



Pr. Nouredine Gherraf

Principes de l'intensification des procédés

Sommaire

1. INTRODUCTION	2
2. EQUIPEMENTS POUR INTENSIFICATION	3
➤ Catalyses monolithiques	4
➤ Microréacteurs	6
➤ Réacteur à disque rotatif	7
➤ Réacteur à baffles oscillantes	8
➤ Réacteur à lit de garnissage rotatif	11
➤ Extracteur centrifuge	12
3. MÉTHODES DE L'INTENSIFICATION DES	13
➤ distillation réactive	13
➤ Réacteur à membrane	14
➤ Séparation par membranes	16
➤ Distillation membranaire	17
➤ Pervaporation	18
4. REFERENCES	20

1. INTRODUCTION

Produire plus et plus rapidement, mais à moindre coût et avec un impact environnemental réduit. Telles sont les contraintes qui pèsent aujourd'hui sur l'industrie chimique et qui ont abouti à une remise en question du procédé industriel tel que défini depuis des décennies.

Qu'est-ce que l'intensification des procédés?

En 1995, en ouvrant la 1ère Conférence Internationale sur l'intensification des procédés dans le Industrie chimique, Ramshaw, l'un des pionniers dans le domaine, a défini l'intensification des procédés comme une stratégie pour faire des réductions spectaculaires de la taille d'un complexe chimique afin d'atteindre un objectif de production donné. Celles-ci peuvent provenir de la réduction de la taille d'équipement individuelles et aussi de réduire le nombre d'opérations unitaires ou d'appareils impliqués. Dans tous les cas, le degré de réduction doit être significatif; Ramshaw parle de la réduction du volume de l'ordre de 100 ou plus, ce qui est assez difficile. À nos avis, une diminution d'un facteur de deux porte déjà tous les attributs d'un changement drastique et, par conséquent, devrait être considéré comme une intensification des procédés.

D'autre part, la définition de Ramshaw est assez étroite, décrivant l'intensification des procédés exclusivement en termes de réduction de la taille de l'usine ou de l'équipement. En fait, il ne s'agit que de l'un des nombreux effets souhaités possibles. De toute évidence, une augmentation spectaculaire de la capacité de production dans un volume d'équipement donné, une diminution progressive de la consommation d'énergie par tonne de produit, ou même une réduction marquée de la formation de déchets ou de sous-produits sont également considérées comme intensification des procédés. Il n'est pas surprenant que l'intensification des procédés, motivée par le besoin de changements révolutionnaires dans les opérations, se concentre principalement sur de nouvelles méthodes et de nouveaux équipements. Mais, il englobe également certaines technologies et matériels établis.

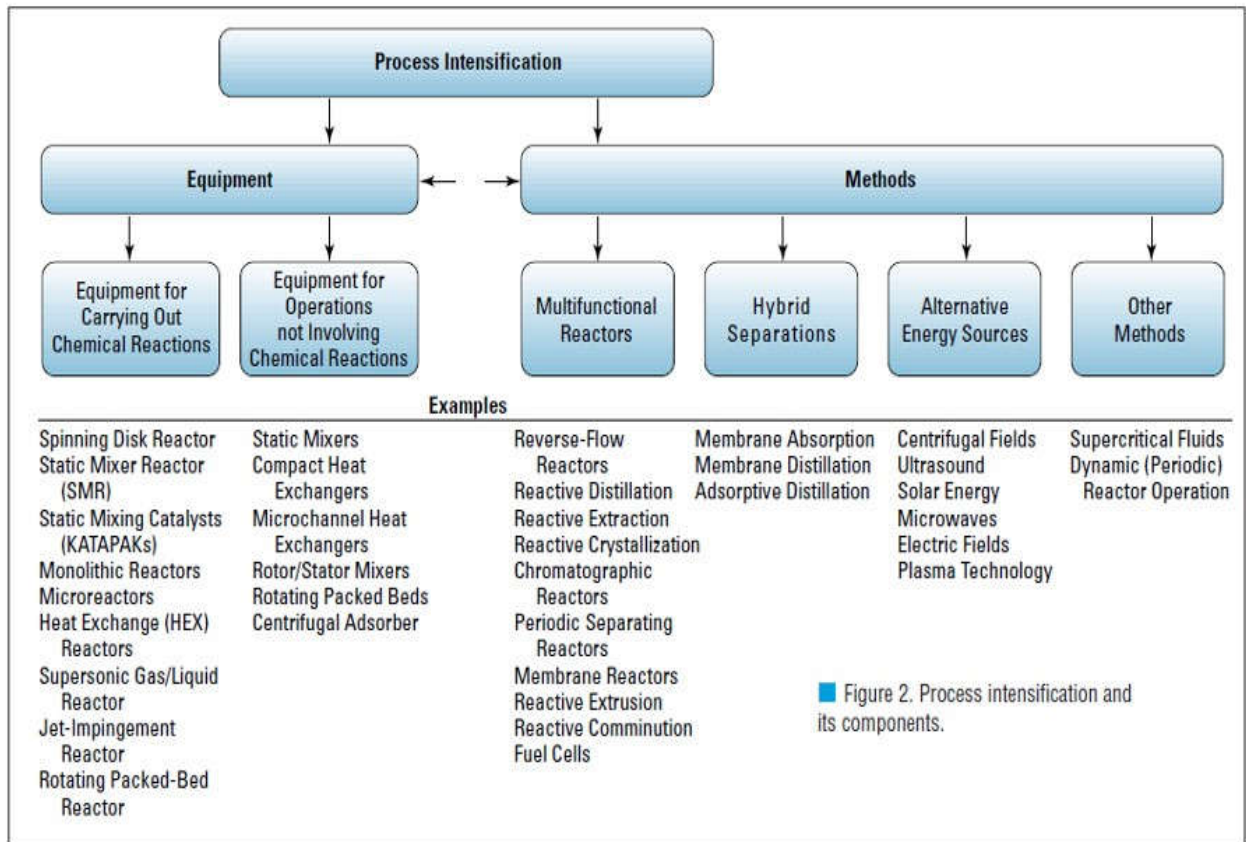


Figure 2. Process intensification and its components.

Figure 1. Taxonomie d'intensification de procédés

L'objectif de l'intensification des procédés est de réduire les coûts de production et de concevoir des procédés rentables. Cela peut être réalisé en apportant des améliorations aux technologies existantes, mais un aspect essentiel de l'intensification des procédés est également le développement de nouvelles technologies. La philosophie de conception dans l'intensification de procédés est de concevoir un procédé qui a la seule cinétique chimique. Cela signifie que toutes les autres limitations de traitement telles que le transfert de masse, le transfert de chaleur et l'hydrodynamique sont éliminées,

2. EQUIPEMENTS POUR INTENSIFICATION DU PROCEDES

la technologie de l'agitation a été grandement intensifiée au cours des 25 dernières années, au moins loin comme liquide / liquide et gaz / liquide systèmes. Particulièrement, ceci est réalisé non pas en améliorant les mélangeurs mécaniques mais, au contraire, en les abandonnant- en faveur des mélangeurs statiques. Ces équipements sont des exemples d'intensification de procédés. Ils offrent une méthode plus efficace et plus économique pour mélanger ou entrer en contact entre des fluides et, aujourd'hui, servir des rôles encore plus larges. Par exemple, le réacteur mélangeur statique (SMR) peut être appliqué dans les procédés dans lesquels le mélange simultané et le transfert intensif de chaleur sont nécessaires, comme dans les réactions de nitration ou de neutralisation.



Figure 2. Le réacteur-mélangeur est un exemple classique d'équipements d'intensification de procédés

➤ Catalyses monolithiques

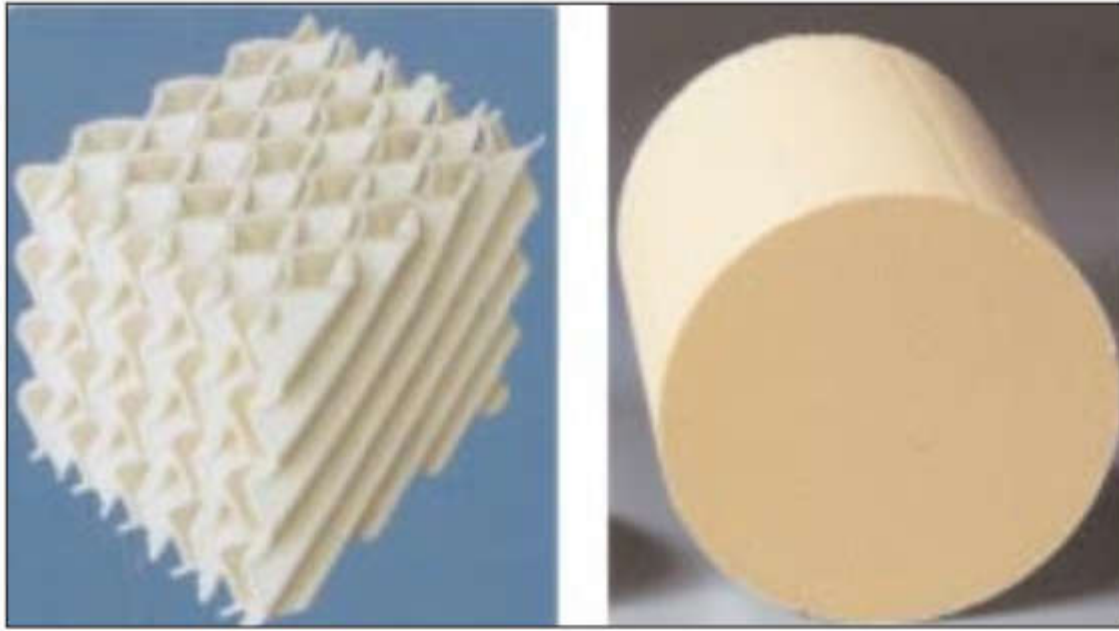
Les substrats monolithiques utilisés aujourd'hui pour les applications catalytiques sont métalliques ou non métalliques fournissant une multitude de canaux étroits rectilignes

de section transversale uniforme. Pour assurer une porosité suffisante et améliorer la surface catalytiquement active, les parois internes des canaux monolithes sont généralement recouvertes d'une fine couche de washcoat, qui agit comme support pour les espèces catalytiquement actives. Les caractéristiques les plus importantes des monolithes sont:

- très faible perte de charge en flux monophasé et diphasique, un à deux ordres de grandeur inférieurs à cela des systèmes à lit garnis conventionnels;
- zones géométriques élevées par volume de réacteur, typiquement 1,5-4 fois plus que dans les réacteurs avec des catalyseurs particulaires;
- rendement catalytique élevé, pratiquement 100%, en raison de chemins de diffusion très courts dans la couche de washcoat mince; et
- performance exceptionnellement bonne dans les procédés où la sélectivité est entravée par résistances de transfert de masse

Les catalyseurs monolithiques peuvent également être installés en ligne, comme les éléments de mélange statiques, en utilisant ce dernier comme dispositifs gaz / liquide de dispersion. Les unités en ligne offrent des avantages supplémentaires:

- faibles coûts d'investissement, car Les réacteurs monolithiques en ligne sont des modules prêts à l'emploi installés en une partie des pipelines;
- disposition de l'installation compacte (en ligne les réacteurs monolithes peuvent même être placés souterrain, disons, dans les conduits de ciment
- capacité à répondre plus aux normes de sécurité et d'environnement que les réacteurs conventionnels (tels que par exemple, en plaçant le réacteur unité sous le niveau du sol);
- remplacement très facile et rapide (par exemple, en cas de désactivation du catalyseur) simplement en échangeant un morceau de pipeline, au lieu de décharger et charger le nouveau catalyseur;
- la possibilité de distribuer plusieurs points d'alimentation le long du réacteur;



a

b

Figure 3. (a) Emballage avec catalyseur intégré et (b) catalyseur monolithique

➤ **Microréacteurs**

Valeurs de coefficients de transfert de chaleur encore plus élevées que celles des échangeurs de chaleurs. Les réactions peuvent être réalisées dans des microréacteurs. Ici, des valeurs allant jusqu'à $20\,000\text{ W / m}^2\text{K}$ sont rapportés. Les microréacteurs sont des réacteurs chimiques de très petites dimensions qui ont généralement une structure en forme de sandwich constituant d'un certain nombre de tranches (couches) avec micro canaux ($10\text{-}100\ \mu\text{m}$). Les couches effectuent divers fonctions, du mélange au réaction catalytique, échange de chaleur ou séparation. Intégration de ces différentes fonctions au sein d'une seule unité est l'un des avantages les plus importants de microréacteurs. Les très hauts débits de transfert de chaleur réalisables dans les microréacteurs permettent un fonctionnement des procédés hautement exothermiques isothermes, ce qui est particulièrement important dans la réalisation d'études cinétiques. A cause des rapports volume réactif/surface très faibles, les microréacteurs sont potentiellement attractifs pour les procédés impliquant des réactifs toxiques ou explosifs. L'échelle à laquelle des procédés utilisent des batteries de plusieurs microréacteurs devient économiquement et techniquement réalisable.

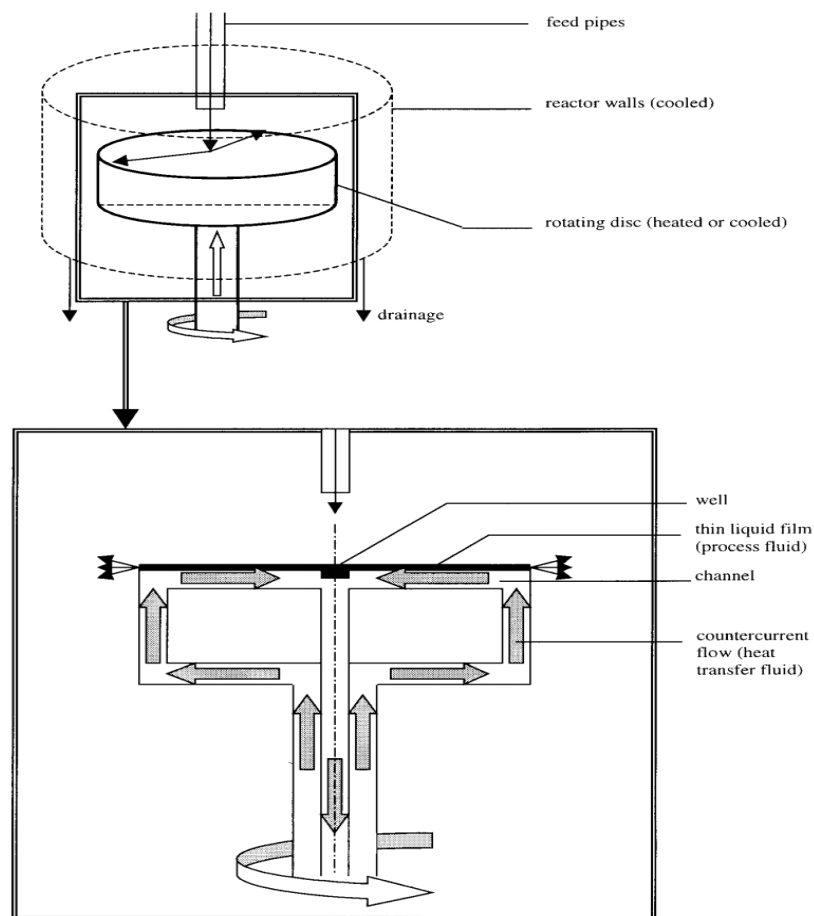
La configuration géométrique de échangeurs de chaleur à micro canaux (structures transversales empilées) ressemble à cela des monolithes à écoulement croisé bien que

les matériaux et les méthodes de fabrication utilisés sont différents.

➤ Réacteur à disque rotatif (SDR)

Récemment, le réacteur à disque rotatif (SDR) a été présenté comme une alternative au réacteur traditionnel à agitation prétendant offrir des avantages en ce qui concerne les caractéristiques de mélange, la transfert de chaleur et distribution du temps de séjours.

Principe de fonctionnement: Le disque rotatif est une plaque orientée horizontalement qui peut être chauffée ou refroidie et tournée par un moteur pneumatique jusqu'à 5000 tours par minute. Des courants d'alimentation liquides, alimentés à travers le centre de la plaque, se déplacent rapidement à travers la surface et forment un film mince d'épaisseur δ . Le liquide quitte le disque sur son bord, après il peut être recueilli. Le SDR est capable de soumettre ce film à une contrainte de cisaillement très élevée, τ , favorisant des vitesses de transfert thermique très élevées entre le film et le disque et des taux de transfert de masse élevés entre les flux liquides ou entre le film et le gaz dans l'atmosphère environnante.



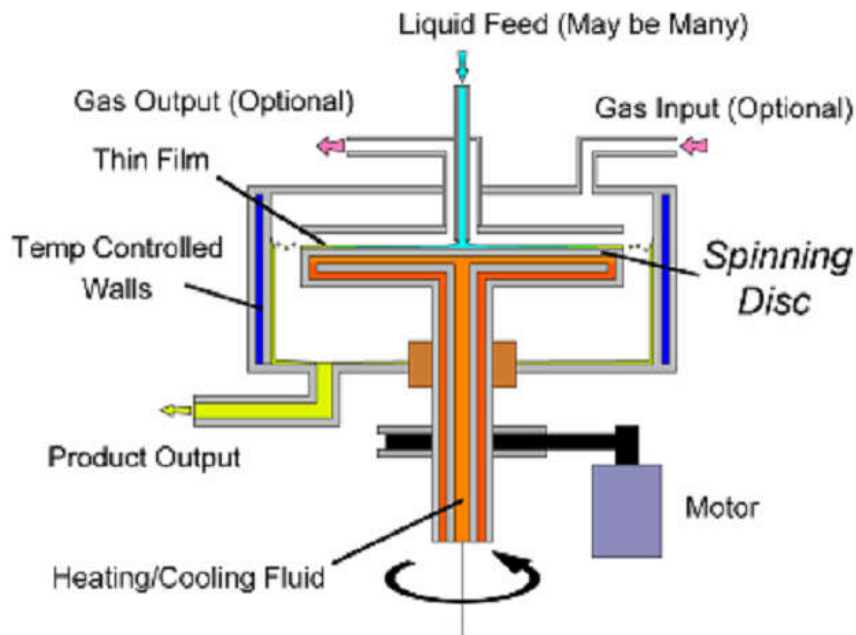


Figure 4: Réacteurs à disque rotatif

- Fondamentalement facile à mettre en échelle, Surface peut être enduite de catalyseur, Surface peut être modifiée pour changer les temps de séjour, Particulièrement bon à manipuler des fluides visqueux particulièrement dans le transfert de chaleur de refroidissement
- Capacité à chauffer et refroidir très rapidement des fluides, particulièrement les fluides visqueux; pasteurisation, formation de cristaux fins. Très faible ΔT donne moins de dommages thermiques. Coefficients de film jusqu'à $50\text{kW} / \text{m}^2\text{K}$, globalement $10\text{kW} / \text{m}^2\text{K}$.
- Auto-nettoyage / caractéristique de nettoyage facile.
- Transfert de masse amélioré pour l'évaporation et l'élimination des odeurs avec moins de dommages thermiques
- facile à mettre en échelle
- La précipitation et la cristallisation peuvent être effectuées sans mise à l'échelle
- Non moussant

➤ **Réacteur à baffles oscillantes**

Le réacteur à baffles oscillantes (OBR) est constitué d'un tube muni de chicanes équidistantes présentées transversalement à un flux oscillant. Les chicanes perturbent la couche limite au niveau de la paroi du tube, tandis que l'oscillation améliore le mélange par la formation de vortex. Si un flux net est également superposé à ce mouvement oscillatoire, alors le réacteur se comporte comme de nombreux réservoirs en série bien mélangés. Ainsi, l'OBR est capable d'obtenir un bon comportement d'écoulement à piston (plug flow) lorsque le débit / mélange du piston est découplé du flux net. Leur avantage est la réduction de processus de longue durée de séjour avec des rapports L / D de plusieurs ordres de grandeur plus petits que les réacteurs à écoulement tubulaire conventionnels.

Les conceptions de réacteurs continus classiques présentent certains inconvénients:

CSTRs: (Continuous Stirred Tank Reactors, réacteurs continus ou ouverts) temps de résidence élevé (conduisant à la variabilité du produit, par exemple des distributions de tailles de particules importantes)

PFR (plug flow reactor, réacteurs à écoulement piston) :

Exige de grandes longueurs de tubes étroits, provoquant: des problèmes de contrôle, d'opérabilité, d'encombrement et de pompage

CSTRs-in-Series: Ont tendance à être coûteux (nécessitant plusieurs réacteurs et systèmes de contrôle)

L'OBR apporte une solution à ces problèmes. Les applications spécifiques comprennent:

- Saponification
- Production de biodiesel (une réaction d'estérification)
- Fermentations, y compris la production de bière / bioéthanol
- Traitement des eaux usées
- Dépistage (à méso-échelle)
- Réactions liquide-liquide
- Réactions liquide-gaz (par exemple bioréactions)
- Réactions liquide-solide (c.-à-d. Catalyse hétérogène)
- Extraction réactive

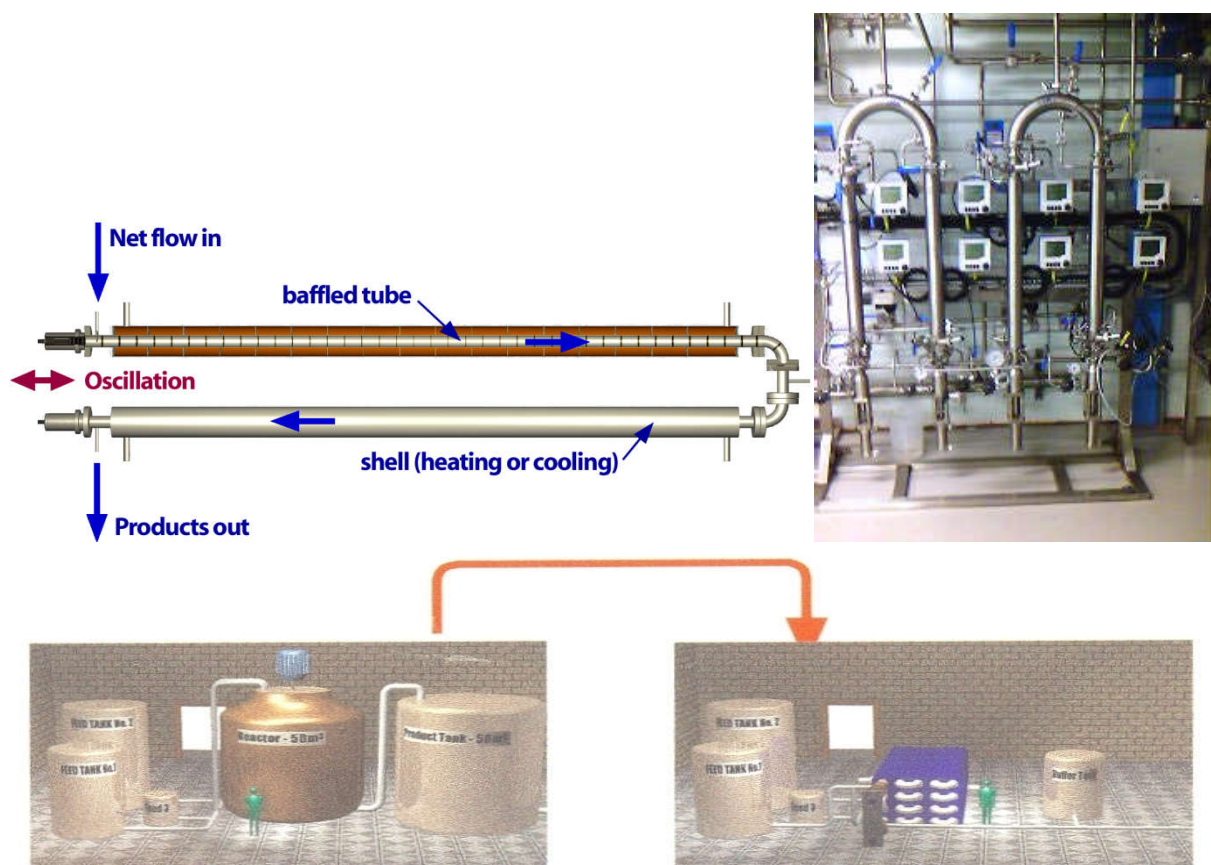
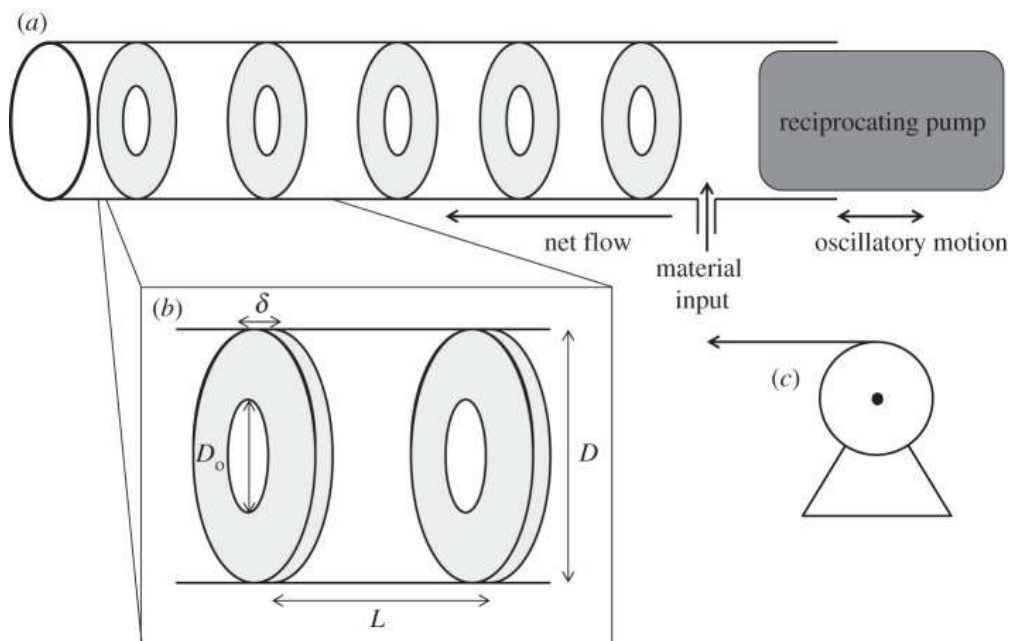


Figure 5 : Intensification des procédés par remplacement d'un réacteur discontinu par un OBR continu

Avantages

Ecoulement piston

Mélange liquide efficace à deux phases

Transfert de chaleur amélioré

Transfert de masse amélioré

Uniformité de mélange, faible cisaillement

Consommation d'énergie réduite: Coûts de fonctionnement réduits

Petit réacteur: coûts d'investissement réduits.

➤ **Réacteur à lit de garnissage rotatif (RPB)**

Les réacteurs centrifuges - souvent appelés Les réacteurs à lit à garnissage rotatif (RPB) ou les contacteurs Higee intensifient le transfert de masse en utilisant les effets d'un champ de gravité élevé. Le liquide est pulvérisé au diamètre intérieur du lit garni par un ensemble de buses bien réparties. La force centrifuge de la filature rotor accélère le liquide radialement vers l'extérieur et crée un film très mince de liquide à la surface du lit garni.

Le gaz pénètre dans le logement fixe et traverse le rotor de l'extérieur vers l'intérieur. Un joint dynamique au sommet du rotor assure que le gaz se déplace à travers le lit garni.

Un taux de conversion très élevé, presque exempt de sous-produits est causé par l'extrême court temps de rétention. Le champ de gravité élevé permet un temps de rétention court et fournit un contact intensif spontané entre le gaz et le liquide. L'espace d'installation requis, en particulier le la hauteur d'installation est seulement une fraction d'une tour traditionnelle. Lors de l'utilisation d'un alliage spécial matériaux, les coûts en capital de l'équipement peuvent être minimisés de manière significative.

Pour la première fois, le lit de garnissage rotatif (RPB) a été mis en œuvre dans des réactions d'hydrolyse biocatalytique. Le processus de forte intensification a amélioré le micro mélange du substrat et de la lipase, qui était fournie par la force centrifuge du RPB. Le facteur de gravité élevé (β), le facteur clé pour le transfert de masse dans le RPB, a été étudié dans la réaction d'hydrolyse de l'huile de soja. Afin d'identifier l'application du réacteur, trois autres espèces d'huiles ont également été appliquées dans le système d'hydrolyse RPB, sous la valeur β optimale. Les rendements d'hydrolyse de ces quatre huiles dans le RPB étaient supérieurs de 15% à 25% au rendement obtenu dans un

réacteur à cuve agitée continue traditionnelle (CSTR) et le temps de réaction était réduit de 30% à 50%, ce qui signifiait que le réacteur RPB applicable pour l'hydrolyse de l'huile et supérieure au système CSTR.

Des colonnes à lit fixe à garnissage conventionnel sont mises en œuvre pour le transfert de masse tels que la distillation, l'absorption.

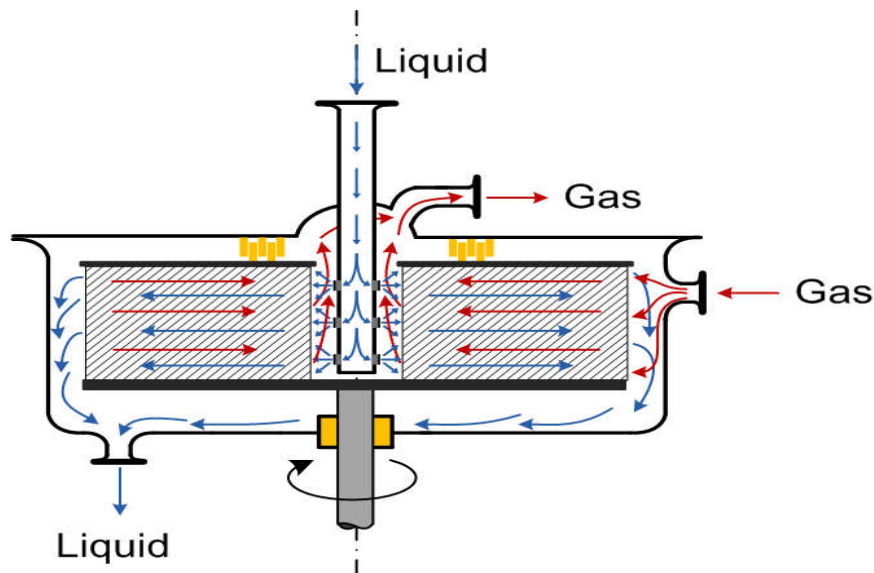


Figure 6 : Réacteur à lit de garnissage rotatif (RPB)

➤ **Extracteur centrifuge**

Un extracteur centrifuge, également appelé contacteur centrifuge ou contacteur centrifuge annulaire-utilise la rotation du rotor à l'intérieur pour mélanger deux liquides immiscibles à l'extérieur du rotor et à séparer les liquides dans le champ de gravité à l'intérieur du rotor. Un extracteur centrifuge génère une extraction continue d'une phase liquide dans une autre phase liquide.

Deux liquides non miscibles de différentes densités sont alimentés et sont rapidement mélangés dans l'espace annulaire entre le rotor tournant et l'espace stationnaire. Les phases mixtes sont dirigées vers le centre du rotor par des ailettes radiales dans la base du boîtier. Comme les liquides pénètrent dans l'ouverture centrale du rotor, ils sont accélérés vers le mur. Les phases mixtes sont rapidement accélérées à la vitesse au rotor et la séparation commence lorsque les liquides sont déplacés vers le haut. Un système de déversoirs au sommet du rotor permet à chaque phase de sortir du rotor où elle atterrit dans un anneau collecteur et sort de la scène. Débit entre les étages est par

gravité sans besoin de pompes. Les contacteurs centrifuges agissent ainsi comme un mélangeur, une centrifugeuse et une pompe.

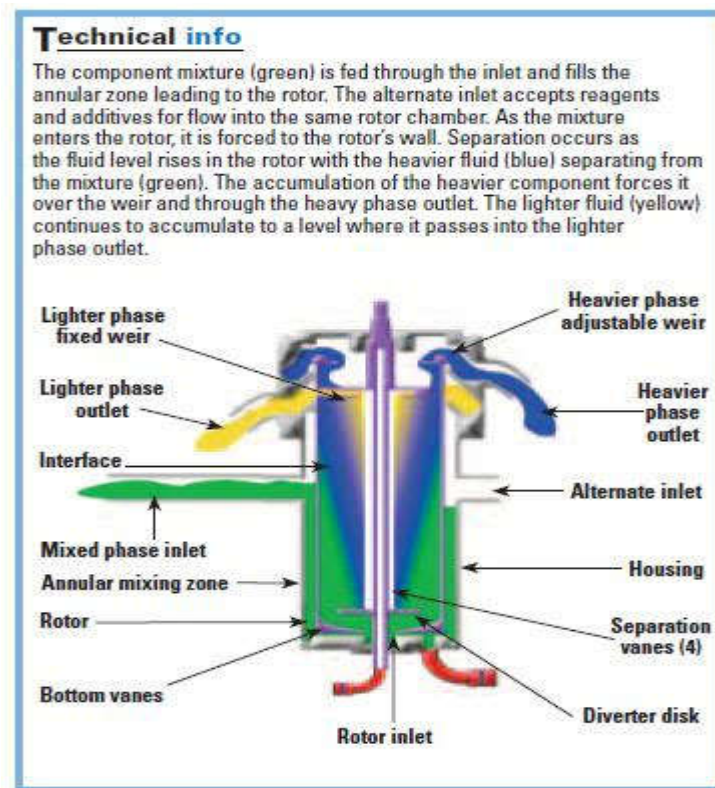


Figure 7 : Extracteur centrifuge

3. MÉTHODES DE L'INTENSIFICATION DES PROCÉDÉS

➤ distillation réactive

La distillation réactive est l'un des procédés chimiques intensifiés les plus reconnus, qui intègrent la séparation et la réaction au sein d'un même appareil. Les principaux avantages de la distillation réactive concerne l'amélioration de la conversion de la réaction, la diminution significative des investissements, des coûts de fonctionnement, de la consommation énergétique, et de la production de sous produits. Un exemple élaboré est présentée sur la transestérification du carbonate de diméthyle par le procédé de distillation réactive discontinue dans une colonne avec un bac intermédiaire.

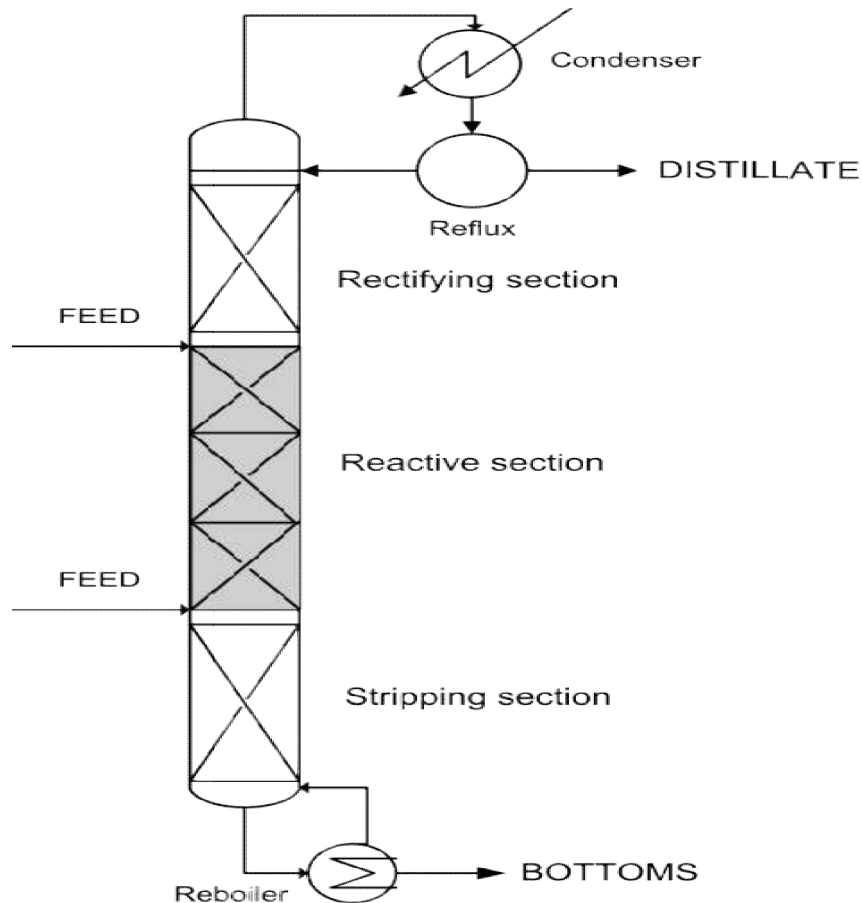


Figure 8: Distillation réactive

➤ Réacteur à membrane (MR)

Un réacteur à membrane (MR) est un dispositif pour effectuer simultanément une réaction (reformage à la vapeur, reformage à sec, reformage autothermique, etc.) et une séparation à base de membrane dans le même dispositif physique. Par conséquent, la membrane joue non seulement le rôle d'un séparateur, mais participe également dans la réaction elle-même. Le terme Membrane Bioréacteur (MBR), d'autre part, se réfère au couplage du traitement biologique avec séparation par membrane contrairement à l'application séquentielle de la séparation par membrane en aval du biotraitement classique.

Parmi les nombreux types de procédés membranaires disponibles pour la séparation, les réacteurs membranaires ont été étudiés en utilisant l'osmose inverse (RO), la nanofiltration (NF), l'ultrafiltration (UF), la microfiltration (MF), l'électrodialyse (ED), les membranes liquide (LM), pervaporation (PV), infiltration de gaz, infiltration de vapeur,

tamassage moléculaire, Diffusion de Knudsen (et diffusion moléculaire), etc.

Les membranes sont utilisées comme films plats, fibres creuses, tubules et tubes, tandis que les structures physiques peuvent être les suivantes: membranes microporeuses symétriques et asymétriques, membranes non poreuses et membranes composites. Les membranes peuvent être de la variété polymérique ou être inorganique de nature, qui comprendrait les zéolites, céramique, et des membranes métalliques. Les membranes peuvent aussi conduire des charges électriques et peut être choisi de l'une des catégories suivantes: membranes échangeuses d'ions, membranes bipolaires, membranes conductrices mixtes, membranes protonductrices, etc. Dans de nombreux cas, les membranes ont des catalyseurs incorporés dans leur structure poreuse ou sur les surfaces. les membranes dans de tels cas sont appelées membranes catalytiques. Bien sûr, la membrane peut être catalytique par lui-même sans l'addition de tous les matériaux de catalyseur provenant de sources externes. Le terme réacteur à membrane catalytique inclut parfois les cas ci-dessus comme un réacteur catalytique entouré d'une membrane, qui est non catalytique.

Cependant, une membrane donnée dans des circonstances appropriées peut effectuer plus d'une fonction générique. L'introduction d'une autre membrane dans le réacteur peut augmenter le nombre de fonctions de la membrane générique dans le réacteur ou atteindre la même fonction générique de la membrane en comparaison de certains autres espèces. La figure indique d'autres phénomènes se déroulant simultanément dans le soi-disant non-réacteur- (ou perméat-) côté de la membrane ainsi que dans le côté réacteur de la membrane. Les fonctions génériques effectuées par des membranes dans les réacteurs sont:

- Séparation des produits de la réaction mélange afin de conduire les réactions limitées à l'équilibre à des niveaux plus élevés de conversion, pour supprimer les réactions indésirable, pour augmenter la sélectivité, ou améliorer les réactions en supprimant l'inhibition des produits.
- Séparation d'un réactif d'un flux de mélange pour l'introduction dans le réacteur, afin de concentrer les réactifs avant réaction chimique ou pour rejeter l'espèce l'inhibitrice
- Ajout contrôlé d'un réactif ou deux réactifs, afin d'améliorer le rendement de produits intermédiaires souhaités, et éviter l'emballement thermique des réactions

fortement exothermiques. Cela a été démontré dans de nombreux travaux pour réactions en phase Gaseuse, gaz-liquide, et phase liquide.

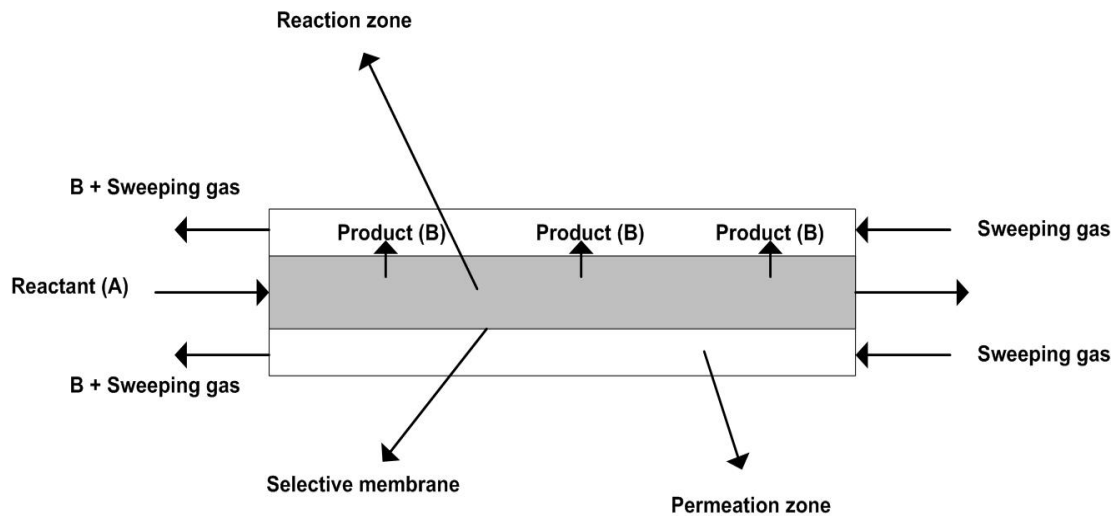


Figure 9 : Réacteur à membrane

➤ Séparation par membranes

Parmi les techniques séparatives existantes, la pervaporation (procédé de séparation de mélanges liquides par membranes) et la perméation de vapeurs (procédé similaire traitant des mélanges de vapeurs) ont déjà montré leur capacité à baisser la consommation énergétique sur certaines applications telles que la déshydratation d'éthanol et d'isopropanol. L'utilisation de la membrane, tiers corps non volatil, permet de remplacer le solvant organique et s'accompagne potentiellement d'un gain énergétique pouvant être avantageux vis-à-vis d'autres techniques séparatives. L'emploi de ces unités membranaires apparaît alors comme une alternative aux techniques séparatives traditionnelles lors de la conception de procédés notamment lorsqu'ils sont associés au procédé de distillation.

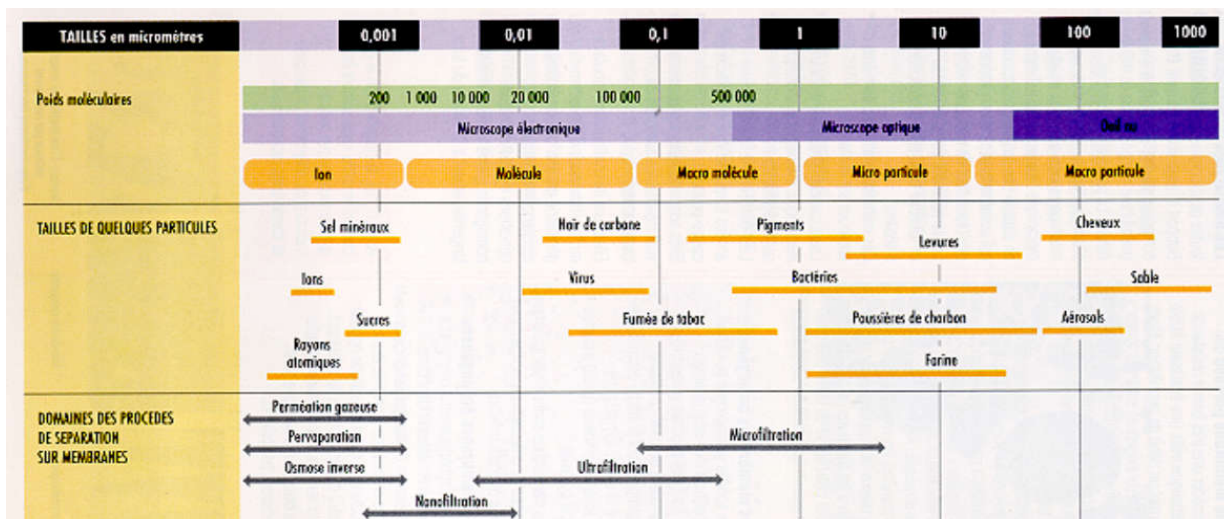


Figure 10 : Les opérations de filtration membranaire selon la taille des pores et des espèces retenues

➤ Distillation membranaire

La distillation membranaire est une technologie émergente mais encore à l'état expérimental. Comme son nom l'indique, il s'agit d'un procédé hybride combinant à la fois le procédé de distillation et un procédé à membrane. La membrane n'a pas le même rôle de séparation que dans le cas de l'osmose inverse par exemple. La force de transfert est la différence de pressions partielles de vapeur d'eau entre les deux côtés de la membrane et non pas la pression totale.

Le principe de ce procédé est le suivant: le gradient de pression de vapeur est créé par le chauffage de l'eau salée côté alimentation ce qui entraîne l'augmentation de sa pression de vapeur et son évaporation au voisinage de la membrane. Seule la vapeur d'eau peut traverser la membrane du fait que celle-ci soit hydrophobe; le liquide ne peut pas pénétrer à l'intérieur des pores. La membrane sert donc uniquement de support à l'interface liquide-gaz. La vapeur d'eau qui a traversé la membrane est condensée par divers procédés possibles puis recueillie à l'état liquide.

Avantages et inconvénients

Ce procédé comporte de nombreux avantages comparé aux autres procédés de séparation:

- on peut travailler à des températures inférieures à la température d'ébullition de l'eau à dessaler
- le colmatage engendré est plus faible
- le procédé a une grande sélectivité (taux de rejet en sel théorique de 100%)
- la technologie ne nécessite pas beaucoup d'espace
- le procédé est moins sensible à la concentration en alimentation contrairement, par exemple, à l'osmose inverse. Ainsi, il est possible de traiter une eau contenant jusqu'à 300 g/L de sels avec une variante de la distillation membranaire : la distillation membranaire sous vide
- il est possible de coupler ce procédé avec une énergie renouvelable

Cependant, il présente des inconvénients qui font que pour le moment cette technologie reste à l'échelle pilote:

- aucune membrane ni module n'ont été conçus spécifiquement pour ce procédé hybride
- la productivité est faible comparé à l'osmose inverse
- le procédé consomme beaucoup d'énergie

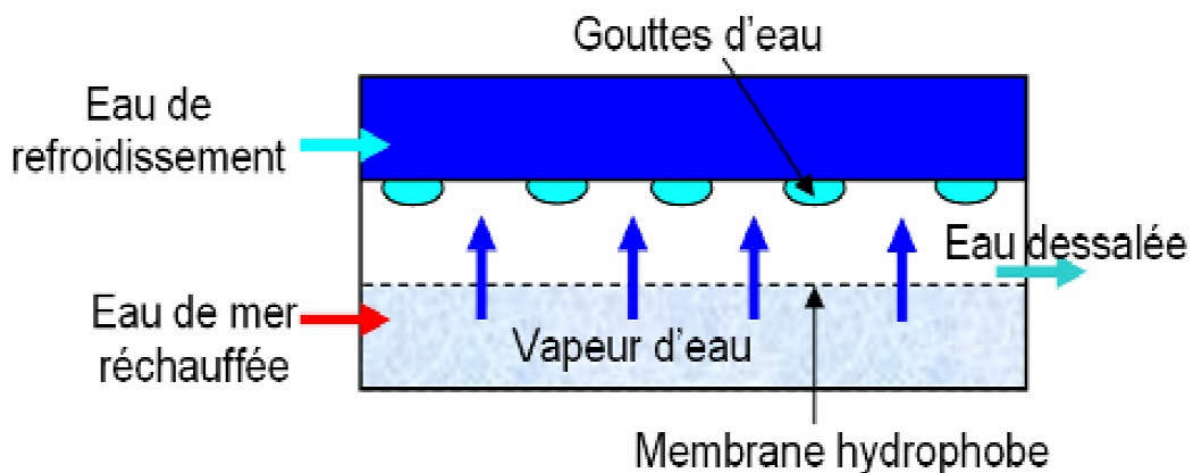


Figure 11 : Principe de la distillation membranaire

➤ Pervaporation

La pervaporation est un procédé de séparation membranaire dans lequel un mélange liquide est mis en contact direct avec un film dense, au travers duquel les constituants vont perméer et subir un changement d'état en se vaporisant. A la différence d'une simple évaporation qui se

produit en distillation et qui dépend de l'équilibre thermodynamique du mélange, la membrane agit comme un tiers corps non volatil qui modifie la composition de la phase vapeur (comparée à celle obtenue par un étage théorique de distillation). Ce changement de phase constitue une particularité propre à la pervaporation par rapport à tous les autres procédés de séparation membranaire (microfiltration, nanofiltration, osmose inverse, perméation gazeuse, ...). Le courant à traiter est appelé alimentation et circule sous forme liquide sur la face amont de la membrane. La part du liquide qui diffuse à travers la membrane est appelé perméat et le reste est évacué et est nommé rétentat. Le transfert de matière est assuré par une différence de potentiel chimique de part et d'autre de la membrane. Deux techniques se distinguent pour entretenir cette différence : maintenir le compartiment aval sous faible pression par pompage continu ou balayer le compartiment par un gaz inerte. Cette dernière technique est peu utilisée et ne sera pas abordée dans ce manuscrit. Le perméat est généralement récolté liquide après condensation des vapeurs sur une paroi froide. Le schéma de fonctionnement de cette configuration est présenté sur la Figure pour une séparation d'un mélange binaire où l'on cherche à extraire l'espèce minoritaire (représentée en bleu sur la figure) du courant d'alimentation.

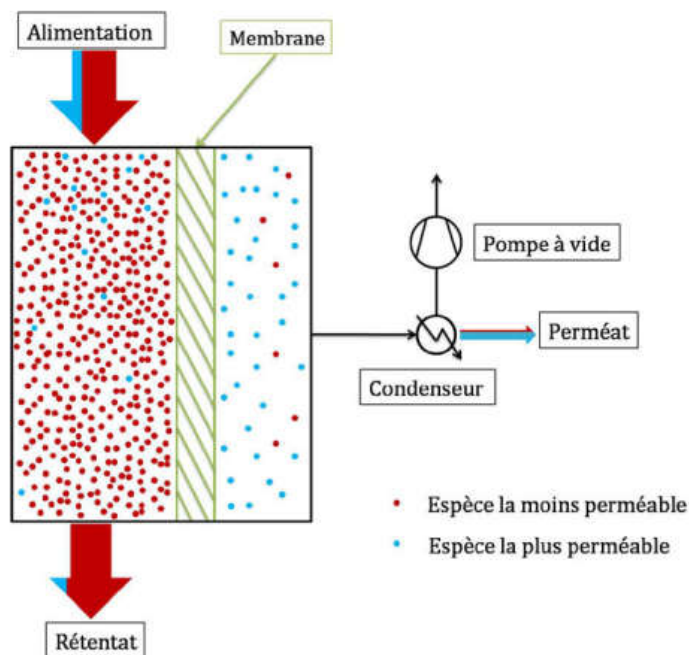


Figure 12. Schéma du principe de fonctionnement de la pervaporation

REFERENCES

1. L. Falk, C. de Bellefon, C. Gourdon et C. Serra, l'actualité chimique 2010, 101-111
2. A.I. Stanckiewicz, , J. A. Moulijn. M. Dekker, Re- engineering the Chemical Processing Plant- Process Intensification. Inc. N.Y 2003.
3. K.K. Sirkar, P.V. Shanbhag, A.S. Kovvali, Ind. Eng. Chem. Res. 38, 1999, 3715
4. J.G. Sanchez-Marcano, T.T. Tsotsis, Catalytic Membranes and Membrane Reactors, Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2002.
5. A.I. Stanckiewicz, , J. A. Moulijn; Process Intensification: Transforming Chemical Engineering, Process Design Trends, Chemical Engineering Progress; 2000, 22-34
6. A. Pohar and I. Plazl, Process Intensification through Microreactor Application, Chem. Biochem. Eng. Q. **23** (4), 2009, 537-544
7. M.N. Kashid and L. Kiwi-Minsker, Ind. Eng. Chem. Res. 48, 2009, 6465-6485
8. M. Meeuwse. Rotor-stator spinning disc reactor Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven 2011, DOI: 10.6100/IR702643
9. A. Seidel-Morgenstern, in K. Sundmacher, A. Kienle, A. Seidel-Morgenstern (eds.): Integrated Chemical Processes, Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2005, p. 359
10. J.L. Falconer, R.D. Noble, D.P. Sperry, Catalytic Membrane Reactors", in R.D. Noble, S.A. Stern (eds.): Membrane Separations Technology, Principles and Applications, Elsevier, Amsterdam 1995.
11. F. H. Scott. Elements of Chemical Reaction Engineering, 4rd Ed. Prentice-Hall: Upper Saddle River, NJ, 2005.
12. F. Gallucci, A. Basile and, F.I. Hai "Introduction—A review of Membrane reactors" in Membranes for membrane reactors: Preparation, Optimization and Selection (eds. Basile, A., Gallucci, F.), page 1-62, Wiley InterScience, USA, 2011
13. C. Servel, thèse doctorat, Potentialités de la pervaporation dans les procédés hybrides de séparation l'Université de Lorraine, juin 2014
14. <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/content/2012-g04/distillation-membranaire>
15. A. Criscuoli (2017) Membrane Distillation: Principles, Applications and Perspectives. J Membr Sci Technol 7: e123. doi:10.4172/2155-9589.1000e123
16. J.C. Monbaliu, F. Collignon L'intensification Des Procédés Chimiques - Une Approche Radicale, CHIMIE NOUVELLE N° 118 - Juin 2015
17. S.A. Ahmad, S.R. Lone, hybrid Process (Pervaporation-Distillation): AReview, international Journal of Scientific & Engineering Research 3(5), 2012, 1-5