

À QUOI SERT LE GÉNIE DES PROCÉDÉS ?

Par Christophe GOURDON¹

Avant d'apporter des éléments de réponse à la question posée dans le titre du présent article, il peut être utile de revenir sur quelques définitions relatives au génie des procédés et sur quelques-uns des faits qui ont conduit à son émergence dans la communauté académique et dans le secteur industriel.

Étymologiquement, le mot génie, qui nous intéresse ici, est rattaché à la racine « ingénieur », le génie désignant d'abord le corps des ingénieurs puis se confondant progressivement avec leurs activités. Ainsi par exemple, le génie civil, expression bien connue de tous, correspond à l'ensemble des techniques relatives aux constructions civiles (bâtiments, ponts, chaussées, etc.). Quand le qualificatif « chimique » a été adjoint au mot génie, le génie chimique a alors désigné l'ensemble des connaissances nécessaires à la mise en œuvre d'une usine chimique et à l'optimisation de production.

En France, le génie chimique est né à Toulouse. L'histoire commence avec Paul Sabatier, Prix Nobel 1912 pour ses travaux sur l'hydrogénation catalytique, et créateur de l'Institut de Chimie à Toulouse, Institut dont Joseph Cathala fut un élève. Joseph Cathala découvre le concept de « *Chemical Engineering* », d'abord au Québec lors d'un séjour de quelques années pendant l'entre-deux-guerres, puis pendant la Seconde Guerre mondiale à Londres où il avait rejoint le général de Gaulle. À son retour en France, il n'a cessé de faire connaître la formation en génie chimique (le « *chemical engineering* » anglo-saxon). Ses efforts de pionnier se voient récompensés avec la reconnaissance en 1948 du diplôme d'ingénieur du génie chimique, et l'année suivante avec la création de l'Institut du Génie Chimique (IGC). Parallèlement, à Nancy, à l'École Supérieure des Industries Chimiques (ESIC), sous l'impulsion de Maurice Letort, est intégrée au cursus universitaire une formation en génie de la réaction chimique qui préfigure la mutation progressive dans cette école de l'enseignement de chimie industrielle en enseignement du génie chimique. C'est bien sur ces deux pôles, Toulouse et Nancy, que s'est appuyée initialement la formation académique en génie chimique en France. À Toulouse, en 1961, l'IGC s'implante sur l'Île du Ramier, suite à une donation de locaux et de terrain de la part de la Poudrerie Nationale (devenue en 1971 la SNPE, Société Nationale des Poudres et Explosifs). L'IGC y est resté jusqu'à la catastrophe d'AZF en 2001, et est désormais situé à Labège, sur le site de l'Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP²), après les retrouvailles avec les collègues chimistes de l'École Nationale Supérieure de Chimie de Toulouse (ENSCT) qui ont conduit à la fusion de l'ENSIGC et de l'ENSCT pour donner naissance en 2001 à l'ENSIACET (École Nationale Supérieure des Ingénieurs en Arts Chimiques et Technologiques).

1 Communication présentée à l'Académie des Sciences, Inscriptions et Belles-Lettres de Toulouse à la séance du Jeudi 13 avril 2023.

2 Toulouse INP regroupe six écoles d'ingénieurs : ENSAT, ENSEIHT, ENSIACET, ENIT, PURPAN, ENM.

Intéressons-nous maintenant à ce que l'on appelle le « génie des procédés », qui traduit une extension de la discipline génie chimique. En effet, le génie des procédés recouvre les méthodes et les concepts du génie chimique, mais cette fois appliqués aux industries de transformation de la matière autres que chimiques, telles que la pharmacie, l'agroalimentaire, la métallurgie, la cosmétique, le traitement des eaux et effluents gazeux... C'est-à-dire toutes les transformations dans lesquelles la réaction chimique n'est pas nécessairement au cœur. Cette définition et cette extension du génie chimique, nous les devons essentiellement à Jacques Villiermaux de l'ENSIC de Nancy, à l'origine de la création de la Société Française de Génie des Procédés (SFGP³) et de la tenue de son 1^{er} congrès en 1987.

À quoi sert le génie des procédés ?

Les secteurs d'application et leurs produits associés, concernés par le génie des procédés, sont très variés. Il est difficile d'être exhaustif en la matière. Citons entre autres le traitement des eaux et leur potabilisation, la fabrication de vernis, peintures et laques, la cosmétique (parfums, crèmes, dentifrice...), le secteur agroalimentaire, le domaine des transports (pour les composants des véhicules ou ne serait-ce que pour la fabrication des combustibles). Il en va de même dans le secteur de l'énergie (comme par exemple avec les nouveaux défis relatifs aux énergies renouvelables ou à l'énergie nucléaire), dans le domaine de la santé, où l'on a besoin du génie des procédés pour fabriquer les médicaments ainsi que leurs emballages, ou dans le domaine de la métallurgie pour fabriquer de nouveaux alliages. Le tout s'inscrit dans une logique de développement durable sur laquelle nous aurons l'occasion de revenir dans cet article, avec le développement du cycle vertueux propre à l'économie circulaire visant au recyclage ou à la réutilisation.

Devant l'ampleur du spectre des applications et de leur diversité, il est légitime de s'interroger sur le pourquoi de la prééminence du génie des procédés qui se cache derrière la réalisation de tous ces produits. Une manière d'y répondre passe par l'examen des fondements de la discipline. Le génie des procédés repose sur trois outils fondamentaux qui sont : la thermodynamique (les cycles thermochimiques ; les équilibres entre phases) ; les phénomènes de transport de quantité de mouvement, de matière et de chaleur (thermodynamique hors équilibre) ; la cinétique chimique et le génie de la réaction chimique.

Or, toutes les transformations de la matière citées précédemment font appel peu ou prou à l'un ou l'autre de ces fondements, ou à toute combinaison entre deux ou trois de ces fondements.

Un mot sur le génie de la réaction chimique

Quand la réaction chimique est au cœur de la transformation de la matière, sa mise en œuvre fait appel à deux modes de production bien distincts, dont on trouve la trace en remontant loin dans l'histoire de l'humanité : le mode discontinu (en anglais,

³ La SFGP est une société savante qui rassemble tous les acteurs impliqués en génie des procédés (industriels et équipementiers, chercheurs, enseignants-chercheurs et étudiants) : <https://www.sfgp.asso.fr/>.

mode « *batch* ») et le mode continu. On parle de réacteur discontinu dès lors que l'on introduit en une seule fois tous les réactifs dans la cuve et que l'on mélange le tout tant que les produits finaux recherchés ne sont pas obtenus. Une fois obtenus, on arrête l'opération, on vide la cuve et on recommence l'opération autant de fois que nécessaire en vue d'atteindre la production désirée. On parle de réacteur continu, dès lors que le réacteur est alimenté en continu par les réactifs et les produits sortent en continu. Dans ces conditions, la durée de la transformation ou encore le temps de contact entre les réactifs sont fixés par le rapport entre le volume du réacteur et le débit volumique du mélange réactionnel, ce dernier obéissant au critère de production désirée. Le volume, quant à lui, peut correspondre à celui d'une cuve unique comme à celui d'une succession de cuves mises en série, les deux manières d'opérer n'étant d'ailleurs pas équivalentes en terme de conversion des réactifs, mais ce n'est pas l'objet de cet article d'aller plus loin sur ce sujet.

Les deux modes opératoires discontinu et/ou continu sont à la base de tous les ateliers actuellement en service dans le monde et le choix entre ces modes dépend des volumes de production à réaliser mais aussi de l'historique des procédés. Traditionnellement, les procédés discontinus sont réservés à des petites productions (typiquement quelques tonnes par an) alors que les fortes productions (plusieurs milliers de tonnes par an) ont recours aux procédés continus. C'est ce qui permet de distinguer grossièrement ce que l'on appelle couramment chimie fine et chimie lourde, la chimie de spécialités étant bien souvent intermédiaire entre les deux.

Le génie des procédés : une science pluri- ou interdisciplinaire ?

Le génie des procédés est donc perçu comme étant la science des processus chimiques, physiques, biologiques, énergétiques et de leurs couplages permettant de transformer la matière en produits fonctionnels à l'échelle industrielle. À ce titre, comme on l'a vu précédemment, le génie des procédés convoque des fondements issus de diverses disciplines ; on peut dès lors le qualifier de pluridisciplinaire. Cependant, nous sommes en droit de nous interroger sur un plan épistémologique afin d'examiner si le génie des procédés ne pourrait pas être considéré comme étant interdisciplinaire, voire transdisciplinaire. La nuance entre inter- et transdisciplinaire peut se comprendre comme suit : l'interdisciplinarité suppose une intrication, un dialogue fructueux entre disciplines de base, tout en sachant toujours reconnaître les apports respectifs de chacune ; en revanche, la transdisciplinarité suppose la construction de contenus et de méthodes originales avec l'émergence d'un méta-niveau qui transcende les disciplines d'apport.

En un certain sens, le génie des procédés peut se réclamer de la transdisciplinarité. En effet, à partir de disciplines de base comme la chimie, la physique, la biologie, les mathématiques (appliquées), l'informatique, le génie des procédés a créé un certain nombre de paradigmes, propres au génie et aux procédés, qui le hissent au niveau d'une méta-discipline.

Les paradigmes du génie des procédés

Nous allons en détailler trois : l'approche systémique (avec la notion de bilans) ; l'approche multi-échelle (spatiale et/ou temporelle) ; la représentation en opérations unitaires (avec la notion d'étage théorique).

L'approche systémique

Qui dit approche systémique, dit système : cela peut être un appareil de transformation de la matière, cela peut être un atelier (un ensemble d'appareils), une usine (un ensemble d'ateliers), un site industriel (un ensemble d'usines).

On s'intéresse à ce que FAIT le système, pas nécessairement à chercher à décrire de quoi il EST constitué. C'est ce qui distingue une approche systémique d'une approche analytique.

Tout système est toujours défini par ses frontières aux bornes desquelles on identifie des entrées (par exemple de matières), des sorties (produits et sous-produits), et des perturbations (par exemple d'autres entrées de matières ou des flux énergétiques, du type froid, chaleur). Le système opère à l'aide d'un certain nombre de variables identifiées comme importantes pour décrire le processus de transformation de la matière et sur lesquelles l'opérateur peut jouer directement ou indirectement.

Le travail de l'ingénieur de génie des procédés est alors d'écrire des BILANS (par exemple de matière ou d'énergie) entre l'entrée et la sortie du système.

Qui dit système, dit nécessairement milieu extérieur au système (hors des bornes qui délimitent le système). On parle aussi d'environnement. Trois types d'interactions existent entre tout système et son environnement immédiat : quand il y a échange de matière et d'énergie entre système et environnement, on parle de système ouvert ; quand il n'y a qu'échange d'énergie, on parle de système fermé ; quand il n'y a ni échange de matière ni d'énergie, on parle de système isolé. La thermodynamique offre la possibilité de traiter ces trois cas systémiques bien distincts.

L'approche multi-échelle

Intéressons-nous aux échelles spatiales, sachant que l'on pourrait faire de même avec les échelles temporelles. Toute transformation de la matière fait intervenir des phénomènes qui se manifestent à différentes échelles spatiales, allant du nanomètre (10^{-9} m) au kilomètre (10^3 m). Parcourons-les ensemble.

À l'échelle nanométrique, on se rapproche de l'état de la matière, constituée d'atomes et de molécules. Puis à l'échelle microscopique, on voit apparaître des agrégats de molécules, des cristaux. On est alors à l'échelle de la paillasse (échelle du laboratoire), où le chimiste manipule quelques milligrammes, voire grammes de matière. En volume, on parle de quelques cm^3 . Ensuite à l'échelle mésoscopique, on voit apparaître des systèmes polyphasiques (bulles, gouttes, particules) dans des appareils dits à l'échelle pilote. L'opérateur manipule des dizaines de grammes, voire quelques kilogrammes. En volume, on parle de quelques litres. Enfin, à l'échelle macroscopique, on se situe à l'échelle des ateliers, des usines, voire d'un territoire avec la prise en considération de toute la chaîne de production (incluant approvisionnement des matières premières, ressources énergétiques, relations clients...). On parle alors en plusieurs tonnes, voire milliers de tonnes et en volume, on a affaire à plusieurs m^3 .

La chimie s'intéresse aux échelles nanométriques et microscopiques, tandis que le génie industriel se cantonne à l'échelle macroscopique. En revanche, le génie des procédés se préoccupe de toute la gamme d'échelles intermédiaires, allant du microscopique au macroscopique, en passant par le mésoscopique.

Au sein d'une même activité de transformation de la matière, toutes les échelles peuvent être impliquées, enchevêtrées les unes dans les autres. Par exemple dans le procédé de production du polychlorure de vinyle (PVC), plastique bien connu que l'on

retrouve dans toutes nos maisons, ne serait-ce que pour l'évacuation des eaux usées, la polymérisation en émulsion du monomère (le chlorure de vinyle) est initiée dans des gouttelettes d'une centaine de microns (10^{-6} m), elles-mêmes manipulées dans des réacteurs de plusieurs dizaines, voire d'une centaine de m^3 . Tout le savoir-faire du génie des procédés est de maîtriser ainsi les phénomènes à toutes les échelles.

Un autre enjeu pour le génie des procédés est d'effectuer les changements d'échelle, on dit aussi l'extrapolation, des procédés. En effet, après la découverte à la paillasse, il convient de passer à l'échelle de la production industrielle : en clair, de la paillasse à l'usine, tout en garantissant la qualité du produit... et la sécurité des opérateurs ! Nous y reviendrons par la suite.

La représentation en opérations unitaires

Le concept d'opérations unitaires, en y adjoignant la notion d'étage théorique, est un paradigme propre au génie des procédés. Tout procédé de transformation de la matière fait appel à une succession d'opérations élémentaires, ou encore unitaires, selon un principe qui se répète et ce quel que soit le produit visé. En effet, généralement, il s'agit de débarrasser les matières premières de leurs impuretés, puis de les mélanger pour les faire réagir entre elles, de chauffer ou refroidir le mélange réactionnel, de séparer le (ou les) produit(s) des sous-produits une fois la transformation effectuée, et enfin de procéder à une mise en forme du produit fini.

En particulier, si l'on s'intéresse aux techniques séparatives, on peut distinguer celles qui ont recours à un agent de séparation matière (tiers-corps immiscible avec le mélange : solvant, membrane, adsorbant, vapeur...) de celles qui font appel à un agent de séparation de nature thermodynamique (chaleur, froid, pression...). Dans la première catégorie, on retrouve l'extraction, l'absorption, la séparation membranaire, l'adsorption... Dans le second cas, on retrouve la distillation, la cristallisation, le séchage...

Une des forces du génie des procédés est d'avoir proposé une représentation unifiée de toutes ces opérations de séparation sur la base de la notion d'étage théorique.

Tout contact entre un mélange riche en constituants avec un agent de séparation (matière ou thermodynamique) conduit au final en sortie à un mélange appauvri et un agent de séparation enrichi du (ou des) constituant(s) que l'on désirait séparer du mélange initial. Quand mélange et agent de séparation ont atteint l'équilibre entre phases (régi par les lois de la thermodynamique), le contact est alors assimilé à un étage théorique. Il ne sert plus à rien de maintenir le contact entre phases et l'on peut alors récupérer les courants à l'équilibre en sortie de l'étage théorique.

Quelle que soit la technique séparative déployée, la technologie associée peut être systématiquement considérée comme étant un seul étage théorique ou comme étant une succession d'étages théoriques. Ce concept très puissant est à la base du dimensionnement des appareils de séparation, que ce soit à l'échelle laboratoire, pilote ou industrielle.

Quid du changement d'échelle (extrapolation) ?

Toute transformation de la matière débute à la paillasse dans un bécher ou un ballon grâce à l'inventivité du chimiste. La question qui est posée ensuite au spécialiste du génie des procédés est d'assurer la production industrielle du produit désiré, en concevant le procédé à l'échelle appropriée au marché envisagé, tout en garantissant que le produit industriel soit bien le même que celui obtenu initialement à la paillasse. En général, on opère par étapes successives en faisant grandir progressivement le procédé pour

garantir qu'à chaque étape la qualité du produit ne soit pas dégradée et que la sécurité des opérateurs soit bien respectée.

Sur le plan fondamental, la question revient à énoncer des règles de similitude entre le système à plus petite échelle et celui à plus grande échelle. Ces règles d'extrapolation s'énoncent à partir du principe de similitude des nombres adimensionnels caractéristiques. Qu'est-ce qu'un nombre adimensionnel ?

Un nombre adimensionnel est le résultat du rapport entre deux grandeurs de même unité, par exemple le rapport entre deux longueurs. Dans le cas d'un carré, le rapport des deux côtés égaux du carré conduit à un nombre sans dimensions égal à un. Si l'on veut que le carré reste un carré en le faisant grossir, il convient de s'assurer que le nombre adimensionnel, issu du rapport des côtés, soit toujours égal à un. C'est là le principe de similitude : on veut que les nombres adimensionnels restent identiques, quelle que soit la taille du système.

Maintenant qu'est-ce qu'un nombre adimensionnel caractéristique ? Nous allons prendre un exemple simple, celui d'un réacteur continu sous la forme d'un tube cylindrique, de longueur L et de diamètre D , parcouru par un flux de matière qui se déplace le long de ce réacteur à une vitesse moyenne U . Dans ces conditions, deux nombres adimensionnels se sont imposés comme caractéristiques du fonctionnement de ce réacteur. Ils portent le nom de leurs inventeurs.

Le premier est le nombre de Reynolds qui caractérise la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent) et qui est défini par le rapport des forces d'inertie du fluide sur les forces visqueuses : $Re = \frac{\rho U D}{\mu}$ (ρ masse volumique du fluide ; μ sa viscosité).

Le second est le nombre de Bodenstein qui caractérise le flux de la matière, défini par le rapport entre convection de la matière et sa dispersion (ou diffusion) : $Bo = \frac{UL}{D}$

Chercher à conserver les nombres de Reynolds et de Bodenstein lors du changement d'échelle conduit au final à une incompatibilité mathématique qui rend l'extrapolation impossible sur le plan formel. En d'autres termes, la similitude absolue recherchée en égalant tous les nombres adimensionnels caractéristiques du système à extrapoler est impossible à atteindre ! On doit donc se contenter de similitude incomplète en étant contraint à des compromis qui consistent par exemple à faire un choix parmi les nombres adimensionnels dont on pense qu'il est plus important de conserver la valeur que d'autres.

C'est bien là tout l'art du génie des procédés !

Le génie des procédés d'aujourd'hui... et de demain

Le génie des procédés est une science en mouvement avec des métiers en évolution face aux enjeux de la transition énergétique et environnementale. Si, dans ce contexte, la chimie est souvent perçue, hélas parfois à juste titre, comme l'un des problèmes, elle peut aussi se revendiquer comme l'une des solutions. Chimie verte⁴ et génie des procédés durable⁵ ont définitivement énoncé un certain nombre de principes qui

4 Anastas, P. T., Warner, J. C., *Green Chemistry : Theory and Practice*, Oxford University Press, New York, 1998, p.30. By permission of Oxford University Press.

5 Anastas, P.T., and Zimmerman, J.B., *Design through the Twelve Principles of Green Engineering*, Env. Sci. and Tech., 37, 5, 94A-101A, 2003.

incitent à affirmer que le génie des procédés se positionne résolument comme un acteur apte à répondre à près de la moitié des objectifs de développement durable affichés par l'ONU⁶. Afin d'illustrer cette ambition, nous pouvons citer quelques-uns des exemples de réussites industrielles mentionnées dans deux Livres Blancs⁷ édités par la SFGP en 2017 et 2019.

L'entreprise Seqens a mis en œuvre un procédé original de distillation réactive pour sa production d'acétate d'isopropyle. La technologie multifonctionnelle combine dans un même équipement réaction et séparation, ce qui permet de former très peu d'impuretés, avec une quasi-absence de rejets aqueux et gazeux, le tout en réduisant la consommation énergétique. En outre, la pureté exceptionnelle de l'acétate ainsi atteinte a ouvert des débouchés pour des applications en cosmétique et en pharmacie. Cette réalisation a été doublement saluée une première fois en 2016 avec le prix Pierre Potier récompensant l'innovation en faveur du développement durable et une seconde fois en 2019 avec un prix de la Fédération Européenne de Génie Chimique dans le domaine de l'intensification des procédés.

La société Air Liquide a développé un nouveau type de réacteur-échangeur élaboré par fabrication additive et dont les performances en terme de transfert de chaleur et de matière ont permis une amélioration de l'efficacité énergétique de 20%, et en conséquence une réduction de l'empreinte carbone dans les mêmes proportions, pour la production sur site d'hydrogène, vecteur énergétique d'actualité.

L'entreprise toulousaine Polymem a mis en place un procédé de potabilisation des eaux par ultrafiltration sur fibres creuses en acétate de cellulose. La nature hydrophile des fibres, associée à la technologie fibres creuses, a permis d'accroître la perméabilité et la sélectivité de la filtration, tout en réduisant le colmatage des membranes.

Plus précisément, le dernier congrès de la SFGP qui s'est tenu en novembre 2022 à Toulouse a marqué les esprits et constitue un véritable tournant. En effet, son slogan était « *sciences et solutions technologiques pour la transition* ». Ainsi, il a été question d'éco-innovation, d'économie circulaire, de transition énergétique, de biomimétisme... Clairement, il s'agit bien de tendre vers une industrie plus propre, plus sobre (en énergie et en matières premières), une société zéro déchet et une économie durable favorisant le développement de filières de recyclage.

Conclusion

La formation en génie des procédés bénéficie désormais d'un bel essaimage sur tout le territoire national avec une grande diversification thématique, tant dans les écoles d'ingénieurs que dans les cursus universitaires. Le génie des procédés s'impose comme la science du changement d'échelle (de la paillasse à l'usine), la science des objets technologiques, concrets et donc complexes. C'est, par essence même, une discipline intégrative, voire transdisciplinaire (l'ensemble des phénomènes et des processus multi-échelles et multi-physiques, incluant leurs couplages).

6 Organisation des Nations Unies : <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>.

7 Livre Blanc, *Le Génie des Procédés en France*, SFGP, 2017 ; Livre Blanc, *L'usine du futur*, SFGP, 2019 : <https://www.sfgp.asso.fr/>.

Le génie des procédés paraît être un véritable moteur d'innovation pour des industries nouvelles ou traditionnelles, et devenir un acteur majeur et incontournable du renouveau industriel (réindustrialisation, relocalisation...).