

De l'aube des polymères au cinquantenaire du GFP

Le Groupe Français d'Études et d'Applications des Polymères (GFP) célèbre cette année ses cinquante ans.

La science des polymères s'est constituée et a été reconnue comme telle il y a moins d'un siècle ; une science par essence originale et très pluridisciplinaire puisqu'elle traite d'un seul élément de base, la *macromolécule*, une entité chimique inattendue qui a soulevé l'incrédulité et lancé dans la joute rhétorique nos grands chimistes du début du XX^e siècle. Une entité dont le concept expliquait nombre des observations expérimentales du siècle précédent et qui ouvrait une nouvelle chimie, en particulier par la diversité des voies de synthèse à imaginer, puis par la mise au point de l'élaboration industrielle de nombreuses variétés de matériaux. Des matériaux organiques dont la compréhension des comportements physico-chimique, physique, mécanique et rhéologique allait conduire à de nouvelles approches de la physique des fluides visqueux, des solides vitreux, semi-cristallins ou totalement cristallisés. Ces macromolécules et leurs assemblages allaient devenir de remarquables objets d'étude pour nos amis physiciens.

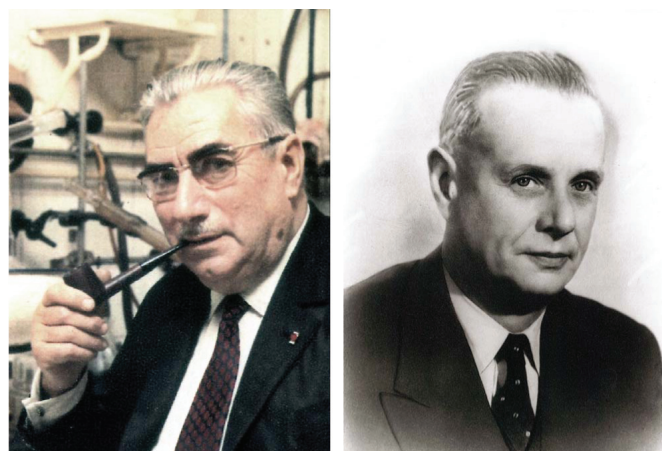
Bien sûr, un rapide développement de la connaissance académique dans ce domaine s'en est immédiatement suivi, associé à la mise au point et à la production de quelques grands polymères commerciaux, mais aussi stimulé à la fin des années 1930 par les embargos de temps de guerre – efforts sur le caoutchouc synthétique, GR-S (États-Unis), Buna (All.), etc.). La recherche, fondamentale et appliquée, dans tous les domaines de la chimie et de la physique des polymères a véritablement explosé à la fin des années 1940, rassemblant en France suffisamment de chercheurs chimistes, physiciens, mécaniciens et industriels producteurs/transformateurs pour que se dessine une nouvelle communauté scientifique associant étroitement toutes ces disciplines : le GFP allait naître en 1970.

L'histoire du GFP serait bien incomplète si on ignorait le contexte international, qui a conduit à la genèse de la science des polymères avec toutes ses composantes pluridisciplinaires (voir l'article de D. Fauque p.16), et national avec l'implantation de cette science dans les domaines de la recherche académique et ses retombées industrielles.

L'évolution de la science des polymères en France des années 1950 à nos jours

La recherche fondamentale, essentiellement publique (CNRS-universités)

Le concept de macromolécule émis par Hermann Staudinger dans les années 1920 a nécessité bien des années pour se voir accepté. Les tenants des agrégats de particules à fortes interactions (colloïdes) insistaient – Hermann Mark lui-même au début ! – sur l'absence de preuves expérimentales de l'existence de longues chaînes de fortes masses molaires. Aucune approche physique de l'époque ne permettait de mesurer de telles masses. Ce n'est que dans les années 1925-35 que les évidences théoriques et expérimentales



Le chimiste Georges Champetier (à gauche, crédit : ESPCI – Centre de Ressources historiques, DR) et le physicien Charles Sadron (à droite, crédit : ICS, DR), pionniers des polymères en France.

du concept de « macromolécule » ont fini par faire l'unanimité, au moins parmi les polyméristes. Cette même période, associée au développement des analyses structurales (RX) et spectroscopiques (IR, Raman), a vu apparaître les premières techniques de détermination des fortes masses molaires comme les mesures de viscosité ou encore l'ultracentrifugation. Parallèlement, l'émergence de nouvelles théories compatibles avec le seul concept de macromolécule comme celle de la nature cinétique de l'élasticité caoutchoutique (K.H. Meyer [1-2]), soutenue par la loi reliant l'entropie (Boltzmann) aux caractéristiques dimensionnelles d'une chaîne (W. Kuhn [3]), a balayé les dernières réticences.

En France, dans ces années 1920-40, la recherche académique sur ce domaine controversé demeure très limitée. Pour ce qui concerne la chimie, Georges Champetier (1905-1980), installé à l'ESPCI et considéré comme le pionnier de la chimie des polymères en France, soutenait résolument la théorie macromoléculaire depuis ses premiers travaux (1928) sur les polymères naturels à fortes interactions entre chaînes. Avec ses élèves, il a beaucoup contribué à la connaissance de la cellulose tant dans ses aspects structuraux (RX) que réactionnels (composés d'addition avec l'eau, les bases et les acides). Il élargira vite ses recherches vers les protéines fibreuses (kératine, élastoïdine), puis sur les polyamides, le polyamide 11 (Rilsan[®]) entre autres. On lui doit par exemple la mise en évidence de la relation linéaire entre l'intensité des interactions hydrogène intercaténaïres et la température de fusion de ces polymères (semi)cristallins [4].

La physique des polymères est de son côté associée à Charles Sadron (1902-1993), qui étudiait la biréfringence d'écoulement laminaire de divers fluides, anisotropie attribuée aux fluctuations dimensionnelles des « particules » en suspension plutôt qu'à leur orientation. Des « particules » que nos physiciens baptiseront « particule équivalente » lorsqu'il s'agira d'une macromolécule isolée. Dans cet esprit, dès 1937, l'idée plus générale est venue, à lui comme à d'autres – Paul J. Flory, Maurice L. Huggins – d'atteindre par des méthodes

physiques les grandeurs caractéristiques (masses et dimensions moyennes) de cette macromolécule ou « particule équivalente » en solution diluée [5]. La porte était ouverte au domaine des mesures physiques sur les polymères dont certaines seront plus tard brillamment développées au CRM/ICS, comme la chromatographie d'exclusion stérique (SEC) et son étalonnage universel [6], puis la diffusion des neutrons aux petits angles (DNPA) dans le cadre d'une collaboration avec le LLB-Saclay et le Collège de France [7]. Mais cette porte était encore plus ouverte aux grandes théories de la physique des polymères, qu'il s'agisse des solutions « diluées », « semi-diluées », des gels ou du solide, des lois d'échelle à la reptation (P.G. de Gennes [8]) et à la rhéologie. L'urgent était d'abord d'atteindre les caractéristiques des macromolécules, et dès 1946, Sadron organise à Strasbourg le premier colloque international sur les hauts polymères, puis crée en 1947 le Centre d'Études de Physique des Macromolécules de l'Université. Mais le besoin était criant, en France comme dans le monde, d'une forte synergie entre les chimistes, concepteurs de macromolécules de mieux en mieux définies dans leurs structures (configurations, masses, distributions), et les physiciens qui, non seulement les caractérisaient, mais développaient les lois de cette toute nouvelle physique. Cette indispensable association d'une chimie de synthèse et d'une physique originales sur ce nouvel objet moléculaire qu'était la macromolécule ouvrait le vaste champ de ce qui deviendra la science des polymères.

En 1954 est inauguré à Strasbourg, à l'initiative de Charles Sadron et sous l'impulsion de Georges Champetier, un des tout premiers laboratoires propres du CNRS, le Centre de Recherche sur les Macromolécules (CRM), qui deviendra bien plus tard l'actuel Institut Charles Sadron (ICS). Un laboratoire délibérément pluridisciplinaire : on y retrouve la chimie de synthèse (P. Rempp), la physique des solutions liant les grandeurs statistiques d'une chaîne à sa structure (H. Benoît), les méthodes de caractérisation (C. Wippler, entre autres), et même la biophysique des macromolécules biologiques. Un an plus tard sera introduite la physique du polymère solide, vitreux et cristallin avec A.J. Kovacs.

À cette époque de genèse, les contenus et les besoins de la science des polymères n'étaient toujours pas vraiment compris et encore moins encouragés par les disciplines académiques « traditionnelles ». Néanmoins, deux chaires dédiées « polymères » furent créées, la première à la Sorbonne (Chimie macromoléculaire, 1953), attribuée à Champetier, et la seconde à Strasbourg (Physico-chimie macromoléculaire, 1955), attribuée à Sadron. C'était, enfin, la reconnaissance affirmée du besoin de diffuser et transmettre les aspects essentiels de cette nouvelle science.

Champetier développe alors le site parisien avec le même esprit d'une nécessaire pluridisciplinarité en localisant la chimie de synthèse à la Sorbonne (P. Sigwalt) et la physico-chimie (J. Néel), puis la physique du polymère solide et du matériau (L. Monnerie) à l'ESPCI, constituant ainsi une grosse unité associée au CNRS qu'il a dirigée jusqu'en 1973. L'ensemble parisien et le CRM sont demeurés longtemps les principaux pôles Polymères français, avec des thèmes complémentaires pour la physico-chimie mais voisins pour la chimie de synthèse, car partout dans le monde les laboratoires de chimie des polymères se lançaient dans l'élaboration de macromolécules « sur mesure », non pas principalement pour livrer des objets modèles à nos amis physiciens, mais pour aller vers des matériaux aux propriétés maîtrisées.

C'était la grande époque de la polymérisation anionique « vivante » (M. Szwarc, 1956) qui ouvrait au monde entier l'accès aux macromolécules presque parfaitement définies (quel rêve !) et dont les concepts, appliqués à tous les types de polymérisation, se sont largement développés et amplifiés jusqu'à maintenant.

Mais – et heureusement –, l'arborescence thématique galopante de cette science et sa forte dynamique dans le contexte des Trente Glorieuses ont généré l'éclosion de nombreux laboratoires partout en France. Jusqu'au début des années 1960, on identifiait les deux pôles précédents accompagnés par quelques petites équipes travaillant sur des thèmes spécifiques (A. Chapiro et M. Magat qui dirigeait le centre de Bellevue à cette époque, radiochimie-CNRS-Bellevue ; ou encore A. Banderet et G. Riess pour la synthèse à l'ENSC Mulhouse).

Dans la décennie 1960, six nouveaux laboratoires polymères sont apparus, deux importantes unités propres du CNRS, le CERMAV-Grenoble (D. Gagnaire, 1966) et le CRPCSS-Mulhouse (J.-B. Donnet, 1967) devenu l'actuel Institut des Matériaux (IS2M), mais aussi l'École d'Application des Hauts Polymères (EAHP Strasbourg, C. Wippler, 1963), le pôle INSA-Lyon (1962) également à orientation appliquée avec son Laboratoire de chimie macromoléculaire (J. Golé) devenu l'actuel laboratoire Ingénierie des Matériaux Polymères (IMP), enfin le laboratoire de Chimie macromoléculaire du Mans (C.P. Pinazzi, 1963) et celui de Lille (C. Loucheux, 1968). On notera que la DGRST, qui apportait à l'époque une importante contribution financière, s'était dotée d'une section Polymères, reconnaissant ainsi l'importance de la discipline.

Les décennies qui ont suivi ont vu le nombre d'unités ou équipes isolées à vocation principale polymères croître de façon spectaculaire sur l'ensemble du territoire national, passant de 16 unités en 1970 à 47 en 1980 et 55 en 1990. Elles ne sont plus que 32 en 2020, conséquence des récentes concentrations et restructurations dans la recherche académique [9]. Par contre, le nombre de chercheurs (CNRS/ES) qui en France se consacrent aux polymères a suivi une progression forte et continue, passant de 280 (57 % CNRS) en 1980 à 500 (41 % CNRS) en 1990 et à 720 (36 % CNRS) en 2020 [9]. Il en va de même pour le nombre global de doctorants et postdoctorants qui croît de 195 en 1980 à 550 en 1990 et jusqu'à 650 en 2020. Ces données traduisent à n'en pas douter l'intérêt scientifique toujours suscité par la science des polymères en général, mais aussi une interaction de plus en plus forte avec l'industrie comme le montre la croissance du nombre de doctorants depuis la fin des années 1980.

L'industrie des polymères en France, des balbutiements à l'époque actuelle

Mise à part la fabrication de la galalithe par réticulation de la caséine par le formol, les premières productions industrielles françaises à la fin du XIX^e siècle et jusque dans les années 1920-30 ont essentiellement tourné autour des dérivés de la cellulose, en particulier la nitrocellulose avec le collodion et le celluloid, première matière plastique dérivée aux multiples usages (et inconvénients), puis la soie artificielle, cellulose régénérée soit à partir du collodion (soie Chardonnet), soit à partir de son xanthate (viscose, fibrane, rayon), ou encore l'acétate de cellulose puis son dérivé, le Rhodoïd, qui survivra en France jusque dans les années 1980. Une passionnante aventure pour laquelle le lecteur pourra se reporter à l'imposante compilation de J.-M. Michel [10].

En France, la production des premiers grands polymères synthétiques a démarré à partir des années 1930, en parallèle avec celles des pays étrangers (IG Farben, ICI, Dow, etc.), soit sous agrément soit dans les créneaux demeurés ouverts (par ex. PS « thermique » Rhodolène, 1938-1947). On retrouve souvent aux commandes la SCURP, Société Chimique des Usines Rhône Poulenc, issue de la Société Chimique des Usines du Rhône, mais dès 1947 les grandes sociétés – Saint-Gobain, AFC-Pechiney, Kuhlmann, Progil, Ugine, Charbonnages de France, etc. – s'intéressent à la production sur notre territoire de la plupart des polymères de commodité. Pour tous ces polymères, les implantations donnent lieu à de véritables sagas de création-fusion-absorption de sociétés, comme par exemple celle de la production des monomères chlorés et du PVC impliquant une quinzaine de sociétés de 1940 jusqu'à 2000, comme illustré par J.-M. Michel [11].

Au même titre que la chimie, la production des polymères en France s'est fortement restructurée dans les vingt dernières années. Au fil des démantèlements, fusions et rachats, on observe un recentrage progressif sur les deux acteurs principaux de la production sur notre territoire, à savoir Arkema, issu en 2000 de la réorganisation de la branche Chimie de Total, et Solvay, après sa reprise des activités Rhodia en 2011. En 2012, Arkema a cédé son activité vinyliques chlorés et chloro-chimie reprise par Kem One, traduisant ainsi sa volonté de se concentrer sur les polymères de spécialité. Bien sûr, il faut également prendre en compte l'activité élastomères de Michelin, d'abord un transformateur mais aussi un chimiste de synthèse qui pourvoit pour partie à ses propres besoins et mise sur l'avenir « vert » en jouant sur le butadiène issu du bioéthanol pour réduire l'empreinte carbone des pneumatiques – programme BioButterfly 2011, avec l'Ifpen, Axens, l'Ademe, et démonstrateur opérationnel en 2021 sur le site de Bassens.

La vision industrielle du futur

Les polymères ont une longue durée de vie et conduisent à des pollutions visibles lorsqu'ils sont utilisés en masse et jetés dans l'environnement. Face aux 710 millions de tonnes de déchets plastiques accumulés dans les écosystèmes marin et terrestre [12], toutes les sociétés liées aux polymères se concentrent sur le recyclage, les intermédiaires biosourcés, mais aussi sur le développement des performances dans des domaines très techniques. Les visions de producteurs comme Arkema et Solvay vont ouvertement dans ce sens : l'innovation se concentrera sur ces domaines plus que sur la recherche de nouvelles familles de polymères industriels issues de ressources fossiles.

Pour les polymères de commodité (emballages et dispositifs jetables), les objectifs sont le recyclage, les matériaux biosourcés de même performance, les nouvelles synthèses catalytiques respectueuses de l'environnement – voire même d'hypothétiques polymères issus du CO₂ –, mais aussi une réduction notable de leurs usages par le développement de solutions alternatives, et (rêve ?) un comportement citoyen plus respectueux dans les usages.

Les polymères techniques et de spécialité offrent des solutions durables dans quasiment tous les domaines de notre vie quotidienne. On retrouve là encore un intérêt croissant pour les polymères biosourcés, mais aussi pour de nouveaux grades de matériaux au plus près des applications par des synthèses (copolymérisation par ex.) ou des formulations adaptées.

Les polymères du futur, de hautes performances, doivent offrir une très large palette de solutions dans le domaine des matériaux avancés, mais également être conçus pour répondre aux grands enjeux sociétaux que sont :

- le réchauffement climatique, avec des polymères et de nouvelles technologies pour la production d'énergie (photovoltaïque, piles à combustible) et le stockage (batteries, électrolytes, séparateurs), pour le développement de l'hydrogène et des matériaux adaptés au stockage et à la distribution sous pression, pour la recherche d'allègement et la substitution des matériaux métalliques dans la construction et les transports de tous types (par ex. composites à renforts fibreux continus), tout en présentant une bonne résistance aux conditions extrêmes (corrosion, température) et en permettant une réduction des émissions de CO₂ ;
- l'accès généralisé à l'eau potable (membranes, filtration, désalinisation, purification, réseaux de distribution durables, etc.) ;
- les besoins en dispositifs médicaux adaptés au vieillissement croissant de la population (alternatives au métal, biotolérance et biocompatibilité, stérilité, durabilité, etc.) ;
- les nouvelles technologies de l'information et de la communication où les polymères ont une place essentielle (composants, électronique imprimée, écrans, fibres optiques, etc.) ;
- la fabrication additive, avec le développement d'une gamme croissante de polymères adaptés sur mesure pour l'impression 3D industrielle.

Mais les grands défis immédiats demeurent le recyclage, le glissement vers les précurseurs (voire les polymères) biosourcés, la biodégradabilité, sans oublier les outils de modélisation pour la prévision et/ou l'amélioration des performances dans une optique de réduction de l'empreinte carbone et dans une démarche globale vers l'intelligence artificielle.

Le Groupe Français des Polymères, de la création à la maturité

C'est au physicien André Kovacs, directeur de recherche au CNRS, en activité au Centre de Recherches sur les Macromolécules (CRM) de Strasbourg, que nous devons la création du Groupe Français d'Études et d'Applications des Polymères (GFP) en 1970. Ce chercheur de renommée internationale, auteur d'une théorie de la transition vitreuse, Prix de physique des polymères de l'American Physical Society en 1986, avait constaté que la France était l'un des derniers grands pays de la recherche à ne pas avoir de société regroupant scientifiques et industriels du monde des polymères. Il avait décidé de pallier cette carence et, cherchant un président pour la future société, il s'était tout naturellement tourné vers Georges Champetier qui, à l'époque, était l'incontournable de la discipline.

Champetier avait été en effet l'un des tout premiers chercheurs de la science des polymères en France. Sous la direction de Georges Urbain, dans les années 1930, il avait préparé et soutenu une thèse sur l'hydratation de la cellulose et avait poursuivi ses recherches dans ce domaine. En 1954, alors directeur général adjoint du CNRS, il avait aidé Charles Sadron à concrétiser son idée de création à Strasbourg d'un institut réunissant toutes les sous-disciplines de la science macromoléculaire, le CRM. Enfin, en 1970, il était le porte-parole idéal auprès des instances académiques et industrielles.

Il fut décidé que le GFP aurait son siège à Strasbourg, c'était là un choix raisonné. En premier lieu, cela rendait hommage



À gauche : JEPO 1 à Mittelwhir (68) en 1972 (crédit : GFP, DR) ; à droite : JEPO 47 à Latresnes (33) en 2019 (crédit GFP, DR).

à Sadron, qui avait été à l'origine du premier institut sur les polymères en France.

Mais il y avait aussi des considérations plus basement matérielles. En effet, la législation relative aux associations leur était beaucoup plus favorable en Alsace et, surtout, le CRM était la structure comprenant le plus grand nombre de polyméristes en France, offrant ainsi un réservoir de secrétaires généraux potentiels, indispensables au bon fonctionnement de la société. Durant les cinquante années de vie du GFP, ce choix s'est révélé particulièrement judicieux.

Il fut aussi décidé que la présidence du GFP serait alternativement à la charge d'un universitaire et d'un industriel. Ce fut là aussi une vision prospective positive, qui revint à impliquer le milieu industriel dans le fonctionnement de la société, pour le plus grand bien des deux parties, en particulier celui des laboratoires de recherche universitaires et de leurs étudiants. Dès le départ, le GFP connut un équilibre entre ses membres industriels et universitaires, ce qui est rare dans les sociétés savantes scientifiques.

La première assemblée générale – qui fut donc l'assemblée constitutive – se réunit à Paris les 26 et 27 novembre 1970. Il y eut 180 membres fondateurs individuels et quelques adhésions collectives qui permettaient à une structure de proposer un grand nombre d'adhérents sans avoir à acquitter les cotisations individuelles à taux plein. C'était relativement peu en considération du nombre de membres potentiels...

Georges Champetier (président), Charles Sadron et René Riou (vice-présidents), André Kovacs (secrétaire général), Constant Wippler (trésorier) et leurs adjoints formaient le cœur de cette nouvelle société savante dont l'audience allait croître pendant de nombreuses années : dès 1971, le GFP comptait 259 adhérents lors de l'assemblée générale de Strasbourg pour doubler cinq ans après. La pérennité était assurée et le GFP a même atteint les mille membres dans les années 2000. Si une lente érosion s'est manifestée durant la dernière décennie, due d'une part à la dilution progressive d'une science que l'on retrouve partout et d'autre part au remodelage tant des structures de recherche académique que du contexte industriel, le GFP n'en demeure pas moins une des plus importantes et actives sociétés savantes françaises.

Très rapidement après la création, des initiatives allaient voir le jour, à l'instigation de sociétés imaginatives. Ainsi, dès 1972, François Schué, Bernt Kaempf et Nicolas Spassky proposaient d'organiser annuellement des Journées d'étude des

polymères (JEPO), inspirées des JECO de la chimie organique. Les JEPO, d'une durée d'une semaine, étaient initialement réservées à des chercheurs de moins de 40 ans, en poste dans les laboratoires universitaires ou dans l'industrie. La première édition eut lieu en Haute-Alsace, à Mittelwihr, en 1972. Les présents encore vivants en conservent un souvenir ému. Et nous en sommes, pour ce cinquantième, à la 48^e édition !

Allaient aussi voir le jour les commissions, dont la commission « Enseignement » qui fut confiée à la présidence de Henri Benoit dans un premier temps, puis à celle de Marguerite Rinaudo ; cette dernière l'a animée avec dynamisme et un grand succès pendant de très nombreuses années. À l'actif de cette commission toujours très active, l'organisation de stages pédagogiques prolongés par l'édition de livres pour les enseignants, la proposition de programmes actualisés d'enseignement sur les polymères au niveau universitaire, la préparation et la mise à disposition de documents audiovisuels associés, la traduction en français des règles de nomenclature de l'IUPAC, la mise en place d'un prix de thèse annuel, et bien d'autres actions.

Autre structure dérivée, la cellule de veille scientifique et technologique (V2P) qui, depuis sa création en 1999 à l'initiative de Jean-Claude Daniel, met en lumière pour la communauté des polyméristes les grandes actualités et avancées du moment.

Au cours du temps, la multiplication des structures de recherche sur les polymères allait conduire à la création de « succursales » du GFP, sous la forme de sections locales. Elles couvrent aujourd'hui la quasi-totalité du territoire national, preuve de la vitalité non seulement de la science mais aussi de la technologie des polymères.

Enfin, compte tenu de l'implication des polymères dans une multitude de domaines scientifiques ou industriels, le GFP s'est ouvert et a établi des liens et conventions avec d'autres sociétés. C'est ainsi qu'il est devenu division de la Société Chimique de France en 1990, de la Société Française de Physique en 2002, et est membre permanent de la Fédération européenne des polymères (EPF). Il entretient également des relations suivies avec les autres sociétés à caractère plus appliqué et plus matériaux dans le domaine de l'utilisation des polymères (SFIP, AFICEP, SFGP, GF Rhéologie, etc.).

Il s'est en outre rapproché de sociétés étrangères sœurs (Belgique, Italie, Espagne, Canada...) de manière à organiser périodiquement des manifestations scientifiques communes.

Bien avant ses cinquante ans d'existence, le GFP est devenu une structure reconnue aux plans national et international, et l'intrusion des polymères dans les domaines de haute technicité faisant appel à des matériaux de plus en plus complexes ne peut que nous rassurer quant à leur avenir et à celui du groupe.

Un défi de réputation

La science des polymères et ses applications ont connu un développement considérable en moins d'un siècle. On trouve ses applications dans tous les aspects de la vie courante et dans les domaines de la plus haute technicité.

Ne nous cachons cependant pas le défi auquel sont confrontés les polyméristes. Les matières dites « plastiques », par l'importance économique qu'elles ont prise et leur stabilité temporelle, sont devenues le matériau honni du XXI^e siècle. La pollution qu'elles engendrent apparaît de jour en jour plus visible et réclame une solution pressante. Certains polymères de grande diffusion sont d'ores et déjà condamnés, les autres devront être modifiés pour répondre à la demande unanime. De nouveaux polymères vont voir le jour – en particulier ceux issus de la biomasse –, qui devront tenir compte des nouvelles exigences liées à l'environnement. La tâche paraît immense mais la nécessité d'une solution l'est encore plus.

Polyméristes de tous bords, unissez-vous ! Et bon vent au GFP pour la cinquantaine à venir !

[1] K.H. Meyer, G.V. Susich, E. Valko, The elastic properties of high polymers and their kinetic significance, *Kolloid Z.*, **1932**, 59, p. 208-216.

[2] K.H. Meyer, C. Ferri, Sur l'élasticité du caoutchouc, *Helvetica Chemica Acta*, **1935**, 18, p. 570-589.

[3] W. Kuhn, Über die Gestalt fadenförmiger Moleküle in Lösungen, *Kolloid Z.*, **1934**, 68, p. 2-15.

[4] G. Champetier, J.-P. Pied, Sur quelques propriétés physiques des polyamides, *Makromol. Chem.*, **1961**, 44, p. 64-70.

[5] Ch. Sadron, Relation of intrinsic viscosity of polymer solutions to degree of polymerization and temperature, *J. Polymer Sci.*, **1948**, 3, p. 812-828.

[6] Z. Grubizic, P. Rempp, H. Benoît, A universal calibration for gel permeation chromatography, *J. Polymer Sci., Part C, Polymer Letters*, **1967**, 5, p. 753-759.

[7] H. Benoît *et al.*, Conformation of polymer chain in the bulk, *Macromolecules*, **1974**, 7, p. 863-872.

[8] P.G. de Gennes, Reptation of a polymer chain in the presence of fixed obstacles, *J. Chem. Phys.*, **1971**, 55, p. 572-579.

[9] Ces données numériques ne sont que des estimations. Sources : C. Quivoron, MEN, 1980 ; J.-P. Vairon, Département Chimie-CNRS, 1990 ; Informations actuelles INC/web sur les laboratoires polymères relevant de la S11-CNRS et la S33-CNU.

[10] J.-M. Michel, Contribution à l'histoire industrielle des polymères en France, www.societechimiquedefrance.fr/Premiere-partie-Les-polymeres-avant-Staudinger.html (consulté le 12/11/20).



SPECIFIC POLYMERS
Concepteur de Monomères & Polymères & Matériaux Innovants

A la recherche d'un laboratoire R&D afin de concevoir des polymères innovants ?
Nous sommes à votre service pour vous accompagner dans vos projets !

Domaines d'expertise

- ⚡ Energie : Batterie lithium | Pile à combustible
- ♻️ Environnement : Recyclabilité & (bio)dégradabilité & fin de vie des polymères
- 🔥 Matériaux haute performance
- 🧴 Santé & Cosmétique

www.specificpolymers.fr

[11] J.-M. Michel, PVC et copolymères - Évolution des sociétés (1940-2000), www.societechimiquedefrance.fr/IMG/pdf/b_3_121_300.vfx2_sav.pdf (consulté le 12/11/20).

[12] W.W.Y. Lau *et al.*, Evaluating scenarios towards zero plastic pollution, *Science*, **2020**, 369, p. 1455-61.

Michel FONTANILLE,

Professeur émérite, Laboratoire de chimie des polymères organiques (LCPO), Université de Bordeaux.

Jean-Pierre VAIRON*,

Professeur émérite, Institut Parisien de Chimie Moléculaire (IPCM), Sorbonne Université, Paris, président du GFP (1995-1997).

*jean-pierre.vairon@sorbonne-universite.fr