

Avant propos

« On fait la science avec des faits, comme on fait une maison avec des pierres : mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison »

Henri Poincaré

L'édition d'un livre d'enseignement constitue l'aboutissement d'un travail de réflexion sur la mise en forme d'une connaissance pour lui assurer une trace matérielle de qualité et une certaine pérennité. L'ouvrage, comme toute activité d'enseignement d'ailleurs, doit également se justifier dans son domaine disciplinaire et dans l'environnement scientifique, industriel et économique du moment. Il doit enfin s'adapter à un public plus ou moins élargi et à une génération d'étudiants qui a ses propres modes de travail et d'apprentissage.

C'est ce qui m'a guidé dans la rédaction de cet ouvrage et ce que j'ai été amené à faire pendant près de 20 ans auprès des étudiants de l'ENS de Chimie Paris et du Master de Chimie de l'Université Pierre et Marie Curie. C'est donc uniquement à des chimistes que je me suis adressé. Si mon auditoire est de niveau Master, ce livre peut également répondre aux besoins des formations de niveau licence en spécialité génie des procédés (IUT ou licence de génie chimique).

J'ai donc été confronté à la nécessité de former des étudiants chimistes aux concepts du génie des procédés appliqués à la chimie. Il me fallait répondre à la question : « Quelles sont donc les connaissances de bases théoriques et pratiques que doit maîtriser un chimiste pour mieux comprendre sa chimie » ? L'objectif était d'élargir leurs compétences et de répondre à la demande de savoir-faire dans les métiers aussi différents que complémentaires que sont ceux de la recherche, du développement et de la production dans le secteur de la chimie et de toutes ses industries connexes. Tout en contribuant à l'amélioration des performances du procédé, l'ingénieur chimiste est un homme d'interface qui doit veiller à faire respecter les contraintes de sécurité, d'environnement, de qualité et de compétitivité. Dans la conjoncture énergétique internationale de ces dernières années, la science du génie des procédés qui est au service de la société et de son économie est incontournable pour répondre à ces obligations.

Le contenu a aussi été guidé par l'absolue nécessité de tenir compte de la diversité des parcours des étudiants réunis dans une même promotion. En effet les programmes évoluent sans cesse et les bases scientifiques des étudiants ne sont pas toutes identiques, que ce soit pour les français issus de la classe préparatoire, d'IUT et de licence, ou pour les étrangers recrutés dans des proportions croissantes ces dernières années. Tous ces étudiants ont été mes « cobayes ». Certains ont probablement soufferts sur le polycopié que je mettais à leur disposition, sur les documents que je projetais et commentais en

Avant propos

On fait la science avec des faits, comme on fait une maison avec des pierres : mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison »

Henri Poincaré

L'édition d'un livre d'enseignement constitue l'aboutissement d'un travail de réflexion sur la mise en forme d'une connaissance pour lui assurer une trace matérielle de qualité et une certaine pérennité. L'ouvrage, comme toute activité d'enseignement d'ailleurs, doit également se justifier dans son domaine disciplinaire et dans l'environnement scientifique, industriel et économique du moment. Il doit enfin s'adapter à un public plus ou moins élargi et à une génération d'étudiants qui a ses propres modes de travail et d'apprentissage.

C'est ce qui m'a guidé dans la rédaction de cet ouvrage et ce que j'ai été amené à faire pendant près de 20 ans auprès des étudiants de l'ENS de Chimie Paris et du Master de Chimie de l'Université Pierre et Marie Curie. C'est donc uniquement à des chimistes que je me suis adressé. Si mon auditoire est de niveau Master, ce livre peut également répondre aux besoins des formations de niveau licence en spécialité génie des procédés (IUT ou licence de génie chimique).

J'ai donc été confronté à la nécessité de former des étudiants chimistes aux concepts du génie des procédés appliqués à la chimie. Il me fallait répondre à la question : « Quelles sont donc les connaissances de bases théoriques et pratiques que doit maîtriser un chimiste pour mieux comprendre sa chimie? » L'objectif était d'élargir leurs compétences et de répondre à la demande de savoir-faire dans les métiers aussi différents que complémentaires que sont ceux de la recherche, du développement et de la production dans le secteur de la chimie et de toutes ses industries connexes. Tout en contribuant à l'amélioration des performances du procédé, l'ingénieur chimiste est un homme d'interface qui doit veiller à faire respecter les contraintes de sécurité, d'environnement, de qualité et de compétitivité. Dans la conjoncture énergétique internationale de ces dernières années, la science du génie des procédés qui est au service de la société et de son économie est incontournable pour répondre à ces obligations.

Le contenu a aussi été guidé par l'absolue nécessité de tenir compte de la diversité parcours des étudiants réunis dans une même promotion. En effet les programmes évoluent sans cesse et les bases scientifiques des étudiants ne sont pas toutes identiques, qu'il s'agisse pour les français issus de la classe préparatoire, d'IUT et de licence, ou pour les étrangers recrutés dans des proportions croissantes ces dernières années. Tous ces us ont été mes « cobayes ». Certains ont probablement soufferts sur le polycopié que je mettais à leur disposition, sur les documents que je projetais et commentaires en

amphithéâtre, sur les exercices que j'avais choisis pour les travaux dirigés ou pour l'examen, ou encore en travaux pratiques sur les montages expérimentaux instrumentés en mesurant les écarts avec la théorie à l'aide de codes industriels pour simuler l'expérience. J'ai essayé d'être à l'écoute de tous ceux qui venaient me poser des questions après le cours sur une démonstration un peu aride, une transition rapide, une imprécision. Il y a aussi ceux qui m'informaient sur des erreurs de dactylographie, d'indice, d'exposant ou de symbol. Je ne remercierai jamais assez tous ceux qui ont eu cette démarche car au fil des années la fréquence des remarques et des questions a diminué, et le cours s'est clarifié enrichi et élargi pour aboutir au contenu de cet ouvrage.

Sans alourdir l'exposé, mais pour faire en sorte que ce livre devienne un document de travail personnel et efficace pour tous, j'ai systématiquement mais succinctement rappelé les prérequis indispensables, les conventions et les lois classiques pour que chacun puisse aborder et comprendre les mécanismes mis en jeu dans les techniques de séparation des constituants d'un mélange. En complément, le lecteur trouvera dans le dernier chapitre des études de cas industriels avec leurs corrigés détaillés, figures et tableaux sur près de 100 pages, soit un tiers du volume du livre.

Il est clair que les opérations unitaires abordées sont parfaitement connues et font l'objet d'un traitement informatique de routine dans les bureaux d'étude. Mais avant de manipuler ces logiciels que nous mettons à la disposition des étudiants pour préparer leur projet, il est indispensable qu'ils en comprennent bien les fondements. Dans ce contexte nous avons largement décrit et utilisé les représentations graphiques pour des raisons pédagogiques. Elles restent en effet une aide précieuse à la compréhension pour analyser l'influence d'un paramètre, mieux cerner les contraintes du procédé et imaginer le mode opératoire optimum pour satisfaire les rendements matière et énergétique, la gestion des sous-produits...

Au-delà des techniques décrites, le lecteur comprendra que les transferts de matière sont gouvernés par la thermodynamique des mélanges biphasiques et les conditions opératoires retenues. Il comprendra également que le dimensionnement des équipements s'appuie sur les bilans de matières et d'énergie. Un cours d'opérations unitaires est d'ailleurs aussi une excellente occasion, voire un prétexte pour obliger l'étudiant à poser correctement ses bilans qui conditionnent les résultats de tous les calculs.

Cet ouvrage n'a pas la prétention d'être exhaustif sur les opérations unitaires. Il détaille les opérations les plus utilisées. Contrairement à beaucoup d'ouvrages qui décrivent également dans le détail les transferts de chaleur et de quantité de mouvement, et les réacteurs chimiques, nous nous sommes limités au transfert de matière. Nous avons ainsi pu donner des explications plus complètes, des interprétations et des solutions détaillées sur des études de cas de séparation dans un contexte industriel. Pour permettre à chacun d'accéder à des ouvrages de référence dont certains ont été mes sources d'inspiration, une liste permet au lecteur de disposer des connaissances supplémentaires dans tous les aspects qui entourent les opérations unitaires.

L'ouvrage débute par une introduction sur les procédés et les rappels scientifiques indispensables pour comprendre les mécanismes de transferts de matière mis en jeu dans le cas simple de l'absorption physique. Il se poursuit par une présentation des équilibres liquide-vapeur puis de façon détaillée de la distillation continue et discontinue. Cette opération est complexe puisqu'elle met en œuvre des transferts couplés avec

amphithéâtre. sur les exercices que j'avais choisis pour les travaux dirigés ou pour l'examen, ou encore en travaux pratiques sur les montages expérimentaux instrumentés en mesurant les écarts avec la théorie à l'aide de codes industriels pour simuler l'expérience. J'ai essayé d'être à l'écoute de tous ceux qui venaient me poser des questions après le cours sur une démonstration un peu aride, une transition rapide, une imprécision. Il va aussi ceux qui

m'informent sur des erreurs de dactylographie, d'indice, d'exposant ou de symbole. Je ne remercierai jamais assez tous ceux qui ont eu cette démarche car au fil des années la fréquence des remarques et des questions a diminué, et le cours s'est clarifié, enrichi et élargi pour aboutir au contenu de cet ouvrage.

Sans alourdir l'exposé, mais pour faire en sorte que ce livre devienne un document de travail personnel et efficace pour tous, j'ai systématiquement mais succinctement rappelé les prérequis indispensables, les conventions et les lois classiques pour que chacun puisse aborder et comprendre les mécanismes mis en jeu dans les techniques de séparation des constituants d'un mélange. En complément, le lecteur trouvera dans le dernier chapitre des études de cas industriels avec leurs corrigés détaillés, figures et tableaux sur près de 100 pages, soit un tiers du volume du livre.

Il est clair que les opérations unitaires abordées sont parfaitement connues et font l'objet d'un traitement informatique de routine dans les bureaux d'étude. Mais avant de manipuler ces logiciels que nous mettons à la disposition des étudiants pour préparer leur projet, il est indispensable qu'ils en comprennent bien les fondements. Dans ce contexte nous avons largement décrit et utilisé les représentations graphiques pour des raisons pédagogiques. Elles restent en effet une aide précieuse à la compréhension pour analyser l'influence d'un paramètre, mieux cerner les contraintes du procédé et imaginer le mode opératoire optimum pour satisfaire les rendements matière et énergétique, la gestion des sous-produits...

Au-delà des techniques décrites, le lecteur comprendra que les transferts de matière sont gouvernés par la thermodynamique des mélanges biphasiques et les conditions opératoires retenues. Il comprend également que le dimensionnement des équipements s'appuie sur les bilans de matières et d'énergie. Un cours d'opérations unitaires est d'ailleurs aussi une excellente occasion, voire un prétexte pour obliger l'étudiant à poser correctement ses bilans qui conditionnent les résultats de tous les calculs.

Cet ouvrage n'a pas la prétention d'être exhaustif sur les opérations unitaires. Il détaille les opérations les plus utilisées. Contrairement à beaucoup d'ouvrages qui décrivent également dans le détail les transferts de chaleur et de quantité de mouvement, et les réacteurs chimiques, nous nous sommes limités au transfert de matière. Nous avons ainsi pu donner des explications plus complètes, des interprétations et des solutions détaillées sur des études de cas de séparation dans un contexte industriel. Pour permettre à chacun d'accéder à des ouvrages de référence dont certains ont été mes sources d'inspiration, une liste permet au lecteur de disposer des connaissances supplémentaires dans tous les aspects qui entourent les opérations unitaires.

L'ouvrage débute par une introduction sur les procédés et les rappels scientifiques indispensables pour comprendre les mécanismes de transferts de matière mis en jeu dans le cas simple de l'absorption physique. Il se poursuit par une présentation des équilibres liquide-vapeur puis de façon détaillée de la distillation continue et discontinue. Cette opération est complexe puisqu'elle met en œuvre des transferts couplés avec

simultanément l'écoulement des phases liquide et vapeur à contre courant et des échanges de matière et de chaleur. Quelques notions sur le dimensionnement des équipements sont ensuite développées pour comprendre que la technologie retenue doit tenir compte avant tout des contraintes expérimentales et des données thermodynamiques et physico-chimiques. Une fois ces connaissances comprises, il est aisé d'aborder selon la même méthode, l'absorption, l'extraction liquide-liquide, l'extraction solide-liquide puis enfin la cristallisation industrielle. Des exercices sur chaque technique avec les corrigés détaillés permettent de manipuler les concepts sur des exemples industriels.

La liste de ceux que je dois remercier parce qu'ils m'ont formé et permis de me familiariser avec le génie chimique est longue. Je ne citerai que les Professeurs Jean Talbot et Jacques Amouroux car le premier m'a mis le pied à l'étrillé et le second m'a guidé pour me conduire à ce que je sais aujourd'hui.

Je dois remercier également le Professeur Mario Moscota Santillan de l'Université San Luis Potosi de Mexico qui à l'occasion d'un séjour au laboratoire a accepté une relecture du document final pour faire des suggestions afin d'en améliorer la qualité. Cédric Guyon, Maître de Conférences à l'ENSCP, a mis en forme les schémas du chapitre consacré aux études de cas en y apportant dans les meilleurs délais le soin et les précisions nécessaires. Je leur exprime toute ma reconnaissance.

C'est Fatiha Abdennebi qui a dactylographié tout le texte et mis en forme les figures et les tableaux de ce livre. Pour avoir réussi à déchiffrer mon manuscrit, difficilement lisible parfois, et assuré la mise en page la plus agréable, je lui exprime tous mes remerciements et ma reconnaissance.

Je dédie ce livre à la mémoire de mon père et de ma sœur. Je ne saurais oublier ma maman, mon épouse Annette et nos quatre enfants, Ewen, Alan, Katell et Gwenolé que j'ai souvent délaissés pendant nos vacances en Bretagne et qui sans broncher me laissaient à mes écritures. Je les remercie affectueusement pour leur compréhension et leur patience.

Je souhaite enfin à tous les lecteurs de trouver autant de satisfaction à parcourir ce livre que j'ai eu à le rédiger. Pour les y aider, je peux leur suggérer d'identifier un lieu aussi merveilleux que celui que j'ai choisi pour avancer efficacement cette rédaction durant ces années. C'est confortablement installé au milieu d'un jardin resplendissant sur sa pelouse verdoyante, à l'ombre d'un magnifique magnolia et entouré d'hortensias, de camélias, de roses, bordés de dahlias jaune et rouge flamboyants, à l'abri du vent du large avec le seul bruit des vagues qui s'écrasent sur le rivage que j'ai mis en forme les idées, fait des choix et construit cet ouvrage en essayant finalement d'appliquer le précepte d'Henri Poincaré.

Je pense avoir fait de mon mieux pour préparer ce manuel. J'espère que vous prendrez plaisir à l'utiliser et qu'il vous semblera facile d'apprendre et comprendre ce que vous y cherchez. Si vous pensez que je pouvais mieux faire à certains endroits, n'hésitez pas à m'écrire : garder le contact avec les étudiants et les collègues et connaître les difficultés rencontrées par les lecteurs est le meilleur moyen de s'assurer de la qualité d'un livre.

Daniel Morvan

simultanément l'écoulement des phases liquide et vapeur à contre courant et des échanges de matière et de chaleur. Quelques notions sur le dimensionnement des équipements sont ensuite développées pour comprendre que la technologie retenue doit tenir compte avant tout des contraintes expérimentales et des données thermodynamiques et physico-chimiques. Une fois ces connaissances comprises, il est aisé d'aborder selon la même méthode, l'absorption, l'extraction liquide-liquide, l'extraction solide-liquide puis enfin la cristallisation industrielle. Des exercices sur chaque technique avec les corrigés détaillés permettent de manipuler les concepts sur des exemples industriels.

La liste de ceux que je dois remercier parce qu'ils m'ont formé et permis de me familiariser avec le génie chimique est longue. Je ne citerai que les Professeurs Jean Talbot et Jacques Amouroux car le premier m'a mis le pied à l'étrillé et le second m'a guidé pour me conduire à ce que je sais aujourd'hui.

Je dois remercier également le Professeur Mario Moscosa Santillán de l'Université San Luis Potosi de Mexico qui à l'occasion d'un séjour au laboratoire a accepté une relecture du document final pour faire des suggestions afin d'en améliorer la qualité. Cédric Guyon, Maître de Conférences à l'ENSCP, a mis en forme les schémas du chapitre consacré aux études de cas en y apportant dans les meilleurs délais le soin et les précisions nécessaires. Je leur exprime toute ma reconnaissance.

C'est Fatiha Abdennebi qui a dactylographié tout le texte et mis en forme les figures et les tableaux de ce livre. Pour avoir réussi à déchiffrer mon manuscrit, difficilement lisible parfois, et assuré la mise en page la plus agréable, je lui exprime tous mes remerciements et ma reconnaissance.

Je dédie ce livre à la mémoire de mon père et de ma sœur. Je ne saurai oublier ma maman, mon épouse Annette et nos quatre enfants, Ewen, Alan, Katell et Gwenolé que j'ai souvent délaissés pendant nos vacances en Bretagne et qui sans broncher me laissaient à mes écritures. Je les remercie affectueusement pour leur compréhension et leur patience.

Je souhaite enfin à tous les lecteurs de trouver autant de satisfaction à parcourir ce livre que j'ai eu à le rédiger. Pour les y aider, je peux leur suggérer d'identifier un lieu aussi merveilleux que celui que j'ai choisi pour avancer efficacement cette rédaction durant ces années. C'est confortablement installé au milieu d'un jardin resplendissant sur sa pelouse verdoyante, à l'ombre d'un magnifique magnolia et entouré d'hortensias, de camélias, de roses, bordés de dahlias jaune et rouge flamboyants, à l'abri du vent du large avec le seul bruit des vagues qui s'écrasent sur le rivage que j'ai mis en forme les idées. fait des choix et construit cet ouvrage en essayant finalement d'appliquer le précepte d'Henri Poincaré.

Je pense avoir fait de mon mieux pour préparer ce manuel. J'espère que vous prendrez plaisir à l'utiliser et qu'il vous semblera facile d'apprendre et comprendre ce que Vous y cherchez. Si vous pensez que je pouvais mieux faire à certains endroits, n'hésitez pas à m'écrire : garder le contact avec les étudiants et les collègues et connaître les difficultés rencontrées par les lecteurs est le meilleur moyen de s'assurer de la qualité d'un livre.