

J. Villermaux¹R. David² (chapitre VI)J.-L. Houzelot³ (chapitre V)D. Schweich⁴ (chapitre V)

VOUS AVEZ DIT GÉNIE DES PROCÉDÉS ?

I. Pour une nouvelle classification des sciences

Sans qu'il soit nécessaire de remonter jusqu'à l'exemple célèbre d'Archimède, l'histoire des sciences et des techniques témoigne de l'apport conjoint, souvent indissociable, des chercheurs et des ingénieurs aux progrès des connaissances, et à leur aptitude à répondre aux besoins de l'humanité, l'ingénieur ayant souvent précédé le chercheur. Jusqu'au début du XIX^e siècle, la connaissance expérimentale était fondée sur l'observation des objets et phénomènes naturels avec, pour corollaire, la fameuse classification des disciplines scientifiques selon le schéma linéaire d'Auguste Comte : mathématiques, astronomie, physique, chimie, biologie, sociologie, classification à laquelle on s'est plu à superposer une hiérarchie de valeurs. Le développement de la civilisation technique a fait apparaître des objets artificiels et des systèmes industriels, dont l'étude a suscité la création de nouvelles sciences et de nouvelles disciplines non réductibles à une simple combinaison linéaire des anciennes. On peut citer, à titre d'exemple, l'informatique, l'automatique, l'analyse des systèmes, l'ergonomie, etc.

Certaines de ces disciplines nouvelles sont regroupées au sein de ce qu'il est convenu d'appeler les « Sciences de l'ingénieur » ou « Sciences des systèmes industriels », ni moins fondamentales, ni moins nobles que les Sciences de la Nature traditionnelles, seul l'objet d'étude étant différent : on peut, en effet, analyser avec une démarche scientifique aussi rigoureuse le fonctionnement d'un moteur à explosion ou le comportement d'une paramécie. Il n'est pas inutile, à ce propos, de souligner que l'opposition traditionnelle entre « recherche fondamentale » et « recherche appliquée » repose sur une distinction simpliste et parfois erronée, surtout lorsqu'elle sous-tend l'identification inconsciente (mais encore trop souvent répandue) : recherche fondamentale = noble, abstraite, théorique, amont, détachée des contingences matérielles, monodisciplinaire, réservée aux universitaires ; recherche appliquée = servile, concrète, expérimentale, aval, guidée par le profit, pluridisciplinaire, laissée aux ingénieurs. La réalité est beaucoup plus complexe et ce vieux clivage doit être dépassé, par exemple en qualifiant une recherche au moyen de quatre critères :

1. Sa finalité : accroître les connaissances, ou répondre aux besoins de l'homme dans la société et du monde socio-économique.
2. Son enjeu, qui peut être fort (guérir le cancer, faire de l'hydrogène avec du soleil et de l'eau, savoir si l'univers est ouvert ou fermé) ou faible (trouver une forme de boulon plus facile à visser, trouver le point d'ébullition du dichloro 1-3 benzène quand on a mesuré celui du dichloro 1-2 benzène).
3. La démarche ou l'état d'esprit avec lesquels elle est faite : démarche fondamentale (analyser, comprendre, remonter aux

processus de base, généraliser) ou démarche empirique, pragmatique, heuristique (réussir aux moindres frais).

4. L'échelle de temps de son aboutissement : délai imposé et court terme, ou au contraire délai non fixé et long terme.

Il est clair qu'on peut mener une recherche à finalité industrielle dans un esprit fondamental, et qu'il existe réciproquement bien des exemples de recherches à finalité cognitive menées empiriquement ou sans très fort enjeu.

Qu'il soit donc admis une bonne fois pour toutes, et nous en donnerons des exemples ci-dessous, qu'il n'y a pas d'un côté les Sciences de la Nature qui seraient fondamentales et de l'autre des Sciences des systèmes industriels qui seraient appliquées, mais un ensemble de démarches scientifiques ayant chacune leurs finalités et leurs enjeux propres.

Les Assises Régionales, puis le Colloque National sur la Recherche et la Technologie ont contribué, en 1982, à une prise de conscience de ces réalités dans le monde scientifique et industriel, aussi bien que dans le grand public. La traduction en est marquée dans la « loi d'orientation et de programmation » pour la recherche et le développement technologique, qui se réfère à une « culture scientifique et technique », et dans le nouveau découpage du Comité National de la Recherche Scientifique du CNRS, (probablement aussi dans celui du Conseil Supérieur des Universités), qui donne désormais leur place à des Sections consacrées aux « Génies » (les Engineering Sciences du monde anglophone).

Parmi ces sciences des systèmes industriels, nous voudrions présenter plus particulièrement dans cet article le « Génie des procédés », dans le contexte français et international.

Mais d'abord, qu'est-ce que le « Génie des procédés de transformation » ?

Dans une définition un peu générale, on peut dire que c'est l'ensemble des connaissances nécessaires pour concevoir, analyser, développer, construire et faire fonctionner d'une manière optimale les procédés dans lesquels la matière change :

- de forme, d'état agrégation ou de dispersion ;
- d'état physique ou de propriétés physico-chimiques ;
- de nature chimique.

Et ceci avec la finalité de satisfaire des besoins socio-économiques. Ainsi défini, le Génie des procédés recouvre sensiblement ce que les

¹ Directeur du Laboratoire des sciences du génie chimique, CNRS-ENSIC, Nancy.

² Chargé de recherche au CNRS-LSGC, Nancy.

³ Maître-assistant à l'ENSIC, Nancy.

⁴ Maître de recherche associé au LSGC, Nancy.

anglo-saxons appellent « Process Engineering » et les allemands « Verfahrenstechnik », à des nuances près que nous discuterons ci-dessous. Le troisième type de transformation (changement de nature chimique) concerne un sous-ensemble important du Génie des procédés, qui constitue *stricto sensu* le « Génie chimique » (« Chemical Engineering », « Chemie Ingenieurwesen ») et qui apparaît, ainsi, comme un cas particulier. En réalité, le Génie

chimique a précédé le Génie des procédés; il est à l'origine de ses principaux concepts, et il est amené, dans bien des pays comme la France, à dépasser le cadre des seuls procédés chimiques pour transposer ses méthodes aux procédés de transformation non chimiques. Il n'est donc pas inutile de rappeler brièvement comment cette discipline est apparue et s'est développée historiquement.

II. Naissance et développement du Génie chimique

Si l'on en croit Astarita (1), le premier ouvrage de Génie des procédés chimiques, œuvre posthume de Vannuccio Biringuccio, a été publié à Venise sous le titre de « Pirotechnia » en 1540, trois ans avant le « Traité sur les révolutions des mondes célestes » de Copernic et plus de cent ans avant que Boyle ne tente, dans son « Chimiste Sceptique » (1661), de dégager les premiers concepts de la chimie des brumes de la doctrine alchimique. En réalité, l'ouvrage de Biringuccio était plutôt le premier traité de chimie industrielle, dont l'objet est de décrire, un par un, les procédés en fonction des produits fabriqués plutôt que de dégager des principes gouvernant les procédés eux-mêmes. Il en était de même du premier cours « Chemical Engineering » créé au MIT, en 1888, par Norton. La date de naissance du Génie chimique moderne peut être située entre 1915, où Little définit le concept « d'opération unitaire » et 1923, où ce concept est repris dans le célèbre ouvrage de Walker, Lewis et Mac Adams « Principles of Chemical Engineering ». Pour la première fois, des opérations comme le pompage et le transport des fluides, le chauffage et le refroidissement des gaz, des liquides et des solides, des changements de phase comme l'évaporation, la condensation ou la cristallisation, des techniques de séparation comme la distillation fractionnée, l'absorption et la désorption d'un gaz, la lixiviation, la sédimentation et la filtration... font l'objet d'études en soi et de théories quantitatives. En France, si le concept d'opération unitaire est accepté, surtout parce qu'il se prête à une mathématisation qui plaît aux ingénieurs de nos Grandes Écoles, la portée réelle de la nouvelle discipline n'est pas comprise (2) : le livre de Walker, Lewis et Mac Adams est traduit par un faux sens « Principes de chimie industrielle », ce qui va accréditer, pour longtemps, l'idée que le génie chimique n'est qu'une branche de la chimie appliquée, et retarder considérablement son développement par rapport à celui qu'il va connaître dans les pays anglo-saxons.

Les méthodes du génie chimique vont faire leurs preuves pendant la Seconde Guerre mondiale pour la mise en place rapide de filières

industrielles de substitution, mais elles concourent hélas aussi au succès du projet Manhattan. Après la guerre, elles permettent la reconstruction rapide de l'appareil de production des intermédiaires de base.

La seconde révolution va avoir lieu, en 1960, avec la publication du livre de Bird, Stewart et Lightfoot : « Transport Phenomena », où sont analysés, en profondeur, les processus élémentaires de transport de matière, d'énergie et de quantité de mouvement qui sont à la base des opérations unitaires.

Parallèlement, le couplage avec la réaction chimique est pris en compte. Un pas de plus est fait vers une compréhension fondamentale et unitaire du fonctionnement des procédés. Simultanément, le développement des moyens de traitement de l'information ouvre l'ère des modèles mathématiques et des représentations conceptuelles (parfois trop) abstraites.

La suite de l'histoire est connue, avec la prise en compte des contraintes socio-économiques (protection de l'environnement), la réponse au défi énergétique (recherche de substituts au pétrole, utilisation rationnelle de l'énergie) et l'avènement prévisible des biotechnologies.

Le schéma que nous venons de décrire est celui qu'ont vécu les pays anglo-saxons. Il n'en a pas été de même partout. En Allemagne et en Suisse, par exemple, le développement des procédés chimiques s'est appuyé très tôt sur une division du travail entre chimistes organiciens et ingénieurs mécaniciens-thermiciens... non sans quelque succès ! C'est seulement dans les années qui ont suivi la Seconde Guerre mondiale que quelques centres de formation et de recherche ont adopté l'approche du génie chimique de style américain, tout en s'appuyant sur de solides bases de chimie-physique. La situation est sensiblement analogue en France. Nous y reviendrons plus loin.

III. Universalité des méthodes du Génie chimique. Vers le Génie des procédés

Au cours des cinquante dernières années, la méthodologie développée par les spécialistes de génie chimique s'est avérée originale et très puissante pour résoudre les problèmes difficiles posés par la conception et l'analyse des systèmes industriels dont la complexité tient à la diversité des phénomènes physico-chimiques et/ou biologiques mis en œuvre. Elle peut être caractérisée par les points forts suivants :

1. Approche systémique

Contrairement à la plupart des sciences d'analyse monodisciplinaires, le génie chimique procède par une approche globale des systèmes dont les avantages ont été clairement mis en évidence par J. de Rosnay dans son ouvrage « Le Macroscopie » (3). Simultanément, sont pris en compte les bilans macroscopiques de matière, d'énergie et de quantité de mouvement, ainsi que leurs couplages. Les aspects transitoires font l'objet d'une discipline fondamentale où sont décrits d'une manière unitaire les comportements d'ensembles en apparence très divers : la dynamique des systèmes.

2. Intégration des processus de transformation physico-chimiques et biologiques au sein des systèmes en écoulement et des systèmes polyphasiques

Le couplage entre réactions et phénomènes de transport ou de transfert est un chapitre essentiel du génie chimique, qui a donné naissance, à partir des années 1960, à une nouvelle discipline : le génie de la réaction chimique et des réacteurs.

3. Méthodes de modélisation originales

Le développement des sciences du génie chimique a conduit à une réflexion approfondie sur les méthodes de modélisation. Il est, en effet, rapidement apparu que la modélisation en génie chimique n'était pas une simple branche de l'Analyse des systèmes classique en raison des singularités et des spécificités des systèmes physico-chimiques industriels : complexité des processus chimiques ou biologiques élémentaires, non linéarités, couplages irréductibles (par exemple entre réaction et diffusion de matière et de chaleur),

répartition spatiale des paramètres, importance des régimes transitoires, multiplicité et instabilité des états stationnaires... Les spécialistes de génie chimique ont donc dû développer de nouveaux types de modèles adaptés à la représentation, à l'optimisation, à l'extrapolation, à l'automatisation et à la commande des systèmes de production industriels complexes et ceci aussi bien au niveau des processus élémentaires que des unités d'opérations ou des grands ensembles. Dans certains cas, la nécessité de disposer de « modèles de tendance » à mi-chemin entre les modèles analytiques détaillés et les modèles en « boîte noire » des automaticiens a conduit à une véritable avance conceptuelle, et à un niveau de compréhension supérieur du système. L'apport du génie chimique à la méthodologie de la modélisation apparaît ainsi comme essentiel.

4. Prise en compte des facteurs technico-économiques

En raison de leur finalité (satisfaire les besoins socio-économiques), les procédés de transformation physico-chimiques doivent intégrer ces composantes. A condition d'attacher à la matière, à l'énergie, à l'information une « valeur » dépendant du contexte socio-économique, il est possible d'ajouter aux équations de bilans techniques traditionnels une équation de bilan de valeur, et de déterminer ainsi les conditions optimales de fonctionnement du procédé ou les coûts généralisés de l'opération (4).

5. Extension à des domaines voisins

Ceci a donné naissance, au cours des dernières années, à de nouveaux « génies » : génie électrochimique (électrolyse, électrosynthèse, hydrométallurgie), génie minéralurgique (métallurgies extractives), génie photochimique (procédés utilisant

l'énergie lumineuse), génie biochimique et biologique (fermentations, production de protéines et de médicaments), génie industriel alimentaire (lyophilisation, congélation, pasteurisation), génie industriel (gestion et économie des systèmes industriels)... la liste s'allonge tous les jours.

Dans tous les cas, on peut remarquer que le génie chimique et ses méthodes ont joué un rôle de précurseur et de pilote dans le développement de ces nouveaux domaines d'activité.

Il est intéressant, à cet égard, de rapprocher la définition, un peu étroite dans ses objectifs mais déjà très générale dans ses applications, que proposait, dès 1922, le Président de la British Institution of Chemical Engineers (nous donnons les deux citations en anglais pour ne pas risquer d'en trahir le sens) :

● « A chemical engineer is a professional man experienced in the design, construction and operation of plants in which materials undergo chemical or physical change » ;

et la nouvelle définition qui est proposée, en 1983, au vote des membres de l'American Institute of Chemical Engineers :

● « Chemical Engineering is the profession in which a knowledge of mathematics, chemistry and other natural sciences gained by study, experience and practice is applied with judgment to develop economic ways of using materials and energy for the benefit of mankind ».

Bien que ces définitions concernent non pas la discipline, mais la profession de ceux qui la pratiquent, on reconnaît clairement l'évolution du Génie chimique, parti pour certains, notamment en France, d'une conception restrictive de « plomberie pour chimistes », vers le Génie des procédés au sens large tel que nous l'avons défini dans la première partie.

IV. Le Génie des procédés et ses interfaces avec la chimie et la mécanique

La situation française

Au terme de cette première analyse, nous pouvons effectivement essayer de résumer ainsi les objectifs du Génie des procédés :

Il y a d'abord un ensemble d'« opération unitaires » communes à de nombreuses branches d'activité industrielle :

- circulation des fluides ;
- transferts de matière et de chaleur intraphases et interphases ;
- opérations sur les milieux poreux, ou génie de la matière divisée telle que bulles, gouttes, grains, agrégats : transport, réduction de taille, broyage, agglomération, percolation ;
- chauffage, production du froid et des basses températures, climatisation, séchage ;
- mélangeage des fluides et des solides ;
- filtration, centrifugation, sédimentation, floculation, flottation ;
- extraction, vaporisation, ab- et adsorption, distillation ;
- compression et détente des fluides...

La liste n'est évidemment pas limitative. La plupart de ces opérations mettent en jeu des consommations importantes d'énergie et de matière. Elles font appel à une industrie de réalisation d'appareillages très diversifiée, trop peu développée en France, qui importe une grande partie des équipements nécessaires à son industrie. Des programmes de recherche importants existent à l'étranger sur ces opérations unitaires, en particulier en Allemagne et en Suisse, avec les conséquences industrielles que l'on sait.

Transcendant en quelque sorte le concept d'opération unitaire, il y a ensuite un corps de doctrine constituant une approche plus fondamentale des systèmes et procédés industriels, et qui a beaucoup emprunté au Génie chimique, comme nous l'avons signalé. Ce sont en particulier :

- l'établissement et l'exploitation des bilans macroscopiques de base : matière, quantité de mouvement, énergie (au sens du

Premier Principe), exergie (au sens du Deuxième Principe), valeur (coût financier et énergétique) ;

● l'établissement et l'exploitation des bilans de population d'entités évolutives : bulles, gouttes, particules solides, cristaux, micro-organismes... S'appuyant sur les distributions de temps de séjour dans les systèmes en écoulement (méthodes des traceurs), ces équations de bilan permettent notamment de relier les propriétés et évolutions microscopiques intrinsèques et leur distribution aux grandeurs macroscopiques observables ;

● la Science des séparations et le génie des procédés de fractionnement ;

● la Science des réactions et le génie des réacteurs ;

● la Dynamique des systèmes et la science de la modélisation : acquisition et traitement de données, représentation, simulation, extrapolation, automatisation des procédés.

On notera dans cette énumération trois caractéristiques :

● les méthodes citées s'appliquent à des objets relevant de disciplines traditionnelles très différentes (mathématiques, mécanique, physique, chimie, biologie, sciences de la terre...);

● elles se situent en amont d'un très important secteur industriel et économique. Parmi les « branches » pouvant bénéficier du génie des procédés, on peut en effet citer : la sidérurgie, la minéralurgie, le ciment, le verre, le papier, le textile, la chimie, l'agro-alimentaire, la parachimie, la pharmacie, le traitement du pétrole, du charbon, du bois, l'industrie du froid, la transformation des plastiques et des métaux, l'industrie nucléaire (séparation des isotopes, retraitement), la dépollution, le traitement des eaux, la bio-industrie, le génie biomédical, la récupération assistée du pétrole, l'hydrologie etc.

● en revanche, et malgré ce vaste champ d'applications, elles ne font pas encore l'objet en France d'un enseignement et de recherches systématiques en rapport avec l'ampleur des besoins industriels.

Ceci nous amène à examiner les interfaces du Génie des procédés

avec d'autres disciplines existantes. L'apport de la chimie et de la chimie-physique, avec la thermodynamique, la cinétique chimique et l'électrochimie est évident. Schématiquement, on peut dire que l'industrie chimique fait usage de certaines opérations unitaires physiques de base, auxquelles il faut ajouter le Génie de la réaction chimique, le réacteur chimique constituant dans bien des cas le « cœur du procédé ». Mais il faut ajouter à ces connaissances méthodologiques la maîtrise des matériaux et des « agents chimiques » nécessaires à la réalisation des opérations : solvants spécifiques, catalyseurs, adsorbants, membranes, céramiques, matériaux résistant à la corrosion..., qui constituent de nos jours une part non négligeable des recherches sur les procédés. A côté du génie chimique classique des procédés continus de la pétrochimie et des grands intermédiaires à gros tonnage, qui relève typiquement d'un génie des procédés au sens large, on a vu apparaître, au cours des dernières années, un génie chimique plus fin, davantage axé sur la réaction chimique, et mieux adapté au traitement discontinu de substances à haute valeur ajoutée. Si le rôle des agents chimiques est ici prépondérant, c'est aussi un domaine de choix pour le génie de la réaction chimique, qui permet d'optimiser les sélectivités, pour des méthodes de séparation très spécifiques et pour la conduite optimale et automatisée des opérations, appuyée sur des modèles mathématiques bien adaptés.

Nous avons signalé, ci-dessus, comment le génie des procédés chimiques, en particulier, avait conduit à enrichir l'analyse des systèmes et les méthodes de modélisation. Il serait injuste de dire que les mécaniciens et les thermiciens ont attendu que se dégagent progressivement les concepts du génie des procédés pour apporter leur concours à la mise en œuvre des procédés de transformation. Bien au contraire, nous avons vu que certains pays avaient développé leur industrie de cette manière. Mais, il faut observer que l'approche de la mécanique et de la thermique est, par vocation, beaucoup plus analytique que celle du génie des procédés. Là où le thermicien analysera les profils de température et de vitesse dans la couche limite, l'ingénieur de procédés introduira une conductance de transfert globale. Là où le mécanicien des fluides étudiera les écoulements réactifs à l'aide des équations de Navier-Stokes et cherchera à « fermer » ses équations de turbulence, l'ingénieur de génie chimique parlera de distributions de temps de séjour, de ségrégation et de temps de micromélange. Partout, il s'efforcera d'utiliser des modèles « simplissimes », et de substituer à une vue analytique trop détaillée, souvent génératrice d'information inutile, une vue d'ensemble plus macroscopique.

V. L'enseignement du génie chimique dans une École d'ingénieurs française

par J. L. Houzelot et D. Schweich

L'enseignement du Génie chimique nécessite, de la part de l'étudiant, l'acquisition préalable de connaissances de base.

1. Les mathématiques

La formation reçue dans les classes préparatoires n'apporte pas tous les outils nécessaires au travail de l'ingénieur. Il faut la compléter par :

- des mathématiques classiques : algèbre linéaire, équations différentielles, transformations de Laplace et de Fourier...
- des éléments de statistiques : principales distributions, méthodes d'estimation et d'échantillonnage, analyse de variance, planification des expériences...
- des mathématiques appliquées : analyse numérique, méthodes d'optimisation, et surtout informatique, qui ne doit en aucun cas se limiter à l'apprentissage d'un langage, mais doit constituer un outil de mise en œuvre « expérimentale » de théories abstraites.

2. La thermodynamique

C'est la science fondamentale permettant d'aborder les problèmes énergétiques, les équilibres chimiques et les équilibres entre phases. Si l'enseignement doit reprendre les notions de base sur les 1^{er} et

Bien entendu, les deux approches sont complémentaires et non exclusives. Il ne convient pas d'y attacher d'échelle de valeurs, même si l'une a historiquement précédé l'autre. Le génie des procédés peut devenir la discipline où se réalise la synthèse des deux descriptions, l'étude analytique apportant une interprétation aux coefficients phénoménologiques des modèles systémiques, ceux-ci fournissant en retour une compréhension globale des comportements et des outils de prévision efficaces.

C'est pourquoi il faut, aujourd'hui, développer la recherche en Génie des procédés au carrefour des autres Sciences pour l'ingénieur, en s'appuyant sur le noyau dur historique du génie chimique dont on a vu l'évolution moderne. A cet égard, le nouveau découpage du Comité National de la Recherche Scientifique du CNRS, créant une Section de Génie des procédés et systèmes réactifs et de thermique, au sein du Département des sciences physiques pour l'ingénieur, apparaît comme une décision heureuse.

Quelle est la situation française en matière de formation ?

Les Écoles de Chimie traditionnelles dispensent pour la plupart, à côté d'un enseignement de chimie industrielle décrivant le principe des grands procédés, des notions de base de génie chimique, souvent limitées aux opérations unitaires les plus courantes.

Les Départements de mécanique des Universités, ainsi que les Écoles de Mécanique et les Grandes Écoles de généralistes, offrent, pour leur part, une formation largement axée sur l'approche analytique de la mécanique et de la thermique et, dans une moindre mesure, sur les opérations unitaires. L'approche systémique des procédés est souvent absente.

Enfin, quelques Écoles et Universités, encore peu nombreuses, ont cherché à développer à partir du génie chimique conçu dans son sens large, une formation où sont présentés des concepts de base qui, même s'ils sont actuellement orientés vers les procédés chimiques, préfigurent un enseignement plus général en Génie des procédés. Avant de formuler quelques propositions en ce sens, il est intéressant de présenter le point de vue de deux enseignants de l'ENSIC sur la manière dont ils conçoivent actuellement l'enseignement du génie chimique, puis de comparer la situation française à celle qui prévaut en République Fédérale d'Allemagne.

2^e principes, il doit surtout aboutir à la maîtrise des méthodes de calculs des équilibres de phases ou de systèmes en réaction chimique. Parallèlement, la thermodynamique énergétique et les machines à cycles thermodynamiques doivent être étudiées.

3. La cinétique chimique

L'étudiant doit posséder parfaitement les bases (définition d'une vitesse de réaction, techniques de mesure, modes d'activation) et acquérir des connaissances sur les mécanismes de réaction (processus élémentaires, réactions par stades en chaînes...), sur les réactions hétérogènes catalytiques ou non.

L'accent doit être mis sur la « cinétique formelle » au service de l'ingénieur en introduisant la notion de modèle cinétique phénoménologique simplifié, facilement utilisable pour le calcul des réacteurs lorsque les mécanismes réactionnels sont trop complexes.

4. La cinétique physique

Cette discipline complète la précédente en traitant des phénomènes de transport (matière, chaleur, quantité de mouvement).

L'étudiant doit bien comprendre les notions de transport par diffusion et leurs lois (Fick, Fourier, Newton) parallèlement au

transport par convection essentiellement traité par la mécanique des fluides qui revêt le caractère de discipline à part entière (écoulements monophasiques, multiphasiques, en milieu poreux...). Pour compléter les résultats de la thermodynamique, il est important de mettre l'accent sur les mécanismes limitant le transfert de matière et de chaleur entre phases (couches limites, diffusion en milieu poreux, transfert de chaleur aux parois...). On doit aboutir ainsi aux concepts de critères adimensionnels, d'analogies et de corrélations indispensables au travail de l'ingénieur.

C'est à ce prix que l'enseignement du génie chimique proprement dit peut être abordé, et ce de deux manières :

La première consiste à passer en revue les opérations unitaires : c'est l'enseignement classique tel qu'il s'est développé lors de sa création en France dans les années cinquante. On y passe en revue les TECHNIQUES : distillation, extraction, séchage, absorption, filtration, fluidisation... A l'occasion de l'étude de ces opérations, on utilise les connaissances de base pour dégager des MÉTHODES d'étude (bilans, courbes d'équilibre, courbes opératoires...) qui présentent souvent une redondance d'une opération à l'autre. L'avantage de cette approche réside surtout dans les bonnes connaissances technologiques qui en résultent. Notons, toutefois, que le réacteur chimique, malgré son importance dans le procédé, s'insère mal dans cette présentation où la chimie est quelquefois oubliée.

La seconde manière consiste à exposer les concepts de base de la science des procédés de transformation de la matière. Il s'agit là d'un enseignement beaucoup plus moderne où apparaît la notion de procédé au sens large, avec des applications dépassant le cadre de la seule industrie chimique.

On insiste, cette fois, d'abord sur les MÉTHODES (approche systémique, bilans...) en prenant en compte les spécificités de la matière à traiter et l'objectif à atteindre afin de trouver la ou les TECHNIQUES à utiliser. On étudie ainsi les séparateurs simples, les séparateurs étagés avec ou sans recyclages, les réacteurs idéaux et leurs associations, les régimes de fonctionnement permanent ou transitoire, les échangeurs (de matière ou de chaleur), la régulation...

Il n'est donc plus question, ici, de spécialiser l'étudiant dans une opération unitaire mais de lui transmettre une méthodologie d'analyse d'un procédé quelconque dont le réacteur chimique fait naturellement partie. (Notons que le « calcul des réacteurs » est apparu dans cette seconde approche vers les années 1960).

Cette présentation a l'avantage d'offrir des méthodes d'étude générales applicables à de nombreux domaines, comme il a été

exposé ci-dessus : l'être vivant ou la cellule en tant que réacteur chimique complexe, la propagation de polluants dans une nappe phréatique à l'image de la chromatographie préparative... C'est aussi l'approche autorisant l'invention de TECHNIQUES NOUVELLES.

Il va de soi que la bonne formation d'un ingénieur en génie chimique résulte d'un dosage judicieux entre ces deux méthodes d'enseignement qui ne s'excluent pas et doivent être complétées par de nombreuses séances d'application.

Les travaux pratiques, d'abord, qui ont plusieurs objectifs :

- sensibiliser l'étudiant à la réalité expérimentale, à l'acquisition des données et lui apprendre à « boucler » un bilan;
- lui inculquer un sens critique face à l'expérience; alors qu'il a parfois tendance à décrier que « l'expérience ne vérifie pas la théorie », il faut, au contraire, lui montrer comment celle-ci peut le guider dans l'interprétation de ses résultats.

Pour cet enseignement, deux types d'installations sont possibles :

- des montages à l'échelle du « pilote » (appareils de 50 à 100 litres), afin de confronter l'étudiant à du matériel proche de la réalité industrielle.
- des installations de « paillasse » (taille des appareils de 50 cm³ à 1 litre), en particulier lorsque l'utilisation de certains produits pose des problèmes de sécurité ou de coût d'exploitation, les principes de base du fonctionnement restant néanmoins inchangés.

Les travaux pratiques ont également pour but de familiariser l'étudiant avec la technologie industrielle et avec l'instrumentation.

Un autre type de formation pratique est le « projet ». Cette forme d'enseignement, génératrice d'une grande motivation, est certainement celle qui est la plus prisée par les étudiants qui y consacrent le maximum de leurs efforts. En premier lieu, elle les forme aux techniques d'accès à l'information (bibliothèques, banques de données), puis elle leur apprend à concevoir des schémas de circulation et à établir les bilans correspondants (en particulier avec recyclages). Enfin, elle leur permet de faire la synthèse de leurs connaissances scolaires, sans oublier l'évaluation économique finale.

L'enseignement du Génie chimique ne serait pas complet sans une formation par la recherche.

Un travail de recherche personnelle (6 semaines environ dans un Laboratoire) vise à confronter l'étudiant à des problèmes dont la solution n'est pas dans les livres. Il s'agit donc de développer en lui l'esprit d'initiative, l'esprit critique envers des interprétations théoriques posées *a priori* et la capacité à mettre au point des expériences pour en tirer un maximum d'informations sur un problème scientifique d'actualité.

VI. Les tendances actuelles de l'enseignement et du développement du Génie chimique en France et en République Fédérale d'Allemagne

par R. David, (ancien responsable du Bureau scientifique du CNRS à Bonn)

Il est intéressant de comparer les conceptions du Génie chimique entre la France et la R.F.A. : les deux pays ont sensiblement la même taille, et sont soumis à des contraintes économiques similaires. Pourtant, le développement de l'industrie chimique et des laboratoires allemands ne peuvent manquer de laisser les Français rêveurs même si la France peut se targuer de succès notoires dans le domaine de la pétrochimie.

Nous détaillerons successivement cette comparaison pour trois problèmes qui nous semblent cruciaux :

- la formation des ingénieurs;
- le transfert de connaissances entre les divers partenaires scientifiques et technologiques;
- les tendances de la recherche en génie chimique.

1. Formation des ingénieurs de génie chimique

En R.F.A., les Grandes Écoles n'existent pas. Pour devenir diplômé de l'enseignement supérieur et plus spécialement ingénieur il faut suivre la filière : Université ou Université technique. On y accède généralement après avoir obtenu le baccalauréat (Abitur) qui est délivré après la 13^e année de scolarité (4 ans d'études primaires et 9 ans d'études secondaires).

Les Universités forment, en 9 semestres, des ingénieurs du niveau des Grandes Écoles françaises : 4 semestres servent à acquérir une formation de base sanctionnée par le Vordiplom; les 4 semestres suivants sont consacrés à des enseignements plus spécialisés et le dernier semestre sert à la préparation d'un projet de recherche appelé Diplomarbeit.

Les ingénieurs de génie chimique, en R.F.A., sont, dans les faits, formés de deux façons :

- par des filières de « Technische Chemie » (qu'on peut traduire par chimie industrielle) des Universités. Ils ont alors le titre de « Diplom-chemiker », et exercent des fonctions d'ingénieur sans en avoir le titre; la plupart des diplômés de ce titre passent leur doctorat;
- par les filières de « Chemie Ingenieurwesen » ou « Verfahrenstechnik » qui existent dans les universités suivantes : T. H. Aachen, T. U. Berlin, U. Dortmund, T. U. Clausthal, G. H. Duisbourg (Gesamthochschule), U. Erlangen, G. H. Essen, T. U. Karlsruhe, U. Regensburg, U. Stuttgart, T. U. Munich, U. Hanovre, T. U. Braunschweig.

Les deux filières diffèrent par le poids donné aux différentes matières enseignées dans les 4 semestres de spécialisation, comme on peut le remarquer sur le tableau suivant (chiffres de l'Université technique de Berlin).

	Filière Technische Chemie	Filière Ingenieurwissenschaften
Physique et ingénierie (résistance des matériaux, transport de matière, de chaleur et de quantité de mouvement, séparation, génie de la réaction chimique, thermodynamique, automatisme, construction d'installation).....	17 %	56 %
Chimie (minérale, organique, générale, physique, industrielle)	83 %	44 %

Au total, la R.F.A. forme environ 500 ingénieurs de génie chimique et 1 500 techniciens supérieurs dans les Fachhochschulen (trois à quatre ans d'études après le baccalauréat) par an.

L'utilité des formations en génie chimique varie selon la taille de l'entreprise selon le schéma de la figure 1, dû au Professeur Schugerl de l'Université de Hanovre.

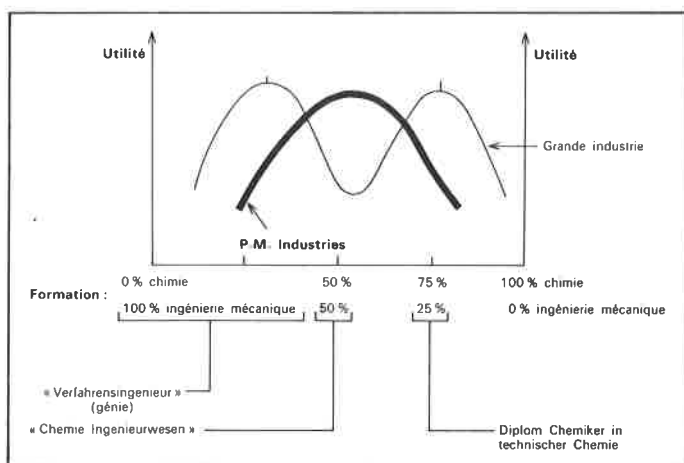


Figure 1.

L'ensemble des industriels allemands semble d'accord sur le principe d'un enseignement concret fondé sur l'importance des travaux pratiques, sans trop de spécialisation, mais avec de bonnes connaissances fondamentales.

Ce phénomène est particulièrement net dans le cas des biotechnologies. Il n'existe, en effet, actuellement pas en R.F.A. de diplôme

spécifique dans ce secteur, à l'exception de l'Université Technique de Berlin, où il s'agit d'un ancien diplôme de brasserie élargi à l'ensemble des fermentations.

La formation se fait donc principalement au niveau de la thèse dans une dizaine de centres d'excellence (15 thèses par an au total) ainsi que par des stages de formation permanente.

Une demi-douzaine d'Universités techniques envisagent la création d'une filière biotechnologie en délivrant un complément d'enseignement adapté à la formation initiale des étudiants selon le schéma de la figure 2.

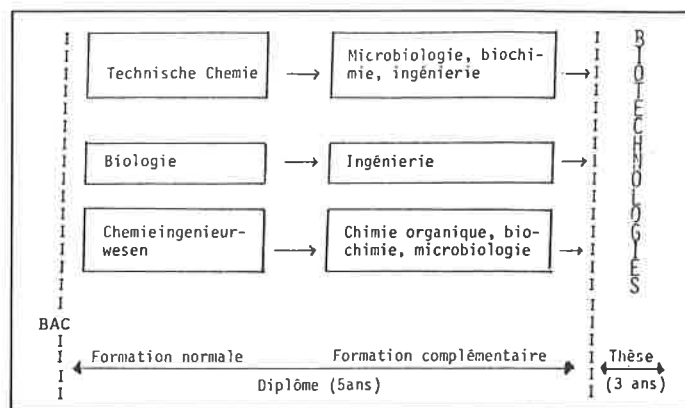


Figure 2.

En aucun cas, un cursus spécifique complet de biotechnologie n'est envisagé. L'assimilation de la notion de génie biochimique en tant que science unitaire se fait au niveau de la thèse, par le même processus que pour le génie chimique à partir des deux formations différentes (Technische Chemie et Chemieingenieurwesen) suivies jusqu'au diplôme.

Cette position est à rapprocher de la prudence générale qu'on peut noter en France sur la création de diplômes d'ingénieurs biotechnologiques et qui se fonde sur un argumentaire fort semblable.

Les situations française et allemande diffèrent, en revanche, sensiblement par le potentiel de recherche et d'enseignement en génie chimique. Le nombre d'ingénieurs sortant de nos grandes écoles est environ de moitié inférieur à ce que produisent les Universités allemandes dans cette discipline. La France ne dispose actuellement, dans ce domaine, que de quelques centres d'excellence (Nancy, Toulouse, Paris, Compiègne) alors que la R.F.A. compte une trentaine de laboratoires universitaires de génie chimique (Technische Chemie ou Chemische Verfahrenstechnik) dont une dizaine sont au niveau international.

Or, pour que chaque région économique puisse disposer d'une infrastructure scientifique satisfaisante, il faudrait atteindre le chiffre d'une dizaine de laboratoires de niveau international; faute de quoi les P.M.E. ne trouveront pas le soutien en cadres et en idées dont elles ont besoin lorsqu'elles voudront se lancer dans des actions de recherche et développement et risquent de se cantonner dans des opérations chimiques ou biochimiques présentant peu de caractère innovatif. Ces sociétés ont besoin d'ingénieurs ayant de bonnes connaissances fondamentales en génie chimique et pouvant se spécialiser localement dans un domaine de pointe particulier, éventuellement grâce à un doctorat.

Pour les entreprises de tailles nationale et internationale, le problème de formation est différent dans la mesure où elles peuvent assurer la formation spécialisée de leurs cadres par elles-mêmes. Mais ce repli sur soi, même s'il peut être justifié par des raisons de secret, est néfaste à la longue dans la mesure où une entreprise ne peut développer son potentiel qu'en acquérant de l'information dont on sait que les hommes sont le plus sûr vecteur. Pour pouvoir

bénéficier de cette mobilité, il leur faut disposer à la fois d'une réserve et d'un flux d'ingénieurs pouvant maîtriser une large gamme de problèmes et acquérir une expérience internationale, par la recherche si nécessaire. Trop peu d'ingénieurs signifie que ceux-ci seront utilisés comme « dépanneurs » des problèmes en cours et non pas comme créateurs.

2. Le transfert des connaissances entre les différents partenaires scientifiques et technologiques

Les structures de transfert horizontal des connaissances entre les divers partenaires des secteurs public et privé intéressés aux mêmes sujets sont indispensables au fonctionnement harmonieux de l'économie et de la recherche.

Deux réalisations allemandes, la Société des Ingénieurs Allemands (VDI) et l'Association pour la recherche industrielle (AIF) et sa composante en génie chimique, la DECHEMA, sont deux exemples particulièrement intéressants.

Créée il y a 125 ans, la Société des Ingénieurs Allemands (VDI) regroupe 75 000 ingénieurs allemands. Elle s'est fixée deux buts :

- conseiller les Pouvoirs publics, les entreprises, et les collectivités locales du progrès sur les problèmes d'ordre technique;
- promouvoir l'image de marque de l'ingénieur dans le cadre du progrès social et technique.

Sa structure est très régionalisée puisqu'elle est divisée en 38 sociétés régionales qui comptent 300 groupes de réflexion.

L'administration du VDI regroupe 15 divisions sectorielles, une division de formation permanente des ingénieurs (2 500 cours par an), un groupe de réflexion sur le rôle de l'ingénieur dans la société dont les études font autorité en R.F.A. L'une de ces divisions, VDI-GVC, est consacrée au génie chimique.

A l'intérieur des divisions sectorielles des commissions permanentes (une trentaine en génie chimique) travaillent sur des sujets scientifiques précis. Composés à parts égales d'ingénieurs de l'industrie et d'enseignants et de chercheurs du secteur public, elles assurent un excellent transfert de connaissances entre recherche et industrie grâce aux contacts personnels noués lors des colloques scientifiques organisés par les commissions et les publications qu'elles éditent.

Fondée en 1954, l'association AIF constitue un intermédiaire entre le Ministère fédéral de l'Economie (BMW) et les entreprises pour l'attribution des aides publiques à la recherche collective, à la recherche externe sur contrat, et au personnel de Recherche et Développement des petites et moyennes entreprises.

L'AIF regroupe 87 associations professionnelles de différents secteurs de l'économie, soit 20 000 entreprises de toutes tailles.

Ces associations proposent à l'AIF des projets de recherche collective dans leur secteur. Après examen par des comités d'experts, les projets sont subventionnés jusqu'à 50 % de leur montant par le Ministère fédéral de l'Economie. En 1980, 80 millions de DM (200 millions de FF) environ de crédits publics, auxquels sont venus s'ajouter 230 millions de DM apportés par les sociétés industrielles constituant les associations, ont ainsi bénéficié aux laboratoires publics ou collectifs qui exécutent la recherche collective ainsi commanditée. Les résultats de recherche doivent être rendus publics à l'achèvement de celle-ci.

Plus qu'une organisation de recherche, les entreprises concernées voient dans l'AIF une source de formation de jeunes chercheurs et de renforcement du potentiel scientifique des petites et moyennes entreprises qui profitent ainsi mieux du transfert des connaissances. Les grandes entreprises ne voient pas ce renforcement d'un mauvais œil, car il contribue à faire de ces PME des entreprises clientes pour des produits plus élaborés.

L'AIF répartit également :

- l'aide publique aux frais de personnel de R. et D. des PME, qui s'est traduite, en 1980, par une aide totale annuelle de 400 millions de DM à 3 000 entreprises;
- les aides à la recherche sur contrat externe, qui ont représenté 10 millions de DM environ en 1980.

On remarquera que l'AIF joue, dans une certaine mesure, le même rôle que l'ANVAR en France, et que si une telle procédure était envisagée dans notre pays, il serait intéressant de lui en confier la gestion.

La plus importante des 87 associations est la DECHEMA à Francfort, dont la spécialité est le génie chimique. Elle comprend 2 700 membres (personnes physiques ou sociétés). C'est à la fois :

1. Un centre de formation continue des chercheurs ingénieurs et techniciens du secteur public et privé : 500 personnes fréquentent annuellement les cycles de perfectionnement de la DECHEMA;
2. Un ensemble de quatorze commissions, comprenant 800 experts, chargées de sélectionner les projets à présenter à l'AIF, ou de conseiller les Pouvoirs publics sur des sujets technologiques relevant du génie chimique;
3. Un centre de recherche collective qui exécute une partie des recherches agréées par l'AIF ou subventionnées directement par des ministères fédéraux ou des entreprises : ce centre comprend 8 enseignants universitaires qui y effectuent leur recherche et 60 chercheurs et techniciens;
4. Un centre d'édition de livres et revues scientifiques reconnu au niveau international.

La DECHEMA assure la représentation du milieu scientifique allemand au sein des Fédérations internationales de Génie chimique de Corrosion et de Génie Biologique.

Le budget annuel de la DECHEMA s'est élevé à 13 millions de DM en 1980. Les rentrées sont constituées par les cotisations versées par les entreprises, les subventions de l'AIF et des ministères, les cycles de perfectionnement, et les revenus de l'exposition ACHEMA, la plus importante exposition mondiale en matière d'ingénierie chimique (153 000 visiteurs et 2 300 exposants en 1979) qui se tient à Francfort tous les trois ans.

Il est très souhaitable que, sur le plan français, un partenaire unique, jouant le même rôle et disposant de moyens équivalents, puisse aider la recherche française en ce qui concerne le transfert des connaissances, l'existence d'une recherche collective, la possibilité de mettre en œuvre des équipements lourds. Au plan international, l'organisme ainsi constitué serait plus à même de jouer un rôle analogue à celui de ses homologues allemands *.

Ces deux organismes (VDI-GVC et DECHEMA) catalysent les bonnes relations entreprises-recherche universitaire dans le secteur du Génie chimique en R.F.A.

Comme les Universités fournissent la quasi-totalité des cadres de la chimie allemande, ceux-ci sont formés par la recherche au niveau du diplôme ou du doctorat, ce qui permet aux enseignants de porter un jugement plus sûr sur leur capacités scientifiques et de les orienter correctement. Ajoutée à une mobilité inter-entreprises très faible (1 à 2 %), cette situation aboutit à des contacts bilatéraux et à une véritable filière Université-entreprise.

En retour, les industriels s'intéressent à la formation de leurs futurs cadres. Ils s'emploient donc à créer les meilleures conditions de formation et de recherche dans les Universités. L'aide aux laboratoires universitaires prend diverses formes :

* NDLR : En France, c'est la Société de Chimie Industrielle qui assume le secrétariat des Fédérations Européennes de Génie Chimique, de Corrosion et de Génie Biologique pour les pays latins. Les I.S.F. jouent, dans la Communauté scientifique et technique française, un rôle analogue à celui du VDI.

- la recherche collective dans le cadre de l'AIF;
- par les colloques du VDI, dont nous avons parlé plus haut;
- l'attribution de bourses de doctorat (le Fonds der Chemischen Industrie, émanation de l'organisation patronale de la chimie allemande, en a attribué 4 800 en 30 ans);
- les contrats directs de recherche;
- les aides à la brevetabilité des résultats : le bénéfice de l'invention reste généralement au nom du laboratoire inventeur;
- des invitations de professeurs dans l'industrie pour des séjours de 1 à 2 mois;
- l'organisation de séminaires d'été (BASF) pour les étudiants;
- l'autorisation d'enseigner dans les Universités pour les chefs des départements de R. et D. des entreprises (ils sont 25 chez Hoechst dans ce cas). Il y a même chez Hoechst une possibilité d'année sabbatique pour les cadres de R. et D.

Si tous ces faits peuvent nous inspirer, il serait également dommageable de négliger le rayonnement que pourrait connaître la science française si les aides aux pays en voie de développement (PVD), les échanges de chercheurs de tous niveaux avec les PVD et les pays industrialisés étaient repensés dans le sens d'une plus grande cohérence, d'une simplification et d'une unification des mécanismes. Ce rayonnement est en effet la clef des marchés futurs que pourront soucrire les cadres de ces pays une fois rentrés chez eux. Il est aussi la source de l'influence que peuvent exercer la science et la langue française dans le monde.

Un accueil convenable et un salaire décent pour les étrangers, l'image d'un dynamisme scientifique et technologique et de la réussite d'un décloisonnement entre recherche publique et industries sont autant d'investissements raisonnables dans notre avenir.

3. Grandes tendances dans la recherche en génie chimique des deux côtés du Rhin

Une des premières différences à noter est d'ordre historique et psychologique. La Recherche et le Développement ont toujours joui d'une considération essentielle dans l'opinion publique et dans les entreprises allemandes. Persuadés que le salut des pays industrialisés se trouve dans une fuite technologique en avant vers des produits et des procédés toujours plus élaborés, les Allemands pensent que les centres de recherche publics et privés sont la source de leur bien-être de demain. Parallèlement, les chercheurs et scientifiques jouissent d'un grand prestige au sein des firmes et ceci se traduit par leur participation massive aux organes supérieurs de décision : par exemple les conseils d'administration de Hoechst, Bayer et BASF sont composés à 80 % de scientifiques dont 50 % ont préparé une thèse.

Cette situation ne présente pas que des avantages pour les scientifiques : les citoyens allemands estiment qu'ils sont en droit d'exiger de leurs chercheurs une production scientifique de haut niveau et bien adaptée aux possibilités du pays et une information claire sur leurs activités.

Il semble qu'en France on vienne, mais avec retard, à des conceptions similaires.

Un deuxième caractère est l'idée que la maîtrise de la technologie est une des clefs du succès de l'industrie allemande, et en particulier de la chimie, car s'il est certes important de produire et de vendre des biens, il l'est encore plus de maîtriser les outils de production, lesquels demandent pour être développés un potentiel de matière grise qui est l'apanage des pays industrialisés.

Le cas de la valorisation du charbon constitue une illustration typique de cette idée. Les procédés chimiques de gazéification et de liquéfaction du charbon sont relativement bien au point en R.F.A., mais n'offrent pas actuellement de garanties de rentabilité

suffisantes. En revanche, ils peuvent être vendus à des pays où le charbon est extrait à faible coût. De plus, les procédés de réaction et de séparation mis au point (filtration des gaz chauds, séparation flash sous vide des hydrocarbures lourds et légers, lits fluidisés, tombants ou transportés, etc.) peuvent aisément être adaptés à d'autres opérations chimiques ou pétrochimiques.

S'agissant de tendances des sciences du génie chimique, trois faits saillants communs aux deux pays méritent d'être relevés :

- les économies d'énergie, facteur essentiel de compétitivité, vont conduire à analyser les processus complexes à une échelle de plus en plus fine afin de les mieux maîtriser au moyen d'une modélisation collant de plus en plus à la microréalité physique, au lieu de se contenter de description semi-empiriques ou en « boîte noire »;
- les progrès de l'informatique et surtout sa miniaturisation vont conduire au même résultat en pilotant les installations et les éléments d'installation de façon de plus en plus poussée et hiérarchisée. Ceci entraîne la nécessité d'une meilleure connaissance des fonctionnements en régime transitoire des procédés chimiques et des opérations physiques de mélange et séparation qui les accompagnent;
- les progrès des biotechnologies vont conduire à une part croissante des processus biologiques (enzymes, micro-organismes, levures) dans les synthèses chimiques, en particulier en chimie fine. Leur mise en œuvre, si elle est soigneusement contrôlée, doit permettre de résoudre, en même temps, beaucoup de problèmes d'environnement.

Une quatrième évolution semble plus rapide en France : il s'agit de la propagation des méthodes de génie chimique à d'autres domaines que la chimie comme nous l'avons noté au début. En effet, le système de recherche public allemand, en particulier le système universitaire, un peu figé, ne prédispose pas à l'interdisciplinarité.

Au contraire, le système allemand est plus favorable à la mobilité universitaire que le système français : des incitations au niveau des rémunérations permettent aux professeurs de gravir les différents échelons de leur carrière par le changement d'Université. Ceci est compensé par l'existence du C.N.R.S. qui apporte aux laboratoires français un corps de chercheurs permanents, relativement mobile, qui fait défaut aux instituts allemands où seuls les cadres universitaires supérieurs sont permanents. Enfin, un scientifique français se rendant dans un laboratoire allemand ne peut manquer d'être frappé par l'aisance financière qui y règne. Les 30 000 (équivalent temps plein) chercheurs et enseignants chercheurs universitaires d'outre-Rhin disposaient, en 1981, de 150 kF environ chacun pour leur recherche, hors salaire, équipements compris.

Un certain nombre de problèmes généraux ou spécifiques au génie chimique sont partagés par les scientifiques des deux pays. On peut citer :

- la taille des laboratoires de génie chimique : faut-il préférer les grandes unités de recherche (plus de 100 chercheurs) avec des équipements d'ensemble plus performants, ou restreindre les équipes pour leur donner une plus grande cohésion ?
- la limite des domaines de la recherche : faut-il, pour favoriser la collaboration avec l'industrie, monter des installations pilotes au sein des laboratoires ? Cela peut paraître une action de développement ne répondant pas à la mission de la recherche publique, mais c'est parfois un moyen unique pour travailler avec des petites et moyennes industries ou vérifier la justesse des extrapolations dans de bonnes conditions de mesure;
- l'information du public : les scientifiques de génie chimique ont à expliquer au grand public une action dans une discipline relativement peu spectaculaire et par conséquent ingrate au regard de son impact sur l'environnement et sur la vie quotidienne des citoyens.

VII. Conclusion : perspectives d'avenir

Au terme de cette analyse, le Génie des procédés apparaît clairement comme une nouvelle discipline scientifique concourant à la connaissance des systèmes industriels. Confronté très tôt à la complexité de l'acte chimique, le Génie chimique a su forger des méthodes d'approche unitaires qu'il faut maintenant étendre à tous les procédés de transformation de la matière. Le Génie des procédés est ainsi la discipline carrefour où peut se réaliser la synthèse entre l'approche systémique du Génie chimique et les descriptions analytiques de la mécanique et de la thermique, au plus grand bénéfice réciproque. C'est aussi le cadre naturel où peuvent se développer les nouveaux « génies » nés de la mise en œuvre industrielle de nouveaux processus de transformation = génies biochimique, biologique, agro-alimentaire, photochimique, électrochimique etc.

Paraphrasant Clémenceau, on peut dire en effet que ce sont là des affaires trop sérieuses pour être laissées aux seuls spécialistes des processus élémentaires concernés.

A cet égard, les perspectives d'avenir pour le développement du Génie des procédés sont largement ouvertes. A côté de l'utilisation de nouvelles sources d'énergie (électrique, photonique), tous les auteurs s'accordent à reconnaître l'importance future des procédés biologiques, qui rendra indispensable l'introduction de la microbiologie dans les cursus de formation de tous les ingénieurs, à côté des disciplines traditionnelles (1, 5). Le génie des séparations, les milieux polyphasiques ou fortement non idéaux, l'utilisation de conditions extrêmes de pression et de température ou de milieux agressifs (6, 7) offrent également de nouveaux champs à explorer. On peut ajouter, sans craindre de se tromper, que le développement de la micro-électronique et de l'informatique va conduire à la maîtrise des régimes transitoires et à une intégration des processus de commande aux niveaux les plus fondamentaux de la conception du procédé, ce qui nécessitera un effort accru pour imaginer de nouveaux capteurs d'information et pour développer encore les méthodes de modélisation (7). A côté de ces évolutions techniques, on peut prévoir une transformation profonde des relations entre les laboratoires universitaires et l'industrie. D'une part, le taux de renouvellement rapide des connaissances dans un secteur en pleine évolution nécessitera des méthodes originales de formation et de transfert de savoir-faire. D'autre part, le contenu fortement innovatif de certaines recherches et l'importance de leurs retombées immédiates (notamment dans le domaine de la microbiologie) posera le problème d'un transfert rapide et d'une protection équitable de la propriété intellectuelle et commerciale : un problème difficile où il faudra faire preuve d'imagination compte tenu des constantes de temps très différentes qui caractérisent le fonctionnement des systèmes universitaire et industriel.

Comme nous l'avons en effet souligné, le Génie des procédés se trouve au cœur d'un secteur clé de l'activité économique. D'un côté, les pays industriellement développés se livrent une âpre concurrence dans le domaine des grandes productions de base de sorte que toute amélioration, fût-ce de quelques points, dans un rendement ou un prix de revient peut suffire pour rendre un procédé compétitif. D'un autre côté, les technologies de pointe ne parviendront à s'imposer qu'en s'appuyant sur des méthodes efficaces de développement et d'optimisation permettant parfois de gagner les quelques mois décisifs dans la conquête d'un nouveau marché. Enfin, nous l'avons également signalé, toute vente de procédés dans les pays en voie de développement implique l'existence d'un tissu d'entreprises capables d'assurer le suivi

technologique et la fourniture d'appareillages sans lesquels le procédé le plus solide ne parviendra pas à s'imposer durablement.

C'est pourquoi le Génie des procédés doit être impérativement développé dans notre pays sur le triple plan de la recherche, de la formation initiale et continue, et de la pratique industrielle.

Il faut pour cela que les Pouvoirs publics, à côté des actions finalisées sur des filières, des produits ou des branches industrielles particulières mettent en œuvre une grande politique « horizontale » de développement de la méthodologie générale des procédés industriels de transformation :

- reconnaissance officielle du Génie des procédés comme une discipline scientifique autonome, notamment dans les cursus de formation, à l'image de ce qui a été fait au CNRS;
- mise en place, au Ministère de l'industrie et de la recherche, d'une structure chargée d'initier et de suivre des actions « horizontales » de recherche et de développement dégagées de toute référence à un « métier » particulier (exemple : amélioration des procédés de distillation, des réacteurs catalytiques, de la filtration en lit épais, des séparations sur membranes etc.) mais allant jusqu'à la construction des appareils;
- renforcement des laboratoires disposant déjà d'un potentiel de compétence dans le domaine de Génie des procédés. C'est autour de ces noyaux durs que pourra se constituer progressivement une masse critique suffisante, capable d'essaimer ensuite dans de nouveaux centres. Vu l'état de sous-développement du Génie des procédés en France, il est en effet à craindre qu'une politique de saupoudrage ou de création ex-nihilo là où n'existe pas une compétence suffisante ne conduise à des résultats décevants. En revanche, l'octroi de moyens supplémentaires aux laboratoires existants devrait s'accompagner d'un engagement de leur part à constituer des foyers de développement du Génie des procédés dont les missions seraient à la fois la recherche de base, la formation des cadres de l'industrie, la reconversion de chercheurs d'autres disciplines, le montage d'opérations pilotes servant de vitrine de démonstration pour l'industrie, et la mise en place d'équipes de « conseils » chargés d'appliquer les méthodes scientifiques sur le terrain à la demande de l'industrie.

Le discours officiel considère à juste titre le rétablissement de l'équilibre des échanges extérieurs comme une priorité nationale.

Est-ce un hasard si les pays industriels qui ont le mieux réussi dans ce domaine sont aussi ceux où le Génie des procédés est le plus fortement développé ?

Bibliographie

- (1) Astarita G. Past, « Present and Future of Chemical Engineering », *Chem. Eng. Fundamentals*, 1982, 1, 3.
- (2) Guedon G., *Adv. Chem. Serv.*, 1980, 190, 45.
- (3) De Rosnay J., « Le Macroscopie », Ed. du Seuil (1975).
- (4) Le Goff P. « Énergétique industrielle ». 3 vol.; Technique et Documentation (1979-1982).
- (5) Michaëls A.S., « Frontiers of Chemical Engineering »; *Chem. Eng. Comm.*, 1982, 17, 99.
- (6) Villiermaux J. et Le Goff P., « Quelles recherches fondamentales en génie chimique ? », *L'actualité chimique*, 1978, 1, 24.
- (7) Villiermaux J., « Perspectives pour la recherche en génie chimique. La politique française », *Entropie*, 1980, 94, 8.