

Le phénomène de cavitation

Vincent POMERO, Dominique BONNEAU

Définition

La cavitation est la formation de poches et de bulles de vapeur au sein d'un milieu liquide initialement homogène. Mécaniquement, on peut la définir par la rupture du milieu continu de liquide sous l'effet de contraintes excessives. Par ce dernier terme, on sous-entend la notion de seuil à partir duquel la cohésion du liquide ne peut plus être assurée. Nous verrons que ce concept de seuil est déterminé par la pression qui règne au sein de ce liquide.

La cavitation peut se produire dans le cas d'un liquide au repos ou dans des écoulements de liquide. Un exemple simple de cavitation dans le domaine médical, observable par tous, est le remplissage d'une seringue par aspiration : si l'aspiration est trop forte, on voit apparaître une poche de gaz dans la seringue.

Phénomènes physiques

Si l'on prend l'exemple de l'eau et que l'on regarde l'évolution de son état en fonction de la température, on remarque les faits suivants. A la pression atmosphérique, l'eau sous forme de glace chauffée atteint son point de fusion à 0°C ; elle devient liquide. Si nous continuons à la chauffer, toujours à la pression atmosphérique, elle passe à l'état de gaz par le phénomène d'ébullition à 100°C .

Cette évolution des différents états s'explique par le diagramme suivant (fig. 1), qui montre qu'en fonction de la température et de la pression, un corps peut se retrouver sous forme solide, liquide ou gazeuse. Par exemple, l'eau passe de l'état liquide à l'état gazeux à 100°C au niveau de la mer. En altitude, on observe un seuil d'ébullition plus bas, du fait d'une moindre pression atmosphérique (proportionnelle à l'altitude). On remarque donc que la pression ambiante influe sur la température de vaporisation. Si l'on se place à une température donnée (par exemple 37°C), à la pression atmosphérique, l'eau est, on l'a vu, à l'état liquide. D'après la figure 1, on observe qu'il existe un moyen de faire passer l'eau de l'état liquide à l'état gazeux à température constante. Il suffit d'abaisser suffisamment la pression (fig. 2).

Lorsque cette dépression amenant à la vaporisation du liquide est locale (discontinuité dans le milieu liquide), on parle alors de phénomène de cavitation, qui se manifeste par l'apparition de poches d'air et de bulles. Cette dépression étant focalisée, un rééquilibrage des pressions au sein du fluide se fait très rapidement après formation de la (ou des) bulle(s), entraînant son implosion. Cette implosion brutale est source de bruit. Ce phénomène violent peut entraîner l'endommagement des surfaces qui ont créé ce phénomène et qui se trouvent à proximité de la bulle de cavitation.

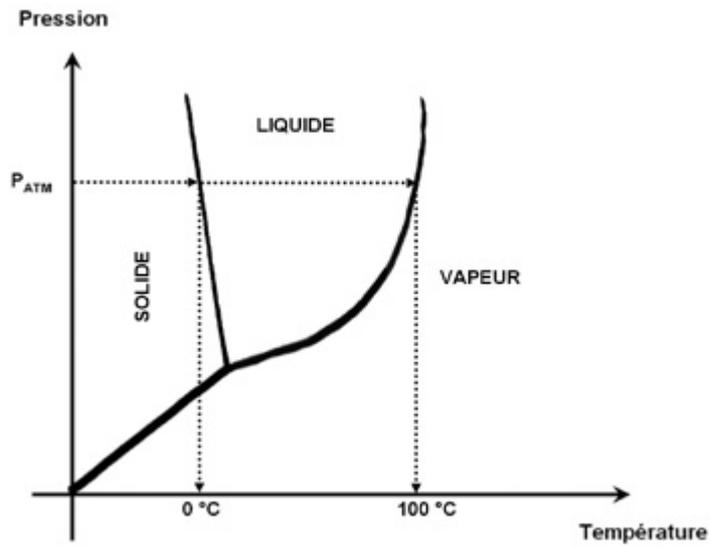


Figure 1 : Evolution de l'état d'un corps (ici de l'eau) en fonction de la température et de la pression. Dans l'exemple ci-dessus (ligne pointillée), la pression est constante (pression atmosphérique) et la température varie.

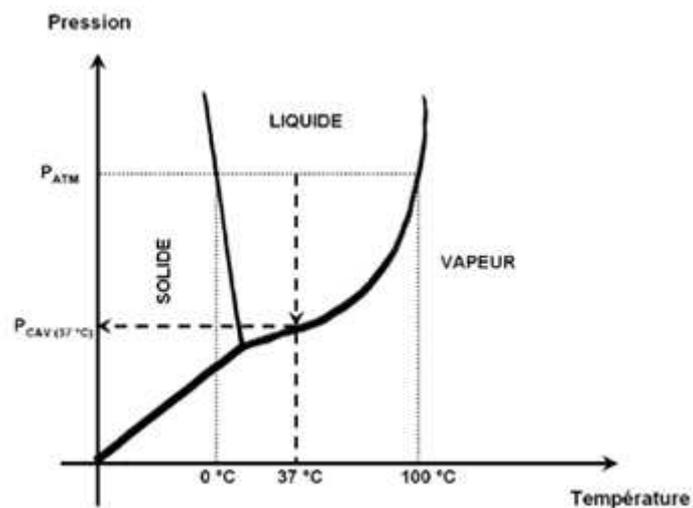


Figure 2 : Dans ce cas, la température est constante, la pression varie. A une certaine valeur de pression (PCAV (37 °C)), l'eau passe alors en phase gazeuse, à 37°C.

Implications pour l'industrie

Dans les applications industrielles, on cherche à limiter la cavitation pour plusieurs raisons.

Perte de rendement

En premier lieu, la cavitation diminue le rendement mécanique des systèmes. Ainsi, par exemple dans le cas d'une hélice de bateau, l'apparition de ces bulles d'air 'décolle' le filet d'eau autour de l'hélice, diminuant significativement son efficacité (fig. 3).



Figure 3 : Apparition de bulles de cavitation sur les pales d'une hélice.

Bruit

On a vu que l'implosion des bulles de cavitation était source de bruit, ce qui peut représenter une gêne dans certaines applications où une discrétion maximale est recherchée (sous-marins).

Détérioration

Enfin, ces implosions au voisinage des éléments métalliques entraînent dans le temps un endommagement des surfaces (fig. 4).

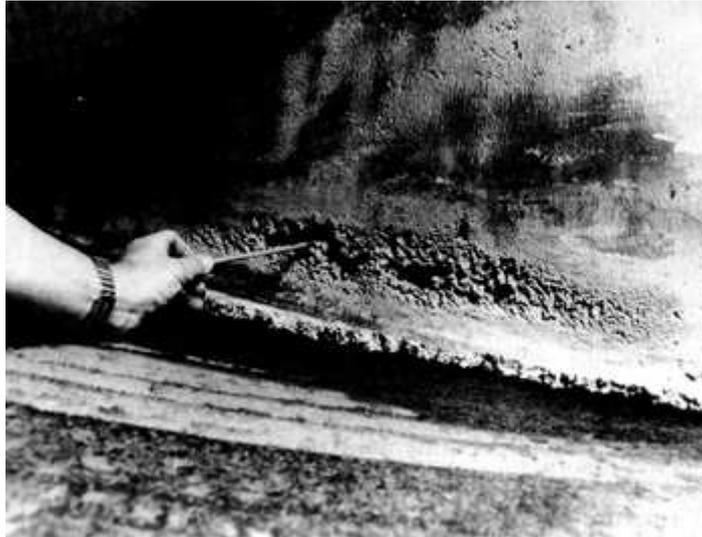


Figure 4 : Détérioration de pièces mécanique soumises à une exposition prolongée à la cavitation.

Chez l'homme

Chez l'homme, on rattache l'observation d'une clarté gazeuse entre deux surfaces articulaires au phénomène de cavitation. Unsworth et al. ont réalisé une étude exhaustive de ce phénomène objectivable par l'imagerie.

Le primum movens de cette réaction est la création d'une dépression par la décoaptation rapide des surfaces articulaires. La dépression ainsi générée entraîne le passage des gaz dissous (15% de gaz dissous dont 80% de dioxyde de carbone) dans le liquide synovial de la phase liquide à la phase gazeuse. La bulle de gaz ainsi formée est instable, car elle est le siège d'une pression inférieure à celle du milieu liquidien environnant (en raison de son état gazeux). Le craquement audible est dû au choc des parois liquidiennes de cette bulle qui se percutent brutalement, équivalent à un collapsus de la bulle, source du bruit et de libération d'énergie (qui serait délétère pour la surface cartilagineuse si ce mécanisme était répété de manière excessive).

Pour mettre en évidence ce phénomène, nous avons effectué des clichés radiographiques centrés sur les articulations métacarpo-phalangiennes. Le premier jeu était constitué par un cliché des deux mains d'un même sujet, avant et après manipulation. Cette manipulation se faisait en traction axiale manuelle instantanée du doigt médian de la main gauche, le claquement typique étant nettement audible (fig. 5). Après manipulation, l'espace inter-osseux était identique à son aspect avant manipulation ; aucune clarté aérienne n'était apparue (fig. 6). Ceci semble confirmer que la bulle se constitue lors de la décoaptation et que cette étape instable est immédiatement suivie d'une brutale attraction des parois, due au collapsus de la bulle. Les parois entrent en collision et produisent la désintégration de la cavité (qui s'accompagne du bruit de claquement) et sa disparition. Un deuxième jeu de clichés fut ensuite effectué chez le même sujet, mais selon un protocole différent. Un premier film était pris immédiatement après une première manipulation. Quelques heures plus tard, après une nouvelle manipulation en traction axiale, avec perception du claquement, la décoaptation (en traction axiale) était maintenue par l'intermédiaire d'un bandage adhésif. Un deuxième cliché était pris. Il a permis de mettre en évidence une clarté aérienne compartimentée évoquant la présence de deux bulles et témoignant de la persistance d'une dépression au sein d'un milieu liquidien initialement homogène. La persistance de cette dépression était due au maintien de

la traction, donc de la décoaptation des surfaces articulaires. La séquence "traction axiale manipulative puis maintien de la décoaptation" était responsable de la fragmentation de la cavité, secondaire à la percussio des parois de la bulle initialement formée, qui s'ovalisait avant que ses parois ne se heurtent brutalement (ce phénomène est instantané, et constitue une véritable implosion).



Figure 5 : A gauche la main gauche manipulée, à droite la main droite témoin. Cliché avant manipulation.



Figure 6 : Métacarpo-phalangienne du troisième doigt gauche après manipulation : absence d'écartement visible.



Figure 7 : Troisième doigt gauche manipulé et maintenu en décoaptation par un strapping. Ecartement de la métacarpo-phalangienne.

Commentaires

Notre expérience nous a fait constater les faits suivants :

- 1- Une traction réalisée à vitesse lente entraîne une décoaptation des surfaces articulaires sans claquement audible et sans apparition d'une clarté aérienne dans l'articulation.
- 2- Une traction à haute vitesse provoque un claquement, et si la traction est maintenue une clarté gazeuse est visible, alors que son absence est liée aux conséquences de la suppression de la dépression au sein du milieu liquidien lorsque la traction axiale n'est pas maintenue.

Unsworth et al. avaient exposé les conditions nécessaires à ce qu'une articulation craque (c'est à dire à la survenue d'un phénomène de cavitation). Ce sont les suivantes :

- La cavité articulaire doit être de petite taille.
- La congruence des surfaces articulaire doit être maximale.

- Le patient doit avoir sa musculature relâchée (dans le cas inverse, cela crée un ralentissement de la dépression).
- Le liquide synovial doit être en quantité minimale (un épanchement synovial excessif est un obstacle à la cavitation).
- Il ne doit pas exister d'hyperlaxité ligamentaire (la dépression serait amoindrie par l'attraction et la déformation des parois).

Après obtention du craquement, tout en maintenant la traction, l'espace articulaire est augmenté de taille et il faut 15 à 30 minutes au milieu liquidien devenu hétérogène (présence d'une cavité gazeuse) pour revenir à l'état initial soit homogène (dissolution du gaz). Pour obtenir le craquement articulaire, il faut encore que le mouvement manipulatif soit réalisé à très haute vitesse et avec une faible amplitude, et ce de manière instantané pour que la baisse de pression au sein du milieu liquidien soit brutale. Ainsi une mise en tension répétée, progressive suivie d'un geste manipulatif à basse vitesse ne provoque pas de craquement articulaire.

Hypothèses sur les effets du craquement

Le craquement est contemporain (et est le témoin) d'une mise en tension brutale des éléments capsulo-ligamentaires et tendino-musculaires qui décoapte instantanément les surfaces articulaires. La " brutalité " de cette mise en tension est elle-même liée au geste impulsif manipulatif à haute vitesse et à faible amplitude.

Certes, les récepteurs ligamentaires sont habituellement considérés comme des capteurs de fin de course sensibles à l'étirement. Mais leur rôle ne peut se limiter à cette seule notion, puisque les corpuscules de Pacini sont sensibles à la pression. On peut envisager, du fait de l'étirement musculaire, la mise en jeu des récepteurs musculaires, organes neuro-tendineux de Golgi et fuseaux neuro-musculaires, dont la fonction de régulation du réflexe myotatique est primordiale. En outre, cette réaction chimique intra-articulaire produit de la chaleur dont le rôle thérapeutique demeure peu connu.

Conclusion

Le craquement n'est pas strictement contemporain de la constitution de la bulle, mais du début de sa disparition. La production d'énergie au contact des surfaces articulaires peut être la cause de la dégradation cartilagineuse en cas de répétition excessive de ce phénomène.

Bibliographie

- 1 Franc JP et al. La cavitation. Mécanismes physiques et aspects industriels. Collection Grenoble Sciences. Presses Universitaires de Grenoble 1995.
- 2 Unsworth A, Dowson D, Wright V. Cracking joints, a bioengineering study of cavitation in the metacarpophalangeal joint. Ann Rheum Dis 1971 ;30:348-58