

Hydrodynamics and physics of soft objects/Hydrodynamique et physique des objets mous

## Hydrodynamics at soft surfaces: from rubber tyres to living cells

The physicist cannot help but be modest! Confronted with intractable problems posed by industry or living matter, he imagines the simplest possible model system, which may isolate a unique phenomenon and discover fundamental laws. These laws then allow the engineer or the biologist to simulate a real system, that is, a complex one in which many effects are intertwined and interfere with one another.

But the road to cover is still very long...

When driving a car on a wet road, to keep a good adherence, the water film between the tyre and the road has to be eliminated within a millisecond. To study this phenomenon, the tyre is replaced by a simple rubber bead of millimetric dimensions and the road is mimicked by a glass slide suitably hydrophobized (Fig. 1). Squeezing the rubber bead onto the glass surface through a water drop, one observes (using interferential microscopy) the formation of an adhesive contact by the dewetting of the intercalated liquid layer. When the contact is sheared by moving the glass slide at increasing velocities, the contact areas is invaded, first partially, then completely, by a liquid film [2]. This loss of adhesive contact beyond a critical velocity mimics the ‘aquaplaning’ of a car when the driver loses control while breaking on a wet road. A defect placed on the glass surface is capable of restoring adhesive zones in the lubricated regime and of opposing aquaplaning (Fig. 2) [3].

How can an engineer make the link between the little rubber bead and the tyre? Actually, the tyre is rough; contacts are formed at little asperities on the tyre. These bumps resemble our little beads, they lose their liquid films. The formation of contacts has to be observed at microscopic dimensions using reflection interference contrast microscopy (RICM) (Fig. 1(a)).

The same concepts can be used for the study of cell adhesion. In order to establish adhesive contacts, a cell needs to eliminate a thin water film and adhesion phenomena occur on the same length scales, even though the cell is hundred times smaller than the soft bead. We will also have to simplify the living cell (Fig. 3)! It will be replaced by a vesicle [4], that is a simple liquid bag consisting of a lipid bilayer used as a model for the cell membrane. The vesicle will be decorated by proteins (CAMs), shown by biologists to be responsible for specific adhesion of cells [5,6]. To model the cytoskeleton, one can use a capsule with a cross-linked leaflet, in analogy with the spectrin network which reinforces the membranes of our red blood cells [7]. One could alternatively replace the actin network by a jelly (a vesicle filled with a hydrophilic gel) [8]. This system will be

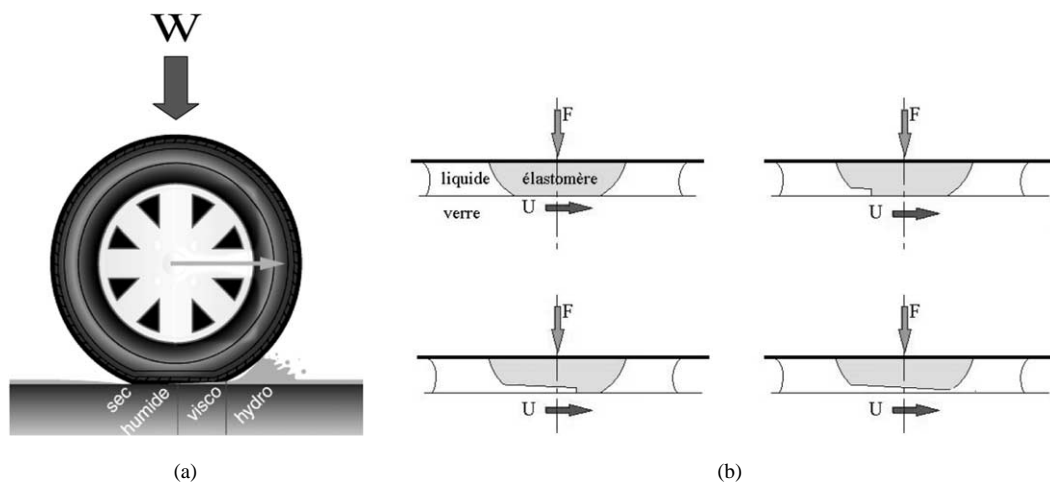


Fig. 1. (a) Tyres rolling on a wet road (Michelin): the contact is partially lubricated. (b) Model system: elastomer bead pressed against an hydrophobic mobile glass plate.

Fig. 1. (a) Pneu roulant sur une route mouillée (Michelin) : contact partiellement lubrifié. (b) Système modèle : bille d'élastomère millimétrique écrasée à travers une goutte d'eau sur une lame de verre (hydrophobe) mobile.

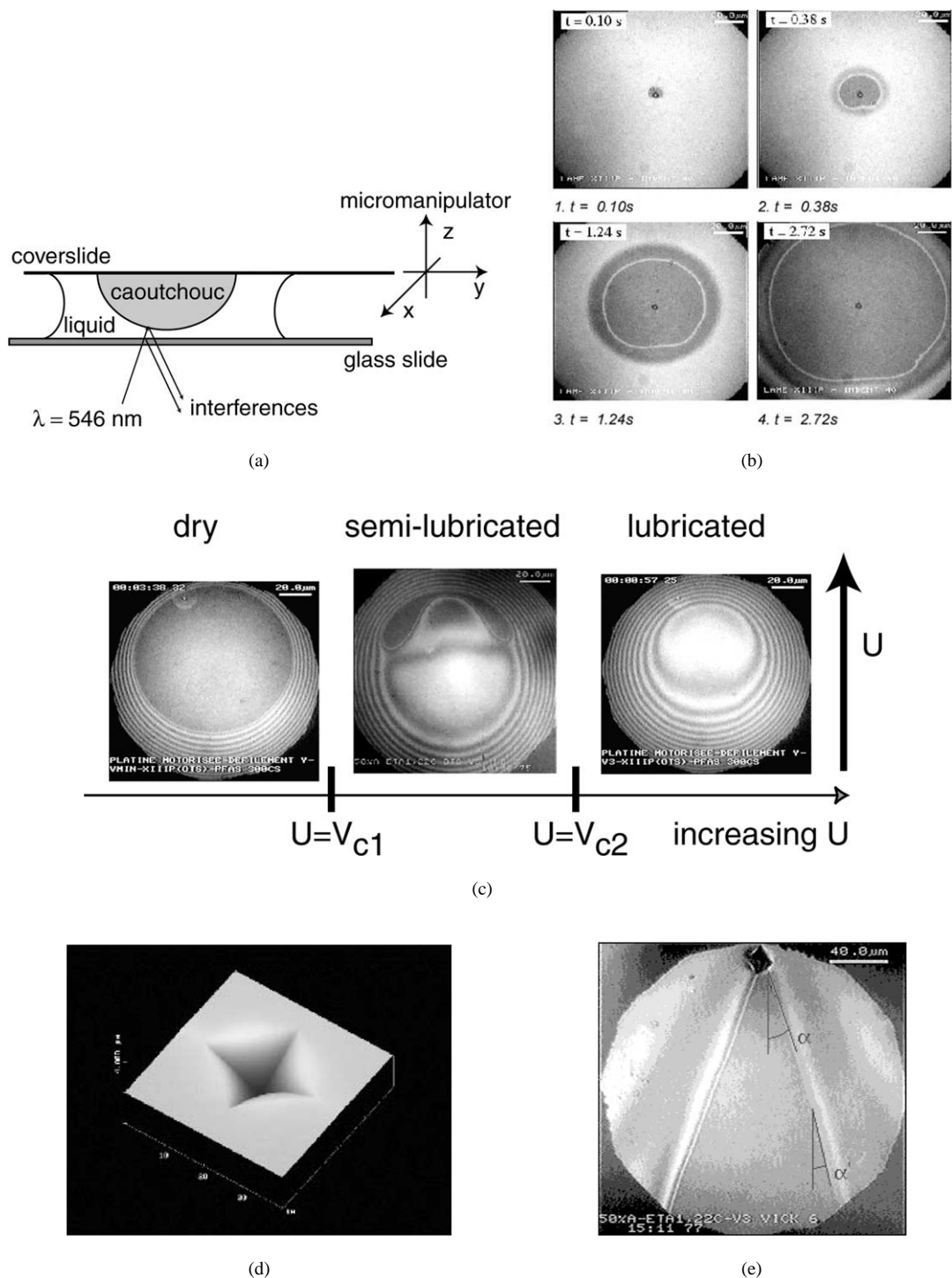


Fig. 2. (a) Observation by optical interferometry RICM of the Rubber/glass contact. (b) Dynamics of contact growth by dewetting of the intercalated liquid film (P. Martin). (c) Three regimes of contacts under shear: dry, semi lubricated, lubricated (A. Martin). (d) Nucleators of dewetting: Vickers print (O. du Roure). (e) Dry wake of nucleator crossing a lubricated contact (J. Clain).

Fig. 2. (a) Méthode d'observations de contact caoutchouc/verre par RICM. (b) Établissement d'un contact adhésif par démoillage de film intercalé (P. Martin). (c) Les trois régimes d'un contact cisailé : sec, semi-lubrifié, lubrifié (A. Martin). (d) Nucléateur de contact : empreinte Vickers gravée dans le verre (O. Du Roure). (e) Sillage de zone sèche d'un nucléateur traversant un contact lubrifié (A. Martin, J. Clain).

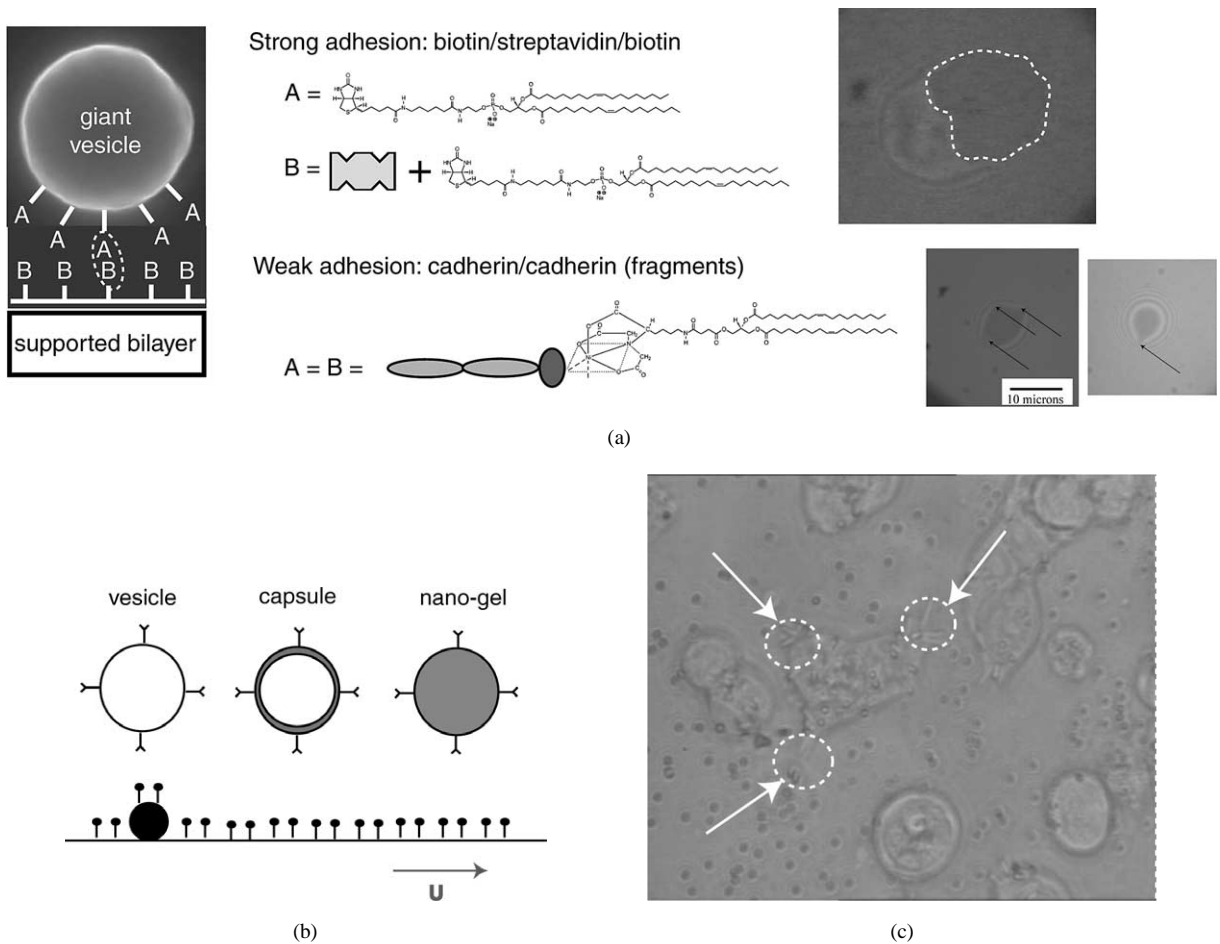


Fig. 3. (a) Specific adhesion of artificial cells: giant vesicle decorated by proteins (P.H. Puech). (b) Model systems for cells. (c) Epithelial cells adhering on a carpet of soft hairs showing the force field developed by the cell (A. Buguin, B. Ladoux).  
 Fig. 3. (a) Adh sion spécifique de cellules modèles : v sicules g antes d cor es de protéines (P.H. Puech). (b) Systèmes modèles de cellules. (c) Cellule  pith liale adh rante sur un tapis de plots d formables, pour mesurer le champ de forces développées par la cellule (A. Buguin, B. Ladoux).

similar to the soft bead one, but with an added complexity: the proteins must be able to diffuse on the cell surface to establish adhesion plaques. This should lead to a great variety of dynamical regimes [9]. Obviously, this artificial system will still be far from the reality of living matter, wherein many families of proteins communicate and form an active coupling between the cell membrane and the cytoskeleton. However, the theme is important: generation of adhesive contacts is essential for cell motility (Fig. 3(b)), tissue development, and migration of cancerous cells.

It is in this spirit that we have put together this special issue: ‘Hydrodynamics at soft surfaces’, for which some examples of soft and living matter have been selected and their static and dynamic properties studied.

This is a book of short stories. Each story is engendered through an industrial problem ((1) insecticide and fungicide deposition, (2) polymer films, (3) microgel based formulations, (4) polymer extrusion) or through the functioning of our cells ((5) transport through pores in membranes, (6) specific/non-specific adhesion: identification of CAMs – their function), and their goals to attain ((7) artificial membranes, (8) motility of particles through formation of an actin-comet, (9) detachment of adhesive contacts).

The art of imagining simple systems capable of mimicking nature is still in its youth, but we hope that this special issue will introduce it to the youngest researchers.

### Avant propos

*Le physicien doit être bien modeste ! Devant l’ampleur des problèmes que lui pose l’industrie, ou la matière vivante, il va imaginer le système modèle le plus simple qui va lui permettre d’isoler un phénomène unique et dégager des lois fondamentales.*

Ces lois permettront ensuite à l'industriel, au biologiste, de simuler un système réel, c'est-à-dire complexe, où plusieurs effets se conjuguent et interfèrent. Mais le chemin à parcourir est encore long...

Prenons l'exemple de la conduite automobile sur route mouillée : pour avoir une bonne adhérence, le film d'eau entre le pneu et la chaussée doit être éliminé en moins d'une milli seconde. Pour étudier ce phénomène, on a remplacé le pneu par une simple bille d'élastomère de taille millimétrique et la route par une lamelle de verre rendue hydrophobe par un traitement de surface (Fig. 1). En venant écraser la bille sur la lame à travers une goutte d'eau, on a pu observer (Fig. 2), par microscopie interférentielle, la dynamique de formation du contact adhésif par démouillage du film liquide intercalé [1]. Si on cisaille ce contact en déplaçant la lame à vitesse croissante, il va être partiellement, puis entièrement envahi par le liquide [2]. Cette perte de contact adhésif au delà d'une vitesse seuil décrit l'aquaplaning d'une voiture lorsque le chauffeur perd le contact de son véhicule en freinant sur une chaussée mouillée. Un défaut gravé sur la surface solide est capable de restaurer des zones adhésives en régime lubrifié, et de s'opposer à l'aquaplaning [3].

Comment l'industriel va passer de la petite bille au pneu ? En fait, le pneu est très rugueux, et ce sont sur les aspérités que les contacts se forment. Les aspérités ressemblent à nos petites billes et seuls leurs films d'épaisseur microscopique sont susceptibles de démouiller.

C'est pourquoi il a fallu observer la formation des contacts à des échelles microscopiques par des méthodes optiques interférentielles en réflexion (RICM) (Fig. 2(a)).

Les mêmes concepts vont servir de référence pour étudier l'adhésion cellulaire. Pour établir des contacts adhésifs, la cellule doit aussi éliminer un film d'eau, et les phénomènes se passent aux mêmes échelles, bien que la cellule soit environ cent fois plus petite que la bille molle. On va devoir aussi simplifier la cellule vivante ! (Fig. 3). On va la remplacer par une vésicule [4], simple feuillet liquide constitué d'une bicouche lipidique modélisant la membrane, que l'on va décorer de protéines (CAMs) identifiées par les biologistes, comme responsable de l'adhésion spécifique des cellules [5,6]. Pour modéliser le cytosquelette, on utilisera une capsule, feuillet réticulé, à l'image du réseau de spectrine qui renforce la membrane de nos globules rouges [7], ou une bulle gélatineuse (vésicule remplie d'un gel hydrophile) pour remplacer le réseau d'actine [8]. Ce système est voisin de l'adhésion de la petite bille molle, avec une complication : les protéines doivent diffuser pour construire les plaques d'adhésion, et ceci devrait conduire à une grande variété de régimes dynamiques [9]. Bien sûr, ce système artificiel est encore loin de la réalité du vivant, ou plusieurs familles de protéines dialoguent et établissent un couplage actif entre le cytosquelette et la membrane.

Mais ce sujet est important : la construction de ces contacts adhésifs est primordiale pour la motricité cellulaire (Fig. 3(b)) la formation des tissus, la migration des cellules cancéreuses.

C'est dans cet état d'esprit que l'on a composé ce numéro thématique des comptes rendus « Hydrodynamique aux surfaces douces », où l'on a sélectionné quelques objets de la matière molle et vivante, et étudié leurs propriétés statiques et dynamiques.

Ce numéro est un recueil de petites nouvelles. Chacune est née d'un problème industriel ((1) dépôt d'insecticides et fongicides, (2) films de polymères, (3) formulation à base de microgels, (4) extrusion de polymères), ou du fonctionnement de nos cellules, ((5) transport par l'ouverture de pores membranaires, (6) adhésion non spécifique/spécifique – identification des CAMS – de leur fonctionnement ) et de leur cible ((7) membranes artificielles, (8) motricité de particules construisant leur comète d'actine, (9) détachement de contacts adhésifs).

Pour les plus jeunes chercheurs, nous espérons que ce texte les entraînera à imaginer des objets tout simples capables de simuler les multiples facettes de la nature.

## References

- [1] P. Martin, F. Brochard-Wyart, Dewetting at soft interfaces, Phys. Rev. Lett. 80 (15) (1998) 3296–3299.
- [2] A. Martin, F. Brochard-Wyart, Wetting transitions at soft, sliding interfaces, Phys. Rev. E 65 (2002) 031605.
- [3] A. Martin, A. Buguin, F. Brochard-Wyart, Cerenkov dewetting at soft interfaces, Europhys. Lett. 37 (2002) 604.
- [4] R. Bruinsma, E. Sackmann, Physics at the scale of the cell, C. R. Acad. Sci. Paris Sér. IV 2 (2001) 803.
- [5] J.P. Thiery, R. Brackenburg, O. Rutishauser, G.M. Edelman, J. Biol. Chem. 252 (1977) 6841.
- [6] W.J. Gallin, B.C. Sorkin, B.A. Cunningham, Proc. Nat. Acad. Sci USA 80 (1983) 1038.
- [7] F. Brochard-Wyart, J.-F. Lennon, Frequency spectrum of the Flicker phenomenon in Erythrocytes, J. Physique 36 (1975) 1035.
- [8] P.F. Kiser, G. Wilson, D. Needham, Nature 394 (1998) 459.
- [9] F. Brochard-Wyart, P.-G. de Gennes, Adhesion induced by mobile binders: dynamics, PNAS 99 (12) (2002) 7854–7859.

Françoise Brochard-Wyart  
 Institut Curie, Section de physique et chimie  
 Laboratoire de physico-chimie des surfaces et interface  
 11, rue Pierre et Marie Curie  
 75231 Paris cedex 05  
 France