



© Marc Fernigier / ESPCI Paris

L'impact des concepts de Pierre-Gilles de Gennes sur l'innovation en France dans le domaine des matériaux

Pierre-Gilles de Gennes, prix Nobel de physique 1991 pour ses travaux sur les polymères et les cristaux liquides, nous a quittés le 18 mai 2007 : dix ans déjà... Ce grand chercheur a marqué son époque dans les champs de la physique et de la physico-chimie de la matière condensée. Nombreux sont encore les témoins directs de son activité scientifique, collaboratrices et collaborateurs, élèves, en France et dans le monde. Plus nombreux sont encore les bénéficiaires de son activité d'enseignement aux multiples facettes, plus nombreuses sont les vocations scientifiques suscitées par la haute tenue associée à la simplicité de ton et à l'humour de ses causeries dans les médias et les lycées et de ses articles de vulgarisation.

La Société Chimique de France et la Société Française de Physique ont souhaité lui rendre hommage en proposant conjointement aux lecteurs de leurs deux revues, *L'Actualité Chimique* et *Reflets de la physique* ce bouquet de courts articles sur le thème « L'impact des concepts de Pierre-Gilles de Gennes sur l'innovation en France dans le domaine des matériaux ». Il s'agit ici en particulier des matériaux à base de polymères et des matériaux granulaires. En amont d'un matériau innovant, c'est-à-dire trouvant un marché pour ses propriétés d'usage, sa conception rationnelle, ses procédés de préparation et ses caractérisations s'appuient, en effet, sur des savoirs qui se situent bien à l'intersection de nos deux sciences, savoirs auxquels P.-G. de Gennes a si magistralement contribué.

Ainsi, avons-nous pris le risque de solliciter avec ce thème-question les directions scientifiques et de l'innovation de grands groupes industriels nationaux, qui ont répondu avec beaucoup d'enthousiasme. Nous les en remercions très chaleureusement.

Tout d'abord, Didier Roux, membre de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies, ancien directeur de la R&D et de l'innovation du groupe Saint-Gobain, revient sur la caractérisation de Pierre-Gilles de Gennes, à la fois comme découvreur et inventeur, qu'il a établie récemment dans le cadre de son cours sur l'innovation au Collège de France. Patrick Maestro, directeur scientifique de Solvay,

membre de l'Académie des technologies, nous résume vingt ans de collaboration avec de Gennes, qui ont débouché sur des optimisations de produits très variés. L'impact profond de ces travaux dans le domaine des polymères en volume et aux interfaces, est ensuite illustré dans les cas particuliers de la formulation des shampooings (Gustavo Luengo, Fabien Leonforte et Nawel Baghdadli, L'Oréal), de la fabrication de membranes de perméation (Pluton Pullumbi, Air Liquide), et de la maîtrise de l'adhérence des pneumatiques (Jean-Michel Vacherand, Michelin). Enfin, nos collègues d'IFP Énergies nouvelles (Yannick Peysson et Benjamin Herzhaft) retracent les nombreux apports conceptuels de Pierre-Gilles de Gennes dans le domaine de l'exploitation des gisements pétroliers par récupération assistée. En conclusion, trois physiciens proches collaborateurs de P.-G. de Gennes (Étienne Guyon, Françoise Brochard-Wyart et Madeleine Veyssié) font un bilan des liens qu'il a établis avec l'industrie, pour chacun des domaines scientifiques qu'il a abordés dans sa riche carrière.

Ce choix non exhaustif de thèmes veut illustrer encore une fois la fécondité de la libre recherche fondamentale, telle que Pierre-Gilles de Gennes la pratiquait, en termes de retombées économiques. Rappelons aussi qu'à l'inverse, les problèmes pratiques que se posent les ingénieurs, les systèmes complexes réels auxquels ils sont confrontés, sont une source inépuisable de questions inspirantes pour le théoricien qui cherche à comprendre, et nul n'a mieux identifié et souligné que Pierre-Gilles de Gennes cette dialectique motivante. Tels sont aussi nos messages à nos lecteurs, non seulement chimistes et physiciens « de terrain », acteurs du « système français de la recherche et de l'innovation », mais aussi, espérons-le, responsables politiques, économiques et sociaux. ■

Charles de Novion,

Rédacteur en chef de *Reflets de la physique*
Ancien directeur du laboratoire Léon Brillouin (CEA-CNRS)

Hervé Toulhoat,

Membre du comité de rédaction de *L'Actualité Chimique*
Ancien directeur scientifique adjoint d'IFP Énergies Nouvelles



Figure 1 consists of three panels. Panel (e) is a scanning electron micrograph (SEM) showing a dense collection of spherical particles. Panel (f) is a schematic diagram showing a cylindrical particle on a flat surface, with a liquid meniscus forming around its base. Panel (g) is a schematic diagram showing a cylindrical particle on a flat surface, with a liquid meniscus forming around its base, and a series of droplets forming on the surface.

1987-2007 : vingt ans de collaboration avec Pierre-Gilles de Gennes

« Pour le progrès technique, quoi de mieux que de rapprocher la science et l'industrie ? », disait Pierre-Gilles de Gennes. Cette citation, souvent reprise aujourd'hui, était beaucoup moins reconnue il y a trente ans lorsque nous commençâmes avec le futur prix Nobel, membre de notre conseil scientifique, une collaboration qui dura jusqu'à la veille de sa disparition.

La rencontre avec Pierre-Gilles était une évidence pour notre groupe, compte tenu de sa connaissance encyclopédique de la physique, et de la science en général, mais aussi de son goût pour les applications. Il développa d'ailleurs largement les interactions entre les laboratoires de l'ESPCI et l'industrie.

Nos chercheurs ont bénéficié par dizaines des conseils de Pierre-Gilles de Gennes, de ses analyses pointues et sans concession, directement dans les laboratoires, devant les résultats et les expériences. Les quelques exemples qui suivent illustrent cette relation exceptionnelle.

Au niveau du magnétisme, il nous aida à comprendre pourquoi les aimants samarium-cobalt, puis néodyme-fer-bore possédaient des propriétés magnétiques aussi exceptionnelles, *via* la combinaison des anisotropies, structurale liée à une structure quasi-2D, et magnéto-cristalline née des interactions magnétiques entre la terre rare et l'élément de transition. Ceci permit de définir les compositions optimales, permettant de stabiliser les propriétés magnétiques, champ coercitif et densité d'énergie magnétique, en particulier en température *via* des dopages appropriés. Ces aimants ont permis le développement exponentiel des moteurs électriques miniaturisés.

Sur les supraconducteurs à haute température critique, les connaissances théoriques de Pierre-Gilles furent un élément clé dans la définition des compositions et morphologies optimales (avec, par exemple, l'analyse du rôle des joints de grains sur les courants critiques). Malheureusement les performances des céramiques, malgré des progrès considérables, ne furent pas suffisantes pour assurer un développement à très grande échelle des applications.

Dans le domaine des pigments, il nous orienta à l'époque vers le Laboratoire d'Optique des Solides de Paris, grâce auquel nous comprîmes comment définir par la théorie (diffusion de Mie, milieux effectifs...) les morphologies des pigments pour en obtenir le

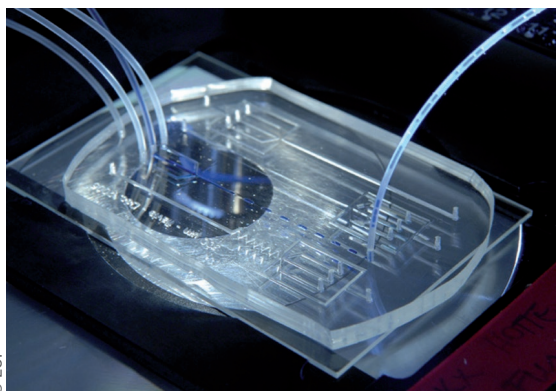
meilleur pouvoir colorant dans les peintures et les plastiques. Car Pierre-Gilles était aussi d'un grand réalisme, n'hésitant pas à nous mettre en contact avec les meilleurs spécialistes, chaque fois que nécessaire. Évidemment, une introduction de sa part était le gage d'un excellent accueil scientifique !

Pour le renfort des matériaux, c'est bien sûr grâce à son intérêt pour la physique de la matière molle et des milieux complexes qu'il nous aida à comprendre les effets dynamiques dans les polymères et élastomères chargés, mais aussi les phénomènes de mouillage et démouillage. Ceci nous permit d'une part de développer des gammes de silicones et de thermoplastiques chargés à haute performance, mais aussi de mettre au point des silices de haute dispersibilité pour le renfort des caoutchoucs, en étudiant les relations entre la morphologie des silices et les propriétés mécaniques de l'élastomère.

Enfin, c'est en nous aidant à créer à Pessac le Laboratoire du Futur, le « LOF », que Pierre-Gilles apporta sa dernière contribution, majeure, à l'évolution de nos outils et méthodes de recherches. Nous avons souvent échangé début 2000 sur l'importance de pouvoir multiplier les essais pour tester les idées nombreuses des chercheurs, et aller plus vite vers les développements. Mais nous voulions aller au-delà de la simple « combinatoire », en essayant de coupler l'expérimentation à haut débit avec une vision scientifique de la conduite des essais, pour mieux cibler les compositions optimales en formulation des fluides complexes ou en science des matériaux, ou les bonnes conditions opératoires de la réaction chimique, pour l'acquisition rapide des données de base (cinétiques ou thermodynamiques) de nos procédés.

L'idée fut alors de combiner dans un projet commun robotique et microfluidique, en s'inspirant pour cette dernière de ce qu'avaient lancé les biologistes. Ce croisement de compétences fut déterminant dans la mise au point de nos outils. Il ne fut pas évident d'instaurer de telles méthodes, faisant appel aux techniques et compétences de microélectronique, automatique, robotique, statistiques, modélisation, etc., dans un monde de chimistes ! Le projet fut précisé, en particulier *via* la création d'une unité mixte avec le CNRS et l'Université de Bordeaux, qui étudie la physique des écoulements en milieu très confiné – et

Des polymères sur les interfaces aux shampoings dans les cosmétiques



© LOF

Le laboratoire sur puce : génération de milliers de gouttes portant chacune une information différente.

leur application à l'étude du comportement de nos formulations dans les conditions de contraintes fortes auxquelles elles sont soumises en situation réelle : crèmes sur la peau, injection de fluides pour la récupération du pétrole, mise en œuvre de lubrifiants sous haute pression... Pierre-Gilles de Gennes, par sa force de conviction, son autorité scientifique, son soutien à la prise de risque, nous aida largement à valider l'investissement auprès de nos décideurs. Quinze ans après, le LOF est le laboratoire avancé de Solvay. Il a multiplié par des facteurs de dix à cent la productivité en recherche et diffuse ses résultats et outils vers nos laboratoires. Il a, de plus, généré des connaissances scientifiques de haut niveau sur la microfluidique et les écoulements, reconnues dans les meilleures revues internationales.

Pierre-Gilles de Gennes était un très grand scientifique, mais il avait en plus cette capacité unique d'expliquer les choses simplement, de prendre position sans concession, et sa culture immense lui permettait de nous donner un avis, toujours humble disait-il, mais si pertinent, sur de nombreux sujets sur lesquels nous le sollicitons. ■

Patrick Maestro (patrick.maestro@solvay.com)

Directeur scientifique de Solvay et membre de l'Académie des technologies
Solvay, 310 avenue de Ransbeek, B-1120 Bruxelles, Belgique

Les chaînes, queues et boucles sont des concepts introduits par Pierre-Gilles de Gennes en vue d'expliquer le comportement des matériaux polymères. En particulier, l'effet de polymères adsorbés sur des surfaces est à la base de nombreuses productions industrielles où ces matériaux sont utilisés comme additifs modificateurs des propriétés intrinsèques d'un substrat. Le soin du cheveu est l'un de ces cas dans le domaine des cosmétiques, dans lequel l'emploi de polymères est essentiel pour obtenir la satisfaction du consommateur, par exemple en terme de facilité de peignage ou contrôle de la mise en forme.

Polymères aux interfaces : le modèle de de Gennes

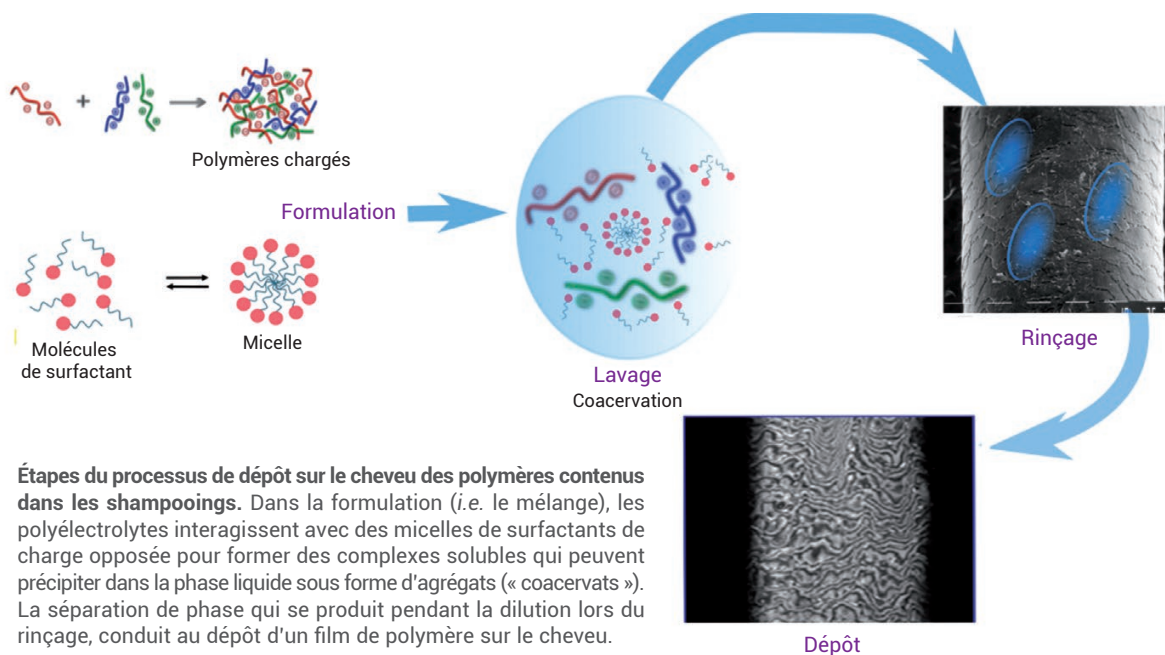
Dans son livre *Scaling Concepts in Polymer Physics* [1], de Gennes a révolutionné notre connaissance des polymères. Il s'est rendu compte que tous les polymères, en particulier ceux de grande longueur (c'est-à-dire comportant un nombre élevé de segments), ont en commun de nombreuses caractéristiques générales. Ces idées nous ont permis de mieux comprendre le comportement des polymères en volume, comme par exemple les caoutchoucs et les colles.

P.-G. de Gennes a ensuite découvert que ces concepts de loi d'échelle permettent de comprendre comment de longs polymères adhèrent aux interfaces. Grâce à cela, nous savons par exemple que l'épaisseur de la couche adsorbée est limitée et est reliée à des longueurs telles que le rayon de giration et la taille de l'enroulement, qui sont des propriétés intrinsèques du polymère, mais aussi des réponses à la nature de son environnement.

La disponibilité de techniques expérimentales permettant de caractériser les polymères aux interfaces nous a permis de tester certains des modèles prédits par de Gennes. Des progrès importants ont par exemple été réalisés en utilisant la technique SFA de mesure de force de surface [2].

Cheveux et cosmétique

L'industrie cosmétique a compris depuis longtemps l'importance des polymères dans la composition des shampoings. Le défi à relever par les produits de rinçage est d'obtenir sur la surface du cheveu un film



Étapes du processus de dépôt sur le cheveu des polymères contenus dans les shampooings. Dans la formulation (*i.e.* le mélange), les polyélectrolytes interagissent avec des micelles de surfactants de charge opposée pour former des complexes solubles qui peuvent précipiter dans la phase liquide sous forme d'agrégats (« coacervats »). La séparation de phase qui se produit pendant la dilution lors du rinçage, conduit au dépôt d'un film de polymère sur le cheveu.

de polymère fin et durable, résistant aux nombreux lavages et ceci en présence d'une grande variété de constituants, en particulier de détergents tensio-actifs qui doivent nettoyer cette surface.

La surface du cheveu, chargée négativement, est recouverte de lipides qui sont partiellement ou complètement perdus lorsque le cheveu est endommagé. Une fonction importante assurée par les polymères contenus dans les shampooings est de restaurer les qualités sensorielles des cheveux (douceur au contact, contrôle de la mise en forme, etc.).

Structure des revêtements, prévision et mesure de l'adsorption

En général, un shampooing inclut un élément de base lavant, des agents de conditionnement du cheveu et des additifs qui donnent à la coiffure son apparence finale. Des surfactants cationiques, constitués de sels d'ammonium quaternaires, sont largement utilisés comme agents de conditionnement dans les produits commerciaux. Ils sont très efficaces sur les cheveux endommagés. L'utilisation de polyélectrolytes cationiques est aussi un moyen classique pour adsorber des polymères sur le cheveu. Ils sont incorporés en basse concentration ($< 3\%$) en association avec des silicones, pour assurer un conditionnement optimal. Les surfactants anioniques interagissent avec les polymères cationiques pour garantir la stabilité de la dispersion. C'est après l'application du shampooing et le rinçage à l'eau que leur concentration diminue brutalement et que l'adsorption sur la surface du cheveu se fait.

Des efforts particuliers sont nécessaires pour concevoir des surfaces modèles qui prennent en compte les éléments physico-chimiques de base de la surface du cheveu. Depuis les surfaces simplement chargées négativement

(p. ex. le mica) jusqu'aux surfaces plus sophistiquées (p. ex. chimiquement modifiées par des acides gras et des protéines ioniques), ces substrats sont des éléments essentiels pour prendre pleinement avantage des concepts de de Gennes dans la formulation de ce genre de produits. Dans nos études, en plus de la technique SFA, nous avons systématiquement utilisé une grande variété de techniques d'analyse de surface (microscopie à force atomique, mesure de l'angle de contact, tribologie, etc.). Par exemple, une microbalance à cristal de quartz (QCM) associée à l'ellipsométrie nous a aidés à déterminer l'épaisseur de ces agrégats de polymères et de surfactants, ainsi que la quantité d'eau piégée. Plus récemment, nous avons montré l'utilité de simulations sur ordinateur pour étudier la capacité d'adsorption des surfaces en fonction de la composition du shampooing.

Vers de nouveaux matériaux sur mesure

Une innovation de rupture requiert une vision en profondeur du domaine étudié. Les concepts de Pierre-Gilles de Gennes ont indiqué la direction et éclairé le chemin pour mieux concevoir des matériaux de performances exceptionnelles. L'étude des protéines et polymères naturels a confirmé que des structures polymériques sophistiquées permettent d'obtenir de grandes variétés de fonctions. La découverte de nouveaux matériaux (naturels ou synthétiques) est pilotée par la conviction que leur structure et leurs fonctions peuvent être prédites à l'aide des concepts que P.-G. de Gennes a explorés. ■

Gustavo S. Luengo (gluengo@rd.loreal.com),
Fabien Leonforte et **Nawel Baghdadli**

L'Oréal Research & Innovation, 1 Avenue Eugène Schueller,
93600 Aulnay-sous-Bois

Références

- 1• P.-G. de Gennes, *Scaling Concepts in Polymer Physics*, Cornell University Press, Ithaca and London (1979).
- 2• J.N. Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces*, 3rd ed., Elsevier, New-York (2011).

De la physico-chimie des polymères aux membranes pour la séparation des gaz

En science des matériaux, une membrane est définie comme une barrière sélective qui, sous l'effet d'un gradient de potentiel chimique, permet le passage ou l'arrêt de certains composants entre les deux milieux qu'elle sépare. Parmi les différents types de membranes, celles constituées de polymères ont de nombreuses applications industrielles, en raison de leur faible coût de production et de leur facilité de traitement par rapport aux matériaux inorganiques.

Air Liquide conçoit et fabrique des modules de membranes polymères composées de fibres creuses asymétriques, ayant une première couche optimisée pour le support de la couche active et la résistance mécanique, et une couche fine externe supportée par la première et optimisée pour les propriétés de séparation. Un module contient environ un million de fibres creuses individuelles, qui sont installées dans des configurations géométriques permettant de répondre à des contraintes de perte de charge et de performance de la séparation envisagée. À l'échelle industrielle, la fabrication de membranes se fait traditionnellement par des itérations d'essais et d'erreurs, les paramètres de fonctionnement étant ajustés progressivement et empiriquement. La formalisation des mécanismes de formation de la membrane à travers des modèles systémiques est à la base de l'innovation dans la technologie de fabrication de membranes polymères. Dans ce contexte, les travaux de Pierre-Gilles de Gennes dans le domaine de la physico-chimie des polymères [1-3] constituent les fondements théoriques pour l'identification de paramètres importants, permettant ainsi de rationaliser le développement de membranes plus performantes.

Le potentiel des matériaux polymères peut être pleinement utilisé lorsqu'ils sont transformés en structures de fibres creuses, optimisant à la fois les performances de la séparation et la durée de vie du module membranaire. La fabrication des fibres creuses est obtenue par un procédé continu d'extrusion, suivi du processus de démixtion polymère/solvant/non-solvant induisant la formation d'une phase dense riche en polymère formant la couche de membrane active supportée autour d'une phase très diluée en polymère ayant une structure poreuse ouverte. La morphologie des membranes obtenues est liée aux caractéristiques rhéologiques et au comportement en phase des solutions de polymères pendant le filage. La séparation de phase des solutions polymères ou des polymères et des solvants est à l'origine des procédés TIPS (« séparation de phase induite par la température ») et SIPS (« séparation de phase induite par le solvant »)

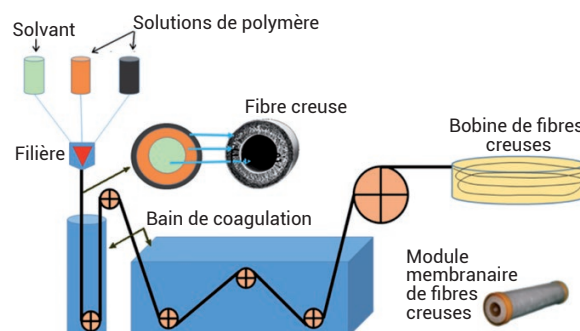


Schéma de fabrication d'une membrane composée de fibres creuses, par la co-extrusion/coagulation d'un solvant de coagulation dans la partie centrale et de deux solutions de polymères au travers d'une filière annulaire.

utilisés pour fabriquer les membranes, comme représenté schématiquement sur la figure ci-dessus. Le principe consiste à préparer les mélanges dans la région du diagramme de phase où il y a miscibilité totale, puis à provoquer la séparation de phase dans la région de décomposition spinodale du mélange polymère/solvant en changeant soit la température, soit la qualité du solvant.

Bien que l'énergie libre du mélange dans le formalisme Flory-Huggins-de Gennes puisse être utilisée comme une bonne ligne directrice pour formuler la décomposition spinodale dans le cadre de la thermodynamique d'équilibre, elle ne permet pas de prédire la dynamique du changement. P.-G. de Gennes a étendu l'étude de la dynamique de la décomposition spinodale aux mélanges de polymères [2] pour lesquels existe une variété d'échelles de longueur qui sont importantes, avec une dépendance en mobilité de la longueur d'onde des fluctuations dans le mélange de polymères. La dynamique de la séparation de phase est étroitement liée à la morphologie de la membrane résultante, et la compréhension des paramètres contrôlant la structure poreuse est un des axes d'amélioration des performances des membranes en forme de fibres creuses. Un deuxième axe d'amélioration consiste en la modulation contrôlée de la perméabilité de la membrane en introduisant dans la couche externe de polymère des charges inorganiques dispersées, dont l'effet principal est la modification de la distribution du volume libre dans les interfaces particules inorganiques-chaîne de polymères, comme décrit dans les modèles développés par Pierre-Gilles de Gennes [4-5]. ■

Pluton Pullumbi (pluton.pullumbi@airliquide.com)
Air Liquide, Centre de Recherche Paris-Saclay, BP 126,
Les Loges-en-Josas, 78354 Jouy-en-Josas Cedex

Références

1. P.-G. de Gennes, *Scaling Concepts In Polymer Physics*, Cornell University Press (1979).
2. P.-G. de Gennes, "Dynamics of fluctuations and spinodal decomposition in polymer blends", *J. Chem. Phys.*, **72** (1980) 4756.
3. G. Jannink et P.-G. de Gennes, "Quasielastic scattering by semidilute polymer solutions", *J. Chem. Phys.*, **48** (1968) 2260.
4. P.-G. de Gennes, "Mechanical properties of polymer interfaces", dans *Physics of Polymer Surfaces and Interfaces*, pp. 55-71, I.C. Sanchez (ed.), Butterworth-Heinemann, Boston (1992).
5. P.-G. de Gennes, "Solvent evaporation of spin cast films: 'crust' effects", *Eur. Phys. J. E*, **7** (2002) 31.

Apports de Pierre-Gilles de Gennes à la compréhension physique du pneumatique

Les contributions de Pierre-Gilles de Gennes à la physique de la matière molle sont considérables, à la fois sur le plan fondamental et sur celui de ses applications industrielles qui l'ont toujours guidé. Il a notamment révolutionné la physique des polymères et a contribué à clarifier les effets liés au mouillage, en particulier, en ce qui concerne Michelin, aux interfaces pneu-chaussée.

Mouillage

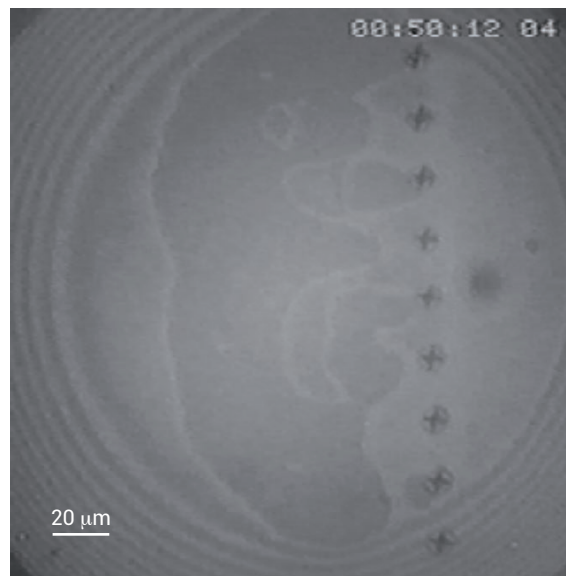
Nos échanges sur l'effet des énergies interfaciales et de la déformabilité [1] dans les transitoires de frottement gomme-sol sont à l'origine des travaux sur le démouillage intercalé que nous avons menés avec l'équipe de Françoise Brochard-Wyart à l'Institut Curie, et qui ont fait l'objet d'un chapitre de livre [2]. Après des études sur les élastomères modèles, le démouillage de l'eau intercalée entre une surface de verre et des caoutchoucs industriels a pu être visualisé et compris (fig. 1).

La compréhension du rôle de l'élasticité et de la pression osmotique dans la rhéologie des émulsions [3] a permis le développement de celle-ci. La robustesse de cette forme de lubrification justifie son usage dans l'industrie ; elle sert par exemple pour le tréfilage des renforts d'acier utilisés dans les pneumatiques. Elle cause également le « gras mouillé », à savoir la perte d'adhérence due à l'intercalation d'un mélange d'eau et de graisse (typiquement du gazole) entre la route et le pneu, bien connu des motards.

Rhéologie des polymères

Les travaux de Pierre-Gilles de Gennes sur la structure et la dynamique des polymères [4, 5] sont fondateurs. La notion de reptation – dont la mise en évidence par simulation moléculaire est fort difficile et dont il a étendu la compréhension aux polymères étoilés ou polydisperses – a donné lieu à des lois de comportement utilisées pour la simulation d'écoulements (modèles BKZ), y compris pour les mélanges industriels de caoutchouc [6].

La principale difficulté pratique pour l'industriel est bien entendu la caractérisation de systèmes souvent complexes : l'utilisation des outils d'analyse dont nous disposons (notamment la RMN dynamique) repose largement sur des idées initiées par de Gennes.



1. Observation en microscopie interférentielle du démouillage d'un film intercalé entre une plaque de verre et un élastomère modèle derrière une ligne de nucléateurs.

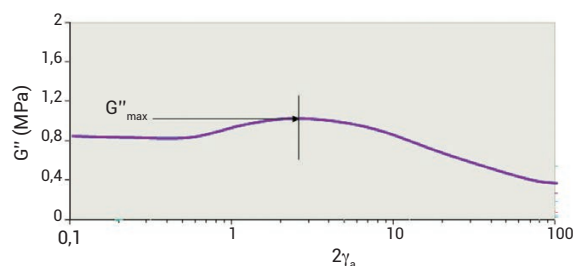
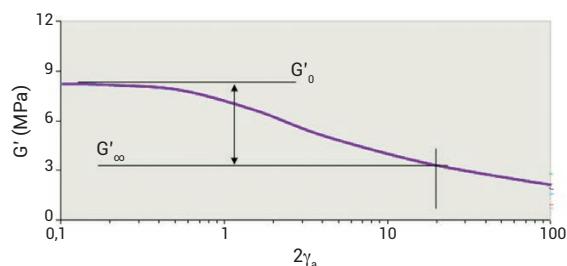
Image obtenue à l'Institut Curie.

Interfaces et fractures

Ses travaux sur la tension superficielle des fondus, la diffusion mutuelle [7] et la cicatrisation^(a) sont essentiels à la compréhension de l'adhésion polymère-polymère [8].

Ceux sur la conformation des polymères aux parois [9] et leurs transitions de repliement [10] illustrent l'influence des conditions aux parois sur la stabilité des écoulements dans les outils de mise en forme [11], bien que d'autres phénomènes soient également évoqués. Le frottement sec entre les élastomères et les charges renforçantes greffées ou non est à l'origine de l'effet « Payne » (fig. 2), c'est-à-dire la viscoélasticité non linéaire et thixotrope^(b) des élastomères chargés aux petites déformations.

Les réflexions de P.-G. de Gennes sur l'importance de la dissipation en champ lointain [12] pour la résistance au décollement et sur le rôle des connecteurs dans la résistance des joints adhésifs [13] ont initié de nombreux travaux ultérieurs de toute une école « matière molle », en particulier sur le rôle de la fibrillation et plus généralement de la mixité de modes et des grandes déformations dans la résistance



2. L'effet « Payne » dans un caoutchouc renforcé par des particules minérales se traduit par une forte décroissance aux petites déformations ($\gamma_a \sim 0,1$ à 10%) de la composante réelle G' de son module viscoélastique complexe, alors que la composante imaginaire G'' (module de perte) passe par un maximum dans la région où G' décroît. Il provient du frottement solide des molécules de polymères adsorbées sur la surface des particules minérales.

des joints adhésifs ; cette extraction de chaînes se manifeste dans l'effet « Mullins » ou pseudo-endomagement aux grandes déformations des élastomères chargés, ainsi que dans le frottement sur des surfaces routières engommées. Un résumé de ses travaux peut être trouvé dans l'article de Hugh Brown dans *P.G. de Gennes' Impact on Science* [14].

Au-delà, son étude avec Ko Okumura sur la fracture de la nacre [15] démontre l'existence d'un émoussissement particulier de la pointe de fissure lié à la flexion de la phase dure et constitue une source d'inspiration sur le rôle de l'hétérogénéité et de l'anisotropie dans la résistance à la fracture des caoutchoucs renforcés de charges nanométriques.

Bien que tous les mystères de la transition vitreuse ne soient pas éclaircis, les travaux de P.-G. de Gennes constituent une entrée en matière à des sujets essentiels pour la maîtrise de l'adhérence des pneumatiques.

Mais plus encore, Pierre-Gilles de Gennes reste une source d'inspiration par la façon qui lui est si personnelle de réduire un problème complexe à son épure, et par son style fait d'économie de moyens et d'une grande élégance, qui donne à ses articles une saveur toute particulière et qui évite au lecteur de se noyer dans les détails. ■

Jean-Michel Vacherand (jean-michel.vacherand@michelin.com)

Référent en science des matériaux chez Michelin, CER Ladoux F19, 63040 Clermont-Ferrand Cedex 09

(a) Cicatrisation : reformation d'une cohésion suite à la refermeture d'une fracture.

(b) Thixotropie : évolution rhéologique due à une évolution structurale lente par rapport aux temps caractéristiques de l'écoulement.

Références

1. P.-G. de Gennes, F. Brochard-Wyart, "Dewetting of a water film between a solid and a rubber", *J. Phys. Cond. Mat.*, **6** (1994) A9.
2. P.-G. de Gennes, F. Brochard-Wyart et D. Quéré, *Gouttes, bulles, perles et ondes*, Belin (2005).
3. F. Brochard-Wyart et P.-G. de Gennes, "Hydrodynamic properties of fluid lamellar phases of lipid/water", *Pramana*, suppl. **1** (1975) 1.
4. P.-G. de Gennes, "Exponents for the excluded volume problem as derived by the Wilson method", *Phys. Lett.*, **38A** (1972) 5.
5. P.-G. de Gennes, "Reptation of a polymer chain in the presence of fixed obstacles", *J. Chem. Phys.*, **55** (1971) 572.
6. T.C.B. McLeish et R.G. Larson, "Molecular constitutive equations for a class of branched polymers: the pom-pom polymer", *J. Rheol.*, **42** (1998) 81.
7. R.P. Wool, *Polymer Interfaces: Structure and Strength*, Hanser, New York (1995).
8. F. Brochard-Wyart et P.-G. de Gennes, « Molécules coulissantes à un interface polymère-polymère », *C.R. Acad. Sci.*, série **2**, **317** (1993) 13.
9. F. Brochard-Wyart et al., "Shear dependent slippage at a polymer-solid interface", *Langmuir*, **8** (1992) 3033 ; "Slippage of polymer melts on grafted surfaces", *Macromolecules*, **29** (1996) 377.
10. P.-G. de Gennes et F. Brochard-Wyart, "Coil-stretch transitions of dilute flexible polymers under ultrahigh velocity gradients", *J. Chem. Phys.*, **60** (1974) 5030.
11. F. Brochard-Wyart et P.-G. de Gennes, "Viscosity at small scales in polymer melts", *Eur. Phys. J. E*, **1** (2000) 93 ; P.-G. de Gennes, "Conformation of polymers attached to an interface", *Macromolecules*, **13** (1980) 1069 ; P.-G. de Gennes, "Polymers at an interface: a simplified view", *Adv. Coll. Interf. Sci.*, **27** (1987) 189.
12. P.-G. de Gennes, "Soft adhesives", *Langmuir*, **12** (1996) 4497 ; « Pégosité, adhésion transitoire d'un polymère fondu sur un solide passif », *C.R. Acad. Sci.*, **307** (1988) 1949.
13. É. Raphaël et P.-G. de Gennes, "Rubber-rubber adhesion with connector molecules", *J. Phys. Chem.*, **96** (1992) 4002 ; F. Brochard-Wyart et al., "Adhesion promoters", *J. Phys. Chem.*, **98** (1994) 9405.
14. H. Brown, "Adhesion and friction", dans *P.G. de Gennes' Impact on Science*, vol. II, *Soft Matter and Biophysics*, pp. 104-114, J. Bok, J. Prost, F. Brochard-Wyart (eds), Series on Directions in Condensed Matter Physics, vol. **19**, World Scientific (2009).
15. K. Okumura et P.-G. de Gennes, "Why is nacre strong? Elastic theory and fracture mechanics for biocomposites with stratified structures", *Eur. Phys. J. E*, **4** (2001) 121.

L'impact des concepts développés par Pierre-Gilles de Gennes sur la recherche à l'IFPEN

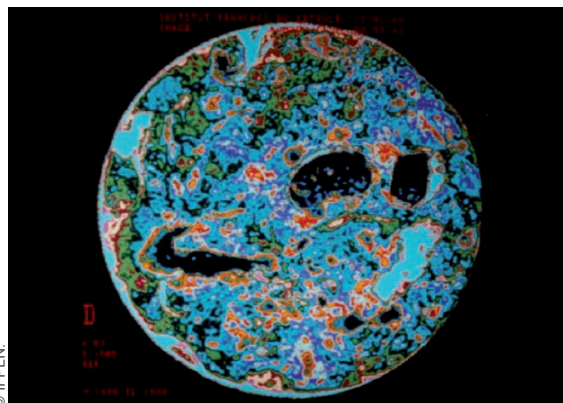
Étudiants à l'ESPCI au début des années 1990, nous avons pu rencontrer Pierre-Gilles de Gennes, alors directeur de l'école, et être ainsi confrontés pour la première fois à la profonde originalité de son approche scientifique. Tout frais émoulus des classes préparatoires où nous étions devenus des champions de l'intégrale triple et du calcul différentiel, son discours d'accueil en première année nous faisait percevoir un monde nouveau, où le sens physique, l'appréciation des ordres de grandeur et les lois d'échelles permettaient des raisonnements audacieux et des résolutions élégantes de problèmes complexes. Volontiers provocateur, il répondait à la question d'ouverture de son discours d'accueil aux nouveaux étudiants : « *Combien y a-t-il d'accordeurs de piano à New York ?* », par un raisonnement par ordre de grandeur qui donnait des solutions dont la pertinence nous laissait pantois.

Ces concepts et approches innovants, développés et mis en application dans des domaines très variés, ont trouvé une résonance particulière avec la recherche menée à IFP Énergies nouvelles, en particulier à partir des années 1980.

À cette époque, les chocs pétroliers propulsent le prix du baril vers des sommets jamais atteints et le monde découvre sa dépendance aux ressources fossiles. Un domaine de recherche émerge : la récupération assistée du pétrole. Il s'agit alors de mieux comprendre pourquoi près de 70 % du pétrole reste dans le milieu poreux. Quels sont les mécanismes de piégeage et quelles sont les conditions de remobilisation ?

En 1980, Pierre-Gilles de Gennes travaille depuis une dizaine d'années sur les polymères, pour lesquels il a proposé des concepts comme la reptation permettant de mieux comprendre leur comportement viscoélastique. Il s'intéresse alors à d'autres systèmes complexes en procédant par analogie et étudie notamment trois sujets liés à la récupération assistée du pétrole : les écoulements de fluides en milieu poreux, les tensioactifs et la mouillabilité. Il entre d'ailleurs à cette époque au conseil scientifique d'IFPEN, où il apporte son expérience et ses idées.

L'exploitation d'un gisement pétrolier est un problème scientifique complexe mettant en œuvre de nombreux mécanismes couplés où interviennent les concepts de percolation, de mouillabilité, de tension interfaciale entre eau et huile. L'exploitation pétrolière est toujours associée à une production d'eau et il est donc nécessaire de comprendre les propriétés des milieux poreux en présence de deux fluides. Dans cette configuration, l'un des fluides sera plus « mouillant » que l'autre vis-à-vis des interfaces minérales qui composent les pores. L'autre fluide se regroupe sous forme de gouttes et gouttelettes sous l'action des forces de surface. Se pose



Écoulements polyphasiques dans un échantillon de roche, visualisation au scanner X. Photo de février 1989 avec couleurs artificielles représentant les variations de contrastes de densité.

alors une question de « percolation », concept qui a passionné la communauté des physiciens et notamment Pierre-Gilles de Gennes, et qui pourrait être résumée ainsi : à partir de quel volume du fluide non mouillant dans l'espace poreux les gouttes se touchent-elles, formant un chemin continu tout au long du milieu poreux ?

Au seuil de percolation, un certain nombre de propriétés peuvent être déduites. C'est ainsi que Pierre-Gilles de Gennes fait en 1983 [1] une proposition d'estimation du coefficient de dispersion d'un traceur en écoulement dans un milieu poreux en présence de deux fluides. Il étudie également la différence de pression entre les deux fluides due aux courbures d'interfaces [2], ce qui lui permet de discuter l'effet de la vitesse d'écoulement sur la pression capillaire lors de l'imbibition d'un fluide mouillant dans un échantillon poreux.

Enfin, dans son article de 1982 sur les tensioactifs [3], il apporte des éléments clés sur les paramètres contrôlant l'apparition d'une phase microémulsion d'eau et d'huile en présence de surfactant. Cette configuration résulte d'un changement dans l'organisation du système eau/huile/tensioactif, qui annule quasiment les forces de surface et rend alors possible la remobilisation d'huile d'un gisement.

Son approche, mêlant analyse des ordres de grandeur et détermination des mécanismes physiques dominants dans un formalisme mathématique minimal, reste un guide puissant pour éclaircir des situations complexes telles que celles rencontrées dans la recherche à vocation industrielle. Cette approche est plus que jamais d'actualité pour aborder les nouveaux défis d'IFP Énergies nouvelles, liés à la transition énergétique et aux énergies renouvelables. ■

Yannick Peysson^(a) (yannick.peysson@ifpen.fr)

et Benjamin Herzhaft^(b) (benjamin.herzhaft@ifpen.fr)

(a) Chargé de mission auprès de la Direction générale d'IFPEN

(b) Responsable du programme Recherche fondamentale à la Direction scientifique d'IFPEN

IFP Énergies nouvelles, 1 & 4 av. de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison

Références

- 1• P.-G. de Gennes, "Hydrodynamic dispersion in unsaturated porous media", *J. Fluid Mech.*, **136** (1983) 189.
- 2• P.-G. de Gennes, "Dynamic capillary pressure in porous media", *Europhys. Lett.*, **5** (1988) 689.
- 3• P.-G. de Gennes et C. Taupin, "Microemulsions and the flexibility of oil/water interfaces", *J. Phys. Chem.*, **86** (1982) 2294.

Pierre-Gilles de Gennes, bilan d'une vie tournée vers l'innovation

Les articles de ce dossier montrent à l'envi la place importante qu'a occupée Pierre-Gilles de Gennes dans le domaine des matériaux et des relations avec le monde industriel. Pour avoir travaillé auprès de lui pendant plus d'un demi-siècle, efforçons-nous de répondre de façon spontanée sur la façon dont ceci a été vécu dans nos laboratoires de recherche fondamentale. Il ne s'agit ici toutefois que d'un regard proche personnel ouvert aux critiques, et non d'un travail d'historien des sciences qui serait à coup sûr utile.

Il convient d'abord de suivre l'évolution des thèmes d'intérêt de P.-G. de Gennes sur une longue période. Sa recherche de thèse au CEA en magnétisme, puis son séjour à Orsay où il est accueilli et entame une recherche en supraconductivité, ne nous semblent pas avoir été accompagnés du souci d'applications. Mais le jeune théoricien de physique des solides manifeste une grande curiosité et un intérêt pour l'expérimentation simple, tout comme pour des méthodes d'instrumentation et de mesures plus complexes, comme la diffusion des neutrons. Dès cette époque, de Gennes met en avant les approches expérimentales en regard des travaux théoriques, mais sans préoccupations explicites tournées vers l'aval. En particulier, le renommé *groupe d'Orsay de supraconductivité* ne poursuivra pas son activité, alors que de nouveaux matériaux supraconducteurs pour l'industrie apparaissent, avec des applications très importantes aujourd'hui.

L'intérêt ultérieur de P.-G. de Gennes pour les cristaux liquides avait été suscité en particulier par les applications, avec un bon contact avec Wolfgang Helfrich, inventeur de l'affichage par nématiques (la découverte ne sera pas valorisée dans le laboratoire industriel où celui-ci travaille !). La recherche du *groupe des cristaux liquides d'Orsay* conduit à clarifier ce domaine dans les années 1970 et mène à des contacts suivis avec les laboratoires de recherche industrielle (Jean-Claude Dubois chez Thomson). Cependant, le groupe d'Orsay n'était pas assez proche de la réalité industrielle, malgré la présence de Georges Durand, revenu d'un stage à Harvard chez Bloembergen. En parallèle, de Gennes développe une réflexion chimique qu'il voit comme un jeu de construction de molécules à propriétés définies à l'avance (l'inspiration du chimiste Jean Jacques). Il utilisera cette démarche par la suite avec les polymères. Autant l'impact des connaissances fondamentales dans la recherche autour de P.-G. de Gennes sera important au début des années 1980, autant la valorisation industrielle dans le domaine de l'affichage et les applications se feront hors de France. Donc on peut dire *échec* pour une action de valorisation, même si ce débroussaillage physico-chimique du domaine des

cristaux liquides, poursuivi avec Jacques Prost, a été essentiel et a eu un impact scientifique considérable. De Gennes lui-même exprimera sa déception que cette activité n'ait pas conduit plus fortement à un développement industriel en France !

Lorsque de Gennes s'intéresse au monde des polymères (influence d'Henri Benoit) et, plus généralement, aux problèmes de matière molle, il va établir des relations étroites et suivies avec l'industrie tant en France qu'à l'étranger (Exxon). Aussi bien comme consultant, membre de conseils scientifiques et d'administration d'entreprises ou comme simple visiteur, il saura à chaque fois tirer profit de ces visites et partager avec ses chercheurs tout ce qu'il y apprend et qui est souvent une source d'inspiration pour de nouveaux thèmes de recherche, qu'il suggère plus qu'il n'impose.

On ne saurait oublier son intérêt pour le génie des procédés (Jacques Villermux), la matière granulaire et les écoulements (avec l'IFPEN par exemple, voir l'article p. 18), l'hydrodynamique physico-chimique (ses contacts avec Benjamin Levich).

De Gennes semble n'avoir été associé qu'à un seul brevet (les grains Janus^(a)), mais ceci n'a pas été sa préoccupation première dans son intérêt pour les applications de la science. Inventeur de sujets nouveaux qu'il aborde chaque fois avec une approche originale, l'éclairage qu'il donne est utilisable autant pour les progrès de la recherche de base que pour ses applications. Dans une situation comme dans l'autre, il apporte des outils plus que des recettes. Et ceux-ci sont source d'inspiration pour ces deux communautés dont il contribue à la rencontre et au travail en commun. Son enseignement, en particulier au Collège de France où se rencontraient universitaires et industriels (on parlait volontiers de la « messe hebdomadaire »), a marqué durablement toute une communauté qu'il a inspirée. Une percolation s'est établie ; elle subsiste dix ans après sa disparition.

N'oublions pas enfin le message qu'il nous a transmis, en particulier pour les jeunes. On les retrouve dans plusieurs interventions du livre *L'extraordinaire Pierre-Gilles de Gennes* (voir p. 46), où il parle des inventeurs et de la recherche appliquée et applicable. C'est ce même souci qu'il a eu, pendant vingt-six ans dans sa direction de l'École supérieure de physique et chimie (ESPCI), un modèle de la formation par la recherche. ■

Étienne Guyon⁽¹⁾ (guyon@pmmh.espci.fr),

Françoise Brochard-Wiart⁽²⁾ et Madeleine Veyssié⁽³⁾

(1) PMMH, ESPCI, 10 rue Vauquelin, 75005 Paris

(2) Unité physico-chimie Curie, 11 rue d'Ulm, 75231 Paris Cedex 05

(3) Physicienne au Collège de France

(a) Les « grains Janus » sont des microparticules présentant deux faces distinctes de propriétés physico-chimiques différentes.