

L'impact sociétal des polymères et des matières plastiques

Perspectives et rôle de l'enseignement

Thierry Hamaide, Jean-Charles Mougénel, Gérard Pignault et Bernard Sillion

Résumé Les polymères permettent des sauts technologiques pour le développement de l'activité humaine mais leur caractère « chimique » crée des interrogations dans la société. Cet article a pour objet de fournir les éléments de réflexion pour un bilan bénéfices-risques du développement de ces nouveaux matériaux dont la structure générale a été reconnue il y a moins de cent ans. L'importance des polymères pour la résolution des grandes questions qui se posent au monde – eau et énergie –, mais aussi pour l'amélioration des conditions de vie au quotidien est évoquée et la nécessité d'une réflexion sur leur enseignement est discutée. L'introduction de plus en plus rigoureuse des techniques d'écoconception peut redonner confiance à une société souvent méfiante lorsque l'innovation vient de la chimie.

Mots-clés Matériaux polymères, impact environnemental et sociétal, écoconception.

Abstract **Societal impact of polymers and plastics: prospects and role of education**
The polymers enable technological leaps for the development of human activity, but their "chemical" nature creates questions in society. This article aims to provide arguments for a risk-benefit assessment about development of these new materials whose general structure was recognized there are less than one hundred years. The importance of polymers for the resolution of major problems in the world – water and power productions –, but also to improve the conditions of daily life are presented and the need to reflect on teaching is discussed. The introduction of increasingly stringent eco-design techniques can restore confidence to an often distrustful society when innovation comes from chemistry.

Keywords Polymer materials, societal and environmental impact, eco-design.

L'image des polymères dans la société

Dans le domaine des polymères, les découvertes fondamentales ont souvent été amorcées par des besoins industriels qui relèvent aussi bien des grands problèmes de la planète tels que l'énergie et les ressources en eau, que de ceux de la vie quotidienne tels que santé, alimentation, transport, communication, confort et loisirs, etc. [1]. Dans tous ces domaines, les macromolécules apportent des réponses significatives, et c'est ainsi que l'on a pu écrire que la société était entrée dans « l'âge des polymères ».

Cependant, pour l'opinion publique, le « plastique » a souvent une connotation péjorative à la fois en termes de qualité et d'impact environnemental. Il s'ensuit une vision sociétale globalement négative [2] sur la base de faits objectifs, par exemple la très mauvaise gestion des déchets de l'emballage, renforcée par l'incivilité notable de certains de nos concitoyens – le sac plastique dans nos campagnes, la genèse du 7^e continent due à la dispersion des plastiques dans l'océan –, qui ont terni l'image des matières plastiques. D'autre part, et de manière moins objective, la nature « chimique » des polymères, source de « pollution », suscite de nombreuses interrogations et inquiétudes.

Toutes ces inquiétudes doivent être prises en considération, mais la nécessaire analyse de l'impact environnemental doit se faire en termes de bilans bénéfices-risques. Il importe

pour cela de mieux connaître les effets du développement des polymères sur le développement des sociétés. On ignore en général que les plastiques ne consomment que 4 % de la production mondiale de pétrole et que leur utilisation permet d'économiser une quantité bien plus importante, en particulier pour les applications dans les transports lorsque l'on remplace des matériaux ferreux dont la densité est de l'ordre de 7 par des polymères de densités comprises entre 1 et 2. D'autre part, étant plus légers, ils produisent moins de déchets (moins de 1 % du poids total de déchets en Europe).

Les inquiétudes compréhensibles d'un certain monde associatif sont cependant prises en compte et le monde industriel s'attache à développer une démarche d'écoconception qui intègre l'environnement dès la phase de conception des produits et prend en compte toutes les étapes du cycle de vie des produits [3]. Cette démarche n'est ni un nouveau métier ni une discipline universitaire constituée, mais bien une approche nouvelle, qui se doit d'être intégrée aujourd'hui dans l'enseignement des polymères.

L'enseignement des polymères

Un enseignement transversal par nature

Les propriétés des matériaux polymères dépendent étroitement de la structure chimique et de l'organisation des

macromolécules qui les constituent liées à la mise en œuvre. La science des polymères procède donc essentiellement de ces trois disciplines scientifiques que sont la chimie, la physique et la mécanique. La chimie intervient pour la transformation des matières premières et dans les procédés de production. Physique et physico-chimie expliquent l'organisation de ces macromolécules et conçoivent les outils analytiques nécessaires à leurs caractérisations. La mécanique permet de comprendre les propriétés d'usage des matériaux polymères. L'enseignement des polymères ne peut donc être mono-disciplinaire, réduit à sa seule composante chimie macromoléculaire ou étude des propriétés mécaniques, pour ne citer que deux exemples. Cet enseignement est donc par nature transversal, ce qui le rend souvent difficile aux yeux de nombreux étudiants habitués à raisonner par disciplines bien définies.

Comme nous l'avons montré précédemment, la dimension sociétale est devenue incontournable, et il convient d'intégrer maintenant un nouvel élément basé sur cette démarche d'écoconception associée à l'analyse du cycle de vie, à travers un enseignement adapté à chaque cursus.

Quel rôle pour l'enseignement en vue d'une meilleure acceptation sociétale des polymères ?

La création de filières scientifiques orientées « développement durable » ou « chimie verte » peut interpeller l'enseignant dans la mesure où ces notions reposent davantage sur des postulats sociétaux que sur de réelles vérités scientifiques. La notion de « chimie verte » présente au moins l'avantage de montrer que les chimistes ont conscience de l'usage parfois irresponsable qui a pu être fait de leur science et qu'ils ont la volonté et les moyens d'y remédier. Cet aspect positif est illustré par de nombreux axes de la recherche actuelle et peut contribuer à un renouveau d'intérêt de la part des étudiants.

La prise en compte du développement durable affecte de nombreuses compétences et conditions d'exercices de ces compétences, d'où la nécessité d'un enseignement transversal adapté qui dépasse le seul domaine des polymères et milite en faveur de la création de filières matériaux clairement identifiées, dépassant par là les frontières habituelles de la chimie et de la physique, et permettant un dialogue constructif avec les toxicologues et écotoxicologues. Ainsi, l'écoconception doit s'inscrire en tant que compétence supplémentaire, acquise à travers une spécialisation par des personnes ayant déjà acquis les connaissances et compétences nécessaires dans les différents métiers de base. La formation initiale n'est donc pas la voie naturelle pour la recherche de ces compétences. Les prérequis nécessaires font de cet enseignement un enseignement transversal par nature.

Pour l'industriel, le fait sociétal étant admis, la priorité des formations est avant tout de fournir des chimistes compétents qui seront dès lors tout à fait capables d'intégrer la notion de durabilité de leurs innovations dans l'exercice de leur profession. L'enseignement de la chimie doit donc être large et complet afin de fournir aux étudiants la totalité de la compétence et du langage, favorisant la capacité à apprendre par soi-même et permettant de s'approprier les concepts et de les développer dans leur environnement professionnel.

Plusieurs cursus universitaires allant du BEP au master intègrent déjà lisiblement dans leur offre de formation cette approche pluridisciplinaire recherchée par l'industrie. L'ensemble des écoles de chimie regroupées dans la Fédération Gay-Lussac partagent cette vision de la formation.

Par ailleurs, afin de répondre plus spécifiquement aux besoins clairement exprimés par la plasturgie française, des outils de formation ont été développés pour les entreprises et les centres de formation, avec pour objectif l'information et la sensibilisation des jeunes en formation et des salariés aux problématiques du développement durable dans la plasturgie. Il existe actuellement plusieurs formations consacrant un nombre d'heures conséquent à l'enseignement de l'écoconception des matières plastiques au sens le plus large du terme.

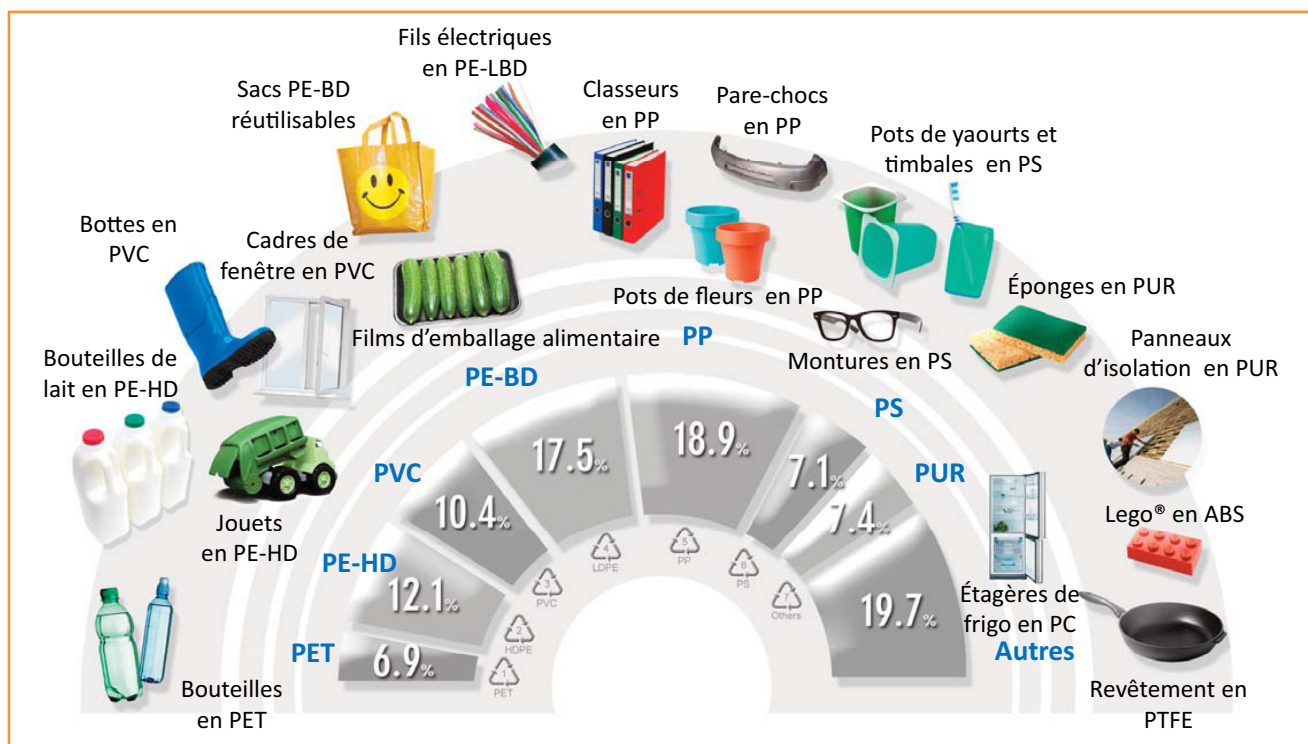
De très nombreux éléments permettant de construire un cours sur les polymères, tant orienté chimie que physique, sont maintenant disponibles en ligne. Il nous a semblé nécessaire de proposer ci-après quelques idées et chiffres complémentaires pouvant aider l'enseignant à introduire un cours dans une logique sociétale et mettre en avant quelques points éclairant les démarches pour demain.

Enfin, la compréhension et l'utilisation des nouveaux outils d'écoconception, à travers des projets tuteurés mettant en œuvre les logiciels gratuits ou de démonstration, doivent permettre aux nouveaux diplômés de devenir des acteurs sources de proposition pour cette acceptation sociétale.

Les polymères au service de la société

Quelques chiffres clés sont nécessaires à la bonne compréhension du rôle et des enjeux des matières plastiques dans la société et devraient être commentés dès les premiers cours. L'une des approches pourrait passer par la mise en évidence, dès le départ, du rôle des matériaux polymères dans la société, tant pour gérer les grands problèmes de la planète, tels que les ressources en eau et en énergie, que pour faciliter la vie quotidienne de tout un chacun. Si l'on a affaire à de petits effectifs, on peut demander à chaque étudiant de réfléchir à un point particulier et de l'exposer rapidement à l'ensemble de la classe. Cet exercice est très intéressant puisqu'il permet à chacun de s'exprimer et peut contribuer à forger un certain esprit de groupe. L'enseignant peut ensuite faire une synthèse des réponses et les replacer dans un cadre plus global, en s'appuyant sur quelques données socioéconomiques. Cette synthèse peut aussi être le point de départ de la présentation de l'ensemble du cours.

Les polymères sont utilisés à plus de 90 % pour faire des matériaux dont la plupart sont devenus incontournables (voir figure). La production de matières plastiques est bien plus importante que celle des autres matériaux et joue par conséquent un rôle essentiel dans l'économie et l'emploi. En 2013, la production mondiale de polymères a été de 299 millions de tonnes. L'Europe est bien placée au niveau mondial avec une production de 57 millions de tonnes. En ce qui concerne l'emploi, en prenant en compte l'ensemble du secteur, c'est-à-dire production des polymères, construction de machines dédiées à la transformation et industrie de transformation, le secteur a employé 1,45 million de personnes, ce qui place cette industrie en tête de celles qui contribuent à l'économie de l'Europe. Son chiffre d'affaires est de 320 milliards d'euros et se place dans le top 5 des secteurs les plus innovants [1]. Les deux tiers de la demande européenne viennent de cinq pays (Allemagne, Italie, France, Grande-Bretagne, Espagne). La plasturgie française est une activité qui a mieux résisté à la crise que celle des autres pays européens avec 3 860 entreprises (90 % de PME) dont 200 pour la production. Elle occupe aujourd'hui la quatrième place mondiale et le second rang européen, et emploie plus de 141 400 personnes [4].



Production européenne de polymères en 2013. Source : PlasticsEurope (PEMRG)/Consultic/ECEBD.

ABS : acrylonitrile-butadiène-styrène ; PC : polycarbonate ; PE-BD : polyéthylène basse densité ; PE-LBD : polyéthylène basse densité linéaire ; PE-HD : polyéthylène haute densité ; PET : poly(éthylène téréphtalate) ; PP : polypropylène ; PS : polystyrène ; PTFE : polytétrafluoréthylène ; PUR : polyuréthane ; PVC : poly(chlorure de vinyle).

Les polymères au service de la société pour les grands problèmes de la planète : l'eau et l'énergie

• Les polymères et l'eau

La population mondiale est actuellement de 7,2 milliards. La question de l'approvisionnement en nourriture, déjà d'actualité de nos jours, sera particulièrement importante en 2050 pour une population qui sera de l'ordre de 9,6 milliards. Les besoins en eau augmentent deux fois plus vite que la population, ce qui entraîne une mobilisation pour épargner et recycler l'eau consommée, mais oblige aussi à développer des procédés de production d'eau douce et d'eau potable. L'eau est abondante sur Terre, mais 97,2 % (l'eau de mer) est impropre à la consommation et le reste (l'eau douce) est très mal réparti dans le monde : 800 millions de personnes sont privées d'eau potable, 2,4 millions n'ont pas de système d'assainissement, 450 millions connaissent des périodes de pénurie d'après l'UNESCO [4-5].

En réponse à ces problèmes, l'utilisation des polymères est devenue incontournable pour la production d'eau potable (membranes de désalinisation de l'eau de mer à base de polymères aromatiques et hétérocycliques sous forme de fibres creuses asymétriques, polymères hydrosolubles de la famille des polyacrylamides floculants pour les stations d'épuration) et pour la gestion de l'eau (polymères superabsorbants pour la rétention d'eau dans l'agriculture, polyéthers à base de poly(oxyde d'éthylène) pour l'écoulement des eaux dans les sols).

• Les polymères pour la gestion de l'énergie

Depuis quarante ans, la consommation d'énergie a augmenté de plus de 40 % et l'évolution des pays émergents accélère cette tendance qui pose deux principaux pro-

blèmes : d'une part la raréfaction des matières premières, et d'autre part la production de gaz carbonique qui contribue au changement climatique. Les statistiques de l'IEA (International Energy Agency) pour l'année 2008 montrent que plus de 80 % de l'énergie primaire est d'origine fossile. En 2010, la quantité de CO₂ rejetée dans l'atmosphère a été de plus de 30 gigatonnes, ce qui conduit à une concentration dans l'atmosphère de l'ordre de 385 ppm.

Les besoins en énergie dans le monde ne sont pas équivalents dans toutes les régions. La réflexion sur l'évolution de la consommation d'énergie primaire fait l'objet de plusieurs hypothèses qui prennent en compte non seulement l'évolution des populations et l'évolution des PIB des différents pays, mais aussi la mise en place de politiques pour lutter contre le réchauffement climatique, c'est-à-dire le contrôle des émissions de gaz carbonique [6-7].

À l'horizon 2050, les combustibles fossiles tiendront encore une place importante en énergies primaires. À cela, il faut ajouter les réserves de gaz non conventionnels (gaz de schiste et de charbon) qui pourraient assurer une production de 120 à 150 ans [8]. Parmi les scénarios utilisés pour prédire les besoins de la demande en 2050, une hypothèse basée sur le contrôle du réchauffement implique la réduction dans les pays riches pour ne pas dépasser une consommation de 20 Gtep [9], soit 2,4 fois celle de 2009. Il est cependant vraisemblable que cette consommation sera dépassée compte tenu des difficultés de signer et d'appliquer des accords contre le réchauffement climatique.

Si l'on examine le rôle que jouent et peuvent jouer les polymères dans le domaine de l'énergie, on peut distinguer plusieurs axes : l'amélioration de la production de fuels fossiles, les matériaux pour le développement d'énergies alternatives, le stockage de l'énergie, les matériaux structuraux pour alléger les structures, ce qui permet des économies d'énergie.

Il n'est pas difficile pour l'enseignant de trouver de nombreux exemples que l'on peut dès lors développer à loisir selon le niveau de l'enseignement requis.

C'est indéniablement dans les transports que les polymères ont apporté le plus d'économies d'énergie, grâce à l'allègement des structures. Par exemple, une réduction de 10 % de la masse d'un véhicule entraîne une diminution de consommation du véhicule de 5 à 6 %, et donc une diminution des rejets de CO₂. En ce qui concerne les transports aériens, le remplacement de l'aluminium conduit à une diminution de poids de 20 % et à une économie de kérosène de l'ordre de 20 % en fonctionnement.

Les polymères dans la vie quotidienne

L'application la plus importante est l'emballage (hors emballage alimentaire) qui utilise plus de 40 % de la production des plastiques. Dans le domaine de l'emballage alimentaire – le nombre de matériaux plastiques en contact avec les aliments –, les polymères connaissent un fort développement car l'effet barrière à l'oxygène assure une bonne conservation des produits oxydables et évite les contaminations des viandes et légumes, avec de plus une transparence de l'emballage permettant d'examiner le produit [10].

Cependant, les temps de contact entre emballage et aliments sont en constante augmentation, contribuant à des débats de plus en plus vifs concernant l'exposition réelle des consommateurs (au sujet des migrations possibles des additifs et de leurs toxicités...), ce qui ne favorise pas la confiance des consommateurs. Les réglementations successives traitant des matériaux, dont les polycarbonates, illustrent parfaitement cette idée.

L'industrie du vêtement a été totalement transformée par l'arrivée des grands polymères tels que les polyesters et les polyamides. D'autres fibres techniques, comme les textiles imperperspirants ou les laines polaires, sont bien connues du grand public. Certains textiles techniques utilisent des fibres à hautes performances telles que les fibres de carbone, les aramides (Kevlar[®], Nomex[®]), le polyéthylène de très haute masse molaire (UHMWPE).

Enfin, des besoins importants dans de nouveaux matériaux textiles à fonctions multiples à haute valeur ajoutée sont clairement identifiés par les producteurs européens qui doivent faire face à la concurrence des pays à main d'œuvre bon marché. Les solutions technologiques passent par le développement de textiles techniques et fonctionnels (TTF, « smart polymers »). Ces TTF sont clairement identifiés [10] et répondent à une demande dans les domaines spécifiques tels que l'hydrofugation, la traçabilité, la protection UV, les applications bactériostatiques, etc., *via* des entités moléculaires ou nanostructurées adsorbées ou greffées chimiquement sur les fibres.

Par ailleurs, l'ensemble du domaine sportif a bénéficié des avancées techniques [11]. Outre les fibres textiles citées ci-dessus, les matériaux composites pour la production des skis, planches à voile, raquettes, bateaux, bicyclettes, etc., sont tous issus de matériaux polymères synthétiques.

Pour terminer, même si cela est en général moins connu du grand public, les polymères sont devenus incontournables dans tous les domaines de la santé, depuis les matériaux solides utilisés en chirurgie pour les prothèses, les lentilles, les cathéters, les poches à sang, jusqu'aux systèmes polymères dispersés développés pour la vectorisation de principes actifs et les diagnostics (tests de grossesse par exemple) [12-13]. Parmi tous ces dispositifs, certains sont à

usage unique (seringues, tubulures de perfusion...), alors que d'autres sont introduits dans le corps pour une durée *a priori* illimitée (prothèses articulaires, substituts vasculaires, cristallins artificiels, fils de suture...) et doivent donc être biocompatibles [14].

Quelles orientations pour le futur ?

Substitution des substances à risque, développement de nouveaux polymères et « nouveaux » procédés

La question de l'impact des produits chimiques sur l'homme et l'environnement fait l'objet du règlement européen connu sous le nom de REACH (enregistrement, évaluation et autorisation des substances chimiques), entré en application en 2007 [15-16]. Les polymères n'entrent pas dans le cadre de REACH, mais tous les polymères synthétiques renferment des molécules de monomère résiduel, dont certaines sont toxiques, qui peuvent être libérées lors de leur utilisation [17].

Une expertise demandée par l'ANR sur les conséquences de l'application de REACH sur les industries souligne le besoin de connaissances sur l'évolution physico-chimique des polymères dans leurs conditions réelles d'utilisation, sur la nécessité de bien définir les priorités en ce qui concerne la substitution des réactifs et des additifs de formulation en fonction des tonnages et de l'impact sur l'économie et sur les techniques de caractérisation à développer pour l'industrie du recyclage [18]. Ainsi, tous les acteurs de la chaîne de valeur sont concernés par le développement et la transformation de polymères dans le cadre du développement durable.

Une question souvent soulevée est celle de l'utilisation de la biomasse en remplacement des matières fossiles pour la production des polymères (cette question se pose en fait pour l'ensemble de la chimie). On a vu que la consommation de produits fossiles pour les polymères est bien inférieure à 10 % de la consommation totale qui est majoritairement destinée à l'énergie. Dans ces conditions, quelques questions méritent d'être débattues telles que celles-ci : le monde des polymères doit-il se soumettre à la mode du « bio » ? De même, un produit « bio » est-il « vert » ? [19]. Le développement durable implique-t-il des produits biosourcés, tels que l'isosorbide et ses esters gras ou encore l'acide succinique ? L'utilisation de polymères biodégradables offre une voie prometteuse pour certains emballages et les applications pour l'agriculture [20], mais est-ce globalement un mieux ?

Il faut insister ici sur le fait que le développement d'un nouveau polymère ne se produit que si celui-ci présente un ensemble de propriétés que les produits disponibles sur le marché n'offrent pas. Les technologies de pointe recherchent des matériaux nouveaux pour lesquels la démarche de découverte ne passe pas par un choix *a priori* de monomère. On voit par là que l'origine du réactif fossile ou biosourcé n'est pas déterminant pour développer un polymère à propriété spécifique à forte valeur ajoutée.

Il n'est pas certain que le développement de nouveaux vecteurs d'énergie, vital pour la planète, puisse se faire par la conversion des végétaux, d'une part parce que le sol sera de plus en plus sollicité pour nourrir l'humanité, et d'autre part parce que la conversion de cette matière sera fortement consommatrice d'énergie. Par ailleurs, la biomasse présente un grand intérêt dans d'autres domaines, car elle fournit des molécules dont les fonctionnalités sont intéressantes pour la



Cinquante ans de recherche sur les polymères : de la science vers l'industrie, le parcours exemplaire d'Alain Guyot

Directeur de recherche au CNRS, Alain Guyot est décédé en septembre 2014 à Grenoble. Sa carrière, longue de plus de cinquante ans, a largement contribué au développement de la science des polymères à Lyon et son audience était largement reconnue, tant au niveau national qu'international.

L'un de ses grands mérites est d'avoir compris très tôt, dès le début des années 1960, l'intérêt des relations avec l'industrie, alors que ce n'était pas la mode dans le monde universitaire à cette époque. Il était convaincu qu'une recherche amont de qualité pouvait contribuer utilement à la résolution des problèmes pratiques et économiques rencontrés par les industriels, à condition d'établir avec eux des relations de confiance respectant les exigences spécifiques de chaque partenaire.

On retrouve ce souci en permanence dans les divers travaux et actions qu'il a initiés et développés tout au long de sa carrière et qui présentent ainsi une assez grande cohérence malgré la multiplicité des sujets abordés.

Alain Guyot s'est intéressé, en lien avec les entreprises nationales concernées, aux mécanismes de synthèse de nombreux polymères industriels. Cela a été le cas des polyoléfines obtenues par catalyse Ziegler ou Phillips, mais aussi celui des (co)polymères vinyliques obtenus par polymérisation radicalaire, procédé plus ancien et de grande

importance industrielle, mais que les universitaires avaient alors quelque peu tendance à négliger. Ses équipes participeront ainsi activement au développement de la chimie radicalaire contrôlée.

Un autre exemple de recherche proche des préoccupations industrielle est celle qui a été menée sur la chimie du PVC pour identifier les défauts de structures et améliorer la stabilité thermique de ce polymère.

On citera enfin la thématique de la polymérisation en émulsion et des systèmes colloïdaux – qu'il a introduite dans ses équipes dans les années 1980 – qui a « irrigué » un très large éventail de secteurs industriels (peintures, adhésifs, papier, textiles...) et éveillé l'intérêt de nouveaux partenaires dans des domaines plus prospectifs comme le biomédical (création d'une unité mixte CNRS/BioMérieux).

Grâce à sa curiosité et à son goût pour les nouvelles thématiques, il a initié et animé de nombreux groupes de recherche coopératifs, nationaux et européens, notamment à caractère pluridisciplinaire.

Pour le développement de ces recherches, Alain Guyot a rapidement constitué autour de lui une équipe de permanents CNRS, d'abord au début de sa carrière dans le cadre de l'Institut de Recherches sur la Catalyse, puis au début des années 1980 lors de la création du Laboratoire des Matériaux Organiques à Solaize en lien avec l'Institut Français du Pétrole, enfin en participant au démarrage en 1995 du Laboratoire de Chimie et Procédés de Polymérisation, localisé dans la nouvelle école de chimie CPE de Lyon.

Toujours très attentif aux innovations et sachant en analyser le potentiel, il a fait évoluer son équipe en conséquence.

Tout cela ne doit pas occulter l'important rôle de formateur qu'a assuré Alain Guyot, d'une part par la mise en place d'un enseignement moderne sur les polymères dans diverses écoles d'ingénieurs lyonnaises, et d'autre part au travers du nombre considérable de thèses (plus d'une centaine) qu'il a dirigées. Une part significative de cadres actuels de l'industrie ou du milieu académique est issue de son laboratoire.

Il a également participé activement à la gestion de la recherche, en particulier au Comité national de la recherche scientifique.

Tous ceux qui ont eu le privilège de travailler ou de collaborer avec lui ont pu apprécier ses grandes qualités intellectuelles, sa puissance de travail, son éclectisme et son esprit de synthèse.

Roger Spitz, Alain Michel et Christian Pichot

chimie fine et la pharmacie, et certains polymères obtenus par fermentation ou à partir de monomères trouvent déjà des applications spécifiques et c'est dans cette direction que les recherches devraient s'orienter. Il est toutefois évident que la production des grandes familles de polymères continuera de se faire encore longtemps sur la base de matières fossiles [21].

Les innovations ne passent pas toutes par le développement de nouveaux produits, mais aussi par une augmentation du nombre de formulations pour améliorer la qualité du produit (« compounds »), par de nouvelles mises en œuvre, ainsi que par une utilisation croissante de matériaux composites, de nanomatériaux. Il faut également compter sur les innovations de procédés. À côté de l'acte chimique, les procédés de polymérisation contribuent aussi depuis longtemps (sans le revendiquer) au développement durable. Ainsi les polymérisations en milieu dispersé, qui sont des procédés déjà anciens, constituent une alternative d'autant plus intéressante qu'elles permettent de contrôler plus facilement la température, la viscosité globale du milieu réactionnel et limitent

les COV. Enfin, et ce n'est pas le moindre des avantages, elles permettent de récupérer en fin de réaction des polymères sous une forme « prête à l'emploi » [22]. D'un autre côté, l'extrusion réactive connaît aujourd'hui des développements importants avec des machines équipées en ligne de contrôles analytiques.

L'écoconception, vers une éco-innovation

Un aspect important de l'écoconception consiste à s'intéresser à des questions telles que : comment identifier la toxicité d'un composant ? Comment déterminer le taux de recyclabilité ou de valorisation d'une matière plastique ? Comment connaître l'empreinte carbone de tel produit ? L'écoconception doit donc prendre en compte chaque étape de la vie d'un matériau, qu'il s'agisse de biens ou de services.

Toutes les entreprises sont directement concernées par cette démarche. Les avantages sont nombreux tant pour l'entreprise que pour le consommateur, avec des produits

plus durables et économiques, moins nocifs pour l'environnement et la santé. Il s'agit tout à la fois :

- de mieux maîtriser les risques et les coûts liés au cycle de vie des produits ;
- d'anticiper les attentes naissantes des donneurs d'ordre ou des consommateurs, favorables à une meilleure prise en compte de l'environnement ;
- de faire de l'environnement un facteur nouveau de dynamisation et de créativité lors des processus de création et de conception de produits.

En conclusion, les polymères sont désormais incontournables pour résoudre des problématiques aussi fondamentales que le droit à l'eau, très mal répartie sur notre planète, et à l'énergie, toujours plus chère, et d'autre part pour nous aider dans notre vie quotidienne. Cependant, le développement de nouveaux matériaux ou nouvelles applications doit de plus prendre en compte les inquiétudes de la société liées aux questions de santé et de respect de l'environnement, ce qui passe par une meilleure compréhension de leur fonctionnement et de leurs interactions avec l'environnement. L'écoconception s'avère aujourd'hui obligatoire et doit donc trouver sa place à tous les niveaux de l'enseignement.

Références

- [1] www.plasturgieducation.org/developpement/developpement-durable.php
- [2] Joignot F., Plastique, l'ennemi intime, *Le Monde Magazine*, 19 sept. 2010.
- [3] www.ademe.fr
- [4] UNESCO, L'eau pour les hommes, l'eau pour la vie – Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau, 2003, unesdoc.unesco.org/images/0012/001295/129556f.pdf
- [5] www.cieau.com/les-ressources-en-eau/dans-le-monde/ressources-en-eau-monde
- [6] Fiche pédagogique « Consommation d'énergie finale dans le monde », www.connaissancesdesenergies.org/fiche-pedagogique/consommation-d-energie-finale-dans-le-monde-0 ; Brown J.A. *et al.*, Energetic limits to economic growth, *BioScience*, 2011, 61(1), p. 19.
- [7] Bouneau S. *et al.*, Construction d'un monde énergétique en 2050, *Reflète de la Physique*, 2013, 36, p. 30.
- [8] www.total.com/fr/dossiers/gaz-de-schiste
- [9] www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/984000168.pdf
- [10] Vitrac O., Goujon A., Emballages alimentaires : de nouvelles directions pour le contrôle de la migration des additifs et résidus, In *Impact environnemental des matières plastiques. Solutions et perspectives*, T. Hamaide, R. Deterre, J.F. Feller (coord.), Hermès Lavoisier, 2014, Chap. 13, p. 327.
- [11] Némoz G., Roland F. (coord.), Numéro spécial « Fibres et textiles chimiques : matériaux du XXI^e siècle », *L'Act. Chim.*, 2012, 360-361 ; *La chimie et le sport*, M.-T. Dinh-Audouin, R.A. Jacquesy, D. Olivier, P. Rigny (coord.), EDP Sciences/Fondation de la Maison de la Chimie, Collection Chimie et..., 2011.
- [12] www.inserm.fr/thematiques/technologies-pour-la-sante/dossiers-d-information/biomateriaux
- [13] Delair T., Elaissari A., Perrin A., Mandrand B., Les polymères de synthèse, supports du diagnostic médical, *L'Act. Chim.*, 2003, 270, p. 79.
- [14] Ball V., Les polymères utilisés dans le domaine des biomatériaux : de la fonctionnalisation de surface à l'ingénierie tissulaire, *L'Act. Chim.*, 2007, 310, p. 20.
- [15] REACH, Règlement (CE) n° 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil, 18 déc. 2006.
- [16] ECHA, Guide pour les monomères et les polymères, 2012, www.echa.europa.eu/documents/10162/13632/polymers_fr.pdf
- [17] Yang C.Z., *et al.*, Most plastic products release estrogenic chemicals: a potential health problem that can be solved, *Environ. Health Perspect.*, 2011, 119, p. 989.
- [18] Sillion B., Normand A., de Guillebon B., Conséquences de l'application du règlement REACH pour les polymères, *L'Act. Chim.*, 2012, 359, p. 4.
- [19] Talon O., Les bioplastiques sont-ils verts ?, In *Impact environnemental des matières plastiques. Solutions et perspectives*, T. Hamaide, R. Deterre, J.F. Feller (coord.), Hermès Lavoisier, 2014, Chap. 6, p. 141.
- [20] Avérous L., Formulation et mise en œuvre de matériaux multiphasés biodégradables et biosourcés : les matériaux à base d'amidon plastifié, in *Impact environnemental des matières plastiques. Solutions et perspectives*, T. Hamaide, R. Deterre, J.F. Feller (coord.), Hermès Lavoisier, 2014, Chap. 9, p. 209.
- [21] Sillion B., Chimie et développement durable, *L'Act. Chim.*, 2011, 353-354, p. 18.
- [22] Hamaide T., Bourdelet C., Lager J., Schaal H., Thibaut J.-B., La synthèse des polymères dans l'eau : une réponse ancienne pour une nouvelle éco-conception, *L'Act. Chim.*, 2014, 385, p. 36.



T. Hamaide



J.-C. Mougenel



G. Pignault



B. Sillion

Thierry Hamaide (auteur correspondant)

est professeur à l'Université Claude Bernard Lyon 1¹. Il est membre de la commission Enseignement du Groupe Français des Polymères et de la division Enseignement-Formation de la SCF.

Jean-Charles Mougenel

est maître de conférences à l'École Nationale Supérieure de Chimie de Mulhouse². Il est membre de la division Enseignement-Formation de la SCF.

Gérard Pignault

est directeur de l'École Supérieure de Chimie Physique Électronique de Lyon, CPE Lyon³.

Bernard Sillion

est membre de la division de Chimie industrielle de la SCF.

¹ Université Claude Bernard Lyon 1, Ingénierie des Matériaux Polymères, Polytech Lyon, F-69622 Villeurbanne Cedex.

Courriel : thierry.hamaide@univ-lyon1.fr

² École Nationale Supérieure de Chimie de Mulhouse, 3 rue Alfred Werner, F-68093 Mulhouse Cedex.

³ CPE Lyon, 43 bld du 11 Novembre 1918, F-69100 Villeurbanne.



102 avenue Georges Clemenceau - 94700 MAISONS ALFORT

Tél. : 01 43 53 64 00 - Fax : 01 43 53 48 00

edition@edif.fr - www.edif.fr