

De la réaction chimique catalysée vers la production éco-efficente des procédés industriels

Adrien Gomez, Alexandra Chaumonnot et Audrey Bonduelle-Skrzypczak

Résumé Les développements de nouveaux catalyseurs plus performants sont résolument orientés vers la sobriété énergétique sur tout leur cycle de vie, de leur fabrication, en passant par leur utilisation et jusqu'à leur éventuel recyclage. Ces développements visent concrètement à diminuer l'intensité des conditions réactionnelles (température, pression), tout en maintenant ou en améliorant la conversion sélective de la matière première. L'optimisation de l'utilisation d'énergie passe par l'optimisation des catalyseurs, des conditions opératoires des trains de séparation, et de la récupération énergétique du procédé *via* son intégration énergétique. Cet article présente les différentes étapes et méthodes permettant de réaliser l'intégration d'un catalyseur au sein d'un procédé industriel.

Mots-clés Catalyseur, éco-efficent, séparation, efficacité énergétique.

Abstract **From catalyzed chemical reaction to eco-efficient production of industrial processes**

The developments of new efficient catalysts are specifically targeted towards energy conservation throughout their life cycle, from manufacture through their use, and to their recycling. These developments are specifically designed to reduce the intensity of the reaction conditions (temperature, pressure), while maintaining or improving the selective conversion of the raw material. Optimizing energy use starts with the optimization of catalysts, of the operating conditions of the separation trains, and finally by optimizing the energy recovery through the process *via* its energy integration. This article outlines the steps and methods to achieve integration of a catalyst in an industrial process.

Keywords Catalyst, eco-efficiency, separation, energy efficiency.

D'ici 2050, la demande mondiale en énergie devrait doubler, et dans le même temps, les émissions de CO₂ devront être réduites drastiquement pour limiter le réchauffement de la planète. Pour y répondre, l'un des moyens est de mettre en œuvre l'efficacité énergétique. En termes scientifiques, l'efficacité énergétique correspond au rapport entre l'énergie qui peut être exploitée utilement par un système sur celle qui a été dépensée pour le faire fonctionner. On la trouve comme paramètre clé dans l'habitat, la construction, le transport, mais aussi dans la plupart des activités de transformation.

Deux aspects de l'efficacité énergétique sont à considérer : l'efficacité énergétique dite passive, qui va concerner tous les moyens à mettre en œuvre pour éviter les déperditions (isolation, calorifugeage, etc.), et l'efficacité énergétique dite active, qui va agir sur l'exploitation et l'optimisation des flux énergétiques *via* l'utilisation d'unités ou d'appareils performants.

La notion d'intégration énergétique, définie comme une approche globale qui analyse l'utilisation de l'énergie et des ressources dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique, s'applique en particulier au niveau industriel, notamment dans les domaines du raffinage et de la pétrochimie. Des répercussions comme la réduction des consommations d'énergie, la minimisation des émissions des gaz à effet de serre et de la quantité d'eau utilisée, etc. sont ainsi attendues. Ce concept intervient naturellement dans la mise en œuvre des réactions catalytiques, l'acte catalytique restant

à ce jour un élément clé pour la production de grands intermédiaires, de produits de commodités ou sophistiqués à haute valeur ajoutée, de carburants, etc.

En prenant comme exemple l'élaboration d'un procédé industriel associé à une transformation chimique réalisée par catalyse hétérogène, nous proposons dans cet article de décrire les gains potentiels en termes d'efficacité énergétique générés aux diverses étapes de ce développement. L'origine du procédé est, bien sûr, indissociable de la réaction chimique visée qui s'opère au sein du réacteur catalytique.

À l'échelle d'un premier niveau, une attention particulière est portée sur le choix du système catalytique mis en jeu qui est au cœur de la performance globale du procédé. Dans un jeu de conditions opératoires données, les réactifs et débits entrants étant fixés, et connaissant les performances catalytiques, il va être possible de déterminer les produits et débits associés et d'identifier les recyclages nécessaires. Les éléments de séparation (séparateurs) peuvent alors être conçus, ce qui constitue le deuxième niveau à considérer lors du développement du procédé (deuxième niveau hiérarchique). C'est à ce stade que les bilans matière et les bilans énergétiques de l'ensemble de l'unité sont calculés.

Le réseau d'échangeurs de chaleur peut, à son tour, être créé (troisième niveau hiérarchique). Son objectif est de pouvoir bénéficier de transferts thermiques au sein même du procédé afin de limiter le recours à des sources chaudes ou froides extérieures, ces dernières étant désignées par le

terme « utilités », communément admis dans le métier. Pour finir, la conception de ces utilités constitue le quatrième niveau hiérarchique à réaliser. Elles font généralement partie d'un système de service centralisé appartenant à l'ensemble du site.

Le système catalytique au cœur de la performance du procédé industriel : de la réaction chimique au réacteur

La performance générale du procédé est dépendante de l'activité et de la sélectivité propres au système catalytique et, par conséquent, des conditions opératoires nécessaires à son utilisation (température, pression, etc.). Dans le cadre de la recherche de nouveaux catalyseurs pour l'industrie du raffinage, une stratégie fréquemment envisagée consiste à développer des systèmes permettant les mêmes conversions que les catalyseurs du marché, tout en fonctionnant à des températures plus basses (gain de 5 à 10 °C à l'échelle du réacteur). Opérer une unité déjà existante à plus basse température conduit ainsi à une économie considérable sur la quantité des calories à apporter. Avec un système catalytique plus performant, plutôt que de baisser la température de fonctionnement de son unité, l'opérateur pourra également choisir d'augmenter les débits de charges pétrolières à transformer ou d'engager des charges pétrolières plus difficiles à traiter, tout en maintenant les caractéristiques des produits (teneur en soufre dans les carburants, indice de cétane ou indice d'octane) identiques à celles obtenues avec des charges moins réfractaires (plus simples à traiter) ou *via* l'emploi de débits moins importants.

La sélectivité est également une donnée importante qui va conditionner l'efficacité énergétique du procédé, de par la quantité des éléments de séparation à positionner en aval. Ainsi, imaginons qu'un catalyseur oriente la conversion de cellulose vers la formation d'éthylène glycol (produit désiré) plutôt que vers la formation de propylène glycol (produit non

désiré) dans un rapport 95-5 % respectivement. Sachant que la différence de point d'ébullition entre ces deux composés est inférieure à 10 °C, l'unité de séparation à mettre en œuvre pour récupérer l'éthylène glycol sera, dans le cas d'un système sélectif, bien plus petite et donc bien moins consommatrice en énergie que l'unité de séparation qui aurait été installée si la réaction n'était pas sélective et qu'elle produisait les deux composés dans un rapport 50-50.

Méthodes de séparation : vers le produit ciblé

En fonction des performances catalytiques obtenues, il convient de concevoir un système de séparateurs robuste et le moins onéreux possible. L'étape de séparation est une technique ou une technologie permettant de transformer un mélange de substances en produits purifiés. Ces séparateurs peuvent avoir deux fonctions : purifier en amont l'alimentation des réacteurs (réactifs) afin d'éliminer des molécules inhibitrices de l'activité des catalyseurs, ou éliminer en aval des produits secondaires, afin d'obtenir des produits primaires conformes aux spécifications imposées. Enfin, ils permettent de séparer les réactifs non consommés pour les recycler, afin de limiter l'approvisionnement en matières premières. L'énergie consommée permet de séparer les différents éléments chimiques, compensant leur enthalpie libre de mélange. Le principe d'un procédé de séparation est d'utiliser une différence de propriétés entre le composé d'intérêt et le reste du mélange.

Ainsi, le choix du procédé de séparation commence par une bonne connaissance de la composition du mélange et des propriétés des différents composants. L'ingénieur procédé doit déterminer quel est le principe physique de séparation le plus adapté, et ceci en tenant compte des débits, des constituants présents et de leur concentration. Le *tableau 1* présente les différents principes de séparation, par ordre croissant de difficulté (et donc de coût), habituellement rencontrés.

Tableau 1 - Principaux procédés de séparation utilisés dans l'industrie chimique.

Méthodes de séparation	État de la matière à séparer	Agent de séparation	Phases produites ou ajoutées	Principe de séparation
Flash	Liquide et/ou vapeur	Diminution de pression ou transfert de chaleur	Vapeur ou liquide	Différence de volatilité
Distillation classique	Liquide et/ou vapeur	Transfert de chaleur	Vapeur ou liquide	Différence de volatilité
Absorption des gaz	Vapeur	Absorbant liquide	Liquide	Différence de volatilité
Entrainement à la vapeur	Liquide	Vapeur d'entraînement	Vapeur	Différence de volatilité
Distillation extractive	Liquide et/ou vapeur	Solvant liquide et transfert de chaleur	Vapeur et liquide	Différence de volatilité
Distillation azéotropique	Liquide et/ou vapeur	Liquide d'entraînement et transfert de chaleur	Vapeur et liquide	Différence de volatilité
Extraction liquide-liquide	Liquide	Solvant liquide	2 ^e liquide	Différence de solubilité
Cristallisation	Liquide	Transfert de chaleur	Solide	Différence de solubilité
Adsorption des gaz	Vapeur	Solide adsorbant	Solide	Différence d'adsorption
Adsorption liquide	Liquide	Solide adsorbant	Solide	Différence d'adsorption
Membrane	Liquide ou vapeur	Membrane	Membrane	Différence de perméabilité et/ou de solubilité
Extraction supercritique	Liquide ou vapeur	Solvant supercritique	Fluide supercritique	Différence de solubilité
Lixiviation	Solide	Solvant liquide	Liquide	Différence de solubilité
Déshydratation	Solide et liquide	Transfert de chaleur	Vapeur	Différence de volatilité
Condensation solide	Vapeur	Transfert de chaleur	Solide	Différence de volatilité

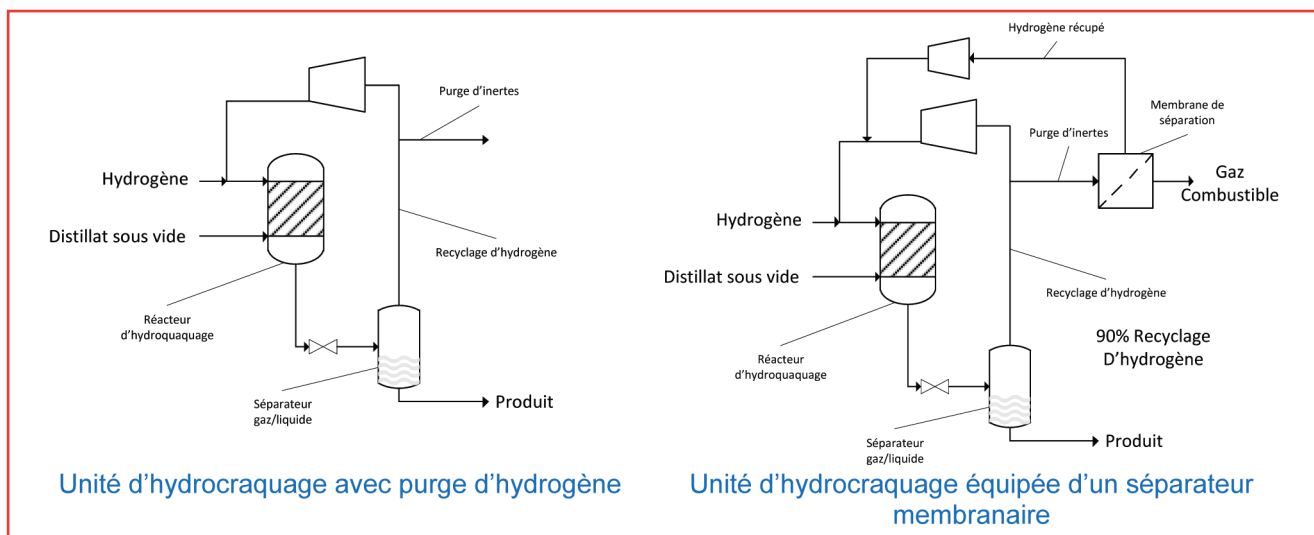


Figure 1 - Exemple d'optimisation d'un procédé industriel d'hydrocraquage par le choix d'une technique de séparation adéquate.

Le choix parmi toutes ces méthodes est difficile. Cependant, les contraintes physiques, économiques et environnementales qui se présentent permettent de réduire les choix possibles. De plus, il est également nécessaire de prendre en compte des aspects pratiques tels que l'opérabilité, qui joue un rôle essentiel dans la productivité (et donc la rentabilité) d'une unité industrielle.

La figure 1 présente un exemple d'optimisation du procédé industriel de raffinage dénommé « hydrocraquage » via un choix adapté des séparateurs. Ce procédé a pour objectif de fragmenter par hydrogénation des liaisons C-C, les molécules d'hydrocarbures lourds en molécules plus légères constitutives des carburants (essence, kérosène et gazole). Ce procédé, qui travaille à des pressions comprises entre 50 et 160 bar, est très demandeur en hydrogène : ce gaz constitue à lui seul une part importante du coût de production des carburants (coût de production élevé et utilisation de compresseurs coûteux). L'ajout d'une membrane de séparation permet d'augmenter la récupération de l'hydrogène non consommé dans le réacteur, et de le recycler dans le procédé [1]. Ce système permet de récupérer 90 % de l'hydrogène initialement perdu par la purge destinée à séparer les gaz indésirables tels que le H_2S ou le NH_3 produits lors des réactions d'hydrotraitement, en sortie du séparateur gaz/effluent liquide.

À l'heure actuelle, les méthodes de conception des schémas de séparation généralistes sont principalement basées sur les logigrammes (représentations schématiques de procédures de conception [2-3] qui permettent de choisir rapidement les techniques de séparation en suivant une procédure basée sur la conception de colonnes à distiller (équipements les plus fréquents). De telles approches utilisent en partie des méthodes graphiques [4-5] et heuristiques ou empiriques [6], ces dernières étant fondées sur l'expérience « métier » des ingénieurs. Dans le domaine des colonnes à distiller, les méthodes par optimisation [7-8] proposent une méthode de modélisation leur permettant d'être traitées comme un problème mathématique par des algorithmes qui nécessitent des moyens de calcul importants.

Un aspect crucial non abordé par ces méthodes est l'intégration énergétique à l'échelle du procédé qui consiste à favoriser les échanges d'énergie internes du procédé pour diminuer la demande d'énergie venant de l'extérieur.

Le paragraphe suivant présente un aperçu des méthodes d'intégration énergétique.

Intégration énergétique des procédés

La principale intégration énergétique envisageable pour un procédé industriel est d'abord thermique, avec pour mission de satisfaire les demandes de chaleur et de froid. Pour cela, les sites industriels disposent d'utilités chaudes (vapeur à plusieurs niveaux de pression, eau chaude, huile chaude, etc.), d'utilités froides (eau de refroidissement, air, gaz, liquide, etc.), et d'un réseau d'échangeurs de chaleur permettant de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre sans les mélanger. Un grand nombre d'industriels considèrent que l'optimisation de leurs réseaux d'échangeurs de chaleur est la meilleure voie pour diminuer leur facture énergétique. De fait, plusieurs méthodes de conception optimale de ces réseaux ont été utilisées avec succès dans un grand nombre de projets d'unités neuves ou de reconfiguration d'unités depuis les cinquante dernières années.

Deux grandes approches sont à ce jour utilisées pour réaliser cette intégration énergétique thermique :

- une approche heuristique : les méthodes associées sont bâties autour d'une procédure détaillée mettant en œuvre des règles d'ingénierie de conception, comme la méthode bien connue dite « du pincement » (ou analyse Pinch) ;
- une approche mathématique des réseaux d'échangeurs de chaleur via le développement de méthodes dites d'optimisation numérique. Cette approche présente l'avantage de pouvoir intégrer des contraintes techniques et économiques plus élaborées mais induit un problème plus complexe.

Ces approches permettent de déterminer, en fonction des températures des fluides et des quantités de chaleur échangées, les objectifs de consommation d'utilités chaudes et froides, et fixent quelques règles pour organiser les appariements de fluides chaud/froid à travers les échangeurs de manière optimale.

Trois étapes sont généralement à considérer pour parvenir à cette optimisation :

- la recherche des cibles de consommation énergétique, qui permet de déterminer le potentiel d'énergie récupérable (possible via l'analyse Pinch) ;

- la conception du réseau d'échangeurs de chaleur, qui consiste à déterminer la structure optimisée (via la méthode du pincement ou d'optimisation numérique) ;
- une étape d'engineering préliminaire pour résoudre les aspects de dimensionnement et de régulation du système et proposer une estimation des coûts.

La méthode du pincement et une méthode d'optimisation numérique récemment développée à IFPEN sont brièvement abordées ci-après, avant quelques exemples concrets d'intégration énergétique appliqués à des procédés industriels.

La méthode du pincement (analyse Pinch)

La méthode du pincement [9] est la méthode d'analyse thermique la plus répandue dans l'industrie et a été appliquée à la conception des réseaux d'échangeurs vers la fin des années 1990 [2]. Cette théorie vise à simplifier l'application des premier et second principes de la thermodynamique en effectuant la synthèse des besoins et des disponibilités en énergie chaleur à l'aide de diagrammes température-enthalpie, appelés courbes « composites », représentées sur la figure 2. Cette figure représente, en théorie, le profil thermique d'un échangeur de chaleur idéal capable à lui seul d'intégrer tous les courants du procédé : ce diagramme ainsi défini permet de quantifier rapidement quelles seront les consommations minimales de chaleur et de froid du procédé, l'objectif étant de se rapprocher le plus possible de ces cibles. Ce diagramme fournit également un renseignement important : la température de pincement, qui permet de localiser la zone et les flux du procédé où les écarts de température seront les plus faibles, et où la récupération de chaleur sera la plus coûteuse.

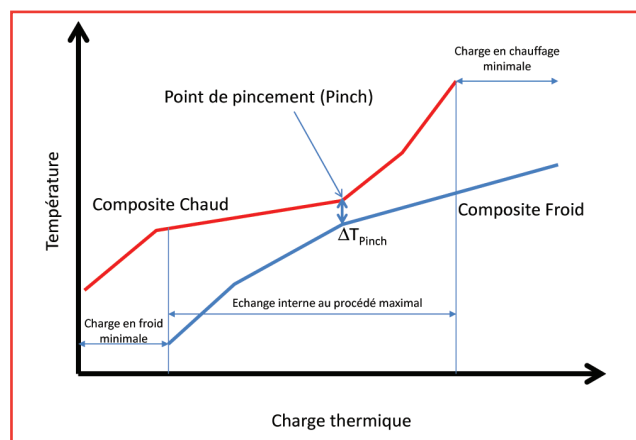


Figure 2 - Courbes composites d'un procédé industriel.

Le retour d'expérience sur l'utilisation de la méthode du pincement montre que la qualité des résultats dépend de l'expérience des ingénieurs, et que cette approche ne permet pas d'identifier systématiquement toutes les modifications nécessaires sur un réseau, ni ne permet de calculer ou de localiser les surfaces d'échange de chaleur à ajouter.

Les modèles d'optimisation numérique de réseaux d'échangeurs de chaleur ont alors été développés de façon à proposer une conception plus systématique et automatisée de ces réseaux.

La méthode d'optimisation numérique

En écrivant toutes les équations sous forme mathématique, et en représentant toutes les combinaisons possibles

en termes d'échanges thermiques, l'espoir est de diminuer drastiquement le temps ingénieur dédié à ces études en améliorant la qualité des réseaux d'échangeurs de chaleur. Un autre avantage de cette méthode est la possibilité de contraindre le système au regard de certaines nécessités, liées à la sécurité par exemple.

Ces problèmes sont généralement formulés comme des problèmes impliquant des variables entières et des modèles non linéaires, ou MINLP (« mixed integer non-linear programming ») [10], mais présentent de nombreuses hypothèses simplificatrices. IFPEN a développé un logiciel interne capable d'intégrer des contraintes industrielles précises.

Pour permettre les économies d'énergie, il faut aussi pouvoir récupérer les gisements de températures non exploités classiquement, dans la gamme de 50 à 150 °C notamment. Ces gisements représentent des pertes colossales d'énergie, qu'il est possible de récupérer (en partie) grâce à des technologies de récupération telles que les pompes à chaleur ou les cycles organiques de Rankine. Le principe de ces deux systèmes est de retransformer une énergie thermique à basse température en une autre énergie réutilisable comme l'électricité, ou un flux plus chaud.

Exemples de résultats d'intégration énergétique appliqués à des procédés industriels

Les recherches menées par IFPEN dans le domaine du raffinage et des biocarburants illustrent l'efficacité de ces méthodes et les gains potentiels que l'on peut en attendre. Le premier exemple est appliqué au procédé HCK [11]. La méthode d'optimisation numérique décrite précédemment a été appliquée, en s'appuyant sur des contraintes industrielles, économiques, technologiques et d'opérabilité. Le réseau d'échangeurs obtenu permet ainsi de diminuer le coût opératoire des utilités de 9,5 %, avec un accroissement du prix des investissements de 4 %. Cependant, le coût de l'énergie augmentant, le temps de retour sur investissement (défini comme le temps nécessaire pour que les économies réalisées puissent payer l'investissement) restera faible.

Un second exemple est basé sur une approche plus globale issue de travaux de thèse sur l'optimisation de procédés de production de bioéthanol à partir de canne à sucre, en collaboration avec l'EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse) [12]. Cette approche consiste à contrôler simultanément la structure du procédé, c'est-à-dire l'enchaînement des équipements (réacteurs, échangeurs, colonnes à distiller), le réseau d'utilité vapeur et électricité, et les conditions opératoires (températures, pressions, etc.), afin de diminuer la consommation d'énergie de l'unité et de maximiser l'exportation d'électricité. L'objectif est d'exploiter simultanément la canne à sucre et ses feuilles pour produire de l'éthanol et un excédent de production électrique.

Pour cela, il est nécessaire de pouvoir modéliser entièrement le procédé et la production d'utilités sous un simulateur (AspenPlus®) et de pouvoir optimiser des problèmes complexes (28 variables d'optimisation des équipements, 50 courants procédés à intégrer thermiquement et 75 équipements). L'optimisation réalisée est multi-objectif, c'est-à-dire qu'elle permet de restituer toutes les solutions de compromis économique et énergétique liées à une ou des fonctions « objectifs » définie(s) par l'utilisateur. Ces travaux ont permis de montrer qu'il était possible de réaliser un gain d'efficacité énergétique globale de 7 % et une augmentation de la production électrique de 20 %.

Conclusions et perspectives

Le contexte actuel de raréfaction des énergies fossiles ainsi que la volatilité des prix associés incitent fortement notre société à la sobriété énergétique. L'Europe en a même fait une de ses priorités au travers du paquet « Énergie-Climat » voté en décembre 2008 qui fixe comme objectif d'augmenter de 20 % l'efficacité énergétique d'ici 2020 tout en réduisant de 20 % ses émissions de gaz à effet de serre (GES) dans le but de lutter contre le réchauffement climatique. De son côté, la France s'est également engagée à réduire ses émissions de GES via la loi de « Transition énergétique pour la croissance verte ».

Même si des efforts importants ont été réalisés dans le secteur industriel depuis 1973, les scénarios tendanciels DIREME (Direction des ressources énergétiques et minérales) prévoient que la consommation d'énergie en valeur absolue devrait continuer à croître d'ici 2030. D'après une estimation du CEREN (Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie), on estime le potentiel d'économie d'énergie maximum à 12 Mtep (soit environ 23 % de la consommation énergétique du secteur industriel).

Ces économies pourraient être réalisées selon la répartition suivante : environ deux tiers des économies peuvent être réalisées sur les usines en utilisant l'approche locale de l'optimisation, avec des technologies classiques ou expérimentales, le tiers restant peut être réalisé en menant des actions transversales, en utilisant des technologies de valorisation et de transport des énergies résiduelles (transmission de fluides caloporteurs, production de froid, chauffage locaux, moteurs, etc.), pour une valorisation à l'échelle d'un bassin industriel par exemple. De telles économies, si elles se réalisaient, pourraient fortement contribuer à la croissance de la compétitivité des industries, en France notamment.

Des voies technologiques et méthodologiques prometteuses sont en développement afin d'appuyer ces objectifs : les méthodologies d'intégration thermique (comme évoquées dans cet article), les pompes à chaleur, la production de froid, le stockage de l'énergie, les échangeurs de chaleur et la valorisation des calories perdues.

Les développements de nouveaux catalyseurs plus performants sont résolument orientés vers la sobriété énergétique sur tout leur cycle de vie, depuis leur fabrication jusqu'à leur éventuel recyclage, en passant par leur utilisation. Ces développements visent concrètement à diminuer l'intensité des conditions réactionnelles (température, pression), tout en maintenant ou en améliorant la conversion sélective de la matière première. L'optimisation de l'utilisation d'énergie passe par celle des catalyseurs, des conditions opératoires des trains de séparation, et de la récupération énergétique du procédé via son intégration énergétique.

Ce dernier domaine profite d'un engouement à la fois scientifique et financier puisque ce savoir-faire est la clé de la diminution de la consommation énergétique. Les enjeux sont tels que la communauté scientifique travaille sans relâche pour améliorer sans cesse méthodes et outils : les résultats sont probants et les perspectives porteuses pour plusieurs décennies.

Références

- [1] Baker R.W., Future directions of membrane gas separation technology, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2002**, *41*, p. 1393.
- [2] Barnicki S.D., Fair J.R., Separation system synthesis: a knowledge based approach. 1. Liquid mixture separations, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **1990**, *29*, p. 431.
- [3] Douglas J.M., A hierarchical decision for process synthesis, *AIChE Journal*, **1985**, *31*, p. 353.
- [4] Ponchon M., *Tech. Modern*, **1921**, *13*, p. 20 ; Savarit R., *Arts et Métiers*, **1922**, *3*, p. 65.
- [5] McCabe W.L., Thiele E.W., Graphical design of fractionating columns, industrial and engineering chemistry, **1925**, *17*, p. 605.
- [6] Glinos K.A., Global approach to the preliminary design and synthesis of distillation trains, Thèse, Univ. of Massachusetts, **1985**.
- [7] Aggarwal A., Floudas C.A., Synthesis of general distillation sequences: nonsharp separations, *Comput. Chem. Eng.*, **1990**, *14*, p. 631.
- [8] Bartfeld P., Aguirre P.A., Grossmann I.E., A decomposition method for synthesizing complex column configuration using tray-by-tray GDP models, *Comp. Chem. Eng.*, **2004**, *28*, p. 2165.
- [9] Linnhoff B., Use pinch analysis to knock down capital costs and emissions, *Chemical Engineering Progress*, **1994**, *90*, p. 32.
- [10] Ciric A.R., Floudas C.A., A comprehensive optimization model of the heat exchanger network retrofit problem, *Heat Recovery Systems and CHP*, **1990**, *10*, p. 407.
- [11] Plenneveau T., Digne R., Dreux H., Feugnet F., Utilisation industrielle d'une méthode numérique d'optimisation d'un réseau d'échangeur, dans *Récents Progrès en Génie des Procédés*, Société Française de Génie des Procédés, **2013**, *104*.
- [12] Bechara R., Methodology for optimal process design: application to sugarcane conversion, Thèse soutenue le 17/11/2015, EPFL.



A. Gomez



A. Chaumonnot



A. Bonduelle-Skrzypczak

Adrien Gomez (auteur correspondant), ingénieur procédé à IFPEN*, travaille sur plusieurs projets dans le domaine de l'énergétique et du raffinage.

Alexandra Chaumonnot, ingénieure de recherche à IFPEN*, est spécialisée dans la synthèse de matériaux à base d'oxydes pour le développement de catalyseurs industriels.

Audrey Bonduelle-Skrzypczak, ingénieure de recherche à IFPEN*, est spécialisée dans le développement de catalyseurs d'hydrotraitement et d'hydrocraquage.

* IFPEN, Rond-point de l'Échangeur de Solaize, BP 3, F-69360 Solaize.
Courriels : adrien.gomez@ifpen.fr ; alexandra.chaumonnot@ifpen.fr ;
audrey.bonduelle@ifpen.fr