

L'origine de la formation des bulles d'azote en plongée



Partie 2 : La mécanique de formation des bulles

La formation des noyaux gazeux



il existe plusieurs mécanismes de formation des noyaux gazeux :

a/ La nucléation : c'est le passage de l'état dissous à l'état gazeux suite à une diminution de la pression ambiante

La nucléation hétérogène : suite aux changements de température, pression, tension ou autre changements physico chimiques

La nucléation homogène : la dispersion thermodynamique des molécules est susceptible de fournir l'énergie d'activation spontanée à la nucléation

Le taux de nucléation est dépendant de :

- L'importance du gradient de pression
- Du temps d'exposition
- De la température
- Des forces appliquées au liquide
- De la tension de surface du liquide.

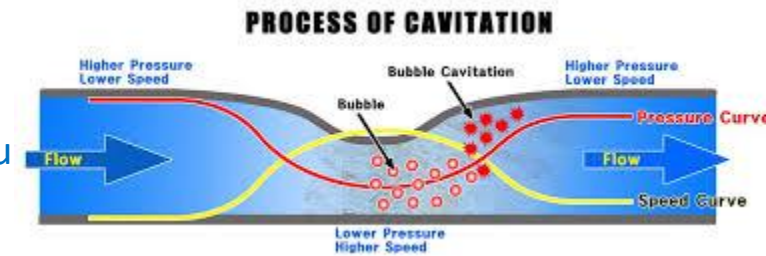


La formation des noyaux gazeux



b/ La cavitation : c'est un cas particulier de nucléation. L'apparition des bulles est liée à une diminution locale de pression hydrostatique et fréquemment reliée aux fluides en mouvement.

La cavitation vaporeuse : apparait dans un liquide faiblement chargée en gaz dissout. Ce sont les actions mécaniques violentes qui provoquent ce type de nucléation (Ex : une hélice de bateau). C'est le liquide qui change d'état.



La cavitation gazeuse : survient dans un liquide contenant une quantité significative de gaz dissout (Ex : lors de la remontée en sursaturation). C'est le gaz contenu dans le liquide qui reprend une phase gazeuse.

Les cavitations particulières

La cavitation de Reynolds : apparait au niveau du resserrement d'un vaisseau suite aux turbulences générées par les changements de pression du liquide (sang)

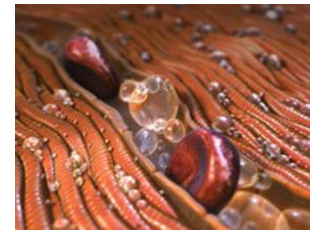
La cavitation acoustique : apparait lors du passage d'ondes sonores (Ex : fermeture des valves cardiaques ou ondes sonars)

La déchirure d'un liquide par **tribonucléation** : apparait lors de la séparation rapide de 2 surfaces solides adhésives ou 2 surfaces entrant en friction

Le vacuum phénomène : apparait lors d'une traction au niveau d'une surface articulaire, ce qui provoque un effet de vide (gradient de pression négatif)

La nucléation par l'exercice : le mécanisme est complexe et serait lié à des phénomènes de cavitation, de tribonucléation et de production de CO₂

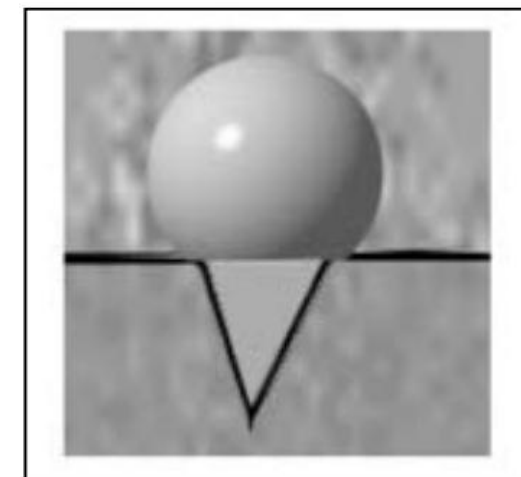
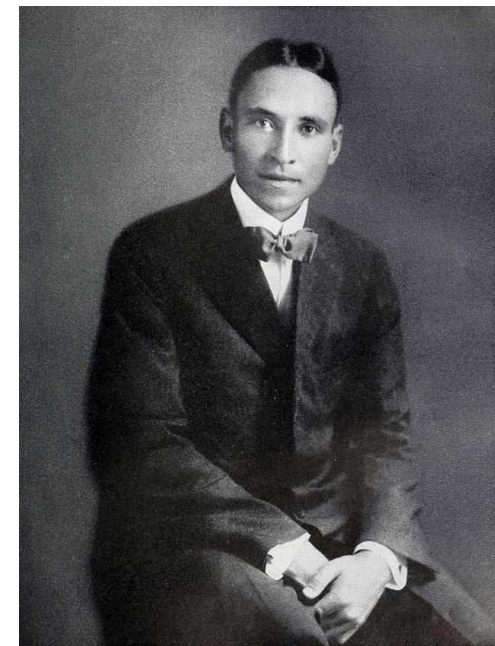
La formation des bulles



Il existe 3 hypothèses connues à ce jour sur la formation des bulles

1/ Les crevasses et hétérogénéités “hydrophobes” de Harvey

on sait que des micro-cavités hydrophobes à la surface de tissus/particules peuvent héberger des poches de gaz stables qui servent de noyaux quand un liquide devient sursaturé ; sans noyau, l'énergie d'interface ferait avorter la naissance d'une bulle. Ce concept dit « crevice model » est encore la base de la cavitation en biologie et en mécanique des fluides. ([SciSpace](#))*



La formation des bulles



2/ Les nanobulles de surface = « active hydrophobic spots » (AHS) de Ran Ariéli

Des travaux plus récents (imagerie de surfaces hydrophobes et modélisation) montrent la présence de nanobulles persistantes sur des zones hydrophobes du côté luminal (face interne du vaisseau en contact avec le sang) des vaisseaux. Chez l'animal, ces AHS portent des phospholipides de type surfactant Ex : DPPC « Dipalmitoylphosphatidylcholine », fournissant des sites stables d'où se détachent des bulles après décompression. (Frontiers)

Le détachement de ces bulles dépend de la forme et de la taille des bulles et lors de son détachement, celle-ci emporte une micro-portion de paroi cellulaire entraînant une micro-abrasion sur laquelle va se reformer une autre microbulle beaucoup plus rapidement.

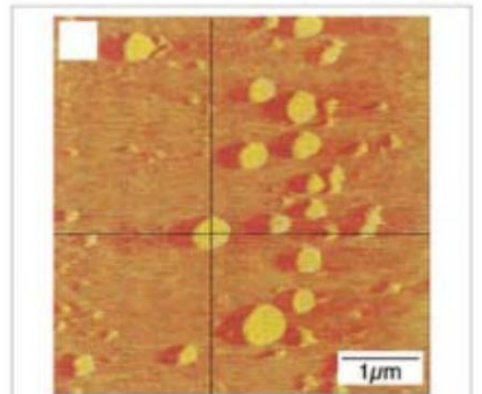
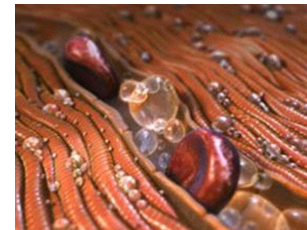


FIGURE 1 | Evolution of nanobubbles on a hydrophobic surface. Nanobubbles which evolved from dissolved gas on a hydrophobic surface observed using atomic force microscopy (taken from Tynell and Altant, 2001 with permission).

La formation des bulles



3/ Microparticules sanguines (MPs) de Steven.R.Thom comme noyaux.

Une autre voie propose que certaines microparticules circulantes (vésicules 0,1–1 μm issues de cellules endothéliales/plaquettaires ou du surfactant pulmonaire) contiennent déjà une microphase gazeuse (pré-gazéifiées) et grossissent sous pression, devenant des noyaux efficaces à la décompression et déclenchant une activation inflammatoire. (Physiology Journals).

Cette théorie a été mise en évidence lors de décompression sur des plongées à saturation avec lesquelles il n'y a pas de microbulles détectables lors de la remontée (Vitesse de remontée linéaire et extrêmement lente) mais une composante inflammatoire avérée et complexe à gérer.

Les derniers travaux de Jean Pierre Imbert; Ran Ariéli et Costantino Balesta montrent que ce phénomène inflammatoire existe aussi lors de plongée loisir à l'air sur des plongées successives au-delà de 5 jours (type séjour / croisières plongées où s'enchaînement 2, 3, 4 voire 5 plongées par jour.)

