

Comportement d'un couple de bulles micrométriques sous excitation ultrasonore

Micrometric bubble pair behavior under acoustic excitation

Mots clés : Bulles, cavitation, oscillations non-sphériques, écoulements, force d'interaction, couplage

Keywords : Bubbles, cavitation, surface modes, microstreaming, interaction force, coupling

Résumé :

Les microbulles de gaz sont des agents physiques permettant une redistribution dans leur voisinage de l'énergie ultrasonore. Dans des applications médicales ou industrielles, elles permettent entre autre la perméabilisation de membrane cellulaire, le nettoyage de surface, l'optimisation de réactions chimiques ... Ces bulles sont généralement rencontrées sous forme d'ensembles plus ou moins denses. Le comportement de ces groupes, ou nuages, de bulles est piloté par différentes interactions, acoustiques ou fluidiques. La compréhension d'un nuage de bulles nécessite d'étudier dans un premier temps un couple de bulles, considéré alors comme une brique élémentaire de ce nuage. Les travaux présentés dans ce mémoire ont pour objectifs d'étudier les couplages acoustiques et fluidiques gouvernant le comportement d'un couple de bulles.

Dans un premier temps, le comportement d'une bulle unique est étudié. Sous certaines conditions de taille et de pression acoustique, son interface peut osciller selon des modes non-sphériques. De telles déformations permettent la mise en place d'un écoulement lent et localisé autour des bulles : le *microstreaming*. Une nouvelle approche théorique, confrontée à des données expérimentales, montre que les motifs de l'écoulement induit varient en fonction de l'interaction modale prédominante, et peuvent permettre une action localisée (motifs en lobes confinés autour de la bulle) ou à plus grande échelle (motifs en croix).

Dans un second temps, l'analyse est étendue à un couple de bulle. Pour cela un dispositif expérimental original est proposé, afin de piéger deux bulles à distance contrôlée, loin de toute frontière, dans une chambre acoustique résonante bi-fréquentielle. Ce dispositif permet de quantifier aussi bien la force de radiation secondaire à laquelle les bulles sont soumises, leurs déformations sphériques et non-sphériques, le couplage acoustique à l'échelle ultrasonore et les écoulements induits. Les travaux présentés ici montrent l'influence d'oscillations non-sphériques sur la force de radiation secondaire et la possible inversion de cette force pour des distances inter-bulles faibles. Pour une fréquence d'excitation donnée, le couplage acoustique est constructif ou destructif si les deux bulles du couple sont respectivement sous-résonantes ou sur-résonantes. Les oscillations non-sphériques sont sources d'un couplage significatif uniquement lorsque les deux bulles sont presque en contact. En revanche, les écoulements qui leurs sont associés peuvent interagir à plus grande échelle. Une quantification des contraintes générées dans le milieu par ces écoulements est réalisée, et semblent suffisantes pour induire l'ouverture temporaire de membranes biologiques.

Summary :

Acoustic bubbles are known to allow a contactless and localized action on a surrounding body, as for example in ultrasound therapies or for engineering applications. These bubbles are often encountered as more or less dense groups, called bubble clouds. The behavior of such clouds are driven by acoustic and fluid interactions. The work presented in this dissertation aims at studying the streaming flow induced by such oscillating bubbles as well as the interactions undergone by a bubble couple.

Under specific conditions on the size of the bubbles and the acoustic pressure amplitude they are submitted to, a bubble interface can demonstrate shape oscillations. Such deformations give rise to a slow mean flow around the bubble: the so-called microstreaming. A recent theoretical approach is used to understand the

diversity of microstreaming patterns that are observed experimentally around bubbles trapped in a resonant water tank. It is shown that the cross-like patterns (large scale action) are linked to self interaction of the main triggered mode and that lobe-like patterns (local action) are associated to the cross-interaction between the breathing mode and the parametrically excited one.

The study of a large variety of bubble couples is achieved through the use of a bi-frequency acoustic levitation chamber. Bubbles are maintained at controlled distances in an infinite fluid. Such a technique allows the quantification of the secondary radiation force acting on each bubble, their spherical or nonspherical oscillations, the acoustic coupling at the ultrasonic time scale and the fluid flow they generate. It is shown that the triggering of nonspherical oscillations induce an additional hydrodynamic force which modifies the bubble pair equilibrium. The inversion of the secondary radiation force is evidenced when the bubbles sufficiently attract and migrate to a specific equilibrium location in the trapping field. At this location, the presence of shape modes has been shown to be responsible for bouncing between the bubbles. The acoustic coupling is also studied. Two regimes are evidenced: either the bubbles are both smaller than the resonance size for the chosen excitation frequency and hence the coupling is constructive or they are greater than this resonance size and hence the coupling is destructive. While nonspherical oscillations do not seem to have a huge impact on this coupling, they are at the origin of a large scale hydrodynamic interaction. In this case, the shear stress induced in the bulk is quantified, and appears greater than the threshold required to induce biological effects on cell membranes.