

Première partie : Procédés d'adsorption

Chapitre 1.

1.1. Généralités

L'adsorption peut être définie comme l'opération fondamentale de génie Chimique qui exploite l'aptitude de certains solides à concentrer spécifiquement à leur surface les constituants d'une solution permettant ainsi leur séparation. Le solide est appelé adsorbant et la substance qui s'adsorbe est l'adsorbat. Rappelons qu'il existe deux types d'adsorption qui se différencient complètement par les énergies mises en jeu et par leur nature.

- ✓ L'adsorption physique (physisorption ou adsorption de Van der Waals) : elle résulte d'interactions faibles, telles que les forces de Van der Waals, entre l'adsorbant et l'adsorbat. Elle est généralement réversible, se produit à basse température et ne nécessite pas de formation de liaisons chimiques.
- ✓ L'adsorption chimique (chimisorption) : elle implique la formation de liaisons chimiques entre l'adsorbant et l'adsorbat. Cette adsorption est souvent irréversible, plus spécifique et se produit généralement à des températures plus élevées.

Caractéristique	Adsorption Physique	Adsorption Chimique
Nature de l'interaction	Forces faibles de Van der Waals	Liaisons chimiques (covalentes ou ioniques)
Énergie appliquée	Faible (10–40 kJ/mol)	Élevée (40–400 kJ/mol)
Spécificité	Peu spécifique	Très spécifique
Réversibilité	Généralement réversible	Souvent irréversible
Dépendance à la température	Diminue avec l'augmentation de la température	Peut nécessiter des températures plus élevées
Vitesse de réaction	Rapide	Plus lente

1.2. Principaux adsorbants industriels

Les adsorbants industriels jouent un rôle fondamental dans de nombreux procédés chimiques, environnementaux et industriels. Parmi les principaux adsorbants utilisés à l'échelle industrielle, on retrouve le charbon actif, l'oxyde d'aluminium, la silice et les tamis

moléculaires, chacun présentant des propriétés spécifiques adaptées à des applications précises.

A. Charbon actif

Le charbon actif est principalement composé de carbone et peut également inclure des polymères carbonisés ou des graphites. Il est généralement préparé à haute température, ce qui lui confère une surface spécifique très élevée et une porosité importante. Ces propriétés permettent au charbon actif d'adsorber efficacement de nombreuses molécules organiques et gaz. Il est couramment utilisé pour la régénération des solvants, la purification du CO₂ et le traitement des gaz industriels. Sa grande capacité d'adsorption et sa polyvalence en font un des adsorbants les plus utilisés dans l'industrie chimique et environnementale.

B. Oxyde d'aluminium (Al₂O₃.nH₂O)

L'oxyde d'aluminium, également connu sous le nom d'alumine hydratée, est préparé par traitement thermique des bauxites. Il possède une structure poreuse qui lui permet d'adsorber efficacement l'eau et d'autres molécules polaires. L'oxyde d'aluminium est principalement utilisé pour le séchage des gaz et l'élimination de l'eau dans les liquides, ce qui en fait un composant clé dans les procédés industriels nécessitant des conditions sèches, comme la production de gaz industriels ou le traitement de solvants sensibles à l'humidité.

C. Silice (silica gel : SiO₂, n H₂O)

La silice, souvent commercialisée sous forme de silica gel, est fabriquée à partir de solutions colloïdales d'acide silicique. Elle se caractérise par une surface poreuse importante et une capacité élevée à adsorber l'eau. En raison de ses propriétés, la silice est largement utilisée pour le séchage des gaz et la séparation des hydrocarbures. Sa stabilité chimique et sa capacité à fonctionner dans des conditions variées en font un adsorbant fiable et économique pour de nombreuses applications industrielles et de laboratoire.

D. Tamis moléculaires

Les tamis moléculaires sont fabriqués par traitement thermique d'aluminosilicates de sodium ou de calcium, ce qui leur confère une structure cristalline régulière avec des pores de taille uniforme et fixe. Cette caractéristique unique permet de séparer des molécules selon leur taille, rendant les tamis moléculaires particulièrement adaptés au traitement des gaz et à la déshumidification des liquides organiques. Ils sont essentiels dans les procédés nécessitant une sélectivité très précise, comme la purification de l'air, le séchage des solvants ou la séparation de mélanges complexes de gaz.

1.3. Critères de sélection

Le choix d'un adsorbant industriel approprié est crucial pour garantir l'efficacité, la durabilité et la rentabilité des procédés chimiques ou environnementaux. Les performances d'un adsorbant dépendent non seulement de ses propriétés physico-chimiques, mais aussi des conditions spécifiques d'utilisation. Pour répondre aux exigences industrielles, les adsorbants doivent satisfaire à plusieurs critères essentiels.

Les adsorbants industriels doivent répondre à un certain nombre de critères :

- ✓ Haute capacité d'adsorption : La capacité d'adsorption représente la quantité maximale d'adsorbat qu'un adsorbant peut retenir sur sa surface. Un adsorbant avec une capacité élevée permet de traiter de plus grandes quantités de substances sans saturation rapide, ce qui est particulièrement important pour les procédés industriels à grande échelle, tels que le traitement des gaz ou la purification de solvants.
- ✓ Grande efficacité pour adsorber des substances de faibles concentrations : Dans de nombreux procédés, les contaminants ou les substances à séparer sont présents en très faibles concentrations. Un bon adsorbant doit pouvoir capturer efficacement ces traces, afin d'assurer une purification complète ou de respecter les normes environnementales strictes.
- ✓ Sélectivité élevée : La sélectivité désigne la capacité de l'adsorbant à préférer certaines molécules plutôt que d'autres. Cette propriété est essentielle lorsque l'adsorbant est utilisé pour séparer des mélanges complexes ou pour éliminer des contaminants spécifiques sans affecter les autres composants.
- ✓ Résistance physique : Un adsorbant doit posséder une résistance mécanique suffisante pour supporter les manipulations industrielles, le brassage, le passage de fluides et les cycles répétés de régénération.
- ✓ Inertie chimique : il doit présenter une inertie chimique, c'est-à-dire ne pas réagir avec les substances adsorbées ou avec le milieu environnant.
- ✓ Facilement régénérable et utilisés de nouveau : La capacité à être régénéré facilement constitue un autre critère clé. Les adsorbants peuvent être saturés après plusieurs cycles d'utilisation, et pouvoir les régénérer permet de les réutiliser tout en maintenant leur efficacité.

1.4. Méthodes de régénération

L'adsorption physique est un phénomène généralement réversible, ce qui signifie que l'adsorbat peut être libéré du solide sans apport externe important d'énergie, comme la chaleur ou la pression. Cependant, dans les procédés industriels, la régénération ou désorption de l'adsorbant est une étape essentielle pour assurer la réutilisation du matériau et maintenir l'efficacité du système sur de nombreux cycles d'utilisation. Cette opération est souvent endothermique, c'est-à-dire qu'elle nécessite un apport d'énergie pour libérer les molécules adsorbées. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour régénérer les adsorbants :

- ✓ Augmentation de la température : en chauffant l'adsorbant, la tension de vapeur de l'adsorbat devient supérieure à sa pression partielle dans la phase gazeuse, ce qui permet aux molécules adsorbées de se détacher du solide. Cette méthode est fréquemment utilisée pour les adsorbants solides comme le charbon actif ou la silice.
- ✓ Application d'un vide : en réduisant la pression au-dessus de l'adsorbant, les molécules adsorbées sont entraînées hors de la surface du solide. Cette technique est particulièrement efficace pour les systèmes sous vide ou les gaz sensibles à la température.
- ✓ Circulation d'un gaz inerte : le passage d'un gaz inerte à travers l'adsorbant permet de transporter les molécules adsorbées hors du solide. Cette méthode est utilisée lorsqu'il est nécessaire de maintenir des conditions de température modérée ou de protéger l'adsorbant de réactions chimiques indésirables.
- ✓ Éluion par une autre vapeur : dans cette technique, une vapeur qui s'adsorbe préférentiellement sur le solide est introduite, déplaçant ainsi le soluté préalablement adsorbé. Cette méthode est particulièrement utile pour des mélanges complexes ou lorsque l'adsorbat doit être récupéré séparément pour une utilisation ultérieure.

La sélection de la méthode de régénération dépend de la nature de l'adsorbant et de l'adsorbat, des conditions du procédé industriel, ainsi que des contraintes économiques et énergétiques. Une régénération efficace prolonge la durée de vie de l'adsorbant, réduit les coûts opérationnels et limite la production de déchets, ce qui en fait une étape cruciale dans la conception et l'optimisation des systèmes d'adsorption industriels.

1.5. Principales applications industrielles

Les adsorbants industriels trouvent de nombreuses applications grâce à leur capacité à séparer, purifier et concentrer différentes substances. Leur utilisation permet d'améliorer la qualité des

produits, de protéger les équipements industriels et de réduire l'impact environnemental des procédés chimiques. On peut classer ces applications en deux grandes catégories : les séparations gazeuses et les séparations liquides.

A. Séparations gazeuses

Les adsorbants sont largement utilisés pour la déshumidification de l'air ou d'autres gaz industriels, ce qui est essentiel pour protéger les équipements sensibles et maintenir la qualité des produits. Ils permettent également l'élimination des odeurs et des impuretés présentes dans les gaz, contribuant ainsi à la sécurité et au confort dans les procédés industriels et les environnements de production. D'autres applications incluent la récupération de solvants, où les adsorbants capturent des substances précieuses afin de les réutiliser, et le fractionnement des hydrocarbures, qui consiste à séparer différents composants d'un mélange gazeux selon leur taille ou leur affinité avec l'adsorbant.

B. Séparations liquides

Dans les séparations liquides, les adsorbants jouent un rôle clé pour améliorer la qualité et la pureté des produits. Ils sont utilisés pour l'élimination des odeurs et des goûts indésirables, ce qui est particulièrement important dans les industries alimentaires et pharmaceutiques. Les adsorbants permettent également de retirer les traces d'humidité dans des produits sensibles comme les essences ou les solvants organiques, et de décolorer les produits pétroliers ou les solutions sucrées, assurant ainsi un aspect et une qualité conformes aux normes industrielles. Enfin, ils sont employés dans le fractionnement des mélanges d'hydrocarbures liquides, permettant de séparer efficacement des composants ayant des propriétés chimiques ou physiques différentes.