

Ascension capillaire : quand le solide semble « hisser » le liquide

par Laurence VIENNOT

Laboratoire de didactique André Revuz (LDAR)

Université Paris Diderot-Paris 7 - 75205 Paris Cedex 13

laurence.viennot@univ-paris-diderot.fr

APRÈS AVOIR RAPPELÉ les questions que soulèvent une formalisation traditionnelle des phénomènes de capillarité, en termes de forces qui tirent sur des lignes tracées aux limites d'interfaces, cette note s'attache à comprendre les difficultés de compréhension liées à ce traitement classique ainsi qu'à celui, classique lui aussi, en termes d'énergies de surface. À cette fin, on rappelle une caractéristique déterminante du raisonnement commun en physique. Puis, à propos du cas du mouillage partiel d'un solide, on rappelle le contenu de mises au point plus ou moins récentes. On propose et discute une analogie comme aide éventuelle à la compréhension. Enfin, on discute quelques traits marquants observés en vulgarisation de ces questions.

1. POSITION DU PROBLÈME

On observe une grande stabilité, depuis le XIX^e siècle, dans les éléments de base du traitement de la capillarité, et notamment celui de l'angle de raccordement θ entre liquide (1) et solide (2) en présence de gaz (3).

Thomas Young [1] établit la célèbre formule :

$$\sigma_{13} \cos \theta - \sigma_{12} + \sigma_{23} = 0$$

où les coefficients (souvent notés aussi γ_{LG} , γ_{SL} , γ_{SG}) désignent respectivement les tensions par unité de longueur aux interfaces concernées. Comme le soulignent Étienne Guyon et *al.* [2], Gibbs avait dès 1878 formulé une version thermodynamique très complète où les coefficients prennent la signification de variations d'énergie libre par unité de surface pour chaque interface.

Les deux approches se sont dès lors maintenues, notamment au plan pédagogique.

Que ce soit par affirmation directe ou par suite d'une retraduction variationnelle de l'approche thermodynamique, les exposés académiques (par exemple Georges Bruhat [3], cf. figure 1, page ci-après) ont souvent impliqué des forces (précisément : des densités linéiques de force) qui « tirent » sur un élément de la ligne de coexistence entre les trois phases.

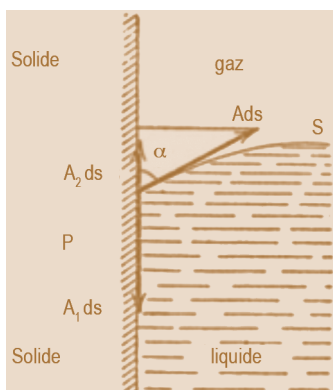


Figure 1 - Extraite de Georges Bruhat ([3], p. 458), cette figure illustre les entités intervenant dans la relation d'Young ($A \cos \alpha = A_1 - A_2$ avec les notations de l'auteur) portant sur l'angle de raccordement solide-liquide.

Les variations de surface, et d'énergie potentielle (plus précisément : d'énergie libre, à température constante), d'une interface se présentent alors comme résultats du déplacement du point d'application d'une force qui agit sur celui-ci. Ceci serait l'analogue d'un ressort sur lequel on tire quasi statiquement et qui acquiert en conséquence l'énergie potentielle correspondant au travail de cette force d'origine extérieure. Bien que les tensions superficielles ne soient pas à confondre avec celle d'un ressort, la démarche serait analogue à la recherche de la position d'équilibre d'un point astreint à rester sur la paroi solide et relié à trois ressorts attachés chacun par son autre extrémité à un point fixe.

Pourtant, des voix se sont élevées [4 à 6] pour questionner le statut des forces ainsi mises en œuvre, notamment le fait qu'elles tiraient, semblait-on souvent dire, sur une « ligne » immatérielle. On a parlé de leur statut fictif.

Ce statut « fictif » a été battu en brèche par ces auteurs, qui se sont attachés à montrer la réalité des interactions moléculaires et leurs conséquences en termes de forces localisées autour des interfaces, impliquant une épaisseur typique de deux ou trois molécules. De part et d'autre d'une ligne tracée sur une interface liquide-gaz, ces molécules que nous appellerons « de surface » se tirent mutuellement dessus parallèlement à l'interface, en moyenne. Un dispositif de mesure classique fait intervenir un objet qui borne un film liquide (cf. figure 2, page ci-contre). Cet objet extérieur est tiré vers le liquide, tangentiellement aux deux interfaces air-liquide. La force en question est bel et bien mesurable.

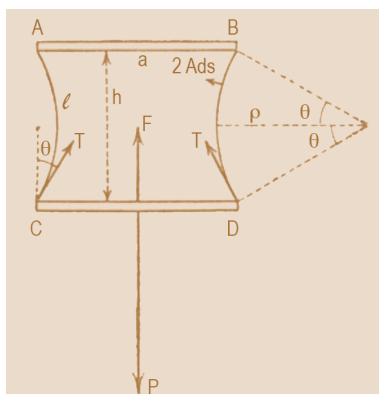


Figure 2 - D'après Georges Bruhat ([3], p. 463) : un dispositif de mesure (dit de Terquem) de la tension superficielle d'un fluide, en disposition verticale entre deux baguettes horizontales et deux fils latéraux.

Ou encore, la forme bombée d'une goutte, par exemple de mercure, déposée sur un support horizontal témoigne visuellement de la réalité de ces interactions et de la tension de surface associée. L'affaire semble donc à peu près réglée pour une interface liquide-gaz.

Mais le solide en contact avec le gaz, ou avec le liquide, « tire-t-il » toujours sur quelque chose, et si oui comment ?

Brown [6] remarque que, si un solide est totalement indéformable, on voit mal comment il pourrait acquérir ou perdre de l'énergie potentielle du fait de sa plus ou moins grande interface avec une autre phase. Il ajoute que cela n'empêcherait pas le solide de tirer sur le liquide perpendiculairement à l'interface. Plus surprenant : cela n'empêcherait pas non plus un liquide, en l'absence de pesanteur, de s'étaler tangentiellement à l'interface sur une paroi solide ni, en situation de pesanteur non nulle, de remonter le long d'une paroi verticale. L'auteur précise qu'en fait le solide se déforme, même très peu, ce qui peut justifier, cette fois, une attraction tangentielle du liquide par le solide.

Des articles récents [7-8] reprennent la question et remarquent que si le solide est indéformable et plan infini, il ne peut exercer sur le liquide qu'une force normale à l'interface. Autrement dit, il n'exerce aucune force tangentielle sur le liquide, y compris dans les situations qui suggèrent le contraire. Comme Brown, quoique de façon plus élaborée, les auteurs expliquent notamment la valeur de l'angle de raccordement et la montée d'un liquide le long d'une paroi verticale. Ils ajoutent qu'une déformation du solide peut ajouter un effet de traction sur le liquide avec composante tangentielle non nulle, mais du second ordre par rapport au premier.

Comment expliquer que des effets bien connus – angle de raccordement, montée de liquide le long d’une paroi – suscitent ce besoin d’inventer une force qui « tire » tangentiellement sur le liquide ? Quant aux auteurs qui démontrent l’inadéquation de cette idée, à quels mécanismes font-ils appel ? Comment réconcilier leurs conclusions avec l’intuition ? Tels sont, dans l’ordre, les thèmes traités dans cette note, qui revient en fin de discussion sur quelques éléments d’explication fréquemment utilisés en vulgarisation.

2. TENDANCES COMMUNES DE RAISONNEMENT

De façon générale, il est probable que nos raisonnements en mécanique prennent comme points de départ ceux qui fonctionnent avec des objets solides.

L’enseignement s’y appuie. Certes, les lois de Newton s’appliquent aussi bien aux objets déformables. Mais, pour un liquide, ce qu’on peut en conclure à l’aide d’un bilan de force global reste particulièrement incomplet. Quant aux bilans de force locaux, sur le « coin » liquide limitrophe des deux autres phases (déjà chez Berry [4]), ils sont à la fois très éclairants [7-8] et d’un accès peu immédiat.

Concernant l’énergie potentielle, la mécanique d’un « point massique » évoluant dans un champ (électrique, ou de gravité) nous habitue à l’idée que la variation d’énergie potentielle ΔE_p d’un système se joue là où agit une force intérieure qui déplace son point d’application (\vec{dl}) : $dE_p = -\vec{F}_{int} \cdot \vec{dl}$, et en cas de transformation quasi statique, $dE_p = \vec{F}_{ext} \cdot \vec{dl}$.

S’il y a une variation d’énergie potentielle associée à une variation de surface d’interface, on attend donc qu’elle s’associe simplement à une force qui agit sur un bord de cette surface, comme lorsqu’on agit sur un ressort. Donc il est difficile, dans cette perspective, d’admettre que la surface du verre ne tire pas vers le haut l’eau qui monte le long d’une paroi verticale partiellement immergée.

L’enseignement habituel, ce faisant, s’inscrit dans une tendance majeure du raisonnement commun en physique : un effet se doit d’avoir une cause, de préférence simple, « agissant » dans le même sens. La mécanique newtonienne, avec ses forces résultantes qui ne sont pas nécessairement dans le sens du mouvement est l’occasion de difficultés considérables. Les études portant sur le raisonnement linéaire causal, utilisé en lieu et place d’une analyse systémique, élargissent ce constat [9]. En bref, il est difficile de ne pas raisonner *via* une analyse causale simple, et en particulier locale⁽¹⁾.

(1) Encore récemment, un article [10] s’insurgeait contre l’idée que la Terre exerçait une force vers l’avant au niveau du pied d’un piéton qui accélère vers l’avant, en arguant notamment du fait que le point d’application de cette force se déplaçait vers l’arrière dans un référentiel galiléen (on trouve une mise au point dans [11]).

3. POINT DE VUE MOLÉCULAIRE SUR L'INTERACTION SOLIDE/LIQUIDE

À la base d'explications récentes [7-8] comme de textes « mécanistes » plus anciens [3-4, 6] se trouvent les interactions moléculaires. Il en ressort qu'un solide plan homogène attire les molécules de liquide perpendiculairement à l'interface. Dans le cas du mouillage (partiel ou total), cet effet l'emporte sur celui des autres interactions moléculaires et se traduit par un étalement du liquide sur la paroi. Dans une mince couche le long de la paroi, la densité de ces molécules est plus grande qu'au sein du liquide.

En termes de potentiel, les molécules qui se rapprochent de la paroi perdent de l'énergie potentielle liée à l'attraction de la paroi. Ce faisant, elles peuvent également gagner de l'énergie potentielle, celle liée à l'attraction à distance des autres molécules de liquide et celle que génère la répulsion à très courte distance entre celles-ci. Le long d'une paroi verticale, elles peuvent aussi gagner une énergie potentielle de pesanteur. On assiste alors à une sorte d'empilement des molécules entassées près de la paroi, comme une colonne en compression située sous le coin liquide entre solide et gaz⁽²⁾. L'équilibre atteint dans le cas du mouillage partiel correspond à une situation où les taux de variation d'énergie potentielle lors d'un déplacement élémentaire du liquide sur la paroi se compensent. Lors de la montée du liquide le long de la paroi verticale d'un récipient, le centre de masse du système « liquide » monte : quelle force verticale, vers le haut, a bien pu intervenir, puisqu'au niveau du coin liquide la paroi verticale n'exerce qu'une force horizontale ?

Faute d'attraction verticale par la paroi, on peut chercher un autre élément extérieur au liquide avec lequel ait lieu une interaction répulsive se traduisant par une composante verticale de force. La force en question peut être exercée par le fond horizontal du récipient. Noter aussi que la symétrie justifiant que l'attraction du liquide par le solide soit normale à la paroi cesse de s'appliquer au bord inférieur de celle-ci⁽³⁾.

En tout état de cause, on est contraint d'envisager le liquide dans son ensemble avec cette fois toutes les interactions qui le concernent, et non seulement la pesanteur et des forces intervenant à sa surface supérieure.

- (2) On trouve chez Brown ([5], p. 443-444) l'analogie suivante : la zone en compression le long des parois du solide agirait comme le feraient, à deux dimensions, les poteaux d'une corde à linge. Ceux-ci soutiendraient cette corde (la limite du ménisque), qui elle-même soutiendrait le liquide en dessous (« le linge »).
- (3) Pour un tube qui trempe dans l'eau sans toucher le fond, la force « supportant » la colonne verticale en compression le long de la paroi cylindrique du tube est exercée en bas du tube : là, la symétrie « plan infini » n'a plus cours et l'attraction du solide sur les molécules de liquide a une composante verticale [7-8].

4. UNE ANALOGIE

Répétons-le : le mécanisme central de l'interaction solide-liquide est une attraction normale à la paroi. Prenons le cas d'une paroi verticale. On se trouve dans la situation où cette dernière interaction – horizontale en haut du tube, donc – se traduit par un déplacement vertical ascendant de liquide. Comment l'intuition peut-elle se réconcilier avec cette étrange situation ?

Un premier outil explicatif est le raisonnement newtonien développé au paragraphe précédent. Mais on peut aussi, en complément, considérer une analogie. Celle-ci n'a d'autre objectif ici que de faciliter – éventuellement – la résolution du conflit que

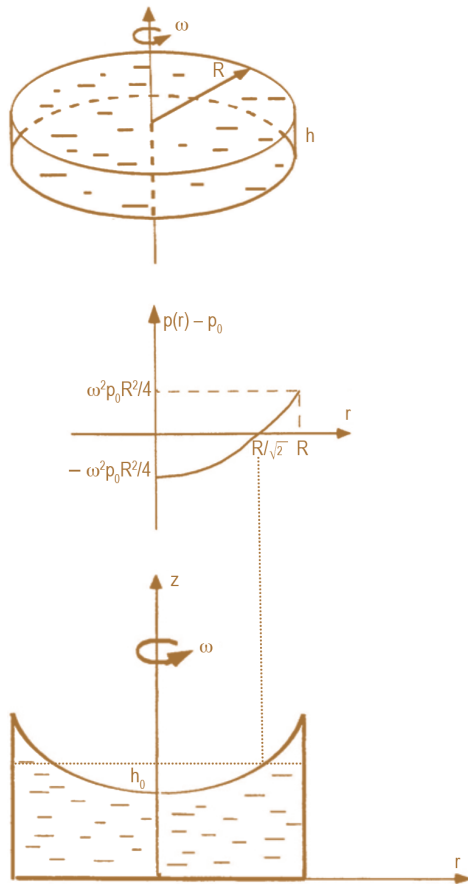


Figure 3 - De haut en bas : une centrifugeuse cylindrique pleine de liquide en rotation (vitesse angulaire ω), répartition radiale correspondante de la pression et variation du niveau du liquide (niveau initial h_0) lorsqu'on enlève le couvercle [12].

l'on vient de décrire.

Cherchons une situation où un liquide se trouve poussé horizontalement vers une paroi verticale. Une centrifugeuse fait l'affaire. Lorsqu'on met en rotation une centrifugeuse cylindrique fermée, d'axe vertical et pleine d'eau, la pression interne diminue au centre et augmente à l'extérieur, par rapport à l'état de repos (cf. figure 3, page ci-contre). Le potentiel attractif du solide, lié aux interactions moléculaires, est ici remplacé par le pseudo-potentiel répulsif (U_{cent}) de la force centrifuge.

Enlevons le couvercle de la centrifugeuse pour retrouver la situation bien connue du seau d'eau en rotation d'axe vertical, dit « de Newton ». Cette fois, la surface libre est à pression constante (atmosphérique). Elle prend la forme d'un parabolôïde de révolution. La zone centrale où la pression diminuait dans l'expérience précédente fait l'objet d'une baisse de niveau, la zone externe voit le niveau d'eau s'élever. La masse se conservant, le volume laissé vide sous le niveau initial est aussi celui de l'eau située au-dessus du niveau initial. Cela revient à dire que ce volume d'eau s'est élevé. Donc le centre de masse de l'ensemble s'est élevé. Seul le fond de la cuve peut expliquer ce résultat : pendant la phase d'accélération, l'interaction de contact avec le fond de la cuve a excédé le poids du liquide, pour lui redevenir égale en régime permanent de rotation.

Comme toute analogie, celle-ci doit être surveillée. Le pseudo potentiel centrifuge n'a ni la forme de l'attraction moléculaire (Lennard-Jones) ni son caractère très localisé au voisinage de la paroi. Mais sa valeur diminue bien quand on se rapproche de la paroi : $U_{cent} = -\frac{1}{2}\omega^2 r^2$ (en notations usuelles, cf. figure 3). On observe comment son gradient, radial et situé dans un plan horizontal, peut se traduire par une montée du centre de masse, modulo une autre interaction qui intervient ailleurs, au contact du fond du récipient. Au moins admet-on sans peine ici que la paroi verticale de la centrifugeuse n'a pas tiré verticalement sur l'eau, laquelle est pourtant bien montée. Il a fallu, au passage, délocaliser – c'est-à-dire globaliser – l'analyse⁽⁴⁾.

5. QUELQUES MODES DE VULGARISATION

En ce qui concerne l'explication de ces phénomènes en termes plus ou moins proches de la vulgarisation, ce qui domine est l'évocation d'une causalité simple, sou-

(4) On peut arguer qu'il y a encore plus simple pour voir des effets orthogonaux aux forces en cause dans une situation de déformation : le cas d'une goutte de liquide déposée sur un support horizontal et qui subit des forces verticales, à savoir la pesanteur et l'attraction du liquide par le support. Nul besoin d'une force extérieure horizontale « tirant » sur cette goutte pour que celle-ci s'étale sur le support. On sait juste que d'autres forces limiteront éventuellement cet étalement. Après tout, lorsqu'on presse verticalement une boule de pâte à modeler sur un support horizontal, elle s'étale aussi. Simplement dans ces cas-là, le centre de masse ne se déplace pas latéralement. Ces situations sont donc beaucoup moins intrigantes.

vent locale, en écho aux tendances communes de raisonnement. Ceci peut prendre plusieurs formes, qui se rejoignent largement.

5.1. Les forces qui tirent

En vulgarisation, il est extrêmement courant de trouver des schémas assortis de commentaires du type de ceux que l'on vient de signaler (par exemple ([13], p. 158)). Les forces symbolisées (il s'agit de densités linéiques de force) sont localisées à l'interface, en un point qui est susceptible de se déplacer : l'analyse est locale, répondant ainsi simplement à l'une des préférences du raisonnement commun en physique. On attribue à la résultante un rôle moteur – la force qui « hisse », « *trois forces tirent* » [13].

On peut noter que les exposés plus académiques évoqués plus haut, bien antérieurs, mais toujours d'actualité, portaient déjà en germe cette vision des choses.

Ainsi, parlant de l'« élément ds de courbe d'intersection du liquide avec une paroi solide », Georges Bruhat ([3], cf. figure 1) s'exprime ainsi : « *Les actions de contact sur cet élément des parties contiguës de la couche superficielle sont représentées par une force $A_s ds$ normale à l'élément dans le plan tangent à S* » (surface de séparation liquide-gaz). « *Les molécules du liquide qui se trouvent au contact de la paroi solide appartiennent aussi à une couche superficielle qui possède des propriétés analogues à celles de S : l'élément ds de la part de cette couche des actions de contact représentées par une force $A_1 ds$ normale à ds dans le plan tangent à la paroi. Enfin, nous admettons qu'il existe une troisième force $A_2 ds$ de direction opposée à la précédente, correspondant à la surface de séparation solide-gaz* ».

Il est question de forces « représentées » par des vecteurs tangents chacun à l'interface concernée. Alors que cette « représentation » est de type classique (on aurait presque envie de dire « réaliste » s'il ne s'agissait pas toujours d'un modèle) dans le cas des surfaces limitant le liquide, elle devient problématique dans le cas de l'action du solide, alors même qu'on nous dit qu'elle « existe ». Cette remarque vaut même si le résultat des calculs ainsi menés convient tout à fait.

Henri Bouasse [14] parle également de trois forces s'exerçant « sur chaque élément du contour $d\sigma$ » (p. 152), après avoir évoqué des « membranes tendues même sur les solides », tout en ajoutant que cela est « difficile à imaginer ». Il nous dit aussi que « *le liquide* (dans un tube capillaire avec mouillage partiel), *est porté par la tension superficielle* » p. 161).

5.2. Des tendances

On observe aussi, y compris chez les auteurs que l'on vient de citer, une expression *a priori* plus globale, en termes de « tendance ».

Ce registre d'expression peut être considéré comme proche d'une formulation qui

ferait allusion à l'énergie potentielle (en fait énergie libre).

Il peut prendre une forme très métaphorique. Ainsi de Pierre-Gilles de Gennes [15] s'exprime-t-il sur la base du bonheur des molécules : « *L'idée générale est que les molécules à la surface d'un liquide sont beaucoup moins "heureuses" que celles qui sont à l'intérieur. Ces dernières voient en effet des molécules amies autour d'elles, alors que les molécules en surface ne voient qu'une moitié d'amies et une moitié d'un milieu qui leur est totalement neutre. Le résultat est que le liquide a envie de diminuer sa surface* ».

Cependant, l'idée de tendance est souvent utilisée en quasi-équivalence avec celle de force.

Ainsi chez David Quéré [13], la mention d'une force « *tendant à remplir le tube* » va avec une représentation très localisée sur la ligne, elle est présentée comme la composante dominante de « *la force qui hisse le liquide* ».

De même, Henri Bouasse ([15], p. 152-153), dans un commentaire de style intermédiaire entre vulgarisation et traitement académique, développe-t-il un point de vue analogue.

« *On se représente mieux les phénomènes en admettant que le solide possède une tendance à se couvrir de liquide représentée par la différence $T_g - T_l$, ou, ce qui revient au même, une tendance à se découvrir représentée par la différence $T_l - T_g$. L'équation (1) (celle de Young) exprime l'égalité entre cette tendance et l'autre force en jeu* » (liée à l'interface liquide-gaz).

Employer l'idée de tendance à se couvrir ou de tendance à se découvrir, s'agissant du solide, c'est comme si, dans le cas du seau de Newton, on parlait de la tendance de la paroi de la centrifugeuse à se recouvrir de liquide, à ceci près que ladite tendance dépend alors de la vitesse de rotation. Toujours est-il que, chez cet auteur, il n'y a qu'un pas de la tendance à la force, puisque la relation de Young est présentée comme exprimant l'égalité d'une tendance et d'une force. Puisque, surtout, c'est un bilan local qu'il s'agit d'expliquer par ce commentaire.

5.3. Une géométrie à statut causal

Terminons par l'exemple d'un type d'explication moins répandu, mais procédant du même principe. Il s'agit d'expliquer la montée d'un liquide dans un tube capillaire. L'attention est cette fois centrée sur le ménisque.

Rappelons à ce sujet la formule la plus en faveur sur le thème de la capillarité, avec bien sûr la relation d'Young : c'est la formule de Laplace. La variation de pression de part et d'autre de l'interface courbée s'exprime en fonction du coefficient de tension superficielle du liquide, σ , et de deux rayons de courbure situés dans des plans ortho-

gonaux entre eux et perpendiculaires à la surface :

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

ou encore $\Delta p = \sigma \kappa$ où κ est la courbure de l'interface.

Il est fréquent de nommer « pression de Laplace » la surpression correspondante. La courbure associée prend parfois, dans les explications expertes proposées, une sorte d'autonomie causale : *Un liquide mouillant dans un tube capillaire sera ainsi tiré par le ménisque qui le borne : la courbure de ce ménisque engendre une dépression [...]* ([16], p. 11). Les meilleures candidates à l'explication causale – les interactions entre molécules – sont alors dépossédées de ce privilège, et s'effacent devant certains aspects liés à leurs effets géométriques, dans un retournement un peu étonnant pour le profane.

Mais la structure de l'explication demeure : il s'agit d'expliquer un mouvement par une cause locale.

6. REMARQUES FINALES

Il ne faut pas voir dans les lignes précédentes la moindre nouveauté concernant la capillarité, mais seulement une tentative pour en comprendre certaines difficultés. Les coefficients classiquement impliqués remplissent une bonne partie du contrat : ils permettent de calculer efficacement toutes sortes d'effets. De plus, le formalisme est assez simple du point de vue des relations et de leur manipulation. La difficulté est de leur donner du sens.

On observe combien ce domaine de la capillarité nous expose à un inconfort conceptuel : les effets observés ne s'associent pas simplement aux causes envisageables. À vrai dire ils le sont, pour dire vite, orthogonaux. On nous parle de molécules attirées vers l'ensemble du liquide et les effets observables apparaissent tangents à la surface libre ; le solide attire les molécules de liquide perpendiculairement à l'interface et le liquide s'étale tangentiellement.

L'analogie de l'eau en rotation dans une cuve cylindrique horizontale, proposée pour faciliter – éventuellement – la compréhension de ces phénomènes, s'inscrit dans cette recherche de sens. À l'inverse, il est très probable que les raccourcis de langage usuels constituent pour les profanes un obstacle à la compréhension des symboles, termes et relations mis en œuvre dans un traitement théorique à visée explicative. Comme pour de nombreux thèmes, les explications présumées simples par leurs auteurs mettent en résonance les grandes caractéristiques du raisonnement commun [17-18], au premier chef le caractère local de l'analyse [9]. Ceci est particulièrement le cas en situation de vulgarisation. Ce faisant, elles renforcent le caractère d'obstacle des limitations associées à ce type d'analyse, pour qui, sans être expert, voudrait aller un peu plus loin.

Des expérimentations auprès de personnes en situation d'apprentissage de la capillarité sont nécessaires pour mettre à l'épreuve les éléments de réflexion discutés dans cette note, et notamment la valeur de l'analogie proposée.

REMERCIEMENTS

Mes vifs remerciements vont à Ken Sekimoto pour d'intéressantes discussions sur ce sujet.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] T.Young, "An Essay on the Cohesion of Fluids", *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, n° 95, p. 65-87, 1805.
- [2] E. Guyon, J. Prost, C. Betrencourt, C. Boulet et B. Bolochine, «Attention aux tensions superficielles !», *European Journal of Physics*, n° 3, p. 159-168, 1982.
- [3] G. Bruhat, *Cours de physique générale (mécanique)*, 5^e édition, Paris : Masson et Compagnie, 1955.
- [4] M.V. Berry, "The molecular mechanism of surface tension", *Physics Education*, n° 6, p. 79-84, 1971.
- [5] R.C. Brown, "The fundamental concepts concerning surface tension and capillarity", *Proceedings of the Physical Society*, vol. 59, n° 3, p. 429-448, 1946.
- [6] R.C. Brown, "The Surface Tension of Liquids", *Contemporary Physics*, n° 15(4), p. 301-327, 1974.
- [7] S. Das, A. Marchand, B. Andreotti and J.H. Snoeijer, "Elastic deformation due to tangential capillary forces", *Physics of Fluids*, 23, 072006, 2011.
- [8] A. Marchand, J. H. Weijs, J.H. Snoeijer and B. Andreotti, "Why is surface tension parallel to the interface", *American Journal of Physics*, p. 999-1008, 2011.
- [9] L. Viennot, *Raisonnement en physique - La part du sens commun*, Bruxelles : De Boeck, 1996.
- [10] J.A. G. McClelland, "A very persistent mistake", *Physics Education*, n° 46(4), p. 469-471, 2011.
- [11] L.Viennot, "Newton's laws: a very persistent consistency", *Physics Education*, n° 47, p. 595-598, 2012.
- [12] B. Roulet and L.Viennot, "Rotating rigid rods or incompressible fluids: how to determine the stress?", *American Journal of Physics*, n° 66(1), p. 75-79, 1998.

- [13] D. Quéré, *Bulles gouttes et perles liquides*, in D. Jasmin, J.M. Bouchard et P. Léna, *Graines de science* 3, Paris : Le Pommier, p. 145-165, 2001.
- [14] H. Bouasse, *Capillarité, phénomènes superficiels*, Paris : Delagrave, 1924.
- [15] P.-G. de Gennes, « Bulles, mousses et autres objets fragiles, *Revue du Palais de la découverte*, n° 18(180), p. 43-60, 1990.
- [16] D. Quéré, M. Prakash et J.W.M. Bush, « Prise de bec chez les phalaropes », *Reflète de la physique*, n° 15, p. 11-14, 2009.
- [17] L.Viennot, « L'explication écho : forme privilégiée du rapprochement entre vulgarisation et enseignement », *Spirale*, n° 48, p. 85-101, 2011.
- [18] L.Viennot, *En physique pour comprendre*, Collection Grenoble Sciences, Les Ullis : EDP Sciences.



Laurence VIENNOT

Professeur émérite

Laboratoire de didactique André Revuz (LDAR)

Université Paris Diderot-Paris 7

Paris