

# OPÉRATIONS POLYPHASIQUES EN GÉNIE DES PROCÉDÉS

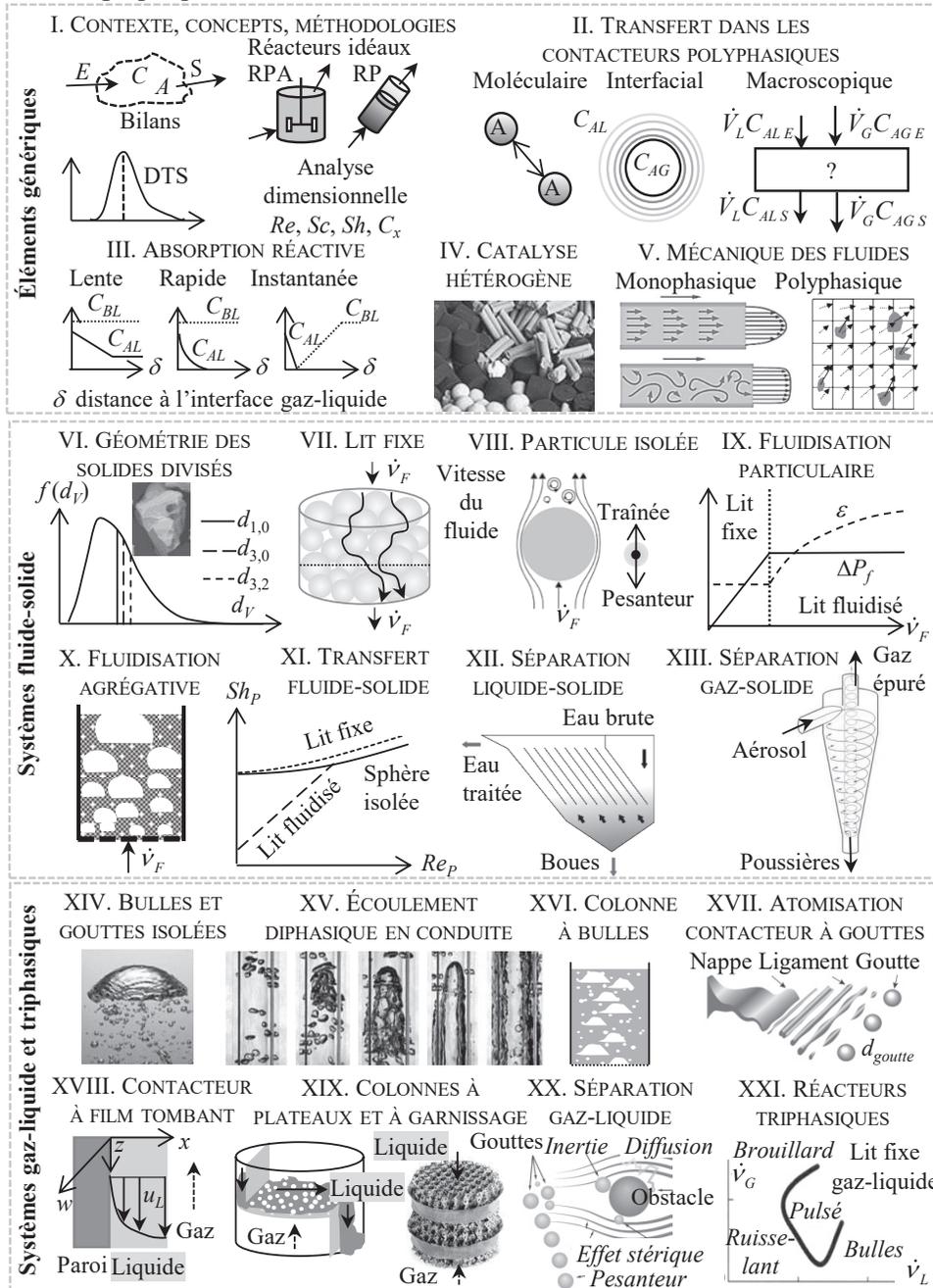
Hydrodynamique,  
transferts, réactions,  
séparations mécaniques

Compléments  
vidéos et corrigés  
téléchargeables

2<sup>e</sup> éd.

Sabine Rode

**Résumé graphique**



# I. Contexte, concepts et méthodologies

## I.1 Le génie des procédés et l'importance des opérations polyphasiques

### I.1.1 Thématiques et matières abordées en génie des procédés

Le génie des procédés est une branche des sciences de l'ingénieur. Il regroupe l'ensemble des connaissances relatives à la conception et à la mise en œuvre des procédés de transformation de la matière et de l'énergie [6]. Comme toutes les sciences de l'ingénieur, le génie des procédés fait appel à différentes disciplines scientifiques, relevant à la fois des sciences fondamentales et des sciences appliquées. La variété des sujets couverts est illustrée dans le Tableau I-1, qui présente les matières enseignées dans une formation de génie des procédés. Les matières sont assemblées en thématiques. Les thématiques sont regroupées en blocs.

Tableau I-1 : Matières enseignées dans une formation de génie des procédés

Bloc	Thématique	Matières
SCIENCES FONDAMENTALES	THERMO-DYNAMIQUE	Thermodynamique énergétique, chimique, des équilibres
	SCIENCES CHIMIQUES	Chimie minérale, organique, analytique – Cinétique chimique – Catalyse homogène et hétérogène
ÉTUDE DES LOIS PHYSIQUES	MÉCANIQUE DES FLUIDES ET TRANSFERTS	Statique et dynamique des fluides – Pompes – Transfert de chaleur par diffusion, convection, rayonnement – Transfert de matière
OPÉRATIONS UNITAIRES	TRANSFERTS	Échangeurs de chaleur – Agitation et mélange
	GÉNIE DE LA RÉACTION CHIMIQUE	Réacteurs idéaux – Distribution des temps de séjour (DTS) – Réacteurs réels – Association de réacteurs idéaux – Réacteurs polyphasiques
ÉTUDE DES ÉTAPES ÉLÉMENTAIRES CONSTITUANT LE PROCÉDÉ	SÉPARATIONS MÉCANIQUES	Séparations gravitaires, centrifuges, électrostatiques – Filtration des gaz et des liquides
	SÉPARATIONS THERMIQUES	Distillation – Séchage – Cristallisation – Adsorption Extraction liquide-liquide – Perméation des gaz
ÉTUDE GLOBALE DES PROCÉDÉS		Ingénierie des procédés ( <i>Process System Engineering</i> ) – Conception de procédés assistée par ordinateur (CPAO) – Dynamique des systèmes et commande des procédés – Hygiène, sécurité, environnement (HSE) – Analyse de cycle de vie (ACV)
SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR	OUTILS SCIENTIFIQUES	Informatique – Mathématiques appliquées : Méthodes numériques – Statistiques – Optimisation
	HUMANITÉS	Sciences économiques et sociales
LANGUES		Anglais et autres langues vivantes

Le Tableau I-1 peut être commenté comme suit.

- i. Les *sciences fondamentales* permettent d'expliciter les lois physiques sur lesquelles reposent les modèles construits en génie des procédés. La *thermodynamique* définit, d'une part, les conditions de conservation de l'énergie et, d'autre part, les conditions de transformation et d'équilibre des systèmes. Ceci pour des systèmes monophasiques ou polyphasiques, constitués de corps purs ou de mélanges de plusieurs espèces chimiques, inertes ou réactives. Les *sciences chimiques* permettent, d'une part, de quantifier la réactivité des systèmes et, d'autre part, de caractériser leur structure et leur composition. Ces sciences sont nécessaires à la conception et à la conduite de tout procédé impliquant des réactions. La *mécanique des fluides* s'intéresse à l'hydrodynamique des écoulements. La connaissance des propriétés thermodynamiques, chimiques et hydrodynamiques permet de caractériser le transport de matière et de chaleur au sein des phases ainsi que le transfert de matière et de chaleur entre différentes phases.
- ii. Le concept d'*opération unitaire* a été introduit au cours de la deuxième décennie du vingtième siècle. Il constitue un des piliers conceptuels du génie des procédés. L'idée est que, quel que soit le produit recherché, le procédé de fabrication peut être subdivisé en étapes élémentaires, les opérations unitaires. Une opération unitaire permet d'atteindre un objectif, par exemple un changement de température ou la mise en œuvre d'une réaction ou d'une séparation. Sa mise en œuvre et sa modélisation dépendent des caractéristiques chimiques, thermodynamiques et hydrodynamiques du système. Elles sont indépendantes des autres étapes du procédé. De ce fait, la méthodologie de dimensionnement de l'opération unitaire peut être formulée de façon générique. De nombreuses opérations unitaires ont été définies. Elles ont été regroupées en thématiques, selon l'objectif recherché : transferts, réactions chimiques ou biochimiques, séparations mécaniques ou thermiques.  
  
L'opération unitaire peut être constituée d'un seul appareil, par exemple une cuve agitée, permettant la mise en œuvre d'une réaction. Toutefois, l'opération unitaire regroupe communément plusieurs appareils, comme la distillation fractionnée, qui implique la mise en œuvre d'une colonne de fractionnement, mais aussi d'échangeurs de chaleur, de pompes et d'un bac de reflux.
- iii. Le bloc intitulé *étude globale des procédés* regroupe les connaissances permettant de concevoir, de caractériser et d'opérer un procédé de transformation de matière ou d'énergie dans son ensemble, à l'échelle d'un site industriel. On y trouve les enseignements de conception de procédés assistée par ordinateur (CPAO), de dynamique des systèmes, de commande et de HSE (hygiène, sécurité et environnement). Pour un produit donné, on peut aussi étudier l'échelle nationale ou planétaire de sa fabrication et analyser son cycle de vie (ACV).
- iv. Les blocs intitulés *sciences pour l'ingénieur* et *langues* regroupent enfin les sciences connexes, enseignées dans tout cursus ingénieur. Il s'agit des mathématiques appliquées, de l'informatique, des sciences économiques et sociales et des langues.

### I.1.2 Lois physiques, théorèmes, concepts et méthodologies

Comme pour toutes les sciences physiques, les modèles utilisés en génie des procédés sont basés sur l'application de lois physiques et l'utilisation de théorèmes. Des concepts particuliers, comme l'*opération unitaire*, le *réacteur idéal* et l'*étage théorique*, constituent les piliers de cette branche des sciences de l'ingénieur. Des méthodologies spécifiques au domaine, intégrant des lois physiques, des théorèmes et des concepts, ont été développées.

Des principes ou lois physiques, théorèmes, concepts et méthodologies majeurs utilisés en génie des procédés sont présentés sur la Figure I-1. Par souci de clarté, les définitions des termes *principe ou loi physique*, *théorème*, *concept* et *méthodologie* sont précisées.

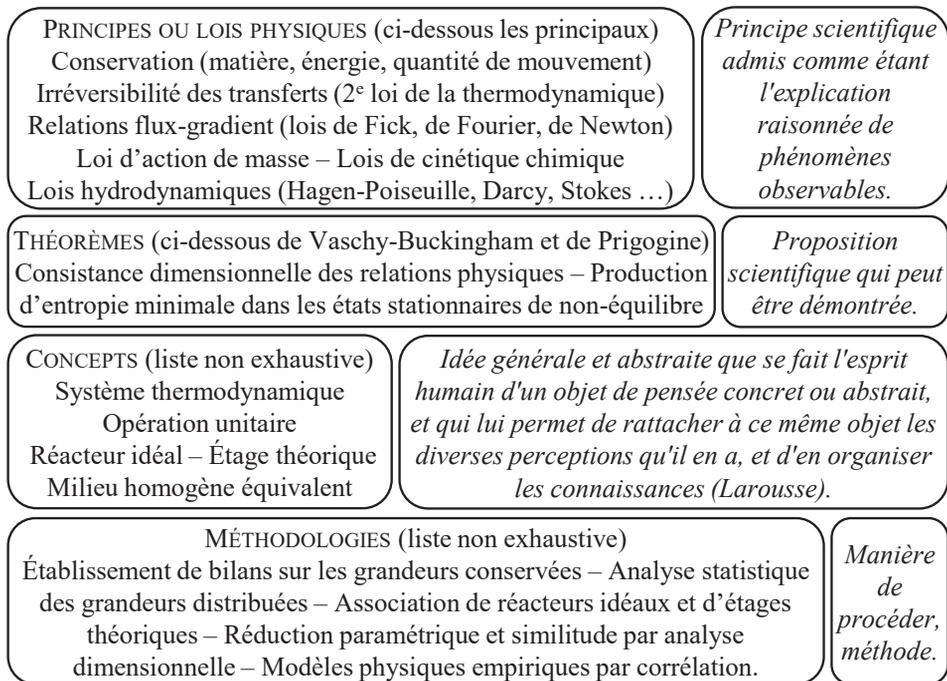


Figure I-1 : Lois physiques, théorèmes, concepts et méthodologies utilisés en génie des procédés

Quelques concepts et méthodologies communément utilisés en génie des procédés sont présentés dans ce chapitre introductif. Les concepts du réacteur idéal et de l'étage théorique sont définis. L'établissement de bilans, la caractérisation des réacteurs réels par étude de la distribution des temps de séjour et l'analyse dimensionnelle sont également discutés. Des éléments spécifiques aux systèmes polyphasiques, comme le concept de milieu homogène équivalent ou l'étude de la distribution de taille des particules, sont traités dans d'autres chapitres.

### I.1.3 Nature multi-échelle des opérations

En génie des procédés, on étudie des phénomènes, dont les longueurs et les temps caractéristiques ont des valeurs extrêmement variées, comme illustré sur la Figure I-2. Les échelles spatiales et temporelles y sont situées sur un diagramme logarithmique. Chaque carré de la grille correspond à un changement de l'échelle spatio-temporelle d'un facteur mille. Les échelles spatiales et temporelles s'étendent sur douze ordres de grandeur.

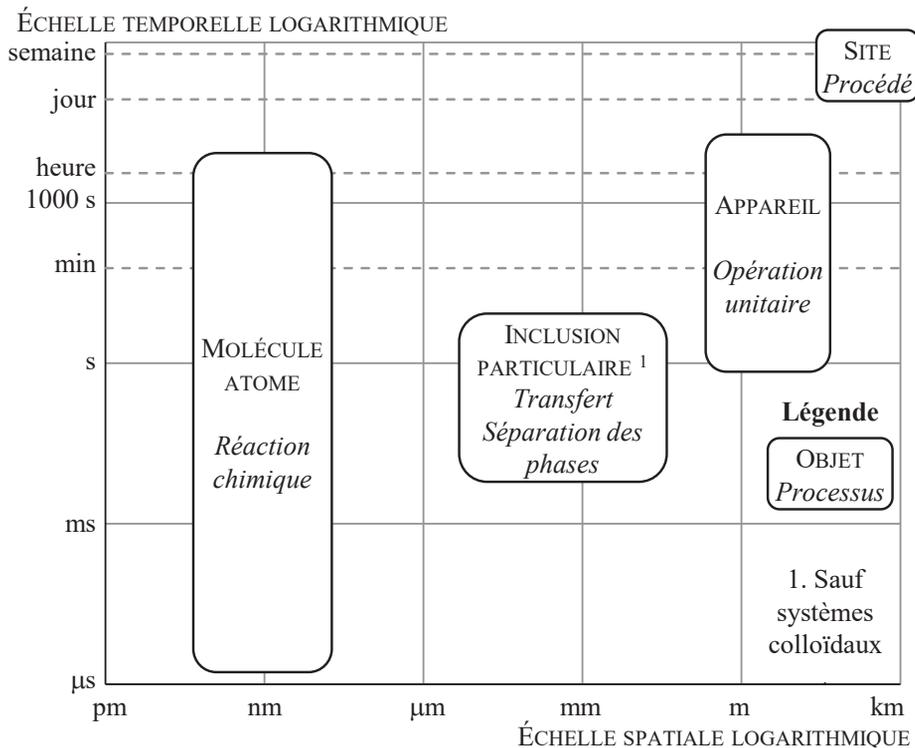


Figure I-2 : Échelles spatiales et temporelles caractérisant les procédés

Certaines échelles spatiales relèvent d'une importance particulière.

- i. La réaction chimique a lieu à l'échelle de l'atome et de la molécule, soit une longueur caractéristique typiquement comprise entre 0,1 et 10 nanomètres.
- ii. La taille des inclusions d'une phase discontinue au sein d'une phase continue est souvent comprise entre quelques dizaines de micromètres et quelques centimètres. Ceci mis à part les systèmes colloïdaux gazeux, liquides ou solides, caractérisés par des inclusions submicroniques.

- iii. La taille des appareils est comprise entre un et plusieurs dizaines de mètres. En effet, la longueur caractérisant les dimensions extérieures des appareils commerciaux est rarement inférieure au mètre. De gros équipements peuvent atteindre dix mètres de diamètre et plus de cinquante mètres de hauteur.
- iv. La longueur caractéristique d'un site industriel est de l'ordre du kilomètre.

Pour atteindre un état d'équilibre ou mettre en œuvre une transformation chimique, le transfert de matière et de chaleur doit être assuré à des échelles spatiales allant parfois du nanomètre au décamètre. Pour décrire le transfert, sa modélisation doit être effectuée à différentes échelles et on doit être en mesure de relier les modèles établis.

Comme pour les longueurs caractéristiques, la gamme de variation des échelles temporelles caractérisant le transport, le transfert et la réaction est importante. L'échelle temporelle peut être liée à l'échelle spatiale. En effet, le temps caractérisant un phénomène physique donné varie souvent selon la taille du système considéré. Toutefois, il n'y a pas de coefficient de proportionnalité unique entre échelle spatiale et échelle temporelle. Selon la nature des molécules et des phases impliquées et selon les conditions de température et de pression, les cinétiques chimiques, les transferts de matière et de chaleur et les séparations mécaniques peuvent être rapides ou lents. Ainsi, le temps caractéristique de séchage au sein d'un sécheur flash est de l'ordre de la seconde, alors que le temps caractéristique d'une réaction au sein d'un fermenteur peut être de plusieurs heures. Ceci, bien que ces deux opérations soient conduites dans des équipements de taille comparable.

#### **I.1.4 Classification des opérations unitaires, exemples d'opérations polyphasiques**

L'opération unitaire est définie comme une étape particulière d'un procédé qui peut être étudiée de façon indépendante. La classification usuelle subdivise les opérations unitaires en thématiques, selon l'objectif recherché. L'idée est de regrouper les solutions technologiques permettant d'atteindre un même résultat, qui peut être une transformation chimique ou une séparation mécanique ou thermique. De nombreuses opérations unitaires comportent des technologies caractérisées par la présence, et souvent l'écoulement simultané, de plusieurs phases. Des exemples sont présentés sur la Figure I-3. Ces exemples peuvent être commentés comme suit.

- i. On regroupe dans la thématique des *séparations mécaniques* les opérations, dont l'objectif est de séparer par action mécanique les phases d'un mélange polyphasique. Les systèmes correspondants sont nécessairement polyphasiques. En décantation et en flottation, la séparation de particules en suspension dans un fluide est effectuée grâce à leur mouvement différentiel dans le champ de gravité. En filtration, on impose un gradient de pression, afin de générer l'écoulement d'un fluide à travers un milieu poreux à pores interconnectés. En cyclonage et en centrifugation, la séparation entre un fluide et des particules en suspension est accélérée par l'action d'un champ de force centrifuge, créé par un mouvement rotationnel.

- ii. Les *séparations* dites *thermiques* regroupent les opérations mises en œuvre afin de fractionner des mélanges que l'on ne peut pas séparer par effet mécanique. C'est le cas de systèmes dits homogènes, dans lesquels les constituants à séparer sont mélangés au sein d'une même phase, par exemple l'eau et l'éthanol dans les boissons alcoolisées ou les sels inorganiques dissous dans l'eau de mer. L'adjectif *thermique* est utilisé pour indiquer que la force motrice de la séparation est liée à un équilibre thermodynamique, même si le processus n'implique pas un transfert d'enthalpie. On utilise parfois des adjectifs précisant la nature de la force motrice comme *diffusionnel* ou *électrostatique*. La thématique est alors subdivisée en catégories.

Malgré le fait que le mélange initial soit monophasique, les séparations thermiques impliquent généralement des opérations polyphasiques. Ainsi, la distillation est basée sur des équilibres liquide-vapeur alors que la cristallisation repose sur des équilibres liquide-solide. En absorption, certains constituants sont extraits par une phase liquide, non miscible avec le mélange à traiter. En adsorption, certains constituants se fixent à la surface d'un solide particulaire microporeux. Enfin, le séchage consiste à évaporer un solvant liquide afin de le séparer d'un solide, dont il ne peut être séparé par effet mécanique. L'opération est triphasique.

- iii. La transformation de la matière dans les *réacteurs chimiques ou biochimiques* implique fréquemment la présence de plusieurs phases. Ceci est lié soit à la nature des réactifs et des produits, soit à la mise en œuvre d'une catalyse hétérogène. Ainsi, de nombreuses réactions en métallurgie extractive sont caractérisées par des systèmes gaz-solide ou liquide-solide. Par ailleurs, des réactions d'halogénéation, d'hydrogénation ou d'oxydation de molécules organiques nécessitent, en général, des systèmes gaz-liquide. Les réactions biochimiques donnent souvent lieu à des systèmes triphasiques, gaz-liquide-solide. Ces systèmes comportent toujours une solution aqueuse, contenant des inclusions solides, les microorganismes. Ils comportent aussi une phase gazeuse, véhiculant des réactifs ou des produits métaboliques tels que oxygène, dioxyde de carbone ou méthane. Enfin, les réactions de combustion du charbon, de la biomasse et du gazole sont polyphasiques.
- iv. En *transfert de chaleur*, les échangeurs avec changement de phase, bouilleurs et condenseurs, donnent lieu à des écoulements diphasiques, gaz-liquide.
- v. Le *transport* du pétrole brut dans les conduites de forage peut impliquer jusqu'à quatre phases : le pétrole, l'eau, le gaz naturel et le sable. Le transport pneumatique consiste à déplacer un solide divisé en utilisant un gaz vecteur.
- vi. En l'absence de réaction et de transfert, l'*agitation* et le *mélange* polyphasiques sont utilisés pour élaborer des produits formulés polyphasiques, émulsions, mousses ou autre dispersion colloïdale. Parmi les produits ainsi fabriqués on trouve des peintures et de nombreux produits alimentaires et cosmétiques.
- vii. La lubrification, relevant de la *mécanique* et permettant l'entretien des machines tournantes, est une opération liquide-solide.

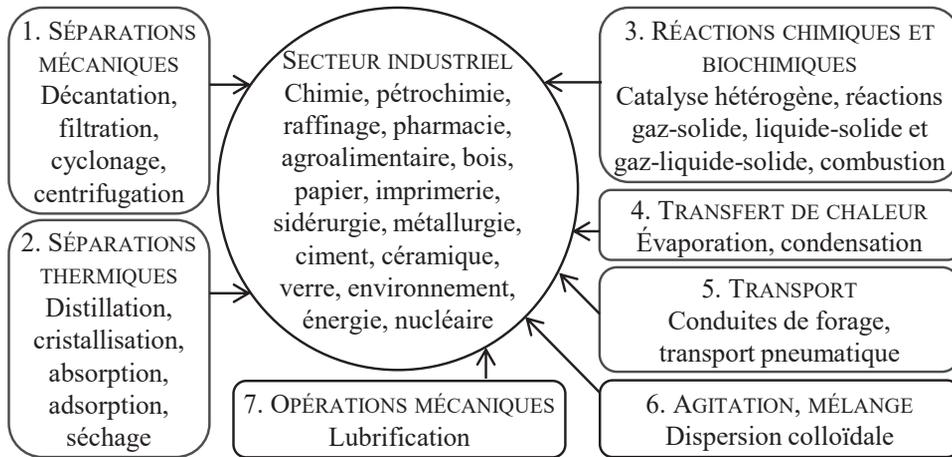


Figure I-3 : Classification des opérations unitaires, exemples d'opérations polyphasiques

La liste dressée n'est pas exhaustive. L'importance des opérations polyphasiques justifie l'étude de leurs caractéristiques dans une formation de génie des procédés.

### I.1.5 Classification des opérations selon la nature des phases impliquées

La classification des opérations unitaires selon l'objectif, mélange, réaction ou séparation, fait partie des origines du développement du génie des procédés. Elle est adaptée à l'étude des procédés dans leur ensemble. En effet, à l'échelle du procédé, on peut considérer que les opérations unitaires visant un même objectif sont interchangeable. Toutefois, si l'on souhaite déterminer les conditions opératoires optimales et les dimensions des appareils, une classification selon l'objectif de l'opération n'est pas fonctionnelle. En effet, au sein des appareils, les étapes de transfert, de réaction et de séparation sont souvent observées de façon non dissociable, comme illustré ci-dessous.

- i. La mise en œuvre d'une réaction va toujours de pair avec un transfert de matière, nécessaire à la rencontre des molécules réactives. Les réacteurs chimiques intègrent donc en général des dispositifs, dont l'objectif est de faciliter le transfert. Si la réaction est rapide, le transfert de matière et la réaction ont lieu simultanément et s'influencent mutuellement. La situation est désignée par le terme *couplage*.
- ii. Les opérations classifiées dans la thématique des séparations thermiques impliquent, sauf exception, la présence de plusieurs phases. Ces phases sont fréquemment mélangées, afin de permettre le transfert de matière et de chaleur, puis séparées par action mécanique. Ainsi, le mélange, le transfert et la séparation, sont réalisés au sein d'un même appareil, parfois de façon répétée.