

La formulation : de l'art à la science du compromis

L'histoire et l'actualité de la formulation

Gilbert Schorsch*

Introduit depuis une quinzaine d'années, le mot formulation tente de s'imposer dans le jargon technique à côté de mots tels que matériaux, biotechnologies, ou plus récemment technologies de la communication.

Ces mots se veulent génériques. Ils ne le sont qu'en apparence. Ils désignent en général des domaines fort complexes par leurs contenus scientifique et technique et toujours mystérieux pour le grand public.

Mais contrairement aux autres mots, la formulation n'est pas reconnue comme une activité prestigieuse. Elle n'a pas la connotation de haute technologie ou de nouvelle économie, obligatoire aujourd'hui pour être porteur de développements futurs, sinon de rêves.

Pourquoi ce déficit d'image ou ce manque de reconnaissance ?

1 - Les trois grandes étapes

Les alliages métalliques, les céramiques ou les caoutchoucs dans les matériaux, l'encre de Chine ou une peinture automobile, une poudre lessivante ou un shampoing, un comprimé d'aspirine ou une bouillie de traitement de céréales dans les spécialités, sont autant d'exemples concrets de formulations de notre vie courante.

L'histoire des civilisations et des techniques montre clairement que la formulation (voir encadré) est une activité ancestrale. En fonction des matières premières et des technologies disponibles, l'humanité a pratiqué et pratique toujours l'art du mélange.

• Du néolithique au second Empire :

la formulation de matières premières d'origine naturelle couvre les besoins essentiels de l'humanité

Très tôt, nos ancêtres ont recours à la formulation pour satisfaire leurs besoins essentiels. Poterie crue dès le néolithique, terres cuites ou amphores ensuite - pour conserver et transporter huiles et graines - et faïences et porcelaines, vernissées ou émaillées - pour décorer habitations et tables - jalonnent l'évolution des expériences acquises dans le domaine des céramiques.

L'histoire de la mise au point initiale de la porcelaine de Chine - puis des tentatives d'imitation - illustrent parfaitement le difficile choix des matières minérales et du dosage des mélanges à base de kaolin pour atteindre le meilleur compromis entre facilité de façonnage de la pâte au tour, sa tenue à la cuisson et l'aspect translucide des objets fabriqués.

L'invention du bronze coulé, dès le milieu du 2^e millénaire, en Chine encore, conjugue adaptation progressive du mélange à base d'argile et de loess (pour fabriquer le moule dans lequel le bronze se coulera facilement) et reconnaissance rapide de l'intérêt de l'alliage à base d'étain et de cuivre pour obtenir la dureté et la résistance à la corrosion spécifiques au bronze.

Par la suite, le développement des alliages métalliques procède de la même stratégie d'adaptation constante des matières premières disponibles aux propriétés recherchées.

Nos ancêtres s'acharnaient donc depuis longtemps à trouver le meilleur compromis possible entre facilité de mise en œuvre, performance et durabilité des matériaux qu'ils fabriquaient.

Plus près de nous, des poudres parfumées - très en vogue à Versailles - et des eaux de toilette étaient préparées à partir de matières premières d'origine végétale.

La fonctionnalité multiple de telles formulations - nettoyage, masquage des odeurs et personnalisation - est détectée très tôt.

Dans le domaine de la conservation des aliments, des formulations très diversifiées et efficaces sont pratiquées depuis longtemps : l'addition de miel puis de sucre pour la conservation des fruits en Égypte, de sels ou de graisses pour la conservation des viandes et poissons, ou d'épices pour la préparation des aliments.

À l'opposé de la stratégie de mélange décrite jusqu'à présent, c'est l'extraction qui est pratiquée pour préparer infusions, décoctions et onguents pour se soigner. Les solutions aqueuses ou les huiles extraient et solubilisent ainsi directement les matières actives. Nous reviendrons plus loin sur l'intérêt de cette pratique.

Durant toute cette période, les technologies de mélange appliquées restent relativement simples ; elles font appel à l'énergie mécanique : le creuset et le pilon ou la meule pour broyer, des bassines et des agitateurs pour remuer, et à l'énergie thermique : pour chauffer, faire fondre ou solubiliser.

Le savoir-faire se construit par une démarche d'essai/erreur et se transmet de bouche à oreille. Sauf dans le domaine pharmaceutique où les formules sont consignées dans la pharmacopée apparue au milieu du XIV^e siècle.

L'apothicaire dans son officine avec ses pots et son trébuchet pourrait symboliser cette période.

* E-mail : cgschorsch@aol.com

• A partir du second Empire :

la demande de produits de substitution entraîne l'essor de l'industrie chimique

Le second Empire marque le tournant que les chimistes connaissent bien. Les industries métallurgiques et textiles se développent. Il faut teindre taffetas et satins qui parent les crinolines ! Les matières colorantes naturelles ne permettent plus de faire face à la demande. Une chaire de chimie tinctoriale est créée au CNAM dès 1852 et la synthèse de la mauvéine est décrite par Perkin en 1856. Par chance, certaines structures préparées se révèlent avoir une activité médicinale.

Rapidement l'industrie chimique identifie, puis fabrique par synthèse totale dans la deuxième moitié du XIX^e siècle, parfums, médicaments, détergents de synthèse, issus successivement de la carbocimie, plus tard de la pétrochimie.

Avec les deux guerres mondiales et l'effort de reconstruction, la demande de produits se fait plus pressante encore. De nouveaux matériaux, avec une plus grande facilité de mise en œuvre, sont introduits : des fibres et des polymères synthétiques, de nouveaux matériaux de construction, des ciments aux bétons.

Pour se substituer et déplacer les matériaux traditionnels, la formulation des élastomères - par des charges renforçantes - et celle des matières plastiques - par des stabilisants thermiques pour le PVC, ou par des anti-oxydants pour les polyoléfines à titre d'exemple - s'avère impérative.

Mais, fait plus significatif pour l'évolution ultérieure de la formulation, l'industrie chimique développe, pour les applications industrielles, divers auxiliaires qui simplifient notablement les opérations de formulation : des bases et des acides de plus en plus caustiques pour dissoudre les produits minéraux récalcitrants, des solvants de plus en plus polaires pour solubiliser des produits organiques, des tensio-actifs pour associer composés hydrophiles et lipophiles, des complexants à structure de plus en plus élaborée pour solubiliser des ions métalliques insolubles.

En résumé, la demande de produits de substitution consacre l'âge d'or de la chimie de synthèse.

Durant cette période, les technologies de formulation s'inspirent de celles de

l'industrie chimique : réacteurs sous pression ou sous vide, broyeurs à billes, extrudeuses, extracteurs... L'industrie traite des lots de plus en plus importants. Les installations s'agrandissent et s'automatisent.

Le formateur type de cette période mélange pigments, charges, liants, modificateurs de rhéologie et solvants pour fabriquer des peintures décoratives.

• A partir de 1975,

l'offre de service est privilégiée

Avec les remises en cause et les événements qui ont marqué 1968 et les deux

chocs pétroliers, la saturation des marchés des produits chimiques et la compétition mondiale forcent l'industrie chimique à revoir sa stratégie.

A l'initiative des industries de grande consommation en contact direct avec les marchés - pharmacie, détergence ménagère ou produits de soins, matériaux de construction... -, des offres nouvelles sont proposées aux consommateurs :

- tantôt des formulations très spécifiques qui traitent de manière ciblée maux ou défauts bien identifiés : médicaments, produits de traitement des façades ou des sols ; hydrofugeants ou anti-mousses ;

La formulation

Sens du mot

Au mot « formuler », l'édition du *Larousse Classique* de 1957 donnait deux exemples et introduisait deux notions différentes que nous rapportons intégralement car elles traduisent, fort à propos, les exigences actuelles en matière de formulation :

- *formuler une ordonnance médicale, c'est-à-dire rédiger d'après une formule (NDLR : au sens d'une prescription dressée par le médecin),*
- *formuler une objection, c'est-à-dire exprimer d'une manière précise.*

En intégrant ces deux sens, le mot formuler désigne deux actions complémentaires et concomitantes :

- la sélection et le dosage des ingrédients qui réclament davantage une connaissance précise du mode d'action que celle de la formule chimique de chacun d'entre eux. C'est le médecin qui fixait la nature et le dosage des principes actifs et c'est le potard qui en réalisait le mélange dans l'arrière boutique de l'apothicaire ;
- la prise en compte précise du besoin réel de l'utilisateur, c'est-à-dire du malade dans notre cas.

Ce retour étymologique nous permet de bien prendre conscience des orientations actuelles de l'industrie. Elle doit prendre en compte totalement les besoins concrets des utilisateurs en matière de mise en œuvre, d'efficacité et de sécurité des formulations.

Le développement de partenariats entre clients et fournisseurs illustre d'ailleurs clairement cette évolution.

Mais aussi ambiguïté du mot

Ce double sens, relevé dans le dictionnaire, permet aussi d'expliquer l'ambiguïté de la connotation du terme formulation.

S'il ne désigne que l'acte pur et simple de mélange, synonyme de cuisine, il mérite bien l'ignorance, voire le dédain, de certains milieux universitaires envers cette activité.

Si, au contraire, nous l'acceptons dans sa totalité, comme les industriels doivent la pratiquer, c'est-à-dire avec une maîtrise parfaite des interactions entre les ingrédients, une bonne connaissance du mode d'action des produits et une réponse précise au besoin réel de l'utilisateur, la formulation mérite bien ses lettres de noblesse.

Au même titre que la cuisine qu'Hervé Thys anoblit en gastronomie moléculaire, la formulation mérite d'être réhabilitée.

- tantôt des formulations à fonctions multiples, qui nettoient et traitent simultanément. Sous le nom générique « 2 en 1 », des formulations de plus en plus élaborées sont mises au point : des poudres lessiviellles, qui nettoient et entretiennent les textiles, des shampoings anti-pelliculaires en passant par les dentifrices antitartre ou les pâtes gingivales ;

- tantôt des formulations qui s'utilisent et s'appliquent facilement : une bouillie de traitement de printemps, des céréales ou un mortier auto-lissant.

L'industriel propose même le système d'application pour faciliter la vie de l'utilisateur et pour optimiser l'efficacité des produits : cartouches pour délivrer le mastic de vitrage ou la mousse à raser, inhalateur pour le traitement de l'asthme...

Mais les industries de grande consommation se tournent aussi simultanément vers l'amont, c'est-à-dire vers leurs fournisseurs pour leur demander de leur livrer des formulations faciles à appliquer ou des dispositifs à intégrer directement dans leurs chaînes de production. Les exemples ne manquent pas :

- un compound de PVC contenant stabilisant et lubrifiant que le fabricant de canalisation d'eaux ou de plinthes pour bâtiment utilisera directement dans ses extrudeuses,

- un mortier ou un béton fabriqué en centrale, contenant les adjuvants qui lui confèrent le caractère auto-plaçant voire autolissant lors de sa mise en œuvre,

- l'industrie automobile ne réclame pas seulement l'élastomère de la courroie mais tout le système de transmission, y compris le tondeur.

Dans tous les cas, le développement de ces types de spécialités repose sur un marché implicite : le partage équitable des gains de productivité. En contrepartie d'une commodité d'application, d'une meilleure efficacité ou d'une plus grande fonctionnalité, l'utilisateur final, industriel ou particulier, est prêt à payer plus cher le coût du service.

L'industrie est à présent entrée dans l'ère du service et du client roi. Avec l'obligation impérieuse de bien connaître le mode d'action des formulations qu'elle vend et de s'assurer qu'elles répondent à un vrai besoin.

Durant cette dernière période, les

technologies innovantes apparaissent. La mise en émulsion fait appel aux homogénéiseurs HP ou UHP, aux membranes... De nouvelles technologies - atomiseur, foisonneur, encapsulation...-, ou de nouvelles présentations - microémulsions, mousses ou aérosols, nanoparticules...-, sont mises en œuvre.

Unilever pour ses deux activités majeures, la détergence et l'agroalimentaire, ou Hutchinson dans le domaine des formulations industrielles à base de caoutchoucs techniques pour l'amortissement ou l'isolation phonique, peuvent fort bien représenter le formulateur type de cette période.

2 - Les leçons de l'histoire

La formulation : une nécessité, qui exige aujourd'hui une grande réactivité

Que ce soit pour assurer des fonctions multiples ou pour franchir une barrière biologique, seul un mélange de produits permet d'apporter une réponse à un coût acceptable. Un produit n'est jamais utilisé seul. Un pigment n'a d'intérêt qu'associé au minimum avec un liant et un additif rhéologique.

Mais cette démarche d'optimisation est inhérente à tout développement de produits dans l'industrie. Chaque profession adapte depuis longtemps composition et structure aux besoins du marché. Toutes les professions pratiquent donc la formulation comme M. Jourdain pratiquait la prose.

Dès lors la formulation touche des domaines trop nombreux, avec des contenus scientifiques trop divers, pour qu'elle puisse être considérée et respectée comme un domaine scientifique cohérent.

Il est intéressant aussi de constater que l'objectif général de la formulation n'a guère varié au fil du temps. Il n'a fait que s'adapter aux moyens et aux besoins locaux - population concernée, niveau de performance et exigences de sécurité exprimées.

Par contre, avec la compétition internationale, c'est la réactivité qui prime. C'est le temps de réponse aux besoins exprimés qui doit impérativement être raccourci. D'où la nécessité

de mieux organiser et de savoir mieux utiliser connaissances et expériences disponibles.

C'est donc dans l'élaboration des concepts unificateurs en matière de technologies de mélange ou d'application, de physique ou de physico-chimie, de caractérisations des structures, que la formulation doit trouver sa cohérence et son identité. Ce sont ces concepts que les diverses professions devront mieux identifier, clarifier et partager pour progresser ensemble.

La formulation : l'art de gérer des incompatibilités

La compatibilité des produits à mélanger constitue par conséquent le facteur critique à prendre en compte.

Les mélanges solubilisés à l'échelle moléculaire, par extraction à l'eau ou aux huiles, ou par l'utilisation de bons solvants, de tensio-actifs voire de complexants, ne posent guère de problèmes.

Pour mieux cerner et segmenter le champ d'action de la formulation, n'y aurait-il pas lieu de distinguer deux grandes familles de formulations fluides ? :

- celle des solutions, des eaux de toilettes ou parfums, par exemple, qui ne posent que la question de trouver le bon solvant et dont l'évaluation se fait par des tests mis en place par chacune des professions,

- celle des « pseudo-solutions », des émulsions aux dispersions en passant par les mousses ou les aérosols, bref des systèmes colloïdaux, essentiellement métastables ou des milieux complexes, par nature fragiles. Ces systèmes posent des problèmes communs de préparation, de stabilité et de caractérisation de leur morphologie et de leur comportement sous contraintes mécaniques ou thermiques.

Une communauté scientifique s'est constituée autour de la récupération assistée du pétrole à partir de 1975. Le Colloque Systèmes Moléculaires Organisés qui s'est tenu à Bordeaux en 1991, sous l'égide du CNRS, a donné une nouvelle jeunesse à cette thématique.

Par ailleurs, ces problèmes d'incompatibilité se trouvent encore exacerbés dans le domaine des matériaux et plus particulièrement dans celui des multi-

matériaux (polymères chargés, matériaux composites, panneaux sandwich, bétons armés...). Ils posent des problèmes communs de caractérisation des interfaces et de leurs relations avec les propriétés mécaniques de surface - en première approximation d'adhésion et de masse - et - en première approximation de renforcement.

En bref, la préparation, la caractérisation et l'origine des propriétés mécaniques et optiques de matériaux hétérogènes à partir de matériaux somme toute assez traditionnels - tels que les métaux, les ciments ou les polymères - sont encore insuffisamment maîtrisés.

La prise de conscience de problématiques scientifiques communes à partager dans ce domaine est plus récente. Un colloque, organisé à Lyon en décembre 1997 par le CNRS, a tenté d'esquisser des Programmes Matériaux Transversaux, un peu éloignés encore des préoccupations concrètes des industriels.

La formulation : un métier global

En dépit d'une approche très empirique, nos ancêtres ont cependant procédé à des avancées qui dénotent d'intuitions géniales de phénomènes physico-chimiques essentiels que nous n'expliquons que depuis moins d'un siècle, comme la stabilité des milieux colloïdaux (encre de Chine) ou l'inversion de phase (fabrication du beurre ou de margarine).

Des travaux récents ont montré aussi que, dans la période initiale, nos ancêtres ne se contentaient pas de mélanger ou d'extraire purement et simplement des produits naturels. Ceux-ci pouvaient subir des traitements thermiques - les pigments à base d'hématite dans les peintures rupestres ou à base de céruse dans les fards en Égypte -, voire des biotransformations par fermentation - pour la préparation du pastel.

L'intérêt de la solubilisation des diverses matières actives pour faciliter la formulation et l'importance des notions d'hydrophilie et d'hydrophobie, a été entrevu très tôt dans le domaine des médicaments, de l'hygiène corporelle et de la peinture.

Ces intuitions montrent qu'une expérience pratique et concrète des

problèmes peut conduire aussi à des résultats intéressants et ne doit pas être dédaignée.

La formulation s'avère donc une activité globale qui, du développement à la mise sur le marché d'un produit, exige non seulement des connaissances théoriques, mais aussi une expérience pratique et une intuition des besoins des marchés. Elle exige donc une réelle aptitude à travailler en équipe, car toutes ces exigences se trouvent rarement réunies dans une même personne ou une même équipe.

La formulation : pas seulement de la chimie

L'offre de service vers laquelle s'orientent les industries de consommation appelle une double orientation :

- L'industrie chimique doit de mieux en mieux connaître non seulement les technologies de mélangeage et d'application des produits qu'elle ou ses clients utilisent (broyage, injection, moulage, encapsulation...), mais aussi comprendre parfaitement leur mode

d'action pour développer des partenariats actifs avec les industries en aval. Faute de quoi elle risque de se voir transformée en simple sous-traitante de ses clients.

- A une époque où les propriétés d'usage des produits prennent le pas sur leur disponibilité, la compétition s'est déplacée de la synthèse vers la maîtrise de la performance des produits formulés. Cela implique que les compétences en physique (de la mécanique à la microélectronique en passant par l'optique dans le secteur industriel) ou en biologie (de la biochimie à la biologie moléculaire dans les sciences de la vie) seront aussi déterminantes que celles de synthèse chimique. La métallurgie, les matériaux de construction, des verres aux ciments, l'industrie électronique ne se réfèrent déjà plus à la chimie et se développent de manière autonome.

La scission entre chimie et sciences de la vie dans les grands groupes chimiques accélère encore cette prise d'indépendance.

L'absence de crédibilité, du moins

Moulage de céramiques par coulage-coagulation... grâce à la formulation

Conférence présentée aux 8^e Journées de Formulation (Besançon, 17-19 octobre 2000)

Une équipe de l'École Nationale Supérieure des Céramiques Industrielles de Limoges vient de présenter une avancée récente et intéressante, en transposant la technique du moulage par coulage, illustrée au début de cet article par la fonte, à la mise en forme des céramiques.

Dans un premier temps, l'introduction d'un dispersant très efficace - un catéchol disulfonate - permet de préparer une dispersion concentrée - 60 % en volume à pH 9 - et très fluide d'alumine, qui épousera parfaitement les formes du moule.

De l'acétate d'aluminium - $(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2\text{AlOH}$ - est ajouté simultanément mais introduit un effet retardé doublement intéressant. Par décomposition thermique, le pH est abaissé vers le point isoélectrique de l'alumine et l'ion Al^{3+} libéré désorbe le dispersant sulfoné.

Le figeage de la suspension est instantané. Il conduit à des pièces crues denses d'une cohésion suffisante pour être démoulées rapidement, séchées et traitées thermiquement et dont le retrait est très faible (1 %).

Ce procédé de fabrication a pu voir le jour grâce à une étude méthodique des mécanismes moléculaires à la base du contrôle de la stabilité de la dispersion : les forces d'interaction entre les particules et la décomposition thermique retardée du coagulant.

Une belle illustration de maîtrise en temps réel de deux phénomènes strictement opposés : dispersion et coagulation.

• Contact : c.pagnoux@ensci.fr

pour les marchés boursiers, des sociétés de spécialités chimiques va dans le même sens et confirme que les activités en contact direct avec le marché ont une meilleure visibilité et offrent de meilleures chances de développement de produits innovants.

La roue tourne car, il y a à peine une quarantaine d'années, on attendait avec la même curiosité et la même frénésie la nouvelle fibre élastique ou le nouveau polymère thermostable, qu'actuellement la nouvelle génération de téléphones WAP !

Il en résulte que, pour l'enseignement de la chimie, une place plus importante devra être réservée à l'exposé des relations structure/propriétés physico-chimiques et propriétés physico-chimiques/propriétés d'usage qui prennent de plus en plus d'importance au détriment de l'enseignement de la synthèse. Il est actuellement difficile d'identifier ou de localiser un tel enseignement sur les tensio-actifs ou les polymères solubles, pourtant très utilisés dans le domaine des formulations.

Une place plus grande doit donc être réservée aux enseignements de physique ou de biologie, c'est-à-dire à la multidisciplinarité, car les emplois actuels se trouvent déjà en majorité dans les industries en aval de la chimie.

L'orientation présagée devrait entraîner une plus grande différenciation des enseignements dans les écoles de chimie.

3 - L'actualité et les opportunités de la formulation

Depuis le milieu des années 1970, et avec les excès du tout chimique dénoncé par les écologistes, la méfiance s'est installée dans le grand public. Les règles de sécurité se renforcent avec un double impact, dont les effets s'opposent.

- La restriction d'utilisation de solvants pour cause de composés organiques volatils, voire leur élimination pour toxicité intrinsèque (cf problème actuel des éthers de glycol) rend plus difficile la formulation car les produits doivent être préparés sous forme d'émulsions ou de dispersions thermodynamiquement instables.

- Le coût du développement de nouveaux produits, et en particulier celui de

l'évaluation de leurs risques éventuels pour l'homme et son environnement, s'accroît. Pour répondre aux besoins exprimés, l'industrie trouve plus avantageux et plus sécurisant de formuler différemment des produits déjà commercialisés plutôt que de développer de nouveaux produits. Les activités de formulation sont relancées de ce fait, car elles constituent le champ de compétition privilégié des industries en aval de la chimie.

Cette relance se produit avec des contraintes nouvelles dues essentiellement aux exigences croissantes des consommateurs. A titre d'exemples :

- Le nombre de composants dans un mélange augmente pour en optimiser la performance ou pour élargir leur spectre : la formulation devient plus difficile.

- Les deux chocs pétroliers de 73 et de 78 et la conjoncture actuelle (Erika, augmentation du coût des produits pétroliers...) montrent tout l'intérêt de diversifier les approvisionnements. Des matières premières d'origine végétale, c'est-à-dire renouvelables, entrent dans les formulations. Les biotechnologies proposent de leur côté enzymes, vitamines ou protéines. Elles exigent de nouvelles conditions de formulation.

- Les impératifs de sécurité se durcissent encore. Les risques de dissémination des produits (dans les cours d'eau ou les nappes phréatiques) ou la possibilité de les recycler doivent être pris en considération au moment de l'élaboration de la formulation.

Par ailleurs, la mondialisation des échanges diversifie les besoins. Tantôt, il faut répondre à des besoins locaux sur la base des matières premières et des technologies disponibles sur place. Tantôt, les formulations doivent supporter des durées de transport ou de stockage plus longues, ce qui suppose un meilleur contrôle de la stabilité des formulations.

Mais toutes ces difficultés créent aussi de réelles opportunités pour les industries en aval de la chimie. Elles investissent pour constituer ou valoriser des domaines de compétence qui deviennent de plus en plus spécifiques.

Le développement des multimatériaux, les techniques de dépollution ou les procédés de biotransformation, les techniques de génie génétique, sont autant d'exemples où l'optimisation de

la mise en œuvre et l'efficacité des produits sont basées sur de la formulation.

Conclusion

En conclusion, la formulation devient une nécessité pour le développement et l'utilisation des produits. C'est une activité globale, difficile, car elle exige de faire du « sur mesure », au prix du « prêt à porter », avec en surplus « des garanties de sécurité ».

Le terme de « formulation » est cependant un peu réducteur car il vise la valorisation de l'ensemble des produits, qu'ils soient naturels ou synthétiques.

La formulation fait encore trop souvent appel à des recettes empiriques qui sont plus du domaine de l'art que de celui de la science.

La cohérence scientifique du domaine est juste en train de s'élaborer. Il s'agit essentiellement du domaine des milieux colloïdaux et de celui des matériaux hétérogènes dans lesquels les industriels de divers secteurs ont à partager, à identifier et à organiser avec des universitaires des problématiques communes.

Une concertation plus fréquente et plus intense est souhaitée, entre industriels et universitaires mais aussi entre technologues et physico-chimistes, qu'ils soient à l'université ou dans l'industrie. Les divers interlocuteurs se rejettent encore trop les causes de l'évolution lente des connaissances dans ces domaines identifiés : études fondamentales trop éloignées des conditions pratiques réelles (milieux concentrés, nombre élevé de composants, systèmes hors d'équilibre...) pour les uns, trop grande discrétion sur les problèmes réels traités, approche trop empirique et trop grande volatilité des problèmes pour les autres...