

Préface de Jean-Claude Charpentier

Économie et ingénierie circulaires

Économie et ingénierie circulaires: la thermodynamique des procédés comme outil indispensable du génie des procédés pour la conception et la maîtrise des procédés de l'usine du futur de l'industrie 4.0

Le génie des procédés concerne les sciences et technologies qui transforment, de façon optimale, la matière et les énergies en produits réclamés par un consommateur exigeant, et en déchets non polluants. Il intervient aujourd'hui dans le cadre des économie et ingénierie circulaires (suivi des produits et procédés, du berceau à la tombe), et les transformations optimales de la matière et des énergies doivent être menées pour concevoir l'usine du futur avec l'émergence de l'industrie 4.0 et de l'abondance de données (*Big Data*).

Le génie des procédés moderne (vert) est volontairement orienté vers l'intensification des procédés (c'est-à-dire produire plus et mieux, avec moins d'utilisation de ressources), et ce, avec une approche de modélisation et de simulation informatique, multidisciplinaire et multi-échelle de temps et d'espace, depuis les échelles de l'atome et de la molécule, de l'équipement et du réacteur, jusqu'aux échelles de l'usine (c'est-à-dire la conception d'une raffinerie, d'un complexe chimique, textile ou cimentier à partir des équations de Schrödinger !).

Pour satisfaire à cette approche multidisciplinaire physico(bio)chimique et multi-échelle apparaît, dans toute sa splendeur, la place prépondérante et irremplaçable de la thermodynamique chimique, et plus généralement, de la thermodynamique des procédés pour la maîtrise multi-échelle de ces procédés.

Il est clair que les ouvrages qui traitent la thermodynamique des procédés doivent s'imprégner et refléter cette place prépondérante de la thermodynamique

chimique (systèmes ouverts ou fermés avec ou sans réaction chimique, équilibres de phases) et de l'énergétique des procédés (cycles thermiques, pompe à chaleur, énergie dégradée, exergie). Mais ces ouvrages doivent surtout concerner et présenter des exemples d'applications physicochimiques multi-échelle réelles, qui préparent ou concourront à la conception, l'élaboration et la maîtrise des procédés de l'usine du futur, par apport de méthodologies, techniques d'obtention de données thermodynamiques fiables qui contribueront à l'abondance des données (*Big Data/Usine 4.0*).

Un grand merci au professeur Salah Belaadi, éminent spécialiste de l'enseignement et de la recherche en thermodynamique des procédés, de nous proposer un tel ouvrage didactique, dont les différents chapitres présentent principalement des exercices très orientés applications industrielles.

Cet ouvrage d'exercices en thermodynamique et énergétique des procédés est un *vade-mecum* qui, j'en suis personnellement convaincu, va profiter au plus grand nombre d'enseignants et chercheurs universitaires, ingénieurs et techniciens en activité dans le secteur économique d'aujourd'hui et du très proche futur.

Jean-Claude CHARPENTIER
Ancien directeur de l'ENSIC Nancy et de l'ESCPE Lyon, France
Ancien président de la Fédération européenne de génie chimique
Laboratoire réactions et génie des procédés
CNRS/ENSIC/Université de Lorraine

Préface de Dominique Richon

La thermodynamique est une science universelle qui présente un formidable intérêt par l'ensemble de ses applications. Les postulats qui sont à la base de sa présentation ne sont pas toujours très compréhensibles, ni aux yeux des étudiants ni à ceux des chercheurs aguerris, pas plus que les nombreux développements qui en découlent.

La nature est complexe, le scientifique se doit d'être humble vis-à-vis de ce qu'il voit. Il doit observer scrupuleusement, mûrement réfléchir, tenter des interprétations et entreprendre une modélisation, une théorie qui seront jugées comme valides jusqu'à ce qu'une nouvelle observation, une nouvelle expérience vienne les remettre en cause. Dans cette optique, il est nécessaire pour le pédagogue de faire preuve de conviction, de perspicacité, de passion afin de transmettre au mieux le goût de l'effort et du travail bien accompli, de favoriser des vocations et de découvrir des talents.

Le professeur Salah Belaadi a ainsi consacré de nombreuses années à l'enseignement de la thermodynamique. Il a enrichi ses cours de nombreux exercices entièrement dédiés à la compréhension de cette science et aux applications potentielles pour le monde industriel. Au fil des années, il a su sélectionner les exercices les plus intéressants et les plus pertinents. Le recueil qu'il propose aujourd'hui est donc une mine de sujets triés sur le volet pour la réflexion et la culture thermodynamiques. Je lui souhaite vivement le succès qu'il mérite et j'espère qu'un très grand nombre de bénéficiaires sauront profiter de ce contenu.

Dominique RICHON
Professeur émérite à Mines ParisTech
Ancien directeur du Laboratoire de thermodynamique
et des équilibres entre phases

Avant-propos

Cet ouvrage a pour ambition d'atténuer l'appréhension vis-à-vis de la thermodynamique et de la rapprocher de ceux qui doivent s'en servir, aussi bien au terme d'apprentissages, de formations ou de recyclages qu'aux instants permanents de recherche et de réflexion sur l'évolution des procédés de transformation de la matière et de l'énergie.

La nécessité d'écrire cet ouvrage m'est apparue, après tant d'années d'enseignement à divers paliers universitaires, suite au constat sans équivoque : la difficulté que rencontrent les étudiants – voire les ingénieurs en activité dans les entreprises ou les pôles de recherche – à résoudre des problèmes concrets de thermodynamique vient du fait que les manuels qui traitent des applications des concepts de cette discipline sont trop didactiques.

D'où l'originalité de l'ouvrage que je propose, dans lequel l'approche adoptée est totalement inédite – puisqu'elle utilise la thermodynamique comme outil de résolution – et indispensable pour la maîtrise d'un procédé de transformation de l'énergie et/ou de la matière faisant appel à un ou plusieurs concepts de thermodynamique. C'est ainsi que l'ouvrage n'est pas structuré selon la progression de l'enseignement des concepts de thermodynamique, mais plutôt selon l'évolution de la difficulté scientifique par rapport à l'état du système thermodynamique étudié, depuis le système fermé jusqu'à l'énergétique des procédés ; car la thermodynamique est avant tout « la science de l'évolution des états d'un système quel qu'il soit ».

L'ouvrage tire son intérêt de la définition même de cette science, admise par la communauté scientifique depuis fort longtemps comme étant la « mère des sciences ». En effet, tous s'accordent pour reconnaître que : « Si la thermo ne résout pas tout, sans elle, on ne résout rien ! » ; ceci est d'autant plus vrai pour les procédés physico-chimiques de transformation de la matière et de l'énergie.