié (RAPTOR®) très compact de moins d'un litre [18], dont la capacité de production est celle d'une cuve agitée de plusieurs m³ pour un coût d'investissement bien moins important. Ceci démontre que le coût d'un équipement intensifié peut dans certains cas être sensiblement plus faible que celui d'un équipement conventionnel, mais il n'existe pas de règles générales.

Il faut également garder à l'esprit qu'en général dans un procédé complexe, le réacteur ne constitue qu'environ 10 à maximum 20 % du coût total ; même pour une réduction notable par deux du coût du réacteur, le gain global en investissement n'est que de 5 à 10 %. La réduction notable des coûts d'investissement est plutôt due à l'impact de l'intensification sur la chaîne complète de production, comme le montrent un certain nombre d'exemples en chimie fine utilisant des technologies éprouvées (IMM, Corning, Nitech). Un des arguments souvent identifiés de la diminution des coûts d'investissement est la réduction du nombre d'étapes (réaction ou séparation) par rapport à un procédé conventionnel [10]. Suivant les cas, les procédés intensifiés permettent un gain d'investissement de l'ordre de 15 à 25 % par rapport à un atelier conventionnel.

L'usine modulaire se positionne donc comme l'une des alternatives pour répondre aux difficultés d'une compétitivité internationale très forte, à la diminution du cycle de vie des produits (entre le lancement et le déclin) et une volatilité importante des marchés, à laquelle s'ajoute un surcoût des coûts de l'énergie, qui conduisent à des prévisions économiques particulièrement fragiles. Dans ce contexte difficile, l'usine de demain doit gagner en flexibilité pour s'adapter au mieux à la demande des marchés.

Il apparaît que les modèles économiques établis après la Seconde Guerre mondiale, basés sur l'augmentation de la consommation de masse, sont de moins en moins adaptés. Les économies d'échelles liées aux grandes capacités de production nécessitent des investissements très importants qui, dans des marchés fluctuants, conduisent à une augmentation des risques et à la diminution de la valeur actuelle nette. L'usine modulaire plus petite et plus efficace que l'usine conventionnelle peut être développée plus rapidement et permet ainsi de générer des revenus et de prendre des parts de marché plus vite. Ceci est un avantage notable pour une société qui fabrique de nouveaux produits avec un cycle de vie assez court demandant des efforts conséquents en recherche et développement. Par ailleurs, l'étalement dans le temps des dépenses capitalistiques est un avantage conséquent par rapport à une usine conventionnelle de forte

capacité dont les pleines performances, permettant de réelles économies d'échelles, seront seulement atteintes plusieurs années plus tard [23-24]. Les coûts d'investissement d'un atelier ou d'une usine conventionnelle, qui représentent près de quatre à cinq fois le coût des équipements (indice de Lang) et qui sont trop importants, sont dus à une conception trop spécifique de chaque unité de fabrication, même pour un produit manufacturé identique. Les raisons sont nombreuses, comme l'âge des installations qui peut être différent, certaines unités pouvant avoir bénéficié d'améliorations techniques, ou les contraintes locales (approvisionnement des matières premières, spécificités du marché des produits et réglementation). L'usine modulaire, basée sur des modules identiques, standardisés, réutilisables et fabriqués en grande série, permettrait de diminuer de manière conséquente les coûts d'investissement et rendrait ces usines modulaires tout à fait compétitives par rapport à des unités de grande taille bénéficiant des économies d'échelles [23-24].

Enjeux de la réduction des coûts d'investissement grâce à la fabrication additive

L'un des principaux problèmes de l'usine modulaire, basée sur des équipements intensifiés, est que dans son ensemble, le marché de ces équipements intensifiés n'est actuellement pas mature, et on estime que le coût de beaucoup de prototypes sont trop élevés et non représentatifs d'un marché stabilisé. Les enjeux concernent donc la réduction importante des coûts d'investissement.

De premières études de développement montrent que les techniques de fabrication additives deviennent maintenant compétitives pour la fabrication économique d'équipements intensifiés de génie chimique en utilisant des matériaux performants [25]. DSM a récemment développé un microréacteur échangeur de 1 à 8 mL interne réalisé par fabrication additive 3D en inox 3016 permettant de traiter un débit par unité de volume d'équipement pouvant atteindre 600 000 kg/m³/h (figure 6). À ce niveau, un réacteur d'un litre est capable d'assurer une capacité de production de près de 5 000 t/an. Il est possible de construire des équipements avec des parois internes d'un millimètre d'épaisseur résistant à des pressions internes de quelques centaines de bars. La consommation de matière première extrêmement faible permet à terme d'envisager l'utilisation de matériaux très résistants à la corrosion comme le tantale, sans compromettre le coût final de l'équipement.

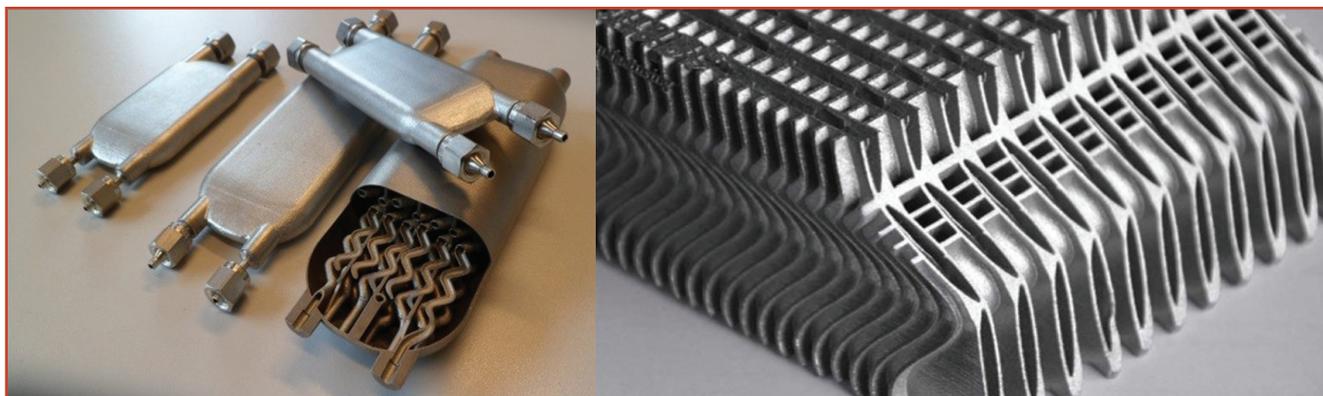


Figure 6 - Réacteurs échangeurs en inox réalisés par fabrication additive. À gauche : réacteur DSM (<https://www.melotte.be/en/news/3d-printing-metal-micro-flow-reactors-dsm>) ; à droite : échangeur Poly-Shape (www.3dnatives.com/poly-shape-petite-parle-grands).

La France n'est pas en reste avec le projet FAIR (« Fabrication additive pour intensification de réacteurs ») qui a pour ambition de développer une nouvelle filière industrielle française centrée sur la fabrication additive d'équipements intensifiés (procédés, produits) pour de nouveaux usages. Le groupe Air Liquide et la PME française Poly-Shape sont à l'origine de cette initiative appuyée par deux autres industriels, Adisseo et Auer, ainsi que par cinq partenaires académiques. Les objectifs de ce projet concerneront les aspects conception, fabrication, fonctionnalisation, intégration et usages de ces nouveaux équipements intensifiés de grande taille (supérieur à 50 cm de côté). La fabrication additive est donc susceptible de permettre une réduction notable des coûts des équipements en grande série ou même spécifiques par rapport aux procédés conventionnels. Les analystes tablent sur un potentiel de réduction important des coûts de la fabrication additive de 60 % à cinq ans et de 30 % supplémentaires à dix ans, soit une diminution de près de 75 % à l'horizon 2025.

Conclusions

Les perspectives qu'offre l'usine miniature et modulaire sont nombreuses et peuvent avoir du sens dans les industries de petites à moyennes capacités, pharmacie, chimie fine et dans le domaine de l'énergie. Pour autant, les concepts de cette usine, qui reposent très souvent sur le passage du mode batch au mode continu des équipements de production, ne sont pas encore établis pour de nombreux procédés. La manipulation très courante de produits solides (catalyseurs, dissolution de solides, formation de produits précipités ou cristallisés) reste une réelle difficulté pour certains procédés intensifiés mettant en œuvre des petits volumes d'équipement.

Il serait donc illusoire d'affirmer que grâce à l'intensification, toutes les usines de demain seront de petites unités propres, sûres et confinées. Les produits de base de grand tonnage resteront fabriqués dans des usines de grande taille. Par ailleurs, le potentiel d'intensification n'est pas le même pour chaque procédé ; certains procédés peuvent bénéficier de sauts technologiques importants, d'autres non. Enfin, suivant le montant des investissements à réaliser, on pourra préférer garder des installations plus conventionnelles qui auront été améliorées, modernisées et dégoulottées plutôt que de construire des unités complètement nouvelles. Il reste enfin un certain nombre de procédés qui ont encore été très peu abordés par l'intensification, comme les bioprocédés dont les cinétiques réactionnelles sont lentes et les micro-organismes très sensibles à toutes conditions opératoires « intensifiées » donc plus stressantes.

Malgré les difficultés encore nombreuses, il n'en reste pas moins que l'intensification au travers de l'usine miniature et modulaire porte des concepts d'innovation qui permettent de repenser les modes de production conventionnels et qui renouvellent les modèles économiques d'entreprises.

Références

- [1] Duvallet R., La personnalisation ou la nouvelle quête de sens du consommateur, *Les Échos*, 8 août 2011 (http://archives.lesechos.fr/archives/cercle/2011/08/08/cercle_36870.htm).
- [2] Ripplin D., Simulation of single and multiproduct batch chemical plants for optimal design and operation, *Comput. Chem. Eng.*, **1983**, 7, p. 137.
- [3] Schwalbe T., Better processes for better compounds at minimal cost – The economics and science of switching from batch to continuous, **2006** (http://depts.washington.edu/cpac/Activities/Meetings/Satellite/2006/Wednesday/Schwalbe_Rome_2006.pdf).

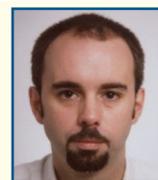
- [4] Charpentier J.-C., In the frame of globalization and sustainability, process intensification, a path to the future of chemical and process engineering (molecules into money), *Chem. Eng. J.*, **2007**, 134, p. 84.
- [5] Stankiewicz A., Moulijn J.A., *Re-engineering the chemical processing plant – Process intensification*, Marcel Dekker, **2004**.
- [6] Commenge J.M., Falk L., Corriou J.P., Matlosz M., Intensification des procédés par microstructuration, *C. R. Physique*, **2004**, 5, p. 597.
- [7] Stankiewicz A.I., Reactive separations for process intensification: an industrial perspective, *Chem. Eng. Proc.*, **2003**, 42, p. 137.
- [8] Favre F., Forestière A., Hugues F., Olivier-Bourbigou H., Chodorge J.A., From monophasic dimersol to biphasic difasol, *Oil Gas Eur. Mag.*, **2005**, 31, p. 83.
- [9] Reay D., Ramshaw C., Harvey A., *Process intensification engineering for efficiency, sustainability and flexibility*, Elsevier, **2008**.
- [10] Roberge D.M., Ducry L., Bieler N., Cretton P., Zimmermann B., Microreactor technology: a revolution for the fine chemical and pharmaceutical industries?, *Chem. Eng. Technol.*, **2005**, 28, p. 318 (www.teknoscienze.com/lp/Paris_Symposium_presentations/Roberge.pdf).
- [11] Hessel V., Novel process windows: gate to maximizing process intensification via flow chemistry, *Chem. Eng. Technol.*, **2009**, 32, p. 1655.
- [12] Markow G., Schirmeister S., Albrecht J., Becker F., Schütte R., Caspary K.J., Klemm E., Microstructured reactors for heterogeneously catalyzed gas-phase reactions on an industrial scale, *Chem. Eng. Technol.*, **2005**, 28, p. 459.
- [13] Peters M., Timmerhaus K., West R., *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (5th ed.), McGraw Hill, **2003**.
- [14] Pissavini S., Guidat R. (Corning), micro-reactor flow chemistry: impact on plant economics, guidelines and case review, *2nd Symposium on continuous flow reactor technology for industrial applications*, Paris, 3-4 oct. **2010**.
- [15] Falk L., La place des procédés intensifiés dans l'usine du futur, in *Le génie des procédés et l'entreprise*, Chap. 12, J.P. Dai Pont (dir.), Hermès, Lavoisier, **2011**.
- [16] Anxionnaz Z., Cabassuda M., Gourdon C., Tochon P., Heat exchanger/reactors (HEX reactors): concepts, technologies: state-of-the-art, *Chem. Eng. Process.*, **2008**, 47, p. 2029.
- [17] Hendershot D.C., Process minimization: making plants safer, *Chem. Eng. Prog.*, janv. **2000**, p. 35.
- [18] <http://la-mesta.coteweb.net/wp-content/uploads/LaMesta-PDF-presentation.pdf>; www.teknoscienze.com/lp/Paris_Symposium_presentations/Panthou.pdf
- [19] Lerou J.J., Enabling small-scale GTL, *9th Novel gas conversion symposium*, Lyon, 30 mai-3 juin **2010**.
- [20] https://www.ika.rwth-aachen.de/r2h/index.php/Main_Page.html
- [21] Shah S., Modular miniplants: a new paradigm, *Chem. Eng. Prog.*, mars **2007**, p. 36.
- [22] www.f3factory.com/scripts/pages/en/home.php
- [23] Mothes H., No-regret solutions: modular production concepts for times of complexity and uncertainty, *ChemBioEng Rev.*, **2015**, 2, p. 423.
- [24] Sievers S., Seifert T., Franzen M., Schembecker G., Bramschiep C., Fixed capital investment estimation for modular production plants, *Chem. Eng. Sci.*, **2017**, 158, p. 395.
- [25] Reintjens R., De Vries A., Microreactors: lessons learned from industrial applications, *Chem. Eng.*, août **2016**, p. 40.



L. Falk



J.-F. Portha



J.-M. Commenge

Laurent Falk (auteur correspondant) est directeur de recherche au CNRS et directeur du Laboratoire Réaction et Génie des Procédés (LRGP), Université de Lorraine*.

Jean-François Portha est maître de conférences et **Jean-Marc Commenge**, professeur, à l'ENSIC-LRGP*.

* LRGP (UMR CNRS UL 7274), 1 rue Grandville, BP 20451, F-54001 Nancy Cedex.
Courriels : laurent.falk@univ-lorraine.fr ; jean-francois.portha@univ-lorraine.fr ; jean-marc.commenge@univ-lorraine.fr