



**OLYMPIADES DE PHYSIQUE 2005**

# Bulles qui roulent s'amassent en mousse



Un dossier réalisé par

- Louis-Frédéric LALLEMENT
- Clément LEMAIRE
- Geoffrey PIERRELEE
- Paul ROUSSEAUX

avec la collaboration de leur professeur, Stéphane PICARD.

## **Remerciements**

Nous tenons à remercier chaleureusement toutes les personnes qui nous ont accompagnés et soutenus pendant nos travaux de recherche.

Hubert Dupuis, directeur du Pensionnat du Sacré-Cœur

François Graner, chercheur au laboratoire de l'UJF de Grenoble pour les conseils.

Hervé Simon, Michaël Cellier, Constant Beaufort pour leur soutien technique.

François Bednarek pour le matériel.

Christine Lemaire pour la relecture.

# Sommaire

## Préambule

### I. Les bulles de savon

1. [La molécule de savon](#)
2. [Les molécules de savon](#)
3. [La structure d'un film savonneux](#)
4. [Une bulle de savon](#)
5. [Plusieurs bulles](#)
6. [Le problème de Steiner](#)

### II. L'étude statique d'une mousse

1. [L'écrasement partiel d'une mousse](#)
2. [Les vertex](#)
3. [Une mousse en équilibre](#)

### III. L'étude dynamique d'une mousse

1. [Le protocole expérimental](#)  
[La «~~la machine à bulles~~»](#)  
[La table d'expérimentation](#)
2. [Réarrangements](#)
3. [Compression](#)
4. [Dépression](#)

## Conclusion

## Bibliographie

## Annexes 1 & 2

## **Préambule**

«**»Bulles qui roulent s’amassent en mousse».**

Si nous ne pouvons guère affirmer que les bulles de savon roulent, une chose est sûre, c'est qu'elles s'amassent en mousse, mais pas n'importe comment... En effet, si le chaos règne au sein d'une mousse, tout n'est pas imprévisible. Ce microcosme est un formidable objet d'étude permettant une observation directe et originale des lois physiques de la dynamique des fluides.

Cette étude n'est pas vaine si l'on considère la diversité des usages et des applications des mousses, citons par exemple l'isolation thermique et acoustique, le rasage, la lutte contre les incendies, la séparation des minéraux, la décontamination nucléaire...

C'est en réalité à partir d'une observation statique de l'organisation de quelques bulles les unes par rapport aux autres lors des TPE de premières que nous avons eu l'idée de poursuivre notre analyse à l'échelle d'une mousse en deux dimensions dans une cellule de Hele Shaw, aussi bien en statique qu'en dynamique.

Notre étude s'articule tout entière autour de cet axe, avec comme interrogation, comme problème initial**»Comment s'organise une mousse, et quelles sont les causes et les conséquences d'un tel agencement ?».**

## I. Les bulles de savon

### 1. La molécule de savon

Le savon est un agent nettoyant obtenu par l'action d'un alcalin la soude sur des graisses ou des huiles par réaction de saponification. La molécule de savon est amphiphile, elle est composée de deux parties

- une partie hydrophile
- une partie hydrophobe

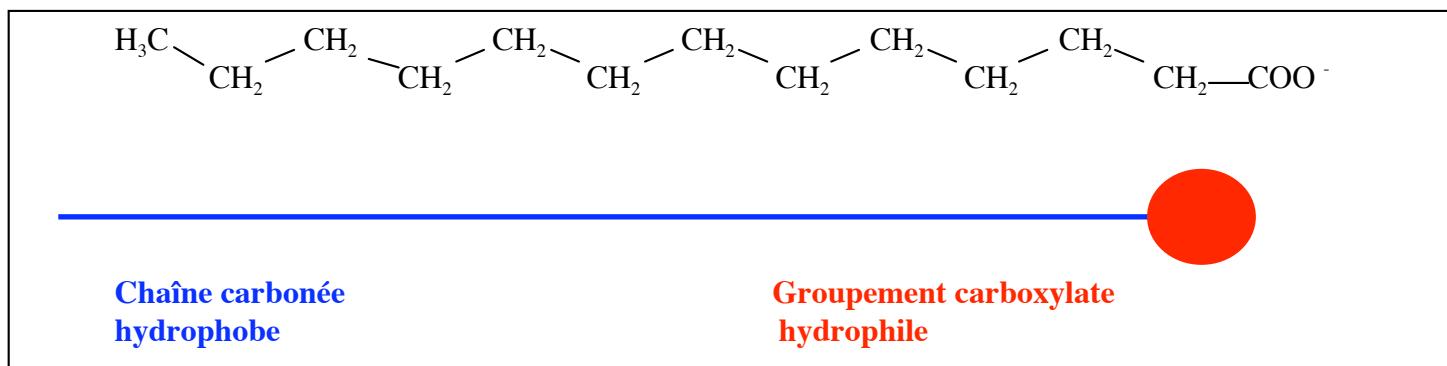


Schéma d'une molécule de savon

La chaîne carbonée est longue, elle contient entre 13 et 19 atomes de carbone. Elle est apolaire.

La tête de la molécule, possède deux atomes d'oxygène, elle est polarisée du fait de la différence d'électronégativité entre le carbone et l'oxygène et de la présence d'une charge négative sur l'un des atomes d'oxygène. Ceci est la cause de son affinité pour l'eau par l'établissement de liaisons hydrogène.

Les molécules de savon, avec leurs propriétés interagissent les unes avec les autres.

## 2. Les molécules de savon

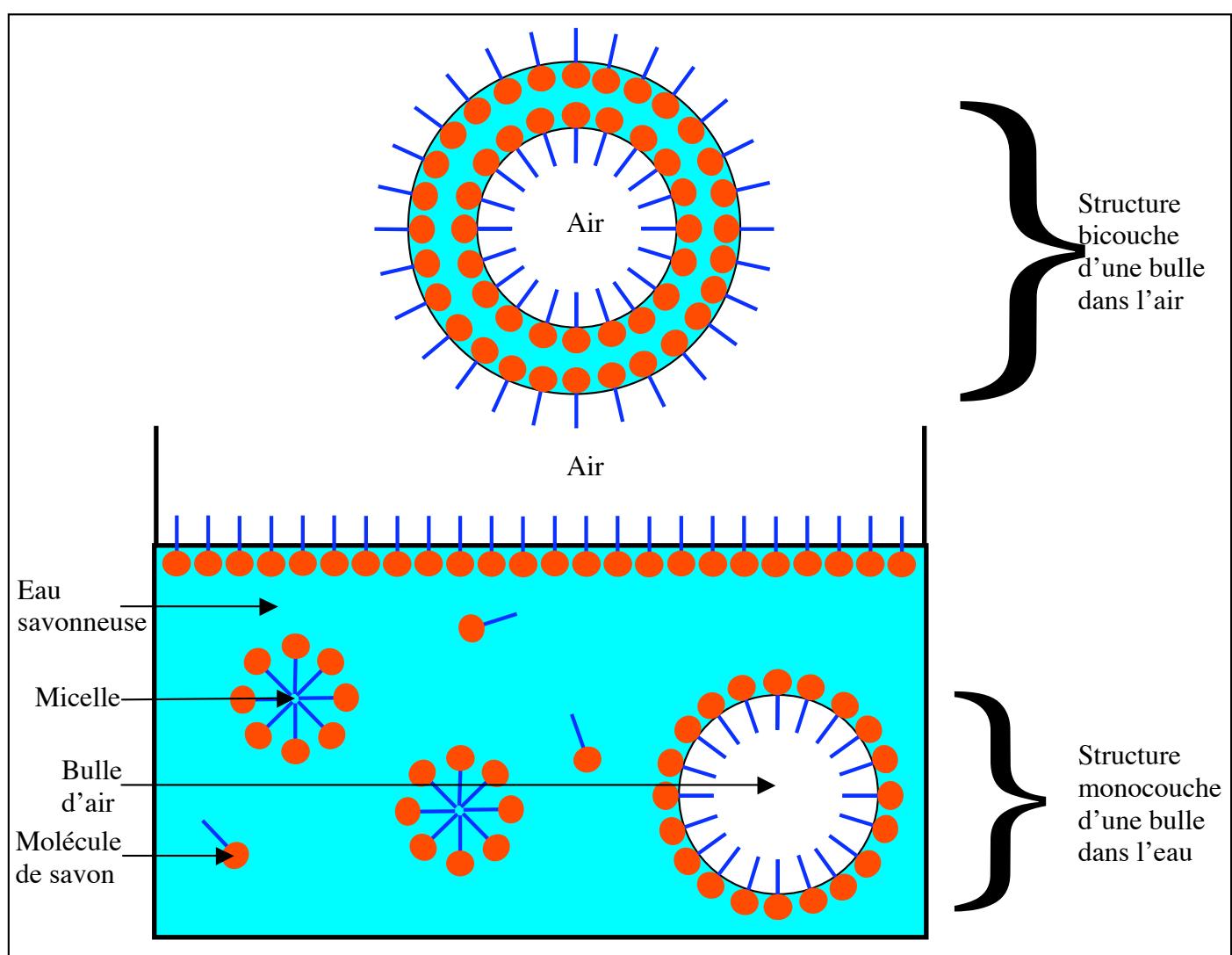
Les molécules de savon se concentrent en priorité à la surface de l'eau. C'est la raison pour laquelle l'eau savonneuse a une tension de surface plus faible que l'eau pure.

( $7,2 \cdot 10^{-2} \text{ N.m}^{-1}$  pour l'eau ;  $3,0 \cdot 10^{-2} \text{ N.m}^{-1}$  pour l'eau savonneuse).

Avec du savon, une goutte sera étalée. Seulement quand il n'y a plus de place à la surface, les tensioactifs sont obligés de se «~~é~~ter à l'eau». Pour éviter au maximum le contact avec l'eau, les extrémités hydrophobes se tournent les unes vers les autres et rentrent en contact en formant des micelles.

Quand on injecte de l'air dans une solution savonneuse, les parties hydrophobes des molécules de savon se précipitent vers l'air et l'entourent. Puis cette bulle remonte vers la surface comme n'importe quelle bulle d'air, sous l'effet de la poussée d'Archimède. En s'évadant, elle va entraîner la pellicule savonneuse de la surface. La bulle de savon ainsi obtenue dans l'air a donc une structure bicouche.

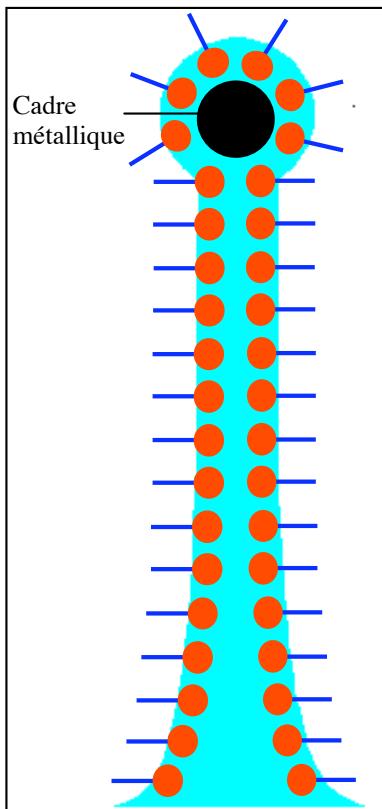
### De la molécule à la bulle de savon



Avant d'étudier les bulles ou la mousse, il faut comprendre le film savonneux.

### 3. La structure d'un film savonneux

Un cadre métallique est plongé dans une eau savonneuse. On le tire hors de l'eau. Un film savonneux se forme, il est constitué de deux couches de molécules de savon et d'une fine couche d'eau entre les deux.



La structure du film évolue peu à peu.

D'un côté, la tension de surface maintient le film en place.

D'un autre côté, l'eau s'écoule vers le bas, sous l'effet de son propre poids. C'est pour cela que le film savonneux est plus épais à sa base.

L'eau qui se trouve emprisonnée dans le film a tendance à partir par drainage, provoquant un amincissement de celui-ci et une mise en tension.

Le film savonneux va donc tendre vers une surface minimale pour minimiser les tensions de surface.

La forme du film dépend de la forme du cadre. Un film savonneux ne sera pas forcément plan.

La prévision de l'allure d'une surface minimale pour un système donné devient rapidement complexe. Pour lever cette difficulté, certains architectes travaillent de manière empirique et modélisent les structures qu'ils veulent construire en utilisant des films savonneux.

#### Coupe transversale d'un film savonneux

### 4. Une bulle de savon

Ce tableau montre que parmi les polyèdres réguliers, la sphère est la structure qui possède la surface minimale pour un volume donné.

forme	nombres de faces	volume	Surface
tétraèdre	4	16 cm <sup>3</sup>	46 cm <sup>2</sup>
cube	6	16 cm <sup>3</sup>	39 cm <sup>2</sup>
octaèdre	8	16 cm <sup>3</sup>	37 cm <sup>2</sup>
dodécaèdre	12	16 cm <sup>3</sup>	34 cm <sup>2</sup>
sphère	infini	16 cm <sup>3</sup>	31 cm <sup>2</sup>

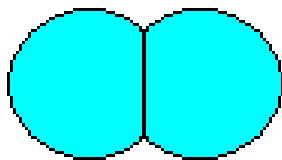
Ce sont les interactions intermoléculaires qui déterminent la structure finale. Les molécules de surfactant s'associent de façon à minimiser la surface de la structure. Ce faisant, le système atteint un état énergétique minimal.

Dans l'idéal, en l'absence de contraintes extérieures, une bulle a une structure sphérique. Après l'étude de la forme d'une bulle, voyons comment plusieurs bulles interagissent.□

## 5. Plusieurs bulles

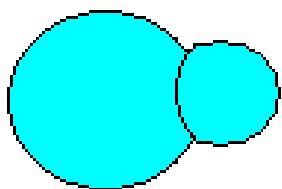
Les mousses ordinaires sont des structures tridimensionnelles. Pour simplifier, nous nous proposons d'étudier une mousse bidimensionnelle produite par agglutination de plusieurs bulles.

### Pour deux bulles de même taille



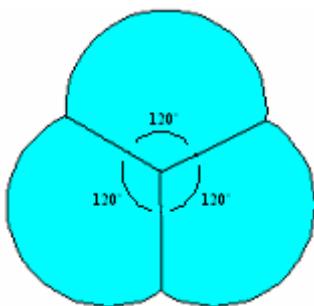
La surface de contact est plane. Chaque bulle, cherchant à avoir sa forme sphérique naturelle, essaie de « pousser » la surface de contact pour s'arrondir. Mais elle subit en même temps la poussée de la part de sa voisine. Il en résulte que les deux bulles doivent trouver un compromis qui se caractérise par une surface plane.

### Pour deux bulles de tailles différentes



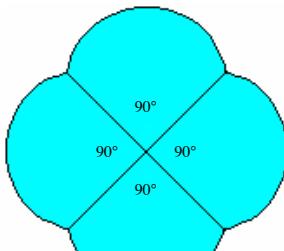
La pression à l'intérieur d'une petite bulle est plus importante que celle qui règne à l'intérieur d'une grosse bulle, si bien qu'au final, on aura une surface de contact légèrement incurvée.

### Pour trois bulles identiques:

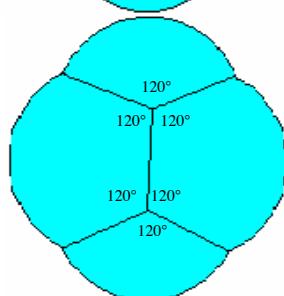


L'espace est partagé équitablement.  
Les plans de séparation s'écartent d'un angle de  $120^\circ$ .  
Une rotation de  $120^\circ$  autour d'un axe rétablit la figure.

### Pour quatre bulles



En toute logique, on s'attend à un partage de l'espace en quatre domaines identiques, avec des angles de  $90^\circ$ . On s'attend à trouver un axe de rotation de  $90^\circ$ .



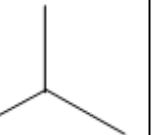
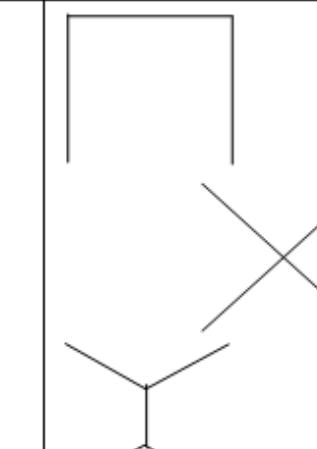
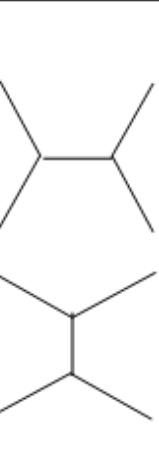
L'expérience montre que l'association de 4 bulles identiques donne ce système.  
On observe l'apparition d'angle de  $120^\circ$  entre les plans de séparation des bulles

A partir de ces propriétés, essayons de comprendre le problème de Steiner, pour comprendre l'origine de la symétrie des figures observées.

## **6. Le problème de Steiner**

En 1837, Steiner chercha la meilleure manière de relier  $n$  villes de même importance par des routes rectilignes, deux villes quelconques devant être reliées et la longueur totale des routes étant minimale. Les routes se rencontrent soit en une ville, soit en un point d'embranchement, dit point de Steiner, situé en rase campagne.

Nous avons cherché à vérifier expérimentalement les solutions du problème de Steiner, en considérant l'arrangement de lames savonneuses amenées à se rencontrer. Dans notre dispositif expérimental, les lames savonneuses prennent naissance entre  $n$  petits axes en acier reliant deux plaques de plexiglas parallèles. Les villes de Steiner sont représentées par des axes en acier et les routes reliant les villes sont les lames savonneuses.

Nombre de points à relier ( $n$ )	Principaux types de réseaux routiers envisageables	Modes d'association des films savonneux
2	—	—
3	 	
4		

### Pour $n = 2$

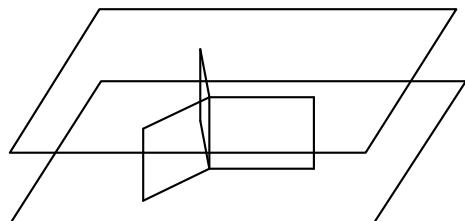
La solution du problème est unique et symétrique le plus court chemin est rectiligne

### Pour $n = 3$

La solution est unique et symétrique.

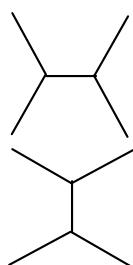
La configuration en Y présente un point de Steiner, elle est plus courte que les configurations non symétriques en V ou en T  
*(Pour le détail des calculs voir annexe 1)*

On peut affirmer cela en faisant l'expérience avec le film savonneux.



Le film de savon qui relie les trois axes se dispose spontanément suivant les lignes d'un réseau minimum identique à celui qui résulte du calcul du plus court trajet possible entre les 3 points. Ce trajet minimum est associé à une surface minimale.

### Pour n = 4



Il existe deux modes d'association où le trajet est le plus court entre les quatre axes. Ils sont équivalents et laissent apparaître des angles de 120° entre les lames.  
*(Pour le détail des calculs voir annexe 2)*

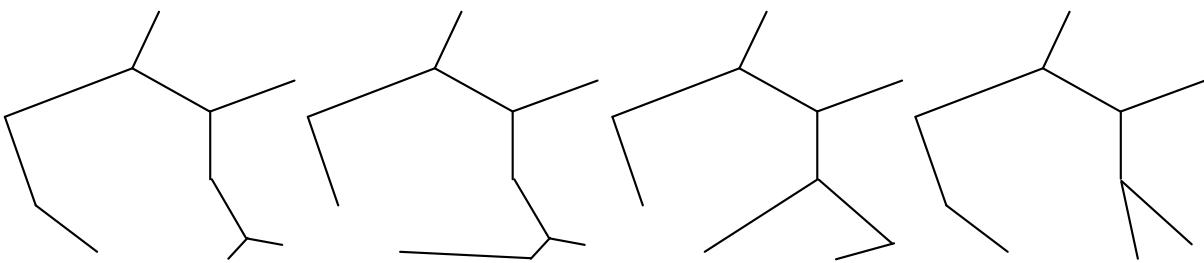
(Nous avons cherché à connaître expérimentalement le mode d'association de lames savonneuses pour n=5 et n=6. Les résultats ne sont pas présentés dans ce dossier).

### Pour n grand, avec une répartition aléatoire de points



Appliquons cette étude dans le cas où la répartition des n points à relier est aléatoire. Prenons l'exemple de différentes villes de France : Lille, Paris, Strasbourg, Lyon, Marseille, Nice, Toulouse, Bordeaux et Nantes. A priori, le réseau autoroutier est optimisé et les autoroutes sont tracées de sorte qu'elles offrent les liaisons les plus courtes possibles.

On se propose de vérifier si la corrélation entre le problème de Steiner et notre expérience avec des lames savonneuses est maintenue en cas de perte de symétrie dans la distribution des points.



Classement par ordre de fréquence décroissante du réseau de films savonneux obtenu expérimentalement.

On s'aperçoit qu'il y a une multitude de modes d'association des lames savonneuses entre elles. Le résultat dépend énormément de la manipulation effectuée.

On peut toutefois expliquer certaines différences entre la carte et le résultat expérimental par le fait que l'on ne peut pas construire une autoroute partout sur le territoire, en effet certaines contraintes empêchent l'Etat d'étendre le réseau où il le souhaiterait□relief, propriétés privées, etc.,....Cependant ces difficultés peuvent être contournées grâce aux nouvelles technologies et aux progrès de l'architecture (Par exemple le viaduc de Millau ouvert à la circulation cet été a permis de traverser une vallée qui quelques années plus tôt empêchait toute circulation).

Une simulation par ordinateur permettrait d'optimiser un modèle unique de réseau autoroutier permettant de relier des villes identiques, en s'affranchissant des contraintes géographiques. Les combinaisons des lames savonneuses reliant n axes répartis aléatoirement entre deux plaques de plexiglas sont quant à elles multiples et imprévisibles. Cette expérience nous paraît révéler par extrapolation, le caractère désordonné d'une mousse ordinaire.

Jusqu'à présent, nous avons mené notre étude à l'échelle de quelques bulles, étendons la à l'échelle d'une mousse.

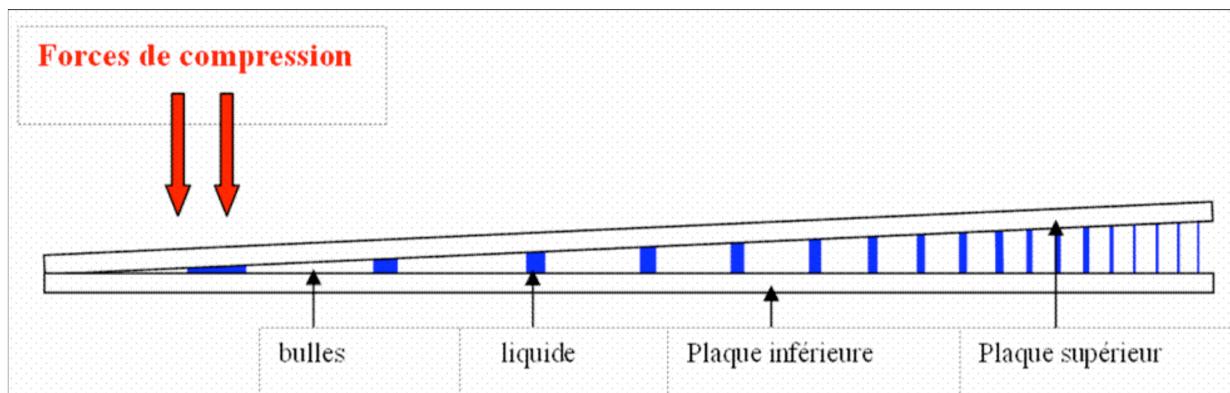
## **II L'étude statique d'une mousse**

Après une approche de l'organisation de quelques bulles les unes par rapport aux autres, nous allons à présent développer notre étude statique à l'échelle d'une mousse.

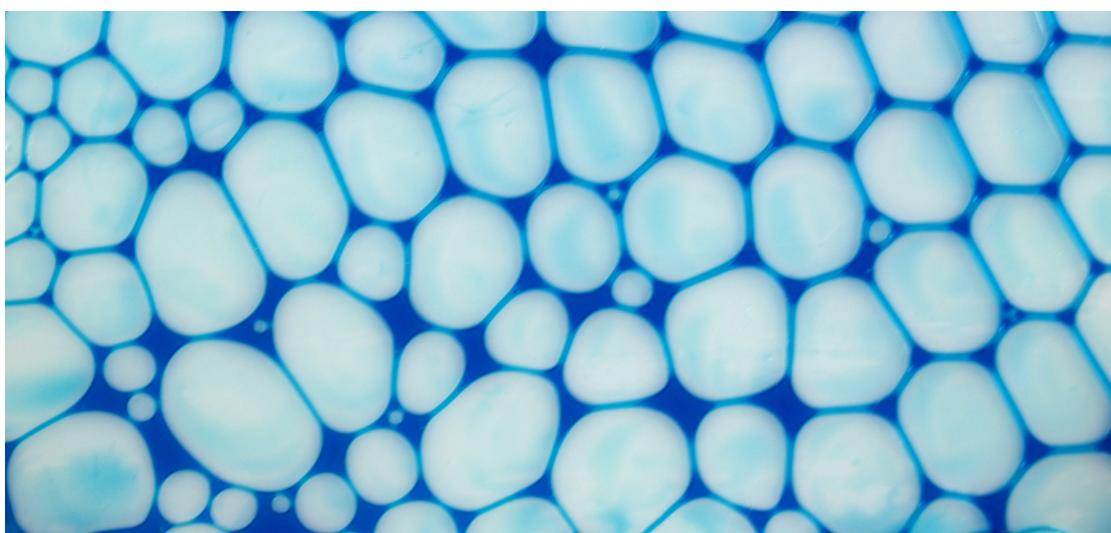
Pour débuter cette étude, il convient de définir une mousse. Une mousse est un matériau diphasé, constitué de cellules de gaz délimitées par des parois de phase liquide.

### **1. L'écrasement partiel d'une mousse**

Le premier phénomène observable est «l'écrasement partiel d'une mousse», qui s'obtient de cette manière :



Voici ce que l'on obtient :



On peut observer ici deux choses :

- sur la partie gauche des cellules aux formes arrondies quasi circulaires
- sur la partie droite des cellules en forme de polyèdres quasi réguliers.

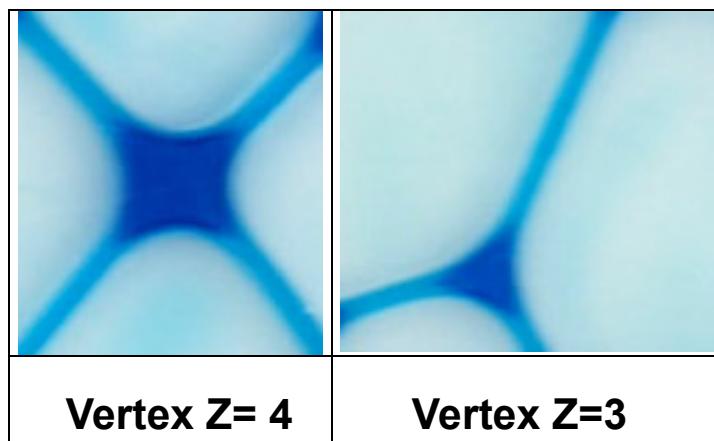
En réalité, on obtient ici deux états de la mousse. A droite la mousse est dite «sèche», car les parois de phase liquide sont très minces; à l'inverse, la mousse aux cellules circulaires est dite

«Humide», car les parois de phase liquide sont épaisses. Si l'on obtient une mousse humide en comprimant, c'est parce que la phase liquide n'est pas compressible. En diminuant la hauteur des cellules, c'est-à-dire l'écartement des deux plaques, on augmente l'épaisseur des lames savonneuses.

Précisons que toutes nos photographies ont été prises à l'aide d'un appareil numérique, puis traitées à l'aide du logiciel Photoshop.  
Les bulles ont en général une longueur proche du centimètre.

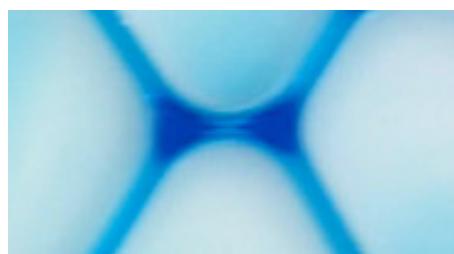
## 2. Les vertex

Sur les photographies ci-dessous, nous pouvons également étudier un autre agencement de la matière, celui des vertex. Un vertex est un amas de phase liquide se formant au point de rencontre entre au minimum trois cellules de gaz. Voici les deux types de vertex qui sont observables:



Le vertex de coordonance Z=3 est le plus fréquent. Il apparaît donc comme le vertex dit normal, et puisqu'une mousse va tendre vers son état le plus stable, nous pouvons considérer ce vertex comme «marqueur de stabilité». Il faut également noter la forme particulière de ce vertex, celle d'un triangle équilatéral.

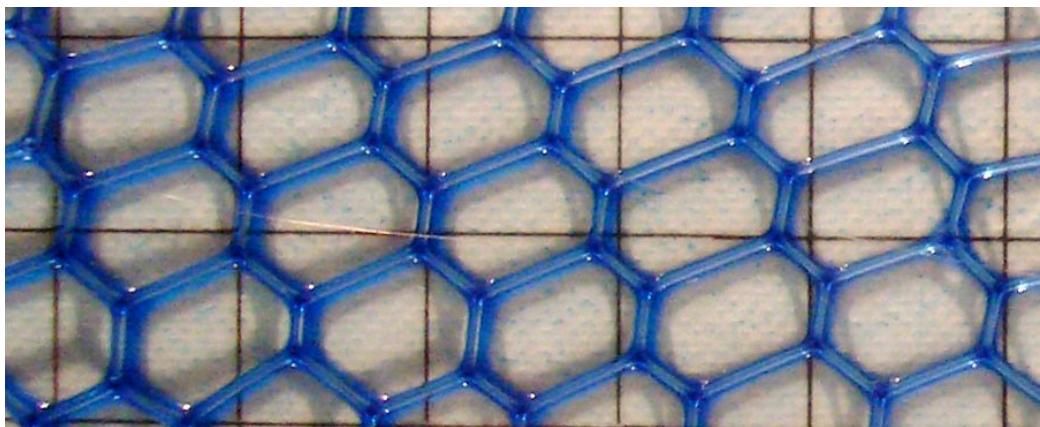
On peut également observer des vertex de coordonance Z=4, mais ils sont très rares, et très instables, se transformant spontanément en deux vertex de coordonance Z=3, c'est la situation qu'illustre notre photographie ci-dessous.



On en déduit donc qu'une mousse va toujours tendre au maximum vers la formation de vertex de coordonance Z=3, et dans ce dessein, il est nécessaire que les cellules de gaz se rencontrent par trois, et forment des angles de 120° .

### **3. Une mousse en équilibre**

Le second phénomène est discernable lors de l'étude dans un état d'équilibre de forces.  
Voici ce que l'on obtient (échelle en arrière plan, les carreaux ont exactement 1cm de côté)



Ce que l'on observe en premier lieu est que tous les angles formés au sein de la mousse sont des angles de  $120^\circ$ , ce qui corrobore l'étude faite sur les vertex.

Par ailleurs, les bulles sont disposées en hexagones presque parfaits. Pour expliquer cet agencement, il faut préciser qu'une mousse tend toujours à minimiser son énergie de surface. Ainsi, les parois entre les cellules seront planes, et non courbes. Et la seule figure possédant à la fois des surfaces planes et des angles de  $120^\circ$  est l'hexagone. Voilà pourquoi, lors d'un équilibre des forces, les cellules hexagonales se forment préférentiellement.

Pour généraliser, on peut affirmer qu'une mousse bidimensionnelle idéale au repos est constituée de cellules hexagonales régulières, par conséquent tout autre forme sera la preuve d'un déséquilibre important des forces en présence.

Lors de notre étude, nous avons été attentifs aux modifications de symétrie des cellules. L'exercice de contraintes sur une mousse produisant certains effets, l'analyse de ces effets doit permettre de connaître les propriétés spécifiques de cette mousse. Réciproquement, la façon dont la mousse réagit permet de connaître les propriétés du milieu dans lequel la mousse se trouve.

La réflexion qui suit s'appuie sur cette hypothèse de travail, elle porte sur l'étude dynamique d'une mousse.

### **III L'étude dynamique d'une mousse**

Dans cette troisième et dernière partie, nous allons étudier la mousse lorsque celle-ci est mise en mouvement. La mousse n'ayant pas de forme propre, nous allons pouvoir étudier son comportement lorsqu'elle rencontre des obstacles. Dans la première partie, nous avons vu que le modèle prédominant de la mousse était le modèle hexagonal, aussi synonyme de stabilité.

À partir de ce modèle, nous allons examiner les contraintes que subit la mousse.

#### **1. Le protocole expérimental**

Pour obtenir autant que possible, une mousse constituée de cellules hexagonales comme sur la photographie précédente, nous avons construit un dispositif comportant une cellule de Hele Shaw. Deux paramètres essentiels devaient être considérés, à savoir un flux d'air constant, et un liquide suffisamment visqueux pour former une mousse.

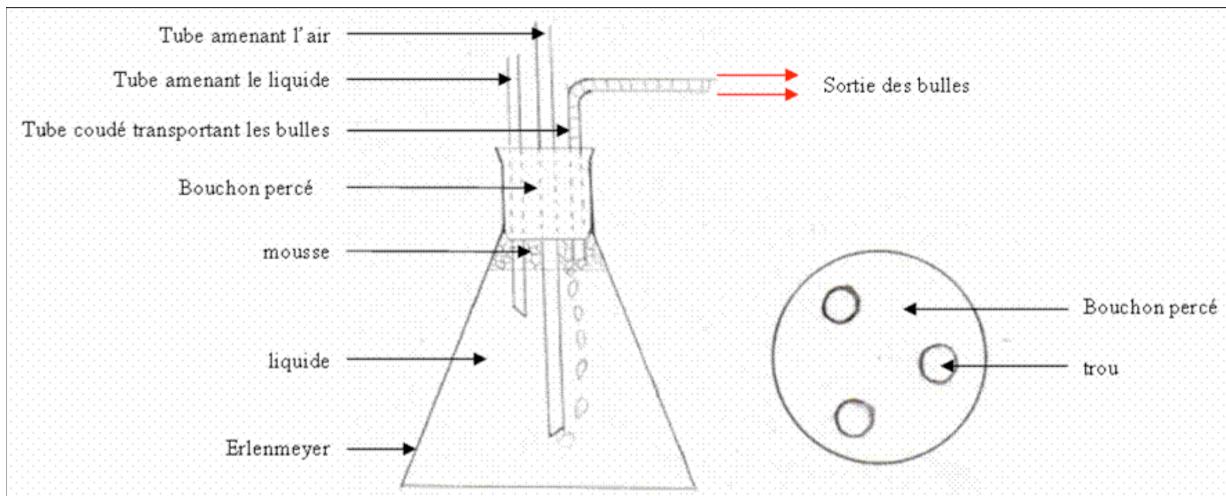
Nous avons ainsi investi dans un compresseur à air, susceptible de délivrer une pression constante réglable. Nous avons également élaboré un «liquide à bulles», dont la composition est (en pourcentage massique)

- 25% de produit vaisselle (marque Winny)
- 15% de glycérine
- 45% d'eau distillée
- 15% de sucre

Pour une meilleure visibilité des bulles, nous avons adjoint à notre liquide un colorant du bleu de méthylène (pur sous forme solide).

Restait ensuite à inventer un montage susceptible de fournir une nappe de bulles régulière. Cette «machine à bulles» est composée de plusieurs éléments.

## La « machine à bulles »



Elle est composée d'un erlenmeyer de contenance 125mL surplombé d'un bouchon aménagé spécialement pour l'occasion.

Ce bouchon a été percé par trois fois, et est traversé par trois tubes de verre, dont l'un présente un angle droit.

Chaque tube a une fonction précise

- Le tube droit le moins profond amène du liquide savonneux., sans démontage du dispositif. Il est à cet effet relié à une ampoule à décanter.
- Le tube qui plonge le plus profondément dans l'erlenmeyer conduit le flux d'air constant en provenance du compresseur. Plus le diamètre de l'extrémité inférieure de ce tube est petit, plus les bulles produites sont nombreuses et de petite taille. La surpression de l'air comprimé vaut seulement quelques dizaines d'hectopascal, le débit lui aussi est plutôt faible  $D = 1\text{mL.s}^{-1}$ . Ces valeurs ont été choisies de manière empirique. Nous nous sommes aperçus par exemple que si la taille des bulles devient trop petite devant l'écartement des plaques de la cellule de Hele Shaw, alors la mousse formée devient tridimensionnelle.
- L'air parvient au fond de l'erlenmeyer, puis remonte à la surface. Les bulles formées s'amassent en mousse. A cause de l'arrivée constante d'air, et de la surpression ainsi formée dans l'erlenmeyer, les bulles de cette mousse remontent dans le tube à angle droit, ouvert sur les deux plaques de la table d'expérimentation. Le tube coudé amène les bulles sur la table d'expérimentation. Nous estimons que le dispositif produit environ 46 000 bulles à l'heure lorsque la buse utilisée a un petit diamètre.

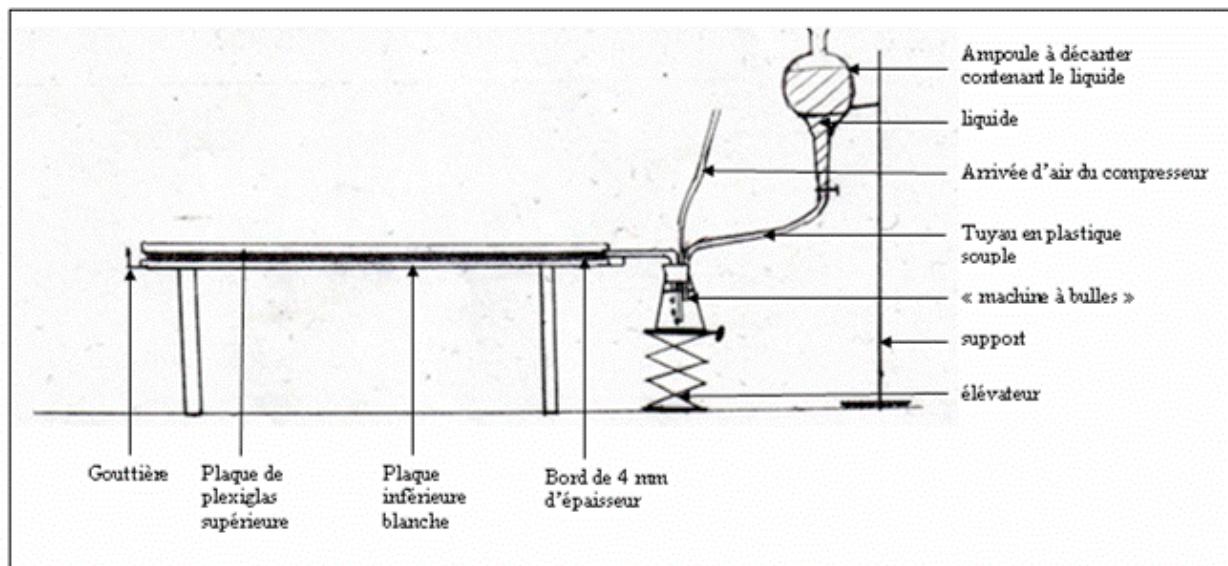
## La table d'expérimentation

C'est une cellule de Hele Shaw adaptée à nos besoins spécifiques.

Elle était composée de deux plaques de plexiglas superposées. Nous avons remplacé le plexiglas par du verre, suite aux conseils reçus lors des sélections interacadémiques au Lycée Buffon à Paris. Cela paraît bénéfique, les bulles « glissent » mieux sur le verre.

Les plaques sont maintenues à distance l'une de l'autre par deux bandes latérales en plexiglas de 4mm d'épaisseur.

## Schéma de la table d'expérimentation

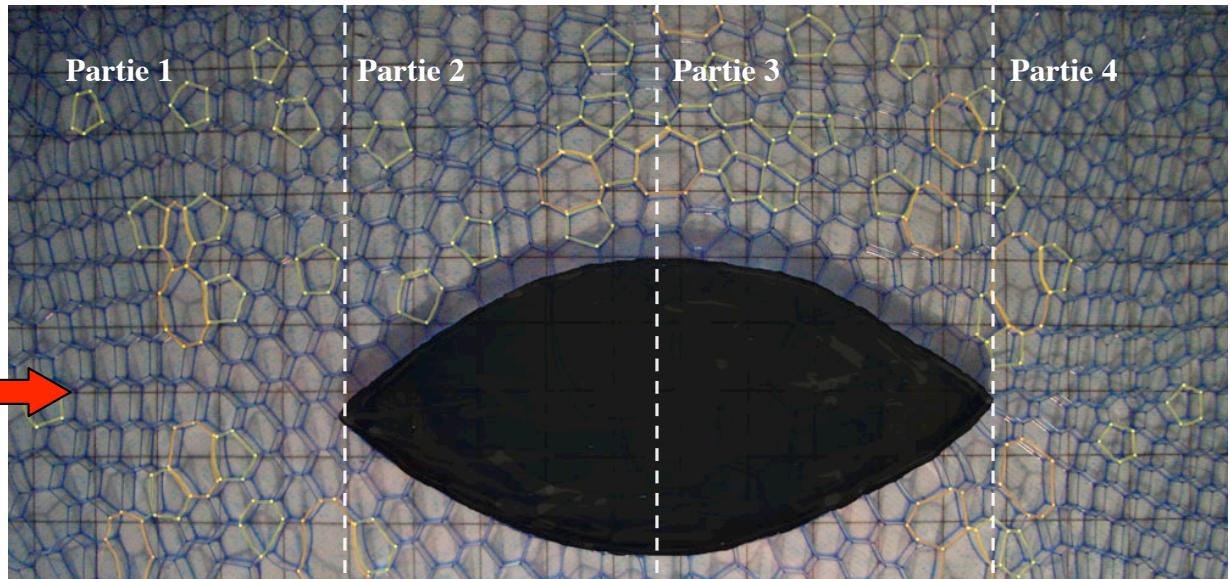


Le dispositif produit une mousse de Langmuir monodisperse et bidimensionnelle qui s'écoule avec une vitesse de l'ordre de 1 à 2 mm par seconde.

Le choix d'obstacles différents permet de contraindre la mousse de différentes manières.

## 2. Réarrangements

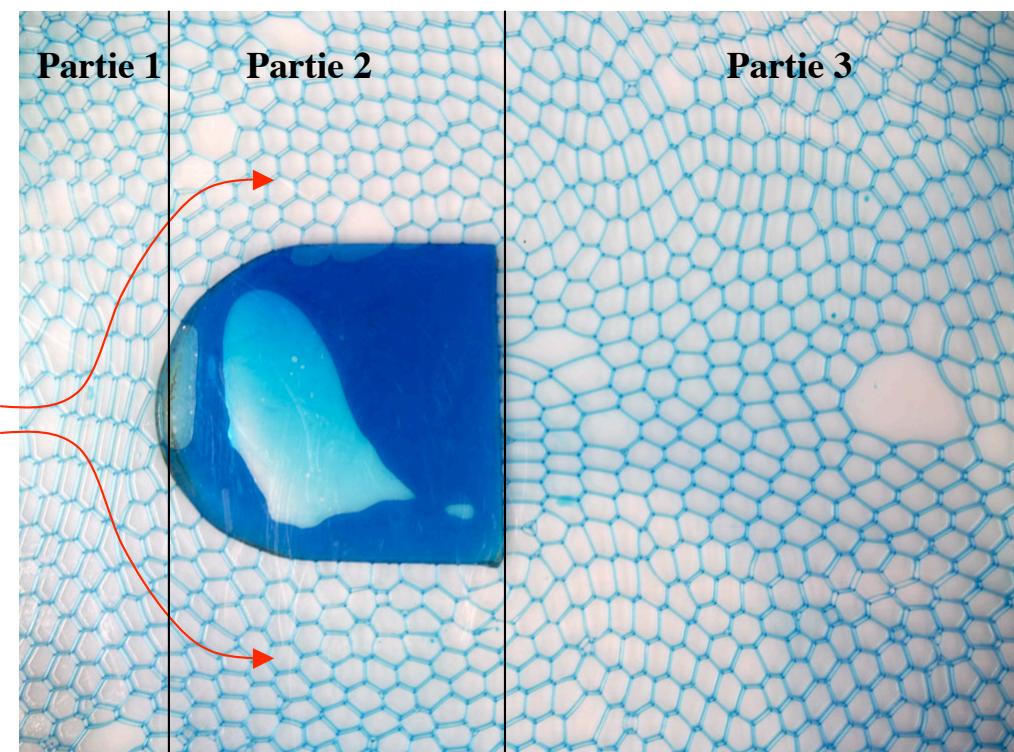
Nous avons placé un obstacle biconvexe entre les deux plaques. La mousse bidimensionnelle s'écoule dans le sens gauche droite. Il en sera ainsi sur toutes les photographies à venir.



Ici on observe un réarrangement des bulles. On passe d'une partie (partie 1) composée en quasi-totalité de bulles normales et stables dans la durée, c'est-à-dire hexagonales, à une zone (parties 2 et 3) reconfigurée, c'est-à-dire composée d'un nombre anormal de bulles pentagonales et heptagonales. On remarque aussi que la partie 4 comme la partie 1 est composée majoritairement de bulles hexagonales. On assiste à un retour à la normale, preuve de la non-stabilité des bulles non-hexagonales. Il faut également remarquer que dans la partie 2, les bulles avancent dans un passage de plus en plus étroit, alors que dans la partie 3, c'est l'inverse. La limite entre la partie 2 et la partie 3 correspond donc à l'interface pression-dépression. Cette zone serait une zone d'instabilité pour la mousse.

### 3. Compression et stagnation

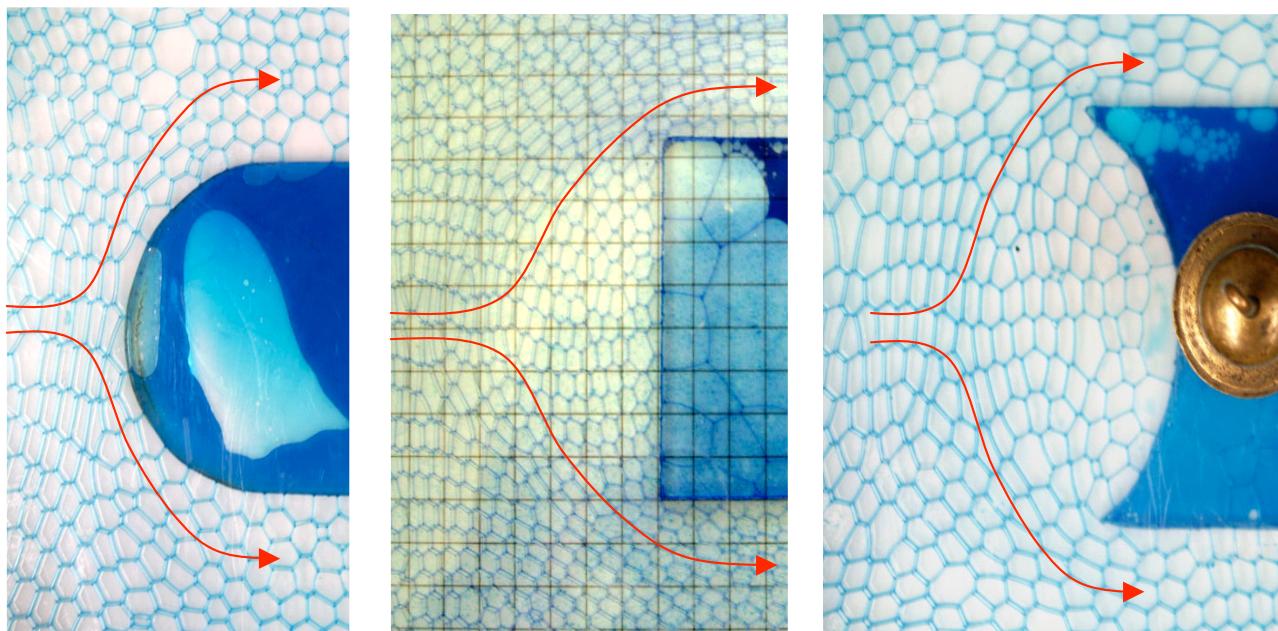
Nous avons observé le comportement de la mousse de Langmuir, lorsqu'elle rencontre un obstacle solide indéformable en plexiglas. Dans la partie 1 du document ci-dessous, on constate que les cellules sont étirées selon une direction perpendiculaire à la trajectoire des bulles. Cela manifeste l'existence de forces pressantes opposées, exercées sur ces cellules par l'obstacle lui-même et par les bulles qui arrivent sans cesse de la gauche. Les bulles déformées vont contourner l'obstacle de part et d'autre. Elles retrouvent alors une structure presque «normale».



Photographie du franchissement d'un obstacle plan-convexe.

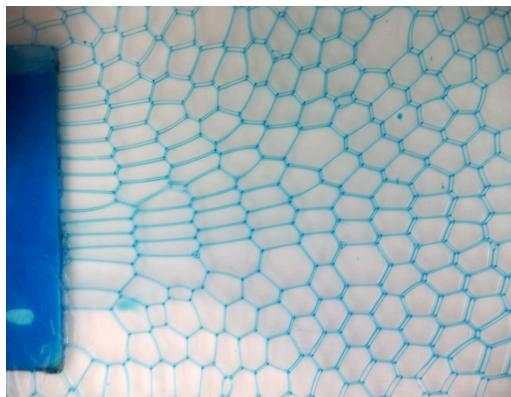
Nous avons remplacé cet obstacle par son homologue, de coupe identique, réalisé dans le matériau fibreux et synthétique d'une éponge grattoir verte utilisée lors de la vaisselle. Nous pensions que les bulles traverseraient le matériau, étant en quelque sorte absorbées par les fibres. Il n'en a pas été ainsi. En réalité, les bulles forment une couche stagnante qui enveloppe l'obstacle. Les bulles semblent adhérer à la surface convexe de l'obstacle rugueux. Elles glissent sur la surface convexe des obstacles lisses.

Ainsi, la nature et la structure du matériau qui constitue l'obstacle modifient l'écoulement de la mousse, nous avons voulu savoir en quoi la forme de l'obstacle pouvait jouer un rôle.  
Nous avons placé un obstacle solide indéformable présentant une surface lisse convexe, plane ou concave.



L'expérience montre que les résultats sont différents. Dès que la surface est plane, a fortiori, lorsqu'elle est concave, la déformation des bulles qui a lieu est accompagnée par une agglutination de mousse stagnante au-devant de l'obstacle. Les bulles piégées dans cette zone ne s'échappent pas. Elles sont elles aussi déformées longitudinalement, ce qui révèle l'existence d'une certaine compression.

#### 4. Dépression et écoulement

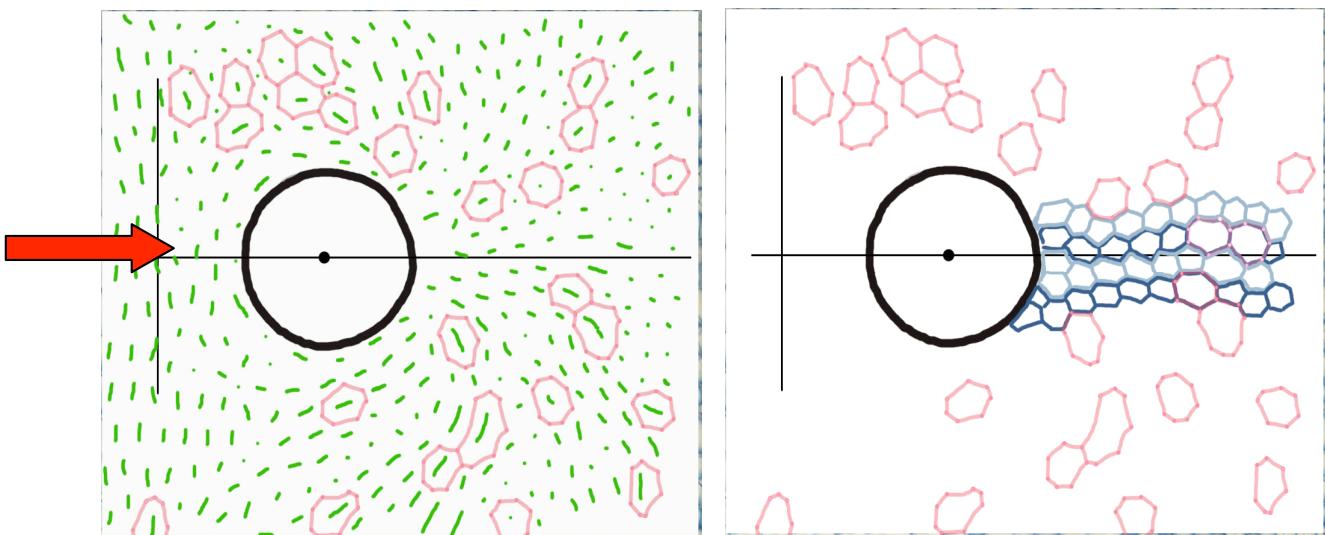


Lorsque la partie arrière d'un obstacle présente une surface plane, les bulles glissent le long du plan et s'allongent dans le sens de l'écoulement. Elles semblent aspirées horizontalement et comprimées verticalement.

C'est particulièrement visible sur la photographie ci-dessus.

Il s'avère que cette déformation ne perdure pas, les bulles reprennent une forme « normale ». Elles sont capables de stocker une certaine énergie élastique.

Nous avons recherché en vain au cours de nos expériences, la présence de turbulences en aval des obstacles. Voici par exemple deux schémas représentant l'écoulement de la mousse autour d'un obstacle cylindrique.

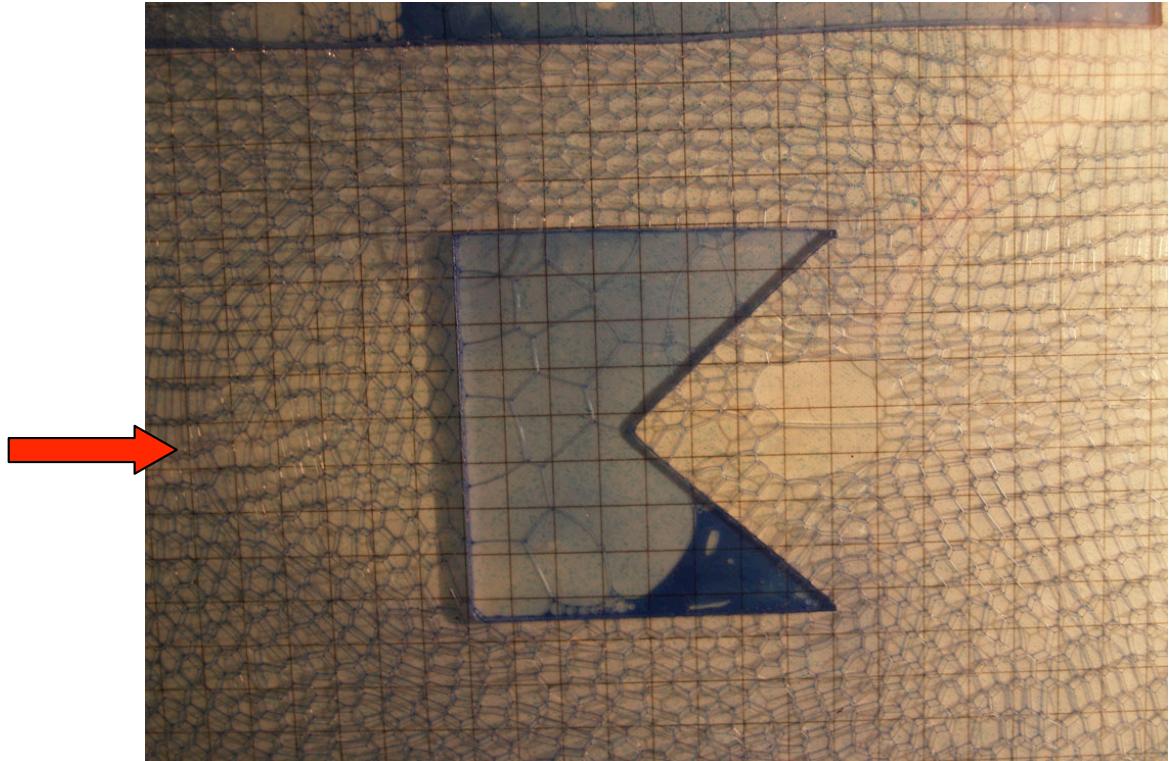


Un écoulement est laminaire lorsque la vitesse de chaque point est constante au cours du temps. On peut alors définir des lignes de courant. (cf. schémas ci-dessus).

Nous avons schématisé les bulles par des traits orientés dans le sens de leur allongement, ou bien par des points lorsque les bulles ont une structure hexagonale ou pentagonale presque régulière. Par ailleurs, les bulles présentant plus de six cotés sont représentées en violet. Sur le schéma de droite figurent en bleu les lignes de bulles qui s'écoulent en aval de l'obstacle.

Dans le cas des mousses, les écoulements semblent toujours laminaires, la vitesse de déplacement des cellules étant inférieure à  $2\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

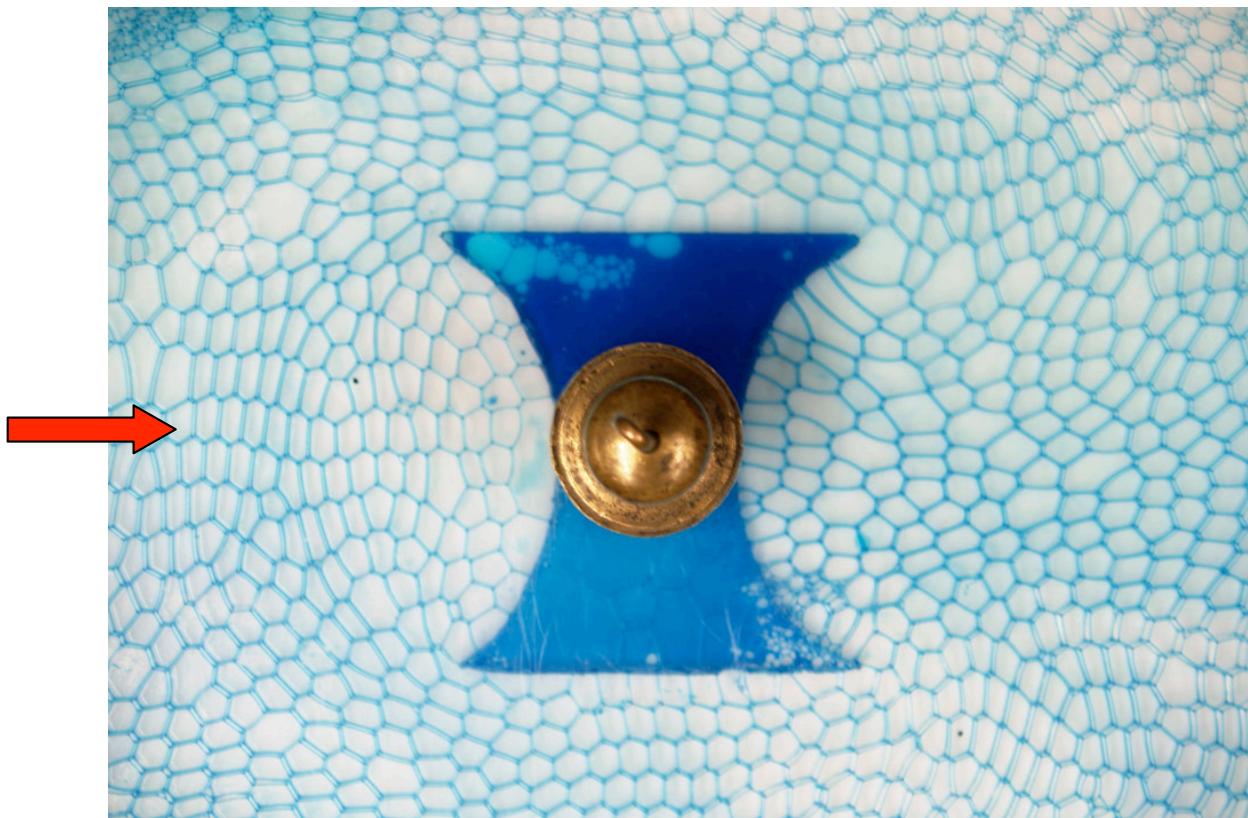
Une exception confirme cette règle. Lorsque la face arrière de l'obstacle présente une concavité importante, il arrive souvent que les bulles ne s'amassent pas totalement en mousse, laissant apparaître une béance.



Les deux bulles de grande taille apparues derrière l'obstacle sur le document précédent peuvent-elles être perçues comme des trous? Elles illustrent pour leur part que cette zone d'aspiration est une zone d'instabilité, due à une baisse de pression. Notre mousse, corps fragile, n'aura pas résisté aux contraintes locales. Les dépressions observées seraient de l'ordre de -0,1 bar au plus. Le phénomène, présente une analogie forte avec la cavitation, mais la comparaison a ses limites, en effet, la cavitation n'apparaît dans l'eau que lorsqu'on a des dépressions de l'ordre de -10 bar.

Les photographies ne permettent pas de suivre la trajectoire d'une bulle en particulier, elles limitent l'étude dynamique d'une mousse. Nous pallions ce défaut en réalisant et en analysant de courtes prises de vues faites avec une caméra.

L'obstacle biconcave présenté ci-après permet malgré tout de visualiser les lignes d'écoulement de la mousse. A l'arrière de l'obstacle, au niveau des pointes, les bulles sont déviées de leur trajectoire au point que certaines d'entre elles ont un mouvement de rétrogradation. Elles semblent aspirées vers l'intérieur de la cavité.



Après la première étude sur cet obstacle biconcave, nous nous sommes demandé si les résultats obtenus seraient différents si l'obstacle était placé de manière différente. Nous avons tourné l'obstacle de 90°. La photographie suivante ne présente que la moitié supérieure de l'obstacle sur lequel s'écoule la mousse.

Nous pouvons ainsi observer un phénomène commun à la plupart de nos obstacles: une déformation des bulles, qui passent du stade d'hexagones (qui représentent la forme régulière de la bulle) pour s'étirer fortement en subissant une compression, jusqu'à ce qu'elles passent de part et d'autre de l'obstacle.



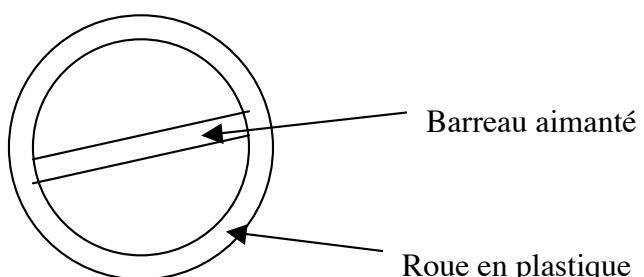
C'est alors que les bulles subissent une décompression due à l'élargissement du passage en raison de la concavité de l'obstacle. Les bulles reprennent alors leur forme régulière. Ensuite on remarque une deuxième compression au niveau de la partie arrière de la lentille car le passage emprunté par les bulles se rétrécit. C'est alors que l'on constate une seconde décompression lorsque les bulles ont dépassé l'obstacle, celles-ci prennent plus de place en reprenant leur forme régulière formant ainsi une sorte de halo de chaque côté de la lentille. Les bulles se situant alors entre les deux halos sont comprimées se transformant en hexagones irréguliers voire en pentagones, ces bulles sont poussées vers l'arrière de la plaque, on peut dire qu'elles sont aspirées vers l'arrière de la dépression afin de retrouver leur aspect normal.

Pour finir, nous nous sommes demandés quels effets aurait un obstacle mobile sur la propagation de la mousse. En effet, la mise en rotation propre d'un cylindre ou d'une sphère en translation dans l'air fait apparaître une zone de dépression qui a pour effet de dévier le solide de sa trajectoire. C'est l'effet Magnus, bien connu des footballeurs. Cet effet existe-t-il dans une mousse□

L'étude ci-dessous comporte deux expériences, réalisées à des vitesses de rotation différentes.

#### **Principe de fonctionnement du mobile en rotation sur lui-même.□**

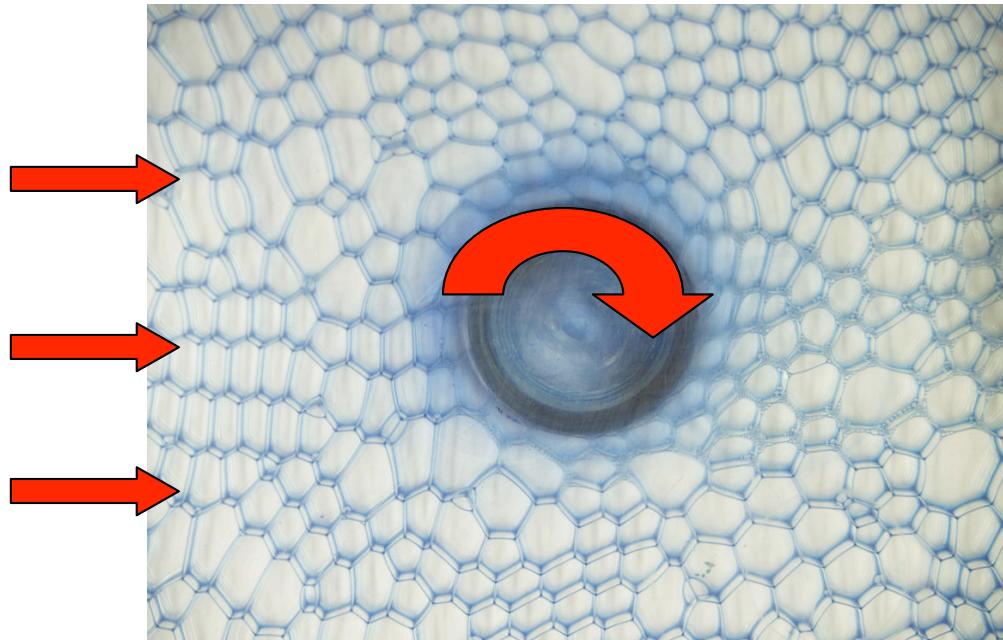
Cet obstacle est constitué de deux parties□



Un agitateur magnétique est placé sous la table d'expérimentation, et ainsi le mobile tourne sans que nous ayons eu besoin de percer la plaque de verre inférieure de notre table d'expérimentation.

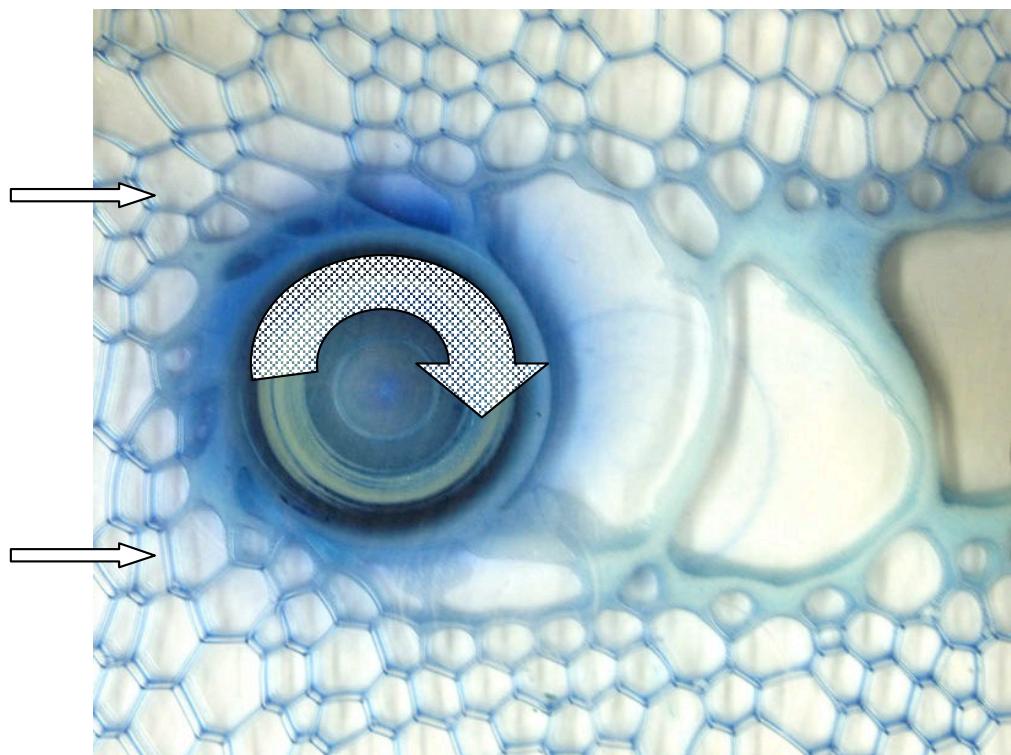
## 1 - À vitesse très modérée

Voici ce que l'on peut observer à cette vitesse. Les bulles s'écoulent autour de l'obstacle et s'enroulent dans le sens de rotation. Pour mesurer la pression, il faut suivre les bulles et mesurer l'évolution de leur aire. Nous n'en avons pas les moyens techniques.



## 2 - À grande vitesse

Intéressons nous à la progression d'une mousse face à un mobile tournant très rapidement sur lui-même. Voici ce que nous pouvons observer dans de telles conditions expérimentales



Nous observons l'apparition de bulles d'un très grand volume à l'arrière du mobile et d'une mousse très fine autour du mobile. Ceci s'explique par la trop grande vitesse de rotation. En effet, si auparavant les bulles pouvaient être entraînées par le mobile, ce n'est plus le cas ici. Ainsi, les bulles sont brisées, ce qui explique l'apparition de grandes bulles, qui peuvent davantage être perçues comme des cavités béantes, des trous dans la mousse. La mousse paraît dégradée.

L'effet Magnus existe-t-il dans une mousse? Monsieur Graner nous a dit qu'il en doutait. Pourtant, avec une vitesse de rotation raisonnable, on voit que le solide entraîne de la matière et l'accumule d'un côté, induisant de ce fait une surpression.

Monsieur Graner a récemment publié un article dans Physical Review Letters, dans lequel il explique que son laboratoire a montré qu'un avion qui volerait dans l'air ne volerait pas dans une mousse. «Plus inattendu, alors que dans le cas de l'air un tel écoulement crée une différence de pression qui soulève l'avion, la réponse de la mousse est dominée par l'élasticité des bulles. Pour réduire leur déformation, les bulles du bas tirent l'obstacle vers le bas, les bulles du haut le poussent aussi vers le bas, et l'aile d'avion descend.»

C'est sans doute cette élasticité des bulles qu'il nous faut encore invoquer pour comprendre l'absence d'effet Magnus dans une mousse.

## Conclusion

Cette étude sur l'organisation spatiale des bulles et des mousses en statique et en dynamique, nous a permis d'aborder quelques aspects de la recherche scientifique, et d'étudier certaines interrogations, à la fois physiques et mathématiques posées par l'existence et le comportement des mousses.

Ces objets fragiles, remis en valeur il y a une dizaine d'années par Pierre Gilles de Gennes, se révèlent être des structures matérielles particulièrement complexes. Il était nécessaire que nous prenions le temps de décrire et de comprendre ces structures. Cela nous a donné des clés pour analyser nos observations.

Au final, il apparaît qu'une mousse possède à la fois certaines propriétés d'un solide et certaines propriétés d'un fluide. Comme un solide, une mousse fait preuve d'une certaine élasticité, comme un fluide, elle peut s'écouler, elle est compressible et expansible.

Au travers de ces recherches en «**aphrostatique**» et en «**aphrodynamique**»<sup>1</sup>, nous avons pris connaissance de certains phénomènes physiques décrits de manière classique par les lois de la statique et de la dynamique des fluides. Nous nous sommes étonnés devant la beauté des structures symétriques des bulles assemblées en mousse que nous avons étudiées.

Ce travail d'équipe, nous aura permis d'acquérir de nouvelles compétences, il aura été aussi, comme c'est souvent le cas en science, une belle aventure humaine.

---

<sup>1</sup> Ces termes sont des néologismes, *aphros* en grec signifie *mousse*.

## Bibliographie

### L'Internet

- [www-lsp.ujf-grenoble.fr](http://www-lsp.ujf-grenoble.fr)
- [www.chevrontexacourSA.com](http://www.chevrontexacourSA.com)
- [archives.arte-tv.com](http://archives.arte-tv.com)
- [www.unice.fr](http://www.unice.fr)
- [Lesdauphinsdavignon.free.fr](http://Lesdauphinsdavignon.free.fr)
- [www.rvweb.fr](http://www.rvweb.fr)
- [www.photosvilles.wanadoo.fr](http://www.photosvilles.wanadoo.fr)
- [frit.lss.wisc.edu/fda/bibliotheque/carte4.htm](http://frit.lss.wisc.edu/fda/bibliotheque/carte4.htm)
- [www.e-scio.net](http://www.e-scio.net)
- [www.lmm.jussieu.fr](http://www.lmm.jussieu.fr)

### Ouvrages

- Symétrie et propriétés physiques, du principe de Curie aux brisures de symétrie de Jean Sivardière
- Les corps fragiles de Pierre Gilles de Gennes et Jacques Badoz

## Annexe 1

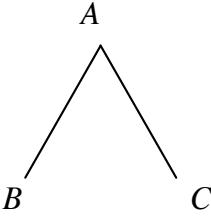
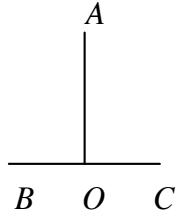
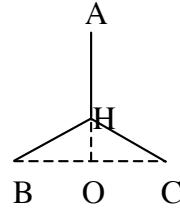
### Calcul du trajet minimal entre 3 points formant un triangle équilatéral

Il y a trois trajets simples reliant les trois points.

Soit  $ABC$ , un triangle équilatéral.

Soit  $a = AB = BC = CA$

Soit  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$  la distance du trajet dans chaque hypothèse.

<u>Hypothèse 1</u>	<u>Hypothèse 2</u>	<u>Hypothèse 3</u>
		
$T_1 = 2a$	$T_2 = AO + BC$ $AC^2 = AO^2 + OC^2$ $AO^2 = AC^2 - OC^2$ $AO^2 = a^2 - \frac{a^2}{4}$ $AO^2 = \frac{3a^2}{4}$ $AO = a\sqrt{\frac{3}{4}}$ $T_2 = a + a\sqrt{\frac{3}{4}}$ $T_2 = a\frac{2+\sqrt{3}}{2}$	$T_3 = AH + HB + HC$ $T_3 = 3AH$ $T_3 = 3 \cdot \frac{2}{3}AO$ $T_3 = 2\sqrt{3}a$ $T_3 = a\sqrt{3}$

#### Comparaison des résultats:

$$\frac{\sqrt{3}+2}{2} > \sqrt{3}$$

$$\frac{\sqrt{3}+2}{2} > a > a\sqrt{3}$$

$$T_2 > T_3$$

$$\sqrt{4} > \sqrt{3}$$

$$2a > a\sqrt{3}$$

$$T_1 > T_3$$

$T_3$  est le trajet minimal.

L'application de ce résultat à un système de trois bulles identiques accolées explique l'allure des films savonneux disposés en Y.

## Annexe 2□

### Calcul du trajet minimal entre 4 points formant un carré

Il y a cinq trajets envisageables.

Soit  $ABCD$ , un carré.

Soit  $AB = BC = CD = DA = 1$

Soit  $T$  la distance du trajet

Hypothèse 1□	Hypothèse 3□	Hypothèse 4□	Hypothèse 5□
 $T_1 = 3AB$ $T_1 = 3$	 $T_3 = 2AD$ $T_3 = 2\sqrt{2} \approx 2,8$	 On admet que $EE' = FF' = x$ , et que $AB$ est parallèle à $(EF)$ $T_4 = 4AE' + E'F'$ $T_4 = 4\sqrt{AE^2 + EE'^2} + AB \approx 2EE'$ $T_4 = 4\sqrt{\frac{1}{4} + x^2} + 1 \approx 2x$ On étudie la fonction définie par $f(x) = 4\sqrt{\frac{1}{4} + x^2} + 1 \approx 2x$ Le minimum est atteint quand $x = \frac{\sqrt{3}}{6}$ et on a $T_4 = \sqrt{3} + 1 \approx 2,73$	 Elle revient au même que l'hypothèse 4.
 $T_2 = 3AB$ $T_2 = 3$			

### Comparaison des résultats□

$T_4$  et  $T_5$  sont les trajets les plus courts.

Dans le cas d'un système de quatre bulles, cela permet de comprendre le mode d'association des bulles et l'allure et l'arrangement des films savonneux.