

Le génie pour les produits

Un génie des procédés pour l'élaboration de meilleurs produits : perspectives et enjeux

Éric Favre et Jacques Bousquet

Résumé Une tendance marquée des industries chimiques, et plus largement des industries de procédés, consiste à élaborer de plus en plus fréquemment des produits formulés complexes et de nature hétérogène. Cet état de fait amène à reconsidérer la place et le rôle que peut jouer le génie des procédés dans l'élaboration d'un produit formulé donné. Cet article tente de faire le point sur les enjeux et perspectives relatifs à cette problématique, en délimitant dans un premier temps différents niveaux d'approche dans l'élaboration d'un produit formulé. Une attention particulière est alors portée à l'articulation à donner aux aspects relatifs aux matières premières entrant dans le produit (conditionnant pour une large part l'état de la matière à traiter : systèmes solides, dispersions fluides, solides mous) avec les technologies de mise en œuvre. Le terme « génie pour les produits » est proposé pour dénommer cette discipline naissante et une première tentative d'identification des principaux défis et enjeux qu'elle présente est développée.

Mots-clés Produits, génie des procédés, formulation, spécialités chimiques.

Abstract **Engineering for products: perspectives and challenges of chemical engineering for product design** Chemical process industries are more and more concerned by the production of complex and heterogeneous products in place of a single molecule. This matter of fact calls for a re-examination of the potential role of chemical engineering, in close association with physical-chemistry and chemistry considerations, in order to develop and produce a given formulated product. This work tentatively offers an overview of the various approaches which can be proposed for a product design problem. Attention is focussed on the key relationship which has to be set up between the type of molecules (ingredients) involved in a given product, and the corresponding technological processes. It is suggested to call this still emerging discipline « product engineering » and a series of its future prospects and targets are tentatively listed.

Keywords Products, chemical engineering, formulation, specialties.



Le génie des produits au XVI^e siècle. Production d'alun pour la teinture textile (d'après G. Agricola [35]).

méthodologie spécifique s'appuyant elle-même sur des disciplines plus fondamentales (mathématiques, informatique, physique, chimie, mécanique, sciences de la vie...).

L'évolution récente du génie des procédés

A l'instar des autres sciences de l'ingénieur, le génie chimique (« *chemical engineering* », devenu génie des procédés chez nous depuis vingt ans), créé à la fin du XIX^e siècle, puis largement diffusé à partir des années 50 avec l'essor de l'industrie pétrolière et pétrochimique, doit faire face à un dilemme permanent :

- rester à l'écoute des problèmes et des besoins de l'industrie,
- développer simultanément ses outils propres (communément appelés *paradigmes*) en appliquant une

Les difficultés liées au maintien de cet équilibre subtil font régulièrement l'objet de controverses entre les partisans d'une approche plus rigoureuse [1-2] (au risque d'empiéter trop sur les disciplines relevant des sciences pures) et ceux qui souhaitent se limiter à la stricte résolution des problèmes industriels [3-4] (au risque de mettre en péril le caractère scientifique de la discipline). Sans entrer dans ce débat de fond, force est de constater que le génie des procédés a été et reste indubitablement appelé à évoluer, en réponse à une série de facteurs propres à chacun de ces deux pôles que nous qualifierons d'*interne* pour le premier (problématique scientifique) et d'*externe* pour le second (problématique industrielle et sociétale).

Pour ce qui est des facteurs *internes*, une série de pistes a été proposée récemment par divers auteurs pour apporter un certain renouveau à la discipline (voire pour aboutir au troisième paradigme que différents auteurs appellent de leurs vœux depuis plusieurs années [5]) :

- En termes d'*objet*, les recommandations du rapport Amundson [6], datant de près de 20 ans, restent pour l'essentiel d'actualité. Les enjeux sociétaux mis à part (environnement, énergie, santé), on peut les résumer schématiquement au fait d'étendre les frontières de la discipline vers des systèmes fortement non idéaux et/ou complexes (polymères, systèmes dispersés fluides, suspensions et dispersions concentrées, solides...), mettant en jeu des processus

aux interfaces et opérant souvent en régime transitoire (procédés discontinus).

- En terme de *méthode*, les limites de l'approche systémique, que l'on peut globalement caractériser par les mots-clés : opérations unitaires, bilans de matière et d'énergie, thermodynamique des gaz et liquides, privilégiant les comportements plutôt que les structures, ont conduit à une certaine forme de remise en cause. Partant de ce constat, certains auteurs préconisent un retour en force des notions structurelles et interfaciales dans la démarche du génie des procédés [7].

- Sur un autre plan, les difficultés de prise en compte, voire de réconciliation, des différents *niveaux d'échelle* compatibles avec la démarche du génie des procédés (du niveau moléculaire à l'échelle macroscopique) continuent à alimenter un débat de fond sur l'éventuelle possibilité de réaliser théoriquement ce saut d'échelle [8-9], à l'instar des méthodes de renormalisation échafaudées par K. Wilson dans le domaine de la physique. Cet état de fait n'empêche cependant pas une appréhension souvent suffisante pour de nombreux problèmes, dès lors que l'échelle caractéristique des processus se déroulant dans un système est identifiée [10].

- D'une manière plus générale, il est utile de rappeler également la nécessité fréquemment invoquée pour les sciences d'être capable de prendre en compte la complexité, une *tendance vers la biologie* étant le nec plus ultra dans le domaine. Étudier ou s'inspirer des systèmes vivants est suggéré à cet égard par certains auteurs pour mettre à l'épreuve et/ou faire évoluer la démarche du génie des procédés.

- La compétition internationale et l'obligation de résultats ont conduit à une refonte complète du paysage industriel en termes de sociétés. Il est à noter que malgré les fusions à marche forcée, le positionnement des grands groupes chimiques a connu en dix ans une régression significative, par exemple en termes de classement en capitalisation boursière en particulier face aux nouvelles technologies [11], mais aussi face aux nouveaux majors de la pharmacie (souvent issus eux-mêmes de conglomérats chimiques), ou face aux groupes pétroliers (eux-mêmes restructurés récemment) qui restent maîtres de nombreuses matières premières et énergétiques.

- A ces suggestions et interrogations à dominante interne, il est nécessaire de mettre en regard des facteurs *externes* qui tiennent, pour la plupart, à une mutation progressive opérée par les industries de procédés depuis plus d'une vingtaine d'années :

- La compétition internationale et l'obligation de résultats ont conduit à une refonte complète du paysage industriel en termes de sociétés. Il est à noter que malgré les fusions à marche forcée, le positionnement des grands groupes chimiques a connu en dix ans une régression significative, par exemple en termes de classement en capitalisation boursière en particulier face aux nouvelles technologies [11], mais aussi face aux nouveaux majors de la pharmacie (souvent issus eux-mêmes de conglomérats chimiques), ou face aux groupes pétroliers (eux-mêmes restructurés récemment) qui restent maîtres de nombreuses matières premières et énergétiques.

- Au sein même des sociétés, l'organisation structurelle privilégie maintenant un positionnement au plus près du client, suivant en ce sens les recommandations des groupes d'experts des années 1970 (comme le célèbre *Boston Consulting Group*). Le concept de SBU (« *strategic business unit* ») représente un exemple emblématique de ce précepte. Au risque d'être caricatural, on pourrait résumer cette tendance forte par une mainmise croissante du marketing dans les choix stratégiques des sociétés.

- A la politique de rentabilité, basée sur des investissements lourds pour produire une molécule par un procédé continu pérenne optimisé à prix de revient minimal (dite *commodité*), s'est substituée une stratégie visant à proposer des produits développant des propriétés données avec un taux

Tableau I - Découpage schématique des principales caractéristiques des produits des industries chimiques en commodités et spécialités (adapté d'après [6, 12]).

	Commodités	Spécialités
Exemples	Produits de base (éthylène, ammoniac, chlore...) + Intermédiaires (urée, acide acétique, acrylonitrile...)	Pigments Agents de surface Insecticides Arômes Antioxydants
Nombre de molécules	~ 20 produits de base + 200 intermédiaires	Plus de 30 000
Produit	Inchangé sur le marché pendant des décennies	Rapidement remplacé
Compétition	Prix	Qualité et performances
Ratio chiffre d'affaires/investissement	0,5	2
Type de produit	Petites molécules	Tensioactifs, polymères, solides divisés
Procédés de production	Produit unique, tonnage élevé, production continue	Production discontinue, quantité modeste
Prix de vente	0,1 à 1 €/kg	2 à 500 €/kg

de renouvellement le plus rapide possible. Cette deuxième catégorie, plutôt caractéristique des produits dits de *spécialités*, fait souvent appel à des procédés discontinus pouvant offrir une rentabilité accrue en ayant recours à des ateliers de production polyvalents. Une classification prétendant recouvrir l'ensemble des produits des industries chimiques sur cette seule base dichotomique est certes critiquable et donne lieu à de nombreuses controverses, y compris sur l'utilisation même des deux termes¹ [12]. Une tentative de présentation des caractéristiques principales de ces deux grandes familles de produits est néanmoins proposée, à titre illustratif, dans le *tableau I*. Quoi qu'il en soit, les activités de type commodités représentent aujourd'hui moins de 45 % du chiffre d'affaires de l'ensemble des industries chimiques des pays industrialisés, alors que la part des produits de type spécialités ne cesse de croître [9].

- Même si l'élaboration de nouvelles molécules ou nouveaux isomères dans les laboratoires de recherche se poursuit à une vitesse vertigineuse, notamment pour des applications pharmaceutiques (*figure 1a*), le développement et la mise sur le marché d'une nouvelle molécule doit faire face à une série d'obstacles réglementaires présentant un coût croissant et pouvant occasionner un délai qui affecte la durée de protection effective par brevet [13]. Ces difficultés

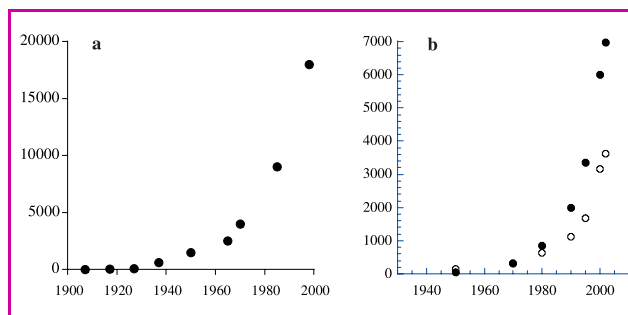


Figure 1 - a) Évolution (en milliers) du nombre de molécules connues depuis 1900 ; b) Nombre cumulé de citations dans la littérature scientifique (en milliers) faisant intervenir les concepts « *formulation and technology* » (●) et « *chemical engineering and product* » (○). (Source : Chemical Abstract Services).

Tableau II - Principaux secteurs d'application de la chimie de spécialités et des industries relevant de la formulation.

Adhésifs	Photographie
Produits phytosanitaires	Matériaux plastiques
Cosmétiques	Peintures, encres, vernis
Lubrifiants et huiles	Caoutchoucs
Produits alimentaires (arômes, texturants...)	Fibres textiles
Peintures et revêtements	Produits papetiers
Détergents et produits de nettoyage	Préparations pharmaceutiques
Traitement des métaux	Inhibiteurs de corrosion
Produits pétroliers (carburants, bitumes...)	Cuirs
Plâtres et ciments	Sécurité (ignifugeants, extincteurs)
Traitement de l'eau	

ont donc incité fortement les groupes chimiques à *améliorer des produits existants*, ou encore à jouer sur une *combinatoire de molécules parmi celles autorisées afin de répondre à un besoin* [14].

Les divers critères esquissés ci-dessus contribuent à délimiter, de manière plus ou moins marquée, le panorama d'une problématique récente (tout du moins dans son appellation) des industries chimiques et parachimiques. La notion de *produit au sens bien de consommation* (et non plus « simple » produit chimique) et celle de *propriété(s) d'usage* traduisant les attentes du client ou du consommateur sont au cœur de cette problématique. Ces deux caractéristiques trouvent tout leur sens dans le secteur des produits de spécialités, et surtout dans les nombreuses industries (non strictement chimiques) produisant des produits formulés à destination directe du consommateur (*tableau II*). Le terme de *formulation* ou encore de génie de la formulation est fréquemment employé en français pour couvrir ce champ disciplinaire [15], alors que les Allemands parlent plus volontiers de « *produktgestaltung* » (même si le vocable « *formulationstechnologie* » peut être cité occasionnellement [16]). La littérature anglo-saxonne utilise plus couramment la notion de génie des produits (« *product engineering* » [17-18]), pouvant être déclinée en « *chemical product engineering* » [19] ou « *chemical product design* » [20] lorsqu'elle s'applique à des objets chimiques ; l'emploi du terme « *formulation* » en anglais est quant-à-lui plutôt réservé au strict choix des ingrédients d'un produit donné.

Alors que la communauté des physico-chimistes a été sensibilisée très tôt à la notion de formulation², l'engouement pour le concept de produit en génie des procédés est plus récent mais spectaculaire, comme on peut en juger par l'évolution du nombre d'articles scientifiques associant ces deux termes (*figure 1b*). Avant d'entrer dans la problématique de la place et du rôle potentiel pouvant être joués par le génie des procédés dans ce domaine, il est indispensable de préciser les différentes facettes recouvrant ce vaste champ disciplinaire.

Formulation et/ou génie des procédés : où en est-on ?

La formulation a initialement été définie par l'Union des Industries Chimiques comme un « *art consistant à optimiser la fabrication d'un produit en utilisant différentes techniques de mélange à partir de produits chimiques de base et divers additifs permettant de satisfaire les exigences du client qui les utilisera* » [21]. Le caractère empirique recouvrant cette définition, et dans une moindre mesure la place pour le moins restreinte laissée aux procédés, ont conduit à une définition plus détaillée proposée récemment [22] : *la formu-*

lation recouvre l'ensemble des opérations nécessaires à la préparation d'un produit à « valeur d'usage » (médicament, cosmétique, détergent, peinture...) par mélangeage de matières premières synthétiques (minérales, organiques ou macromoléculaires) ou naturelles (huiles, cires hydrocolloïdes...). Elle concerne peu ou prou toutes les industries situées en aval de la chimie (carburants, plastiques, caoutchouc, ciments, céramiques...), mais ce terme est habituellement réservé à la « parachimie » et aux industries dites de « spécialités » (médicaments, phytosanitaires, cosmétiques, produits d'hygiène, détergents, peintures, encres, adhésifs, lubrifiants, bitumes...).

Cette définition, pour précise qu'elle soit, ne retire en rien le caractère *générique* qui se cache derrière le vocable de formulation, à l'instar de nombreux autres termes passés dans le langage courant comme matériaux, biotechnologie ou moyens de communication [23]. Un découpage simplifié en périmètres permet de distinguer différents niveaux d'actions englobés dans le terme formulation, représentés *figure 2*. Le produit en constitue bien évidemment le centre de gravité, sur lequel viennent se greffer :

i) en amont, les ingrédients (molécules ou spécialités chimiques préformulées entrant dans la composition du produit) ainsi que les technologies de mise en œuvre (procédés) nécessaires pour aboutir au produit formulé ;

ii) en aval, les propriétés du produit formulé. Une précision importante est à faire sur ce terme qui recouvre deux notions distinctes. D'une part, les caractéristiques physiques (mécaniques, optiques, thermiques, électriques...), chimiques et structurales du produit ; ces données sont le plus souvent quantifiables, accessibles expérimentalement et constituent la base d'interprétation des *relations structure/propriétés*, chères aux biologistes, et passées dans le langage des matériaux et des produits formulés. D'autre part, le terme de propriétés est aussi employé au sens de *fonctions d'usage* que doit avoir le produit lors de son utilisation, c'est-à-dire les qualités attendues par le consommateur ou le client. Ces dernières constituent les fonctions premières à satisfaire ; elles reposent sur des tests d'application très variables selon le secteur industriel concerné (par exemple la vitesse de dissolution d'un comprimé pharmaceutique, le temps de prise d'un mortier, la brillance d'une peinture, la tenue en bouche d'une crème glacée...). Il va sans dire que

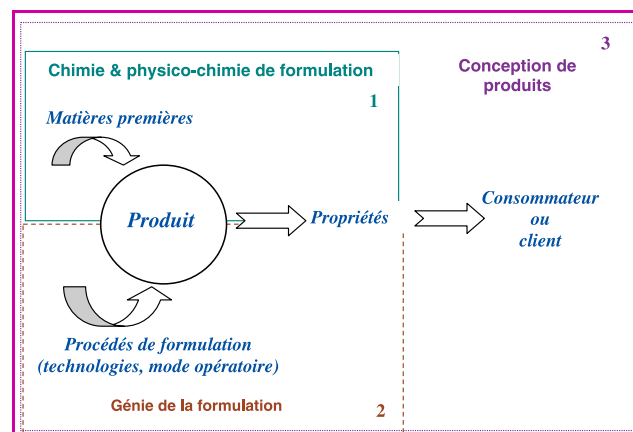


Figure 2 - Représentation schématique des approches au cœur des notions de formulation (1), génie de la formulation (2) et conception de produit (3).

l'établissement de relations explicites entre les propriétés physiques d'un produit formulé et ses fonctions d'usage constitue un défi scientifique de premier plan.

Les différentes approches de la formulation

La représentation largement simplifiée de ces questions apparaissant à la *figure 2* est critiquable ; elle permet cependant d'identifier différents angles d'approche de la problématique « produit formulé », constituant autant de champs disciplinaires.

La formulation au sens strict

Un premier périmètre se limite aux relations molécules-produits-propriétés, correspondant à la *formulation dans son sens le plus strict* (recherche de la formule, c'est-à-dire des ingrédients permettant de développer au mieux les fonctions visées). Terrain d'action favori du physico-chimiste, le rôle du procédé dans ce schéma est souvent oublié ou réduit au simple mélange des matières premières, comme évoqué dans les définitions données plus haut. Un gisement considérable de connaissances relatives à cet espace existe pour chaque secteur d'application, particulièrement dans l'industrie ou les centres techniques professionnels. Rationaliser ce savoir-faire, à caractère souvent empirique et qui continue à faire preuve d'une efficacité remarquable, représente un défi auquel se sont attaqués les chimistes et physico-chimistes depuis longtemps.

Le génie des produits

Une approche plus large consiste à intégrer le triptyque molécules-procédés-produit dans la problématique précédente, afin de donner toute la place qu'elles méritent aux technologies de mise en œuvre. En effet, celles-ci peuvent jouer, avec la formule, un rôle clé dans l'obtention de la structure du produit requise pour atteindre les fonctions d'usage recherchées. Cette analyse constitue un message véhiculé jusqu'à présent par quelques auteurs ou groupes de réflexion, avec comme argumentaire principal la nécessité d'aborder, dès les premiers stades de l'élaboration d'un produit, les considérations physico-chimiques en parallèle avec les contraintes de procédés. La pluridisciplinarité qui soutient cette combinaison d'approche est souvent citée comme essentielle à la réussite d'un développement [24]. Les industries alimentaires, pharmaceutiques ou parachimiques possèdent de loin la plus longue et riche expérience en conception de produits à bien d'usage, et cherchent le plus souvent à la mettre en œuvre, malgré les difficultés liées à la gestion d'équipes de projet pluridisciplinaires. La prise en compte de la dimension technologique et d'ingénierie ainsi proposée suggère une dénomination du type génie de la formulation fréquemment employé (*figure 1*), ou encore *génie (de l'élaboration) des produits* (« *product engineering* ») à ce deuxième pan d'activités.

La conception de produit (« *product design* »)

Un périmètre encore plus large que le précédent peut également être proposé, capable d'englober en aval les besoins et attentes du consommateur. Ce domaine fait intervenir des concepts à dominante économique, comme la création d'un besoin ou l'identification des attentes du marché, assorti des méthodes permettant d'échafauder rapidement un produit adéquat (sélection d'idées, stratégies d'innovation...). Cette action, qui s'inspire des méthodes développées en *conception de produit* (au sens large), peut

être appliquée aux objets chimiques ou tout autre mettant en jeu un processus physico-chimique [9, 20].

La « préformulation », une autre façon de faire du génie des procédés pour optimiser un produit

On peut à ce stade préciser une autre catégorie de génie des produits, concernant l'industrie chimique au premier chef, mais se distinguant de la définition de la formulation exposée précédemment. En effet, il ne faudrait surtout pas négliger un pan entier d'activités situé en amont de la *figure 2*, conduisant à la production de molécules ou de spécialités chimiques préformulées entrant dans la composition des produits formulés. Le rôle que joue ici l'industrie chimique, fournisseur de molécules pour la quasi-totalité des secteurs industriels, comporte deux différences notables par rapport à celui de la formulation telle qu'elle est entendue plus haut : d'une part, les produits concernés sont très souvent des molécules (produits purs) ne présentant pas le caractère de mélange hétérogène des produits formulés ; d'autre part, l'utilisateur n'est pas le plus souvent un consommateur mais un industriel. Toutefois, le schéma conceptuel présenté *figure 2* s'applique également à cette autre forme de génie des produits [25], parfois qualifiée de *préformulation*. De manière analogue au génie des produits formulés, une association étroite entre le chimiste de synthèse, le physico-chimiste et l'ingénieur procédé peut là aussi jouer un rôle capital, tant pour assurer le respect du cahier des charges du produit que pour stimuler l'innovation³. S'apparentant à la production chimique plus conventionnelle (synthèse et purification d'une molécule spécifique), la préformulation joue souvent un rôle considérable dans l'atteinte des fonctions d'usage ; les exemples montrant comment un produit chimique façonné pour un usage précis peut améliorer la qualité du produit final abondent. Un principe actif solide entrant dans la composition d'un comprimé pharmaceutique requerra par exemple une granulométrie, une morphologie, voire un état de surface particulier pour permettre la réalisation du comprimé par compaction en présence des excipients et agents de surface choisis pour la formule commerciale (*figure 3*). De la même manière, un polymère pourra être produit sous différents grades selon l'usage visé par son utilisation dans le produit final (épaississant, gélifiant, stabilisant) [13].

Il existe donc une source d'ambiguïté incontestable dès lors que le terme de « génie des produits » est employé, puisqu'il revêt tantôt le sens de préformulation proposé ici, tantôt le sens génie des produits formulés développé plus haut, et ce au gré des auteurs (*figure 3*). A l'instar de l'industrie pharmaceutique, il faut maintenir une articulation

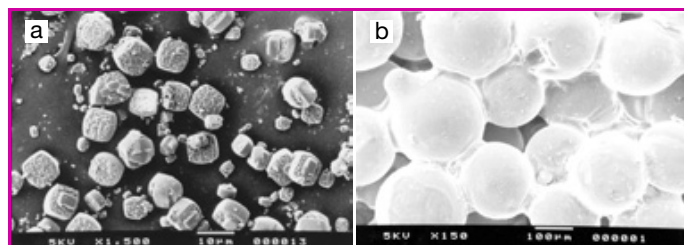


Figure 3 - Deux facettes du génie des produits au travers d'un exemple appliqué aux solides divisés.

a) Préformulation : exemple de principe actif (solide pur) obtenu par cristallisation et broyage ; b) produit formulé : exemple de comprimé (principe actif + liant + excipients) sous forme commercialisable.

Tableau III - Répartition des produits formulés en trois classes avec leurs caractéristiques.

	Système homogène	Système solide particulaire	Système dispersé fluide	Solides mous
Exemples de formes finales	Huiles, lubrifiants, carburants	Comprimé, granules, poudres	Émulsions, dispersions, mousses, latex, micelles	Pâtes, crèmes, gels
Phase continue	-	Solide	Liquide	Solide
Phase dispersée	-	Gaz	Liquide, solide ou gaz	Liquide ou gaz
Constituant clé		Interphases, surfaces solides de propriétés spécifiques	Tensioactif	Polymère

entre ces deux secteurs, à savoir la production d'une molécule seule (qualifiée de production primaire en industrie pharmaceutique) et son utilisation dans un produit formulé commercialisé (production secondaire). Les méthodes et contraintes peuvent différer significativement entre ces deux secteurs, et plus particulièrement les procédés mis en œuvre : la préformulation visant à produire une molécule dans une phase solide ou liquide homogène fait souvent appel à des opérations unitaires plus « classiques » (distillation, cristallisation, polymérisation), alors que les procédés de formulation au sens strict concernent invariablement l'élaboration de mélanges plus ou moins hétérogènes complexes faisant appel à des enchaînements d'opérations unitaires moins classiques et où la mécanique joue un rôle clé (tels que, par exemple, les opérations d'émulsification, de granulation, de gélification...).

Avant d'évoquer plus en détail la place et le rôle du génie des procédés dans le contexte de la formulation, il est indispensable d'évoquer dans un premier temps la composition des produits formulés.

Des produits formulés en tant qu'objets

Les critères liés à la nature chimique des molécules présentes, ou à leur fonction attendue (principe actif, solvant, épaississant, stabilisant, antioxydant...) conduisent à un nombre de classes à considérer trop élevé. Une vue plus synthétique peut être résumée au fait qu'un produit formulé contient en général 5 à 20 constituants différents, et que ceux-ci, hormis le milieu solvatant pour les produits fluides (phase aqueuse ou organique), peuvent être classés en quatre familles principales : petites molécules organiques, agents de surface et d'interphase, polymères, solides divisés.

Il est intéressant de noter, ne serait-ce que pour se convaincre du caractère général de cette observation, qu'un produit aussi banal que le sel de cuisine répond à ces critères [12].

En dehors de la stricte composition, la structure, ou plus exactement le type d'état de la matière à considérer, répond *grosso modo* à trois grands cas de figure, indiqués dans le *tableau III*. Cette classification arbitraire ne doit pas être prise trop à la lettre mais elle offre l'avantage d'une typologie mettant en exergue les cas de figure très différents, sur les plans mécanique et physico-chimique, que peut être amené à traiter un ingénieur procédé en génie des produits formulés. Schématiquement, elle délimite trois ensembles distincts :

i) Les systèmes solides particuliers, constitués principalement de solides divisés et dont la dimension caractéristique est typiquement comprise entre 0,1 μ m et 1 mm.

ii) Les formes fluides dispersées, présentant une hétérogénéité à des échelles de taille comprises entre

10 μ m et quelques nm (microémulsions). La place des agents de surface tient un rôle prépondérant dans ce type de structure, et les procédés qui leur sont associés comportent de manière quasi systématique un aspect relevant de la dispersion et du mélange.

iii) Les milieux déformables pseudocontinus que constituent principalement les pâtes et gels. Systèmes à caractère ambivalent entre solide et liquide, la notion d'interface ou d'interphase peut y être moins marquée comme dans le cas des gels polymères. Leur très haute viscosité est due le plus souvent à la présence de polymères ou de molécules susceptibles de former un réseau structuré apparenté à un polymère réticulé.

Les procédés de formulation *stricto sensu*

En dehors d'un découpage basé sur la nature des objets concernés (produits formulés), une autre logique d'action peut être esquissée à partir des types de procédés mis en jeu. Une liste non exhaustive des principaux procédés de formulation est présentée dans le *tableau IV*, selon qu'ils s'adressent aux états solides ou fluides.

Cette présentation met en avant deux opérations unitaires quasi incontournables, communes à la plupart des schémas de production : le mélange, pratiqué souvent mais pas uniquement en amont, et le séchage, technique de finition très courante.

Un autre point commun plus générique est que la plupart des procédés élémentaires cités dans le *tableau IV* sont des opérations où la mécanique joue un rôle fondamental. Dans presque tous les cas, le procédé consiste à créer une interface, ou une interphase, ou encore à modifier de façon très spécifique la structure de la matière traitée. Dans tous les cas, la quantité et la qualité de l'énergie dissipée par le procédé ainsi que le mode spatio-temporel de libération de celle-ci jouent un rôle déterminant pour la qualité du produit fabriqué. L'exemple de la mayonnaise, cher à Hervé This, est bien connu. L'ajout d'ingrédients en quantité et qualité ne suffit pas. Il faut aussi introduire ceux-ci au bon moment et

Tableau IV - Les principaux procédés de formulation en fonction de la nature (solide ou fluide) des phases traitées.

Phase solide	Phase fluide
Agitation, mélange	Agitation, mélange, dispersion
Broyage, micronisation	Compoundage, extrusion
Cristallisation	Émulsification
Calandrage	Moussage
Tamisage	Gélification, cristallisation
Granulation	Polymérisation
Compactage	Atomisation
Agglomération	Lyophilisation, désolvation
Enrobage, enduction, pelliculage	Coacervation, polymérisation interfaciale
Séchage, dévolatilisation	Séchage, dévolatilisation

avec la dose adéquate d'un certain type d'énergie mécanique.

Le rôle très important que jouent la mécanique et les machines dans ce « chapitre » du génie des procédés a été compris très tôt par nos collègues allemands du génie chimique. L'exemple donné par le professeur Rumpf à Karlsruhe et par tous les brillants élèves qu'il a formés est remarquable. Ceux-ci sont ensuite passés par l'apprentissage industriel et sont revenus enfin dans diverses universités où ils ont à leur tour enseigné et développé des programmes de recherche aussi divers que : extrusion, séchage, séparation solide/liquide, agglomération, broyage, écoulement et convoyage des poudres, émulsification, enrobage, pastillage... Souvent, ces travaux étaient réalisés en liaison non seulement avec des industries intéressées par les produits, mais aussi avec des équipementiers qui ont compris qu'ils pouvaient trouver là un moyen précieux pour protéger, voire accroître leur compétitivité.

Les défis du futur

On ne peut pas parler de futur sans évoquer d'abord l'évolution récente de l'industrie chimique mondiale dont les tendances sont communes à celles que suivent bien d'autres industries de procédés. Les compagnies étaient encore récemment surtout orientées par la maîtrise des matières premières et des techniques de production, et beaucoup moins par le développement des marchés. Leurs gammes de produits étaient très diversifiées, ce qui tendait à favoriser l'existence de grands groupes intégrés multimétiers. Depuis dix ans, la globalisation des échanges commerciaux et financiers a accru la compétitivité générale et a forcé la plupart des sociétés chimiques à se concentrer sur leurs points forts et à spécialiser leur activité. Certaines ont choisi le business du vivant, d'autres les grandes commodités pétrochimiques, d'autres enfin ce qu'il est convenu d'appeler le secteur des spécialités chimiques, caractérisé par le Boston Consulting conformément à la figure 4 [27]. Si l'on met à part le développement très fort que vont encore connaître longtemps les industries consacrées au milieu vivant, il est clair que la chimie de spécialités offre de belles perspectives de développement à l'industrie chimique des pays industrialisés, peu pourvus en matière première pétrolière et dont les taux de croissance économique restent modestes. Pour progresser sur les marchés de spécialités, l'industrie chimique concernée doit faire appel non seulement aux meilleurs chimistes et physico-chimistes, mais elle doit demander un effort d'adaptation encore très important aux spécialistes du génie des procédés. Citons quelques pistes possibles, encore difficiles à préciser pour certaines :

- Développer des modèles thermodynamiques des états de la matière non classiques : verres, gels, émulsions, suspensions concentrées, mousses, pâtes...
- Introduire, quand c'est possible, les modèles précédents (même approximatifs) dans des schémas d'opérations unitaires : modèles consécutifs/compétitifs pour des réacteurs par exemple, bilans de population pour des procédés d'agglomération, enrobage, broyage...
- Exploiter davantage dans les opérations la problématique des systèmes statistiques, en dépassant en particulier les approches classiques utilisant la moyenne (moment d'ordre 1 de la distribution).
- Étendre l'application des méthodes du génie des procédés aux techniques de production de systèmes

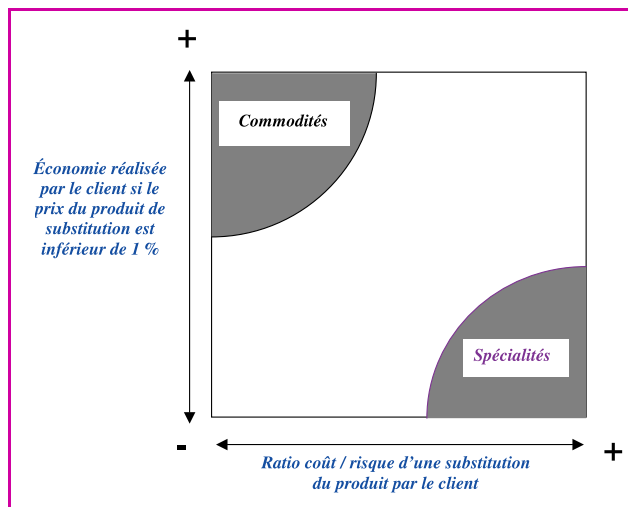


Figure 4 - Positionnement spécialités vs commodités (d'après [27]).

fragiles, métastables ou présentant des *défauts maîtrisés*, en examinant par exemple si une analyse plus locale des réacteurs, coagulateurs ou précipitateurs mis en œuvre ne permet pas de résoudre certains problèmes de maîtrise de la production ou d'améliorer les produits obtenus.

- Mieux exploiter, en termes de procédés, les progrès faits par les chimistes et physico-chimistes dans les connaissances des relations propriétés/structure.

- Appliquer au contrôle de certains procédés les techniques analytiques avancées qui ont fait récemment des progrès importants en miniaturisation et fiabilité.

Il va sans dire que la liste de propositions ci-dessus n'est en aucun cas exhaustive.

Conclusion : le génie pour les produits, évolution ou révolution ?

Au terme de ce tour d'horizon articulé autour de la problématique procédés et produits, une série de points méritent d'être soulignés.

D'abord la nécessité d'une terminologie unanime. Un premier constat s'impose, relatif à l'absence de définition commune de plusieurs termes clés :

- **produit**, qui peut être employé aussi bien comme résultant de l'activité de l'industrie chimique (définition économique, c'est-à-dire possédant une valeur marchande), ou uniquement l'objet acheté par le consommateur (définition plus sociétale) ;

- **propriétés, formulation, spécialités...**

Le mot génie des produits a le mérite d'être court et de correspondre directement au mot anglo-saxon reconnu « product engineering ». Mais pour éviter d'attribuer au seul ingénieur de procédé tout l'aspect que les jeunes d'aujourd'hui qualifieraient de génial dans certains produits nouveaux, nous proposons le vocable de **génie POUR les produits**. Cela dit, cette nouvelle appellation traduit-elle une simple évolution ou une véritable révolution pour notre discipline ?

La révolution apportée au début du XX^e siècle par le génie des procédés au travers du concept d'opération unitaire reposait essentiellement sur son caractère générique, permettant de **se détacher de l'objet chimique** (cher jusqu'alors à la chimie industrielle) pour rationaliser l'analyse d'une unité de production chimique autour de son plus petit

dénominateur commun⁴. Le retour en force de la dimension chimique et physico-chimique, maintes fois évoqué dans la problématique du génie des produits, auquel s'ajoute la prise en compte quasi incontournable de la *notion de structure*, suscite des interrogations quant à la pertinence de la démarche, devenue aujourd'hui conventionnelle, du génie des procédés. Le fait que de nombreuses analyses foisonnent au détriment de travaux de synthèse⁵ laisse présager une difficulté pour un expert en procédés de se détacher réellement de l'objet dès lors qu'une notion de type produit sera abordée. En ce sens, le développement du génie des produits pourrait constituer une forme de rupture en terme de pratique⁶ pour le génie des procédés.

Une deuxième rupture, plus méthodologique, pourrait également provenir du niveau de complexité des objets traités, obligeant le recours à des outils à caractère statistique (plans d'expérience, logique floue, réseau de neurones...) pour œuvrer au cœur du système molécules/procédés/produits/propriétés⁷. Sans négliger l'intérêt incontestable de ce type d'outils dans le domaine de l'aide à la décision ou de la résolution rapide de problèmes à dominante industrielle, force est de constater que l'emploi exclusif de cette stratégie constituerait un changement radical.

Au risque de paraître rétrograde, un certain nombre d'indicateurs tempèrent néanmoins la vision de rupture évoquée ci-dessus et invitent à maintenir la méthode du génie des procédés qui a fait jusqu'à présent son succès sur la base d'une description la plus rigoureuse possible de la thermodynamique des systèmes, des phénomènes de transport, ainsi que des équations de bilans et de réaction chimique, compatibles avec une résolution mathématique (analytique ou numérique) :

- Dans le domaine des procédés de formulation, des avancées remarquables ont été réalisées concernant des opérations aussi complexes que l'émulsification [29] ou la granulation [30]. Certains paramètres dans les travaux cités peuvent présenter un caractère empirique, être difficilement accessibles expérimentalement et ne sont pas toujours reliés de manière univoque avec la formulation du système. Néanmoins, l'approche unifiée offerte par le génie des procédés permet d'ores et déjà d'orienter les choix, voire de dresser une cartographie des relations procédés/structure du produit.

- Concernant les processus mis en jeu dans l'utilisation des produits formulés (technologies d'application), une interprétation de phénomènes aussi subtils que l'effet de peau pouvant se développer par exemple lors du séchage d'une peinture (« *skinning effect* »), ou encore des défauts de surface apparaissant en enduction (« *ribbing* »), a pu être élaborée sur la base d'une approche rigoureuse [31-32]. Sans être totalement prédictifs, ces travaux laissent entrevoir la possibilité de rationaliser la compréhension de processus considérés jusqu'alors comme accidentels et, d'une certaine manière, incontrôlables, lors de la mise en œuvre du produit par l'utilisateur.

- Enfin, des exemples, encore rares, offrant une approche plus large relevant du génie des produits au plein sens du terme (c'est-à-dire balayant l'ensemble de la problématique des procédés aux propriétés d'usage) ont été rapportés récemment, en particulier dans le domaine des crèmes et lotions cosmétiques [33-34].

Finalement, les auteurs pensent plutôt que le développement du **génie pour les produits**, essentiel pour accompagner la mutation des industries de procédés (dont la chimie)

vers des produits toujours plus performants et souvent complexes est un pas franchi vers un génie des procédés finalement assez différent de celui de référence. Ce génie pour les produits ne reniera rien du génie chimique classique, mais demandera à ses praticiens une plus large culture scientifique (particulièrement dans les domaines de la chimie et de la physico-chimie) et technique. Au final, c'est donc une belle aventure qui se profile, avec à la clé un véritable défi scientifique et pédagogique à destination de nos futurs élèves.

Notes

¹ De nombreuses variantes existent, en particulier selon le devenir des produits (vente directe au consommateur ou à un autre industriel), leur composition (une seule molécule ou un mélange formulé), ou encore leur prix de vente.

² Une division Formulation, comptant plus de 400 membres, existe à la Société Française de Chimie depuis plus de vingt ans.

³ Cette situation n'est pas nouvelle. Le développement du nylon, avec le succès à caractère emblématique qui en a découlé, résulte d'un groupe de projets associant chimistes et ingénieurs des procédés haute pression chez Dupont [26].

⁴ La naissance du génie chimique est parfois associée dans ce sens aux techniques de management du système manufacturier américain du début du siècle échauffées dans le domaine de l'automobile par H. Ford et diffusées par Taylor [26].

⁵ Il n'existe pas (encore) l'analogue du *Perry's Chemical Engineering Handbook* (R.H. Perry & Don Green (eds), Mac Graw Hill), consacré au génie des produits par exemple.

⁶ D'aucuns associeront ce changement aux caractéristiques de l'époque post-moderniste, annoncée par les milieux artistiques et les sociologues, pour laquelle la spécificité, le caractère unique de l'objet par opposition à son traitement générique, constitue l'un des piliers (cette analyse a constitué la trame de la surprenante *2001 Danckwerts Memorial Lecture* par J. Prausnitz [28]).

⁷ Le fait que l'un des premiers chapitres des *Techniques de l'Ingénieur* consacré à la formulation traite des plans d'expérience est à ce titre révélateur.

Références

- [1] Bird R.B., Rethinking academia: restore the right priorities, *Chemical Engineering Progress*, **1996**, 92, p. 80.
- [2] Astarita G., Frontiers in Chemical Engineering and 1992, *Chemical Engineering Progress*, **1990**, 86, p. 55.
- [3] Landau R., Education: moving from chemistry to chemical engineering and beyond, *Chemical Engineering Progress*, **1997**, 93, p. 52.
- [4] Landau R., The chemical engineering trilemma, *Chemical Engineering Progress*, **1976**, 72, p. 13.
- [5] Wei J., A century of changing paradigms in chemical engineering, *ChemTech*, **1996**, 26 (5), p. 16.
- [6] Amundson N.R., *Frontiers in Chemical Engineering. Research Needs and Opportunities*, National Academy Press, Washington DC, **1988**.
- [7] Villadsen J., Putting structure into chemical engineering, *Chemical Engineering Science*, **1997**, 52, p. 2857.
- [8] Mashelkar R.A., Seamless chemical engineering science: the emerging paradigm, *Chemical Engineering Science*, **1995**, 50, p. 1.
- [9] Krieger J.H., Chemical engineering redefines itself in era of global change, *Chemical & Engineering News*, **1996**, 74, p. 10.
- [10] Bacchin P., Bergel A., Biscans B., Floquet F., Wilhelm A.M., Joulia X., Génie des procédés : discipline des interactions et interactions des disciplines, *Entropie*, **1999**, 216, p. 61.
- [11] Cussler E., Savage D.W., Middleberg A.P.J., Kind M., Refocussing chemical engineering, *Chemical Engineering Progress*, January **2002**, p. 26.
- [12] Agam G., *Industrial Chemicals. Their Characteristics and Development*, Elsevier Amsterdam, **1994**.
- [13] Wintermantel K., Process and product engineering achievements. Present and future challenges, *Chemical Engineering Science*, **1999**, 54, p. 1597.
- [14] Quadbeck-Seeger H.J., Chemistry for the future. State of the art and perspectives, *Angewandte Chemie*, Int. English Ed., **1990**, 29 (11), p. 1177.
- [15] Schorsch G., La formulation au carrefour des compromis, *Informations Chimie*, **1991**, 325, p. 152.
- [16] Mollet H., Grubenmann A., *Formulationstechnologie*, Wiley VCH, **2000**.
- [17] Charpentier J.-C., Process engineering and product engineering, *Chemical Engineering Science*, **1997**, 52, iii-iv.
- [18] Kind M., Product engineering, *Chemical Engineering and Processing*, **1999**, 38, p. 405.
- [19] Favre E., Marchal-Heussler L., Kind M., Chemical product engineering: research and educational challenges, *Transactions IChemE*, **2002**, 80 (A), p. 65.

- [20] Cussler E., Moggridge G., *Chemical Product Design*, Cambridge University Press, **2001**.
- [21] Union des Industries Chimiques, Science et Technologie pour l'Industrie Chimique, Fascicule « Formulation », **1995**.
- [22] Aubry J.-M., Schorsch G., Présentation générale de la formulation, *Traité Génie des Procédés*, Techniques de l'Ingénieur, **2000**.
- [23] Schorsch G., La formulation : de l'art à la science du compromis, *L'Act. Chim.*, décembre **2000**, p. 20.
- [24] Wesselingh J.A., Janssen L.P.B.M., Teaching product engineering, *Récents Progrès en Génie des Procédés*, **1999**, 64, p. 401.
- [25] Wei J., Molecular structure and property: product engineering, *Industrial Engineering Chemistry Research*, **2002**, 41, p. 1917.
- [26] Ndiaye P., *Du nylon et des bombes*, Belin, **2001**.
- [27] Semel J., *Keynote lecture* présentée au 3rd European Congress of Chemical Engineering, Nuremberg, Allemagne, **2001**.
- [28] Prausnitz J.M., Chemical engineering and the postmodern world, *Chemical Engineering Science*, **2001**, 56, p. 3627.
- [29] Walstra P., Principles of emulsion formation, *Chemical Engineering Science*, **1993**, 48, p. 333.
- [30] Iveson S.M., Lister, Growth regime map for liquid bound granules, *AIChE Journal*, **1998**, 44, p. 1510.
- [31] Cairncross R.A., Francis L.F., Scriven L.E., Predicting drying in coatings that react and gel: drying regime maps, *AIChE Journal*, **1996**, 42, p. 55.
- [32] Coyle D.J., Macosko C.W., Scriven L.E., The fluid dynamics of reverse roll coating, *AIChE Journal*, **1990**, 36, p. 161.
- [33] Wibowo C., Ka M.N., Product oriented process synthesis and development: creams and pastes, *AIChE Journal*, **2001**, 47 (12), p. 2746.
- [34] Wibowo C., Ka M.N., Product centered processing: manufacture of chemical based consumer products, *AIChE Journal*, **2002**, 48 (6), p. 1212.
- [35] Agricola G., *De Re Metallica*, Libri XII, **1556**.



Éric Favre

est professeur à l'ENSIC de Nancy*.

Jacques Bousquet

est à la direction scientifique de Total**.

E. Favre

1 rue Grandville, 54001 Nancy.

Tél. : 03 83 17 53 90. Fax : 03 83 32 29 75.

Courriel : Eric.Favre@ensic.inpl-nancy.fr

** Total, Direction scientifique, BP 22, 69630 Solaize.

JCO 2004
Journées de Chimie Organique
 7-9 septembre
 ECOLE POLYTECHNIQUE - PALAISEAU (FRANCE)

JCO 2004

Colloque organisé par la
Division de Chimie Organique de la Société Française de Chimie

<http://www.evicevents.com/chimie/index.html>