

BULLES ET ANTIBULLES

S. DORBOLO

23 octobre 2003

1 Introduction

En Belgique, on connaît bien toutes ces histoires à bulles : Tintin, les Schtroumpfs, XIII etc. Cet exposé concerne les histoires des bulles. En créant ces sphères transparentes, fragiles et éphémères, on se prend pour le meilleur des verriers. Derrière ce phénomène ludique se cache bon nombre de phénomènes physiques remarquables. On peut en effet visiter de nombreux chapitres de la physique si on veut parvenir à décrire ces objets et à comprendre leur stabilité : de la physique des fluides à l'optique en passant par la physique moléculaire. Une partie de l'exposé vous racontera les mécanismes de formation ainsi que ceux qui mènent la bulle à sa perte. À l'aide de quelques formules élémentaires, on pourra décrire ces films d'eau savonneuse qui renferment de l'air.

Récemment, on a été porté à étudier un objet qui sort un peu de l'ordinaire : les antibulles. Il étonne par sa simplicité et par sa stabilité. Une antibulle est le négatif d'une bulle de savon : si on prend une photo d'une bulle, il 'suffit' de changer le liquide en air et l'air en liquide. Une coque gazeuse entourant une bille aqueuse. La stabilité de ce film est assez remarquable et méconnue, donc intéressante.

Dans les sections consacrées à *La peau des liquides*, *Les surfactants* et *La loi de Laplace*, on trouve l'arsenal physique nécessaire à la compréhension de la stabilité d'une bulle. Ensuite, on expliquera comment créer des antibulles puis on les décrira en établissant les lois qui régissent cet objet. Enfin, quelques propriétés des antibulles seront évoquées dans la dernière section avant de conclure.

On ne peut finir une introduction sur les bulles sans un paragraphe un peu plus pragmatique qui tente de répondre à la question la plus populaire : pourquoi étudier la forme, la stabilité et la



FIG. 1 – Le garçon qui fait des bulles, Manet 1867.

physique des bulles, à quoi ça peut bien servir? Si on met plusieurs bulles ensemble, on obtient une mousse. La bulle est la cellule essentielle de la mousse [1]. Ces mousses, on les rencontre dans énormément de domaines : domestique (bain mousse, mousse à raser, détergent, nettoyage du sol, ...), sécurité (extincteur), automobile (siège de voiture), alimentaire (bière!) etc etc... Certains sujets justifient à eux seuls l'existence d'études sérieuses. En effet, la stabilité des mousses est un critère essentiel dans l'industrie. Toutes les mousses ne doivent pas avoir les mêmes propriétés. Une bière, on aime que la mousse soit stable et onctueuse. Un fabricant de produits pour lave-vaisselle ne veut pas de mousse. Celui qui confectionne des produits d'entretien du sol veut une mousse qui disparaît immédiatement après que l'ardue tâche soit accomplie. Les cahiers des charges sont assez variés et font appel aux différents mécanismes physiques de la mousse. Une bulle, c'est beau...

2 La peau liquide

Le fer flotte. En s'y prenant avec précaution, il est possible de faire flotter une aiguille à la surface de l'eau. Cette expérience va bien évidemment *a priori* à l'encontre du sens commun qui veut qu'un morceau de métal coule. Il n'y a pas de miracle, si l'aiguille ne coule pas, c'est qu'il existe une force opposée à la pesanteur qui l'empêche de couler. Dans cette section, nous allons voir quelle est la nature et quel est le rôle de celle-ci dans la formation des bulles de savon.

Un liquide est composé de molécules qui sont en interaction. L'origine de ces interactions est essentiellement électrostatique. Brièvement, on peut trouver des forces attractives ou répulsives entre les différents acteurs à l'échelle moléculaire : les ions, les dipôles ou encore entre des dipôles induits (forces de Van der Waals). En faisant court, deux molécules s'attirent (forces de Van der Waals) et se repoussent à courte portée (répulsion due aux noyaux positifs). A tout moment, les molécules cherchent à se trouver dans une position qui minimise leurs énergies potentielles dans une position où les différentes forces s'équilibrent.

Les molécules situées dans le liquide sont entourées d'un maximum de voisines. Par contre, à la surface, les molécules ne peuvent s'entourer que de la moitié. On dit qu'il y a un défaut d'énergie W_s , vu que la situation la plus stable est celle d'une molécule située sous la surface, i.e. entourée d'un maximum de voisins. Cette énergie 'en trop' est proportionnelle à la surface. On peut écrire

$$W_s = \gamma A \quad (1)$$

où A est l'aire de la surface. Le coefficient de proportionnalité est la tension superficielle γ . Ainsi, pour augmenter la surface d'une unité, il faut fournir γ joules. En agissant de cette façon, on aug-

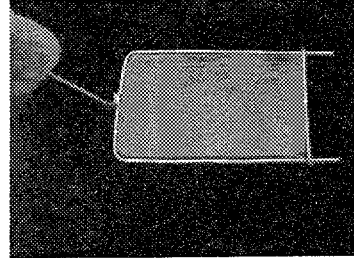
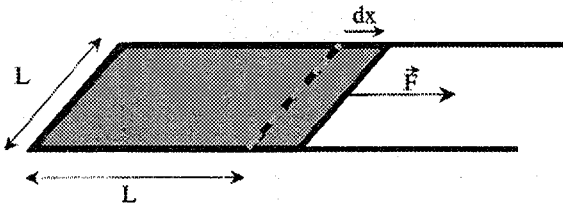


FIG. 2 - Film liquide délimité par un cadre à côté mobile. Lorsqu'on tente d'augmenter l'aire du film en bougeant l'armature de droite, une force s'oppose à ce mouvement. Elle est due à la tension superficielle du film et est proportionnelle à L .

mente l'énergie du système attendu que celui-ci tente d'avoir *naturellement* une surface minimale. Les unités de la tension superficielle est le joule par mètre carré [J/m^2].

La tension superficielle est une force qui s'exerce par unité de longueur. Pour illustrer ce fait, considérons un film d'eau savonneuse soutenu par un cadre carré de côté L (Fig.2). Un des côtés de ce cadre étant mobile, on peut modifier l'aire du film. Si on tente d'augmenter l'aire du film en déplaçant le côté mobile d'une distance dx , on augmente la surface de Ldx . Intuitivement, on sait que pour accomplir cette tâche on devra fournir un travail dW . Le film se comporte comme une membrane de caoutchouc que l'on tend. Plus L est grand, plus la force à appliquer sera importante. Cela s'exprime par la relation suivante :

$$dW = 2\gamma L dx \quad (2)$$

où le facteur 2 provient du fait qu'on a deux faces, autrement dit deux surfaces. On peut donc également l'exprimer en newton par mètre [N/m].

La tension superficielle dépend évidemment de la nature du liquide et de la température vu que ce sont les interactions entre les molécules qui sont à l'origine de cette force. On trouve ainsi dans les tables que l'eau a une tension superficielle de 72 mN/m tandis que le mercure dont les interactions entre atome sont fortes a une tension superficielle de 485 mN/m. On sait que le mercure forme des gouttes très sphériques sur la plupart des supports. Le verre fondu a un γ de 300 mN/m, cette propriété facilite la fabrication des billes en verre.

Petit calcul et ordre de grandeur

Considérons notre aiguille, elle mesure $L = 2$ cm. Quelle est la masse maximale que peut supporter la peau de l'eau ? Afin d'obtenir la limite supérieure, nous allons considérer que l'angle de contact entre l'eau et l'aiguille est de 90° (voir chapitre de A. Daeri).

Il y a ainsi une force verticale

F_v due à la tension superficielle proportionnelle au périmètre de l'aiguille $2L$

$$F_v = 2 L \gamma = 2.88 \text{ mN}$$

Au maximum, l'aiguille peut avoir une masse de $(2.88 \cdot 10^{-3}/g)$ kg, soit environ 0.28 g.

On comprend mieux pourquoi le *Gerris marginatus* tient à garder la ligne.

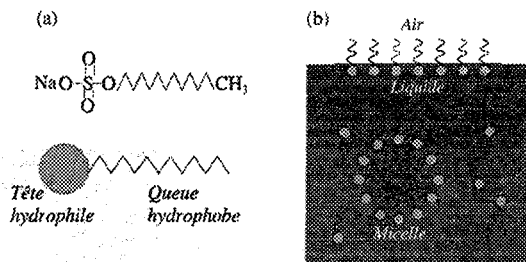


FIG. 3 - (a) Molécule de surfactant (SDS), les lignes brisées représentent les chaînes carbonées. (b) Disposition des molécules de surfactant à la surface libre d'un liquide. Sous l'eau, un micelle ne participant pas à l'abaissement de la tension superficielle a été représenté.

3 Surfactant et stabilité d'un film liquide

N'importe quel enfant sait que pour faire des bulles, il faut mettre du détergent vaisselle dans l'eau sinon les bulles se cassent immédiatement. Dans des conditions habituelles, on ne parvient pas à réaliser des films d'eau car... la tension de surface est telle que le film se brise immédiatement pour former des petites gouttes sphériques de manière à minimiser la surface. Ainsi on ajoute du détergent vaisselle (du surfactant et du parfum) pour faire chuter la tension de surface. Cette propriété spécifique du détergent est intéressante vu que le liquide eau+surfactant 'mouille mieux' la vaisselle sale du repas gargantuesque (voir exposé de A. Daerr). La saleté est plus facilement soulevée de la vaisselle car la surface des assiettes préfère être couverte de la mixture eau+surfactant. Outre les applications ménagères, les surfactants sont nombreux dans la nature, l'exemple le plus essentiel est ce qui se passe dans nos poumons. Car si on parvient à ouvrir nos alvéoles pulmonaires, c'est grâce à un surfactant naturel qui diminue la tension de surface des alvéoles.

Nous allons essayer d'expliquer brièvement comment ces molécules permettent de diminuer γ . Pour ce faire, il faut partir de la structure moléculaire particulière des surfactants. Il existe différents types de surfactant : anionique, cationique, non-ionique. Nous nous cantonnerons à un surfactant typique : le SDS (Sodium Dodécyl Sulphate). Cette molécule est fortement polarisée. Sa forme moléculaire ressemble à un têtard dont la tête serait un ion de sodium (voir la Fig 3a). Cette tête est la partie hydrophile, c'est-à-dire que la tête sera dirigée vers le liquide tandis que la queue hydrophobe est dans la direction opposée. La surface d'un liquide, à l'échelle moléculaire ressemble à la Fig. 3b : des molécules de surfactant dressées verticalement. A la surface, les interactions qui entrent en jeu dans ce cas sont celles qui ont lieu entre molécules de surfactant et non entre les molécules d'eau. Ainsi la tension superficielle du liquide eau+surfactant est plus petite que celle de l'eau.

La valeur de γ décroît lorsque la concentration en surfactant augmente. Cependant, une saturation autour d'une valeur minimale est observée. Par exemple, on atteint 25 mN/m pour un mélange eau-SDS lorsque la concentration de celui-ci dépasse 5 pour mille. En fait, les molécules de surfactant ont tendance à s'agglomérer en *micelles* (Fig.3b) : les interactions entre les queues des molécules sont telles qu'une configuration stable est de se lier. Les molécules qui forment un micelle ne participent plus à l'abaissement de la tension superficielle. La concentration à partir de laquelle la tension superficielle n'évolue plus est appelée concentration micellaire critique CMC.

Maintenant intéressons-nous à la structure d'un film. Un film liquide se compose d'eau et de

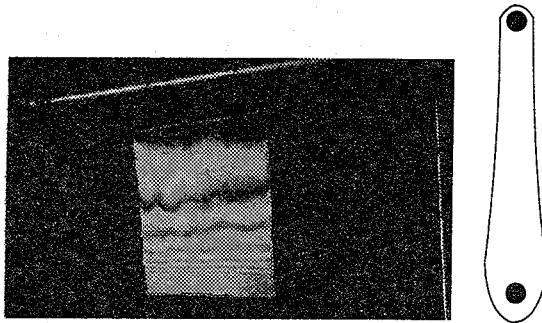


FIG. 4 – Film liquide délimité par un cadre vertical. Les interférences sont visibles sous la forme de bandes horizontales. Sur la gauche le film est représenté schématiquement de profil. Il est plus épais dans le bas à cause du drainage dû à la gravité.

molécule de surfactant. Comme expliqué ci-dessus, les molécules de surfactant s'orientent la tête vers le liquide. Le film liquide est donc composé de deux interfaces liquide-air. L'interaction entre ces deux interfaces est complexe. L'épaisseur d'un film est un compromis entre la quantité de liquide à emprisonner et la force d'attraction entre les deux couches. En effet, les forces électrostatiques entre les ions et entre les nuages électroniques des molécules tant attractives que répulsives agissent. Le potentiel résultant est dès lors assez complexe car il est le résultat de la somme des différents effets.

Avant de passer à la structure de la bulle, il est utile d'étudier la formation et le vieillissement d'un film d'eau savonneuse. Pour illustrer les différents comportements, on considère un cadre vertical qui sous-tend un film d'eau savonneuse (Fig.4). Lorsque le film est éclairé, on peut voir apparaître des lignes colorées horizontales. Elles sont le résultat d'interférence lumineuse entre un rayon réfléchi par la première couche et un rayon qui, après avoir traversé une épaisseur e de liquide, est réfléchi par la seconde couche. Le long des bandes colorées, le film a une épaisseur constante. Dans un film vertical et stable, ces bandes sont horizontales, ce qui montre que l'épaisseur du film varie continûment avec la hauteur dans le film. La Fig.4 (droite) présente le film de profil. Le film est le plus fin au-dessus du cadre qu'en bas. Au cours du temps, il va continuer à s'amincir au-dessus; le liquide étant drainé vers le bas par gravité et vers les bords par la tension superficielle. L'étude complète du profil d'un film peut être trouvée dans [2].

4 Loi de Laplace

Une goutte, un film, une bulle sont des objets stables. Cela signifie qu'il y a un équilibre mécanique à chaque interface. Pour illustrer ce propos, considérons une goutte d'huile située dans un bain d'un liquide non-miscible avec l'huile de même densité ρ que celle-ci (Fig.5). On peut essayer en utilisant de l'huile végétale $\rho_{oil} = 0.894 \text{ kg/dm}^3$ et un subtil mélange d'eau $\rho_w = 1 \text{ kg/dm}^3$ de l'alcool à 60° $\rho_h = 0.889 \text{ kg/dm}^3$. La goutte est parfaitement sphérique. La surface doit être minimale vu que l'énergie doit être minimale pour que le système soit stable. La sphère est la forme géométrique qui expose une surface minimale par rapport à son volume. La pression p_{ext} subie par la goutte est proportionnelle à la hauteur h de la colonne de liquide située au-dessus

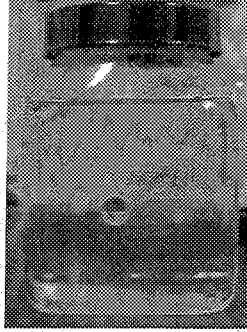


FIG. 5 – Gouttes d’huile entre deux eaux. Une goutte d’huile sphérique flotte dans un liquide non-miscible et de même densité (un mélange d’eau et de méthanol).

d’elle, soit $p_{ext} = \rho gh$. L’interface, cette fameuse membrane liquide exerce une pression sur l’huile de la goutte. Laplace (1749-1827) a montré que la différence de pression Δp entre l’intérieur d’une bulle et l’extérieur est donnée par

$$\Delta p = \frac{4\gamma}{R} \quad (3)$$

où R est le rayon de la bulle et le facteur 2 est un facteur lié à la géométrie sphérique de la goutte. La loi de Laplace est plus générale que cela car elle s’applique à n’importe quelle surface élastique.

$$\Delta p = \gamma C \quad (4)$$

où C est la courbure de la surface. Armé de la loi de Laplace et d’un logiciel capable de minimiser la surface géométrique, on peut prédire les configurations stables d’un système composé de plusieurs interfaces. Cela ne veut pas dire que c’est facile...

5 Les bulles B

Une bulle est un film liquide fermé. La bulle est sphérique et stable. Une simple expérience permet de vérifier l’équation de Laplace. Considérons deux bulles reliées par un chalumeau (Fig.6). On s’est arrangé pour que le diamètre des deux bulles ne soit pas identique. Lorsqu’on permet le passage du gaz d’une bulle à l’autre, on devine qu’il va y avoir un mouvement d’air d’une vers l’autre. Grâce à l’équation de Laplace, le lecteur attentif aura en plus prédit que la petite se dégonfle au profit de la plus grosse. La pression dans la petite est plus grande que dans la grosse. On peut également réaliser l’expérience en utilisant des ballons de baudruche.

Appliquons la formule de Laplace au cas d’une bulle. Comme nous l’avons dit, le liquide est maintenu entre deux couches de surfactants. On détermine ainsi trois zones de l’espace, notées de I à III, qui sont caractérisées par des pressions p et deux interfaces, notées 1 et 2 (Fig.7). La loi de Laplace s’applique à ces deux interfaces. Pour l’interface 1, on a

$$\Delta p_1 = p_I - p_{II} = 2\gamma/R \quad (5)$$

où R est le rayon de la bulle. De même, l’interface 2 donne lieu à une variation de pression

$$\Delta p_2 = p_{III} - p_{II} = 2\gamma/(R + \varepsilon) \quad (6)$$

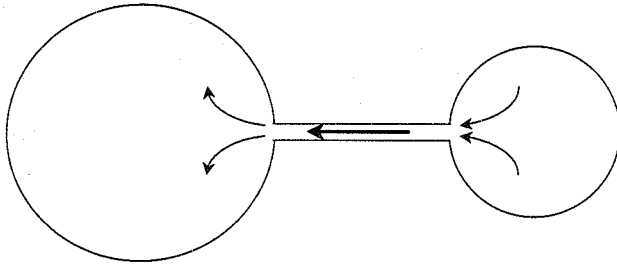


FIG 6 - Lorsque deux bulles de tailles différentes sont reliées par un tube, la plus petite se dégonfle au profit de la plus grande, c'est la loi de Laplace.

où ε est l'épaisseur du film liquide. Si on somme ces deux contributions, on trouve la différence de pression entre l'intérieur de la bulle et l'extérieur, c'est-à-dire que

$$\Delta p = 4\gamma/R \quad (7)$$

si on néglige ε devant R .

Petit calcul et ordre de grandeur

- Le petit Adrien a fait une bulle de 1 cm de rayon
- La différence de pression entre l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la bulle vaut : $4 \times 25 \cdot 10^{-3} / 10^{-2} = 10 \text{ Pa}$
- Si il avait fait une bulle de $1 \mu\text{m}$, la pression serait de l'ordre de $10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ atm}$!

Question : y a-t-il des échanges possibles entre l'intérieur de la bulle et l'extérieur? Une expérience assez simple permet de répondre. Dans un bassin aux bords hauts, on verse du vinaigre (le moins cher possible) que l'on saupoudre avec du bicarbonate de soude (le moins cher possible). Une réaction effervescente se produit immédiatement et du gaz carbonique se dégage. Ce gaz est plus lourd que l'air et par conséquent, il stagnera au fond du bassin. On peut vérifier cela en allumant un rat-de-cave et en le descendant au fond du bassin : il s'éteint. La partie délicate du

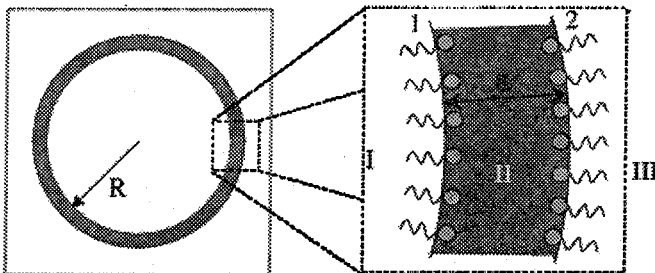


FIG. 7 - Bulle de savon vue en coupe transversale. La structure moléculaire du film savonneux a été mise en évidence. Il est composé de deux films de surfactant qui retiennent le film d'eau.

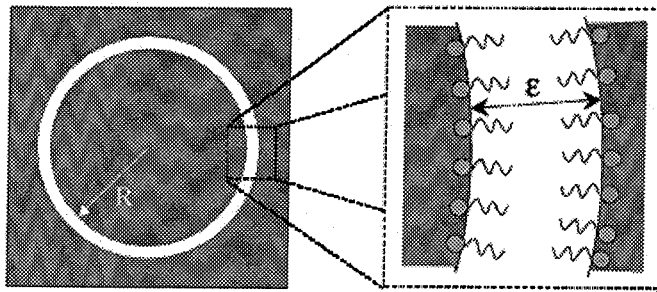


FIG. 8 – Antibulle de savon vue en coupe transversale. La structure moléculaire du film d'air a été mise en évidence. On peut vraiment observer qu'il s'agit du négatif de la Fig. 7.

travail est de créer une bulle et de parvenir à la faire descendre dans le bassin. La bulle descend lentement et plutôt que d'aller s'écraser au fond, elle va rester en suspension. On peut la conserver ainsi plusieurs minutes et observer les franges d'interférences qui se déplacent. Après un certain temps, elle peut éclater (mourir de vieillesse) ou encore continuer à descendre pour venir éclater à la surface du liquide contenu au fond du bassin.

Cette manipulation assez simple illustre deux phénomènes : (i) Tout d'abord le déplacement des franges colorées indiquent que l'épaisseur du film de la bulle n'est pas constant et qu'il évolue au cours du temps. Le liquide est drainé par la pesanteur vers le dessous de la bulle. Le film s'amincit tellement sur le dessus (pôle nord) qu'il paraît transparent. Ce film extrêmement mince a été étudié par Newton. Une variété de ces films minces portent d'ailleurs le nom de film noir de Newton (5 nm d'épaisseur !). (ii) Ensuite, la bulle qui 'coule' après un certain temps dans le lit de gaz carbonique signifie qu'elle devient pesante. Le gaz carbonique parvient à passer outre le film liquide. Le mécanisme le plus probable est que le gaz carbonique se dissout dans la membrane puis passe dans la bulle.

6 Les antibulles \bar{B}

Quand on pense à un gaz dans un liquide, on pense directement aux bulles dans l'eau minérale. La forme sphérique de ces bulles est la plus connue. Les plongeurs savent quant à eux que les grosses bulles de gaz qui remontent à la surface ont plutôt la forme de demi-lune. Les dauphins, beaucoup plus doués, parviennent à faire des bulles en forme d'anneau. Dès lors il n'est pas inconcevable d'imaginer que le négatif d'une bulle puisse exister : un film d'air d'épaisseur ϵ en forme de couronne sphérique qui contient du liquide et qui est contenu dans ce même liquide, comme une coquille d'oeuf qui sépare deux liquides (Fig 8) [3, 4]. C'est ce que nous allons montrer dans cette section.

Quand vous vous servez un café à partir d'un percolateur type 60 tasses, vous avez peut-être constaté que la dernière goutte flotte à la surface du café avant de disparaître. En fait, la goutte de café ne touche pas la surface du café de la tasse. Un mince film d'air s'interpose entre les deux. On peut également réaliser le même phénomène à partir d'eau savonneuse. La Fig.9 montre la manière de procéder. On remplit tout d'abord un récipient avec de l'eau savonneuse. On le remplit à raz-bord de manière à obtenir une surface propre et sans bulles. On utilise un autre récipient muni d'un bec verseur et équipé d'une connexion électrique qui relie le liquide contenu dans les deux récipients. Ensuite, avec une infime délicatesse, on va déposer à la surface une goutte de

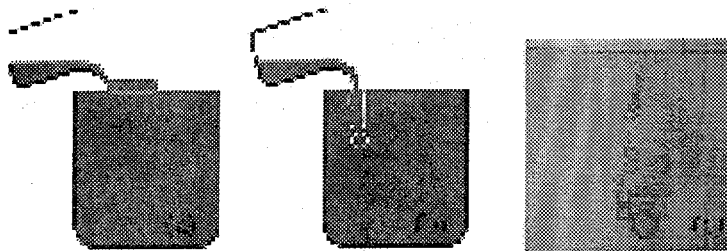


FIG. 9 – Procédure pour créer une antibulle. Préparez dans un large récipient de l'eau et du liquide vaisselle. Versez le liquide obtenu dans un récipient transparent et dans un récipient muni d'un bec verseur (presse-agrume). Assurez-vous que la surface du récipient transparent est propre et sans petites bulles. Versez délicatement le liquide contenu dans le presse-agrume dans le vaste récipient. Des globules liquides doivent se former et flotter à la surface du liquide (b) Augmentez le débit (plus ou moins brutalement). Les globules coulent et des antibulles peuvent se former. (c) Photographie sous-marine d'antibulle. La plus grosse mesure 1cm de diamètre.

liquide. Celle-ci flotte puis disparaît. On parle de *globule* plutôt que de goutte dans ce cas. Avec un peu d'habileté, on peut réaliser des globules d'un centimètre de diamètre. On obtient une antibulle si on parvient à couler le globule sous la surface du liquide. Pour ce faire, il faut créer un globule puis augmenter le débit. La Fig.9 à gauche présente des antibulles en formation. On voit le jet qui propulse les globules sous la surface. Ce jet se scinde en goutte ¹.

La connexion électrique sert à mettre les liquides au même potentiel électrique. A cause des frottements (triboélectricité), des charges peuvent apparaître dans le liquide que l'on verse. Ces charges seraient situées dans le globule central. Un champ électrique serait créé dans l'espace situé entre les deux liquides. Le globule central étant libre, un tel champ serait capable de détruire l'antibulle.

Petit calcul et ordre de grandeur

Le rayon d'une antibulle peut atteindre $R = 20mm$. En éclatant, l'antibulle se transforme en une petite bulle d'air de 2 mm de rayon r . Ce volume d'air ($4\pi r^3/3$) est égal au volume d'air contenu dans le film ($4\pi R^2\varepsilon$). L'épaisseur du film vaut donc

$$\varepsilon = \frac{r^3}{3R^2} \approx 3\mu m$$

La faible épaisseur d'air joue un rôle important sur les propriétés optiques de l'antibulle (Fig.10). Tout d'abord, on a l'impression que les bords de l'antibulle sont épais. Il s'agit d'une illusion d'optique à cause de la réflexion totale à l'interface. On peut calculer que pour un rayon frappant l'antibulle à une distance R/n de l'axe, n étant l'indice de réfraction de l'eau, le rayon se réfléchit (réflexion totale). Ensuite, tout comme pour une bulle, on peut voir apparaître des franges d'interférence. Cependant, elles n'apparaissent pas comme des latitudes mais comme des cercles concentriques dont le centre serait situé un peu au-dessus du méridien. Ce sont des anneaux de Newton. De plus, le léger décalage vers le haut par rapport au méridien est dû à une légère déformation de l'antibulle : le film d'air est plus fin sur le dessous à cause de la gravité.

La structure de la double interface est opposée à celle de la bulle. Dans ce cas, ce sont les queues

¹Instabilité de Rayleigh-Plateau, observable pour un mince filet d'eau dégoulinant d'un robinet

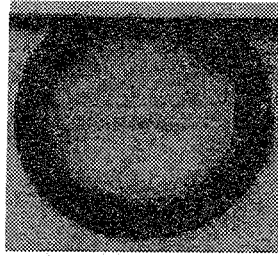


FIG. 10 – En regardant attentivement une antibulle sur un fond sombre, on peut déceler des franges d'interférences concentriques, centrées légèrement au-dessus de l'équateur de l'antibulle. Ces interférences sont similaires aux anneaux de Newton.

des molécules de surfactant qui se font face. De plus, le milieu entre les molécules de surfactant est gazeux et non plus liquide. La constante diélectrique passe de 80 pour l'eau à 1 pour l'air. Il n'y a donc plus d'effet dépolarisant que l'on trouve dans l'eau. Les interactions électrostatiques sont totalement différentes par rapport au cas de la bulle : différentes en nature et en intensité. Ce type de structure est très proche des cellules biologiques (liposomes) et des vésicules. Les antibulles sont des liposomes géants : 10 mm de diamètre pour les antibulles, 20 μm pour les liposomes ! L'étude de l'interaction entre les couches d'une antibulle est un sujet encore très récent. Des études théoriques et expérimentales sont encore à envisager.

7 B et \bar{B} : pression

La théorie de Laplace doit aussi être applicable à l'antibulle. En gardant les mêmes notations, on trouve pour l'interface 1,

$$\Delta p_1 = p_I - p_{II} = 2\gamma/R \quad (8)$$

où R est le rayon de la bulle. De même, l'interface 2 donne lieu à une variation de pression

$$\Delta p_2 = p_{III} - p_{II} = 2\gamma/(R + \varepsilon) \quad (9)$$

le globule intérieur étant incompressible, seule la pression dans le gaz peut changer. Ainsi l'équation de Laplace correspondant à une antibulle est la suivante :

$$\Delta p = 2\gamma/(R + \varepsilon) \quad (10)$$

En surchargeant le globule central d'une antibulle, on peut la couler. Nous avons fabriqué une colonne d'eau de 2 m de haut. Les antibulles sont créées à la surface et lentement, emportées par la gravité, elles descendent. Nous avons observé qu'elles éclatent toutes à la même profondeur. La Fig.11 (gauche) montre la distribution des profondeurs d'explosion. Les différentes courbes obtenues proviennent d'expériences effectuées à des jours différents. Dans chaque cas, on trouve une distribution gaussienne centrée autour d'une valeur critique. Il semble qu'il existe une pression critique au-delà de laquelle l'antibulle devient instable. Le fait de trouver des résultats différents à des jours différents provient sans doute des variations de la pression atmosphérique. Le petit raisonnement ci-dessous permet d'expliquer ce phénomène.

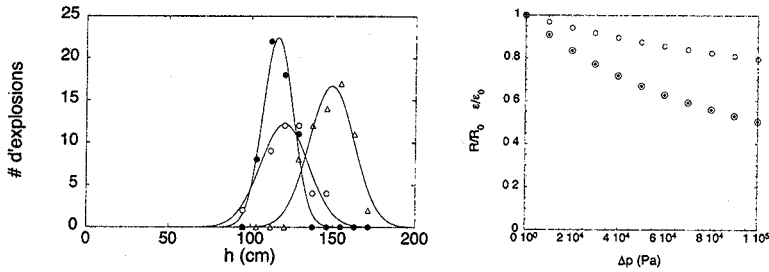


FIG. 11 – (a) Graphique représentant la distribution du nombre d'explosions d'antibulles en fonction de la profondeur. Les différentes courbes correspondent à des mesures effectuées à des jours différents. (b) Variation du rayon d'une bulle et de l'épaisseur du film d'air d'une antibulle en fonction de la pression extérieure.

La loi des gaz parfaits stipule que la pression P multipliée par le volume V et divisée par la température T demeure constant au cours d'une expérience pendant laquelle le nombre de particules de gaz ne varie pas. Dans notre présent propos, la température peut certainement être considérée comme constante. Par contre, la pression est modifiée lorsque l'antibulle descend le long de la colonne de liquide. La pression total est la somme de la pression atmosphérique p_{atm} , de la pression hydrostatique p_{hydro} et de la pression due à la tension superficielle Δp Eq (10). La pression hydrostatique est donnée par $p_{hydro} = \rho_w g h$ où h est la hauteur de la colonne d'eau située au-dessus de l'antibulle. On obtient

$$(p_{atm} + p_{hydro} + \Delta p) (4\pi R^2 \varepsilon) = cste \quad (11)$$

En égalant l'équation obtenue pour l'antibulle située à la surface ($p_{hydro} = 0$) et celle située à une profondeur h , on peut obtenir les variations de l'épaisseur en fonction de la profondeur. A titre de comparaison, on peut effectuer le même calcul pour les bulles et on obtient :

$$\left(p_{atm} + \frac{4\gamma}{R}\right) \left(\frac{4}{3}\pi R^3\right) = cste \quad (12)$$

Les solutions ε'/ε et R'/R en fonction de la pression supplémentaire p_{hydro} et p_{atm} pour les antibulles et pour les bulles respectivement sont représentées à la Fig 11 (droite). Les primes correspondent aux paramètres modifiés par la pression imposée. On calcule ainsi que pour une profondeur de 150 cm (≈ 0.15 atm), l'épaisseur de la couche d'air diminue de 10% tandis que le rayon d'une bulle ne diminue que de 4%. Cette variation de ε est suffisante pour provoquer la rupture du film et crever l'antibulle.

8 \bar{B} : éclatement

Les bulles et les antibulles éclatent en quelques millisecondes. Ces processus extrêmement rapides donnent lieu à des phénomènes qui étonnent par leur beauté. En outre, ils permettent de mieux comprendre la structure de ces objets.

La Fig.12 montre les différents stades d'une bulle qui éclate. De la fumée a été placée dans la bulle de façon à matérialiser les mouvements d'air lors de la rupture du film. Le film se retire

assez rapidement, on ne discerne tout d'abord aucun mouvement d'air. Ensuite, le gaz contenu à l'intérieur est libéré. La violence de l'ouverture cède au gaz interne une certaine quantité de mouvement. Ceci se manifeste par la formation d'un anneau de vorticité. Cet anneau est émis dans la direction opposée au sens de retrait du film. Cette forme particulière est attribuée à la géométrie du système et à la turbulence générée par le choc de la rupture.

La Fig 13, quant à elle, permet d'analyser l'explosion d'une antibulle qui descend dans la colonne d'eau. Elle est en mouvement vers le bas. Soudain, la membrane d'air cède par le bas, le film se retire en quelques millièmes de secondes (image 3). Pendant ce temps, l'antibulle n'a pratiquement pas bougé, ce qui veut dire que le liquide du globule en mouvement est subitement mis en contact avec du liquide au repos. Ce liquide va peu à peu être freiné à cause du frottement avec le liquide environnant. C'est d'abord la surface du globule qui subit les conséquences de ce freinage forcé. Le mouvement général produit de la turbulence et un anneau se crée (image 4-7). Enfin, un deuxième anneau de vorticité se produit. Celui-ci, plus petit, est dû à la violence du choc du retrait du film d'air. En se repliant en une petite bulle, l'air procure au liquide du globule une certaine quantité de mouvement. Un anneau en résulte.

9 Conclusion

Dans cet exposé, on a décrit les bulles à partir d'arguments physiques et chimiques assez simples. La nature particulière des surfactants a été mise en exergue. Nous avons montré comment ces molécules étaient capables de procurer à un film mince une certaine stabilité. La loi de Laplace a été expliquée et a permis de prédire la pression à l'intérieur de la bulle qui garantit l'équilibre de celle-ci.

La stabilité des antibulles est remarquable et est déconcertante. Par analogie aux bulles de savon, on en a déduit leur structure et la loi d'équilibre des pressions. Les couleurs de l'antibulle ont été expliquées. L'existence d'une pression externe critique a été montr e expérimentalement et justifiée par la loi de Laplace appliquée aux antibulles.

Enfin, grâce à une caméra rapide, des prises de vue successives ont permis de mieux comprendre ce qui se passe lorsque le film qui délimite la bulle où l'antibulle est déstabilisé. Des anneaux de vorticité ont été trouvés dans les deux cas.

La stabilité des antibulles est encore une question ouverte. Pourquoi le globule extérieur ne coalesce-t-il pas plus vite avec le liquide environnant comme il le fait lorsqu'il est à la surface? Des expériences complémentaires et une étude plus précise des interactions entre les couches de surfactants sont attendues.

Références

- [1] D. Weaire and S. Hutzler, *The physics of foams*, (Clarendon Press, Oxford, 1999).
- [2] P.G. de Gennes, F. Brochard-Wyart and D. Quéré, *Gouttes, bulles, perles et ondes*, (Belin, Paris, 2002).
- [3] W. Hughes and A.R. Hughes, *Nature* **129**, 59 (1932).
- [4] C.L. Stong, *Scientific American*, **230**, 116 (April 1974).

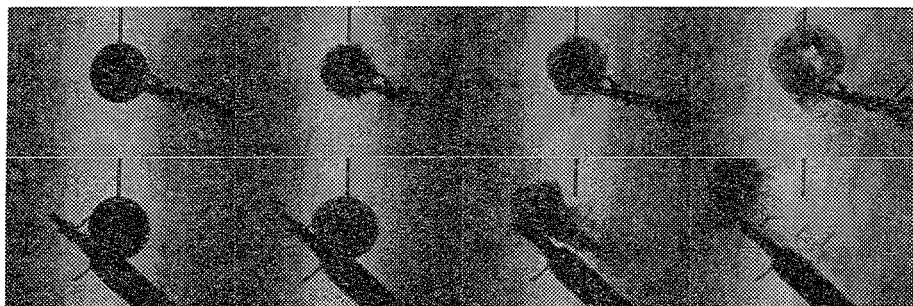


FIG. 12 – Mosaïque représentant l'explosion d'une bulle. Celles-ci ont été remplies de fumée afin de rendre les mouvements d'air visible. La ligne du dessus représente une explosion filmée de face et la ligne du dessous une explosion filmée de profil. Les images sont séparées d'environ 15 ms. Les anneaux de vorticité sont particulièrement visibles sur les photos finales.



FIG. 13 – Mosaïque représentant l'explosion d'une antibulle chutant dans la colonne d'eau. Les images sont séparées de 15 ms. L'antibulle éclate à l'image 3. Le liquide contenu dans l'antibulle est brutalement mis en contact avec le liquide au repos de la colonne. Un premier vortex résulte de ce choc. Sur les images 4 à 7, on distingue la bulle d'air résiduelle qui remonte à la surface. Un second vortex se forme sur l'image 6, il provient de la libération de la bulle d'air.

The Branly effect and contacting grains in a packing

S. Dorbolo and N. Vandewalle

University of Liège

GRASP, Department of Physics – 4000 Liège – Belgique

Contact address, e-mail: S.Dorbolo@ulg.ac.be

Summary. The electrical conductivity of a granular matter has been studied. Electromagnetic perturbations have been experimentally produced at the vicinity of the packing. The Branly experiment has been performed and quantified. It appears that the soldering of grains is induced by the electromagnetic waves. This explains the drop of electrical resistance, i.e. the Branly effect. The contacts between the grains is enhanced because the electromagnetic waves induce soldering between grains. PACS: 45.70, 47.50+d, 51.10.+y, 47.11.+j

and/or **Keywords:**Electrical conductivity, Branly effect, granular materials

1 Introduction

In 1890, Branly discovered that electromagnetic perturbations are able to change the electrical properties of a granular material located in the vicinity of the perturbations [1]. A glass tube containing metallic filings is called a Branly's coheror. This system has been used by Marconi to transmit the first transatlantic message using electromagnetic waves. From discoveries to discoveries, emitter and receptor enhancements were such that 100 years later everybody is able to transmit sound and video through the air. On the other hand, very few papers consider the Branly's coheror problem [?].

Granular packing are characterized by arches and force chains through the system. The electrical current is a good tool to probe those paths since the electrical resistance is lowered by the pressure induced by the force chains [?]. The current has to find the lower electrical resistance through the system and therefore the current preferably uses the chain force path. Any new contact decreases the total electrical resistance because this new connection is in parallel with the lowest electrical resistance path. Obviously, any enhancement of this latter path decreases the global resistance of the packing.

Moreover, the nature of the electrical contact also play an important role. Oxide layers or weak contacts induce particular behaviors to the global resistance. Indeed, some non-linear behavior and memory effects are observed in electrical properties of metallic granular materials.

2 Electrical properties of a granular matter

Contrary to a piece of metal, the electrical resistance of a granular material is not a fixed value. It depends on the electrical history of the system, on the injected current (or on the imposed voltage) and on the state of compaction. In this paper, we consider a packing of 14000 lead beads of 2 mm diameter contained in a insulating vessel ($40 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$) [3]. The electrodes are rectangular and placed at opposite vertical faces of the parallelepiped.

Figure 1 shows the voltage V versus the injected current i . This $i - V$ diagram is very different from that of a bulk material since the voltage V is not univocally given by the current i . To emphasize this fact, ramps of current have been injected and the voltage has been recorded during those ramps. Starting for $i = 0 \text{ A}$, the current was increased until a maximum current value. The current value was then decreased until the same maximum current but with the opposite polarity. Finally the current was set back to zero. The amplitude of the ramps has been increased after each loop. On the right of the Figure 1, a sketch of the $i - V$ diagram has been depicted. The different areas of the sketch are described here below. When we wish to set the current to

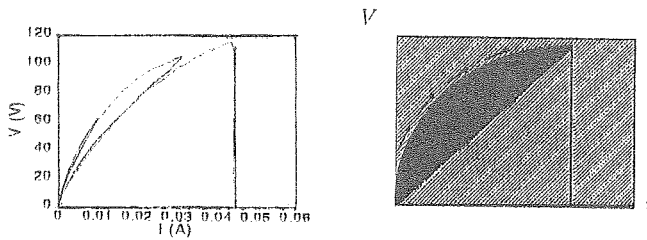


Fig. 1. (left) Current-voltage diagram of a granular material composed of 14 000 lead beads. Ramps of current (with increasing amplitude) have been applied in order to point out the memory effect behavior. (right) Schematic $i - V$ diagram. The grey zone and the dashed zone materialize the reachable and the unreachable points respectively.

a given value for the first time, the voltage follows an exponential law (black curve). When the current is then decreased, the voltage linearly decreases as for a bulk material, i.e. Ohms law is of application (black line that links the black point to the origin).

This particular behavior is due to the structure of the grain contacts. Figure 2 shows a sketch of a contact between two beads. Beads are covered by a thin layer of oxide. A semiconducting junction is formed. This layer provides a non-linear behavior as far as electrical properties are concerned. This behavior can be modeled by two opposite diodes having exponential law behavior in the $i - V$ plane.

When the voltage between two adjacent beads is increased, the electric field can be such that microscopic dielectric breakdown can occur. In this

case, the oxide layer is destroyed and some well-conducting electrical paths are created. Those conducting channels follow Ohm's law and are modeled by the resistance in Fig. 2. This resistance part of the contact explains the reversibility and the Ohm like behavior of the packing under certain conditions.

In summary, a region of the i - V plane is accessible (grey area in Figure 2) by tuning the injected current.

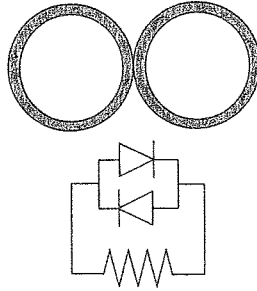


Fig. 2. Sketch of the electrical contact between two adjacent beads. The grey area represents an oxide layer which is semi-conducting.

The vertical line that occurs at high current is the brutal Calzecchi-Onesti transition [4]. At a given current, the resistance sharply drops. Beads solder to each other. The resistance becomes then low. The system is similar to a bulk material with a resistance of about 20Ω . The dashed area represents the unreachable points.

3 Branly experiment

First of all, a fixed current is injected through the sample, 10 mA for instance. The system is then located in the i - V plane at a certain representative point in the i - V plane (black point in Fig.3 (right)). The system is characterized by a subsequent resistance $R_0 = V/i$. The resistance is recorded versus time and normalized by R_0 . Firstly, R_0 slightly decreases. Then sparks are produced at 1 m from the parallelepiped. The resistance consequently drops as shown between the two vertical lines in Fig.3 (left). As soon as the spark production ends, the resistance stops decreasing.

4 Path in the i - V diagram

The electrical resistance variations can be interpreted in view of the i - V plane. As we work with a constant current, the system follows a vertical line in the i - V plane (arrow 1 in figure 3 (left)). When sparks are produced, the resistance

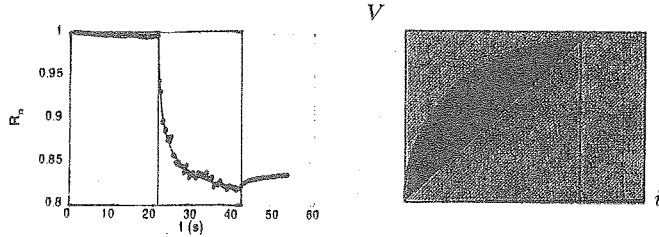


Fig. 3. (left) Normalized resistance of the packing as a function of time. The two vertical lines delimit the spark production period. (right) Motion of the representative point of the system in the i - V diagram.

decreases and the system reaches a point located in the accessible region (grey area). Such point can be also reached by tuning the current (arrows 2 in Fig.3 (left)): by increasing the current following the black curve (exponential) and by decreasing the current following the Ohm law line. Such trajectory is characterized by the microsoldering of the beads since the resistance decreases. That means that irreversible processes (like a microsoldering) are also induced by the electromagnetic waves since the same situation can be obtained by tuning the injected current. Note that the change of resistance is continuous contrary to the Calzecchi-Onesti transition.

5 Conclusion

The decrease of the resistance of a metallic granular packing is due to microsolderings induced by external electromagnetic waves. This transition is continuous and saturates towards a minimum of the resistance.

Acknowledgements

SD thanks FNRS for a financial support. This work is also supported by the contract ARC 02/07-293.

References

1. E. Branly, C. R. Acad. Sci. Paris **111**, 785 (1890).
2. E. Guyon, *Pour la Science* **300**, 130 (2002); S. Dorbolo, M. Ausloos, and N. Vandewalle, *Physical Review E* **67** (2003), 040302(R).
3. S. Dorbolo, M. Ausloos, and N. Vandewalle, *Appl. Phys. Lett.* **81** 936 (2002); *ibid.* *Europhys. J. B* **34** (2003), 201.
4. T. Calzecchi-Onesti, *Il Nuovo Cimento* **16**, 58 (1884).