

WEEL, P. B. v.: "Die Periodizität im Stoffwechsel des restituierenden Pankreas der weissen Maus". (Communicated by Prof. H. J. JORDAN), p. 278.

RIETMEYER, ELISABETH A. and F. J. NIEUWENHUYZEN: "The action of guanidin-derivatives on motility". (Communicated by Prof. B. BROUWER), p. 281.

VERRIJP, C. D. und E. F. DRION: "Ueber die Frequenzverteilung des Wachstums in homogenem Material". I. (Communicated by Prof. L. G. M. BAAS BECKING), p. 286.

Hydrodynamique. — Cavitation et tension superficielle, I. Par F. K. TH. VAN ITERSON.

(Communicated at the meeting of January 25, 1936).

1. *Généralités et état actuel du problème de la cavitation.*

L'étude des pompes centrifuges des stations d'élévation d'eau du polder Wieringermeer, polder qui fait partie de l'endiguement du Zuiderzée, a conduit à de nombreuses séries d'essais sur modèles réduits, dans le but non seulement d'obtenir un rendement très élevé mais aussi pour éviter l'usure rapide des pompes par cavitation. Ces essais ont permis d'éliminer plusieurs types de roues, entre autres des roues à trois pales, dont le rendement fut excellent, mais qui accusaient un commencement de cavitation (détecté par un léger bruit), par suite de la hauteur d'aspiration imposée par le polder.

Avec les tracés de roues définitivement choisis, nous avons alors estimé être à l'abri des phénomènes de cavitation.

Or, combien grand fut le désappointement, lorsque, pour les deux stations de pompage, le „Lely” et le „Leemans”, une cavitation intense fut signalée, cavitation qui se manifestait non seulement pendant la période d'assèchement du lac endigué, mais encore, circonstance plus grave, quand les pompes fonctionnaient avec hauteur d'aspiration et de refoulement normales.

La figure 1 donne la disposition générale des pompes de la station „Lely”. La figure 2 est une photographie de la roue à quatre pales. La figure 3 montre l'un des effets de la cavitation; finissant par la rupture des roues de plusieurs pompes.

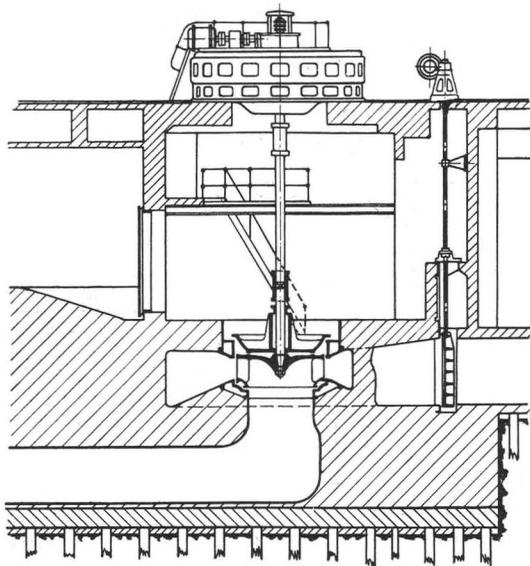


Fig. 1. Disposition générale des pompes dans la station élévatrice „Lely” à Medemblik.

On voit sur ces figures que les profils adoptés pour les aubes sont analogues à ceux des ailes d'avion, de profils bien étudiés.

Nous fûmes alors conduits à étudier les causes de la cavitation:

Suivant la conception généralement adoptée, la cavitation dans une machine hydraulique se produit aux endroits où la pression absolue du

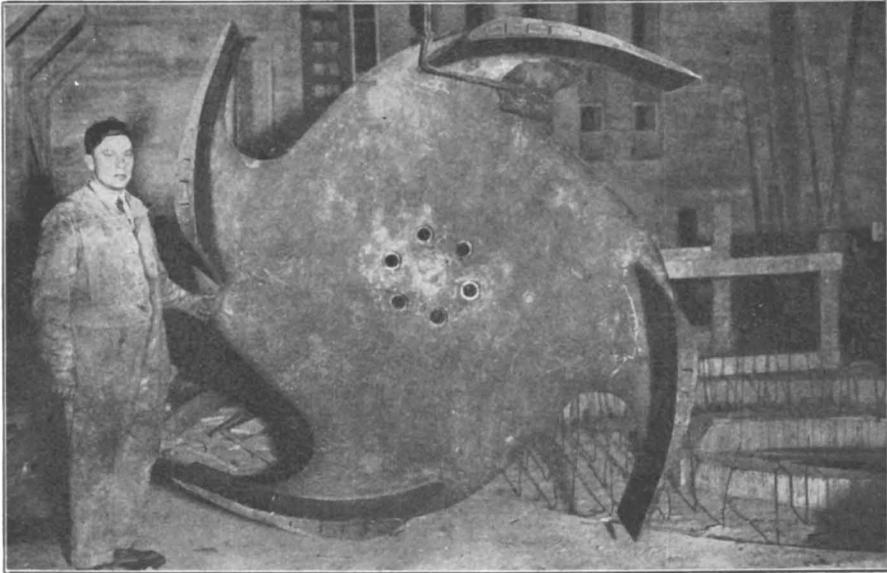


Fig. 2. Roue à quatre pales pour les pompes de la „Lely”.

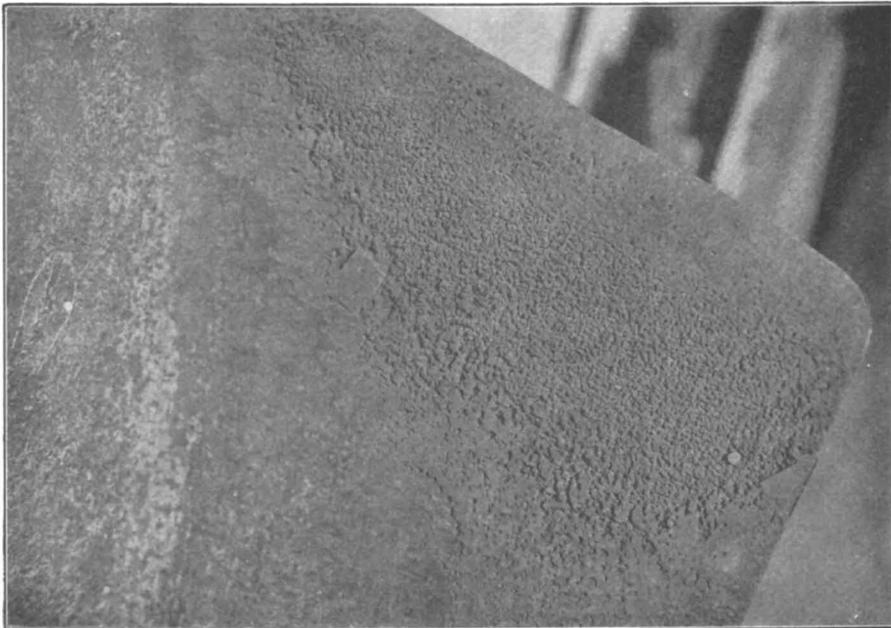


Fig. 3. Erosion par cavitation de la roue d'une pompe de la „Lely”.

liquide tombe au dessous de la tension de la vapeur d'eau, c'est à dire à 1/100 d'atmosphère pour la température moyenne en hiver.

Dans nos calculs quantitatifs, nous pouvons négliger cette faible valeur de la pression absolue, et dire que l'eau commence à bouillir quand sa pression s'approche du zéro absolu.

La condensation brusque des bulles de vapeur d'eau dans les zones où la pression absolue de la veine fluente redevient supérieure à sa tension, occasionnerait le bruit, les vibrations, la détérioration, la rupture des organes de nos machines, autant d'éléments qui constituent les indices de la cavitation.

2. Investigation théorique.

Afin de mieux pénétrer le fonctionnement de la pompe centrifuge la plus importante de la Hollande, pompe qui servirait comme objet d'étude pour les stations de pompage futures, la direction des Travaux du Zuiderzée avait chargé BURGERS et VAN DER HEGGE ZIJNEN de déterminer les caractéristiques de l'écoulement de l'eau à travers la roue de la pompe, par la méthode de la transformation conforme.

Le monde scientifique doit admirer la manière dont ces savants ont accompli cette tâche. Leur travail restera un chef-d'oeuvre de l'hydrodynamique.¹⁾

Nous reproduisons deux figures de leur ouvrage: La figure 4 donne

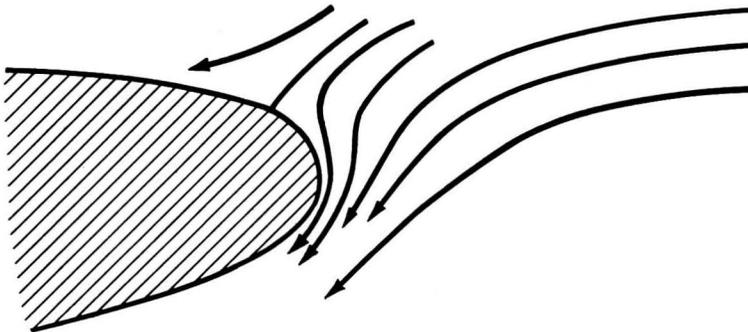


Fig. 4. Quelques lignes du courant relatif calculées par BURGERS et VAN DER HEGGE ZIJNEN près du bord d'attaque d'une pale de la roue d'une pompe centrifuge à Medemblik.

quelques lignes de courant (en mouvement relatif); la figure 5 indique la répartition théorique calculée des vitesses relatives et des pressions autour de l'un des profils de chaque pale.

Cette épure théorique montre que la dépression maximum est équivalente

¹⁾ Berekening van het verloop van de stroomsnelheid en van den druk langs een doorsnede van een schoep van een waaier met 5 schoepen van een der centrifugaal-pompen te Medemblik, par J. M. BURGERS et B. G. VAN DER HEGGE ZIJNEN, deux tomes 1933 (présent dans les bibliothèques techniques en Hollande).

à 9,34 mètres de colonne d'eau: il en résulte qu'à cet endroit du profil la pression absolue n'est plus qu'un dixième d'atmosphère.

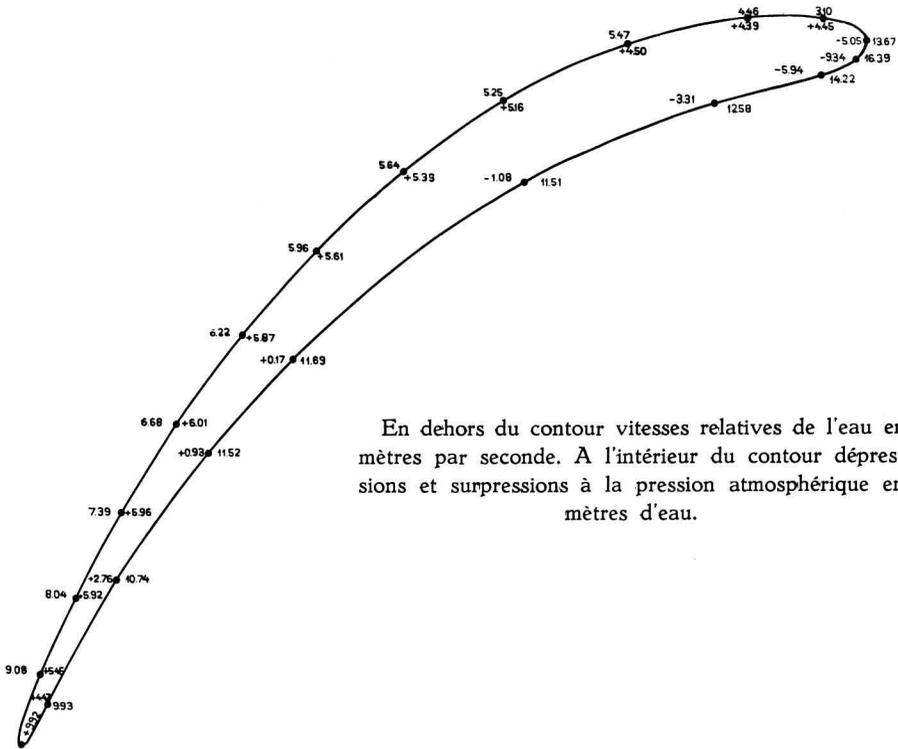


Fig. 5. Répartitions calculées d'après la méthode des transfigurations conformes, des vitesses et de la pression autour d'une pale de la roue d'une pompe centrifuge de la station de pompage „Lely” à Medemblik.

Or, la moindre modification de l'angle d'incidence, résultant par exemple d'une légère modification du niveau du bief amont ou du bief aval, un léger défaut dans l'exécution de la forme du profil, la rugosité de la surface de l'aube peuvent engendrer des vitesses locales supérieures à celles calculées.

Il est donc certain qu'une marge suffisante de sécurité, contre la cavitation par production de bulles de vapeur d'eau, n'existait pas dans cette pompe.

3. Les différents stades de la cavitation, et ses conséquences.

Nous pouvons scinder les phénomènes de cavitation en plusieurs catégories, dont quelques-unes peuvent se superposer:

1. *Cavitation superficielle*: De petites bulles, remplies d'air ou de vapeur, apparaissent sur la paroi.

Elles sont entraînées le long des surfaces métalliques et disparaissent comme absorbées par elles.

Cette cavitation améliore légèrement le rendement de nos machines hydrauliques et augmente le débit (*Schluckfähigkeit*); cette augmentation de débit a été constatée dans des tuyaux convergent-divergent.

Cette catégorie de cavitation érode les matériaux de construction à l'endroit où les bulles d'air disparaissent.

2. *Cavitation plus accentuée*: le sillage de vapeur d'eau constitué de mousse formée de petites bulles, se détache de la paroi et ondoie librement dans l'eau et, sauf quelques bulles d'air, est résorbé dans le courant en aval de l'endroit de formation. Cette cavitation affecte considérablement le rendement et modifie les caractéristiques de la machine.

3. *Cavitation avec décollement local en bloc de la veine*: la poche d'air et de vapeur d'eau oscille, mais elle est instable sur la surface, bien qu'elle accompagne chaque pale dans sa rotation. Les caractéristiques de l'écoulement sont alors fortement influencées.

4. Cavitation très accentuée avec bouillonnement intense sur les parois et entre celles-ci; les grosses bulles de vapeur sont entraînées et se condensent dans le liquide avec un bruit très symptomatique et des trépidations violentes qui peuvent devenir dangereuses.

Dans ce qui suit, nous ne nous occuperons que de la cavitation de la première catégorie.

Si l'augmentation du rendement de nos machines hydrauliques à grande vitesse spécifique fut liée au choix des profils des pales ou des aubes comparables à ceux des ailes d'avion, profils appropriés au but à atteindre et contrôlés par des essais de laboratoire, la rançon de ce gain fut la destruction des organes, interprétée comme une maladie contagieuse.

Des commissions d'ingénieurs et beaucoup de physiciens recherchent les moyens d'y remédier.

Dans tous les pays du monde on a installé à grands frais des laboratoires d'investigation pour l'étude des phénomènes de cavitation ¹⁾.

Il faut reconnaître que la gravité du problème justifie les dépenses et le travail assidu d'un nombreux personnel.

Combien trop souvent rencontre-t-on dans les grandes centrales hydrau-

¹⁾ Dans le laboratoire d'hydraulique fluviatile de Delft, on a effectué des essais de cavitation sur modèles réduits pour les pompes du Wieringerméer (en circuit fermé, capable d'être mis sous pression).

On trouve la description de treize installations pour essais de cavitation sur turbines hydrauliques dans l'ouvrage très complet sur cette matière:

A. TENOT, Turbines hydrauliques, Livre II 1932, Librairie de l'E.T., Paris.

M. TENOT nous a montré son intéressant laboratoire pour essais de cavitation à l'École d'Arts et Métiers de Châlons sur Marne; au moyen d'un stroborama avec lampes à néon, on peut regarder commodément ce qui se produit sous les pales d'une roue-hélice tournant à des vitesses de l'ordre de 3000 tours par minute et l'on peut suivre ainsi les différentes phases de la cavitation.

En outre dans beaucoup d'instituts on exécute des essais de cavitation sur des hélices de bateaux. Le laboratoire le plus réputé est celui de la „Kavitations-Anlage der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt G. m. b. H.“

liques, des machines hors service, ainsi qu'un grand nombre d'ouvriers spécialistes occupés à réparer par apport de métal les érosions occasionnées par la cavitation.

Encore pire sont les difficultés qu'éprouvent les compagnies maritimes et les marines de guerre, par suite de la cavitation des hélices. Les trépidations des bateaux sont souvent dûes à ce fléau.

Le paquebot „Normandie” souffre d'une façon si aiguë des effets de la cavitation, que l'on doit recharger de métal les hélices érodées après deux ou trois voyages, ce qui entrave l'utilisation économique de ce navire.

Celui-ci ne constitue pas une exception; l'usure rapide des hélices est de règle, pour les paquebots détenteurs du ruban bleu. Pour les croiseurs et contre-torpilleurs, on cite maints exemples où les hélices ont été détruites en quelques heures.

Dans l'état actuel de l'art des constructions navales ce sont les difficultés éprouvées par la cavitation des propulseurs qui ont rendu impossible d'augmenter davantage la force installée dans les navires.

4. *Contribution expérimentale personnelle de l'étude de la cavitation; influence de la nature de l'eau sur les dégagements d'air dissous dans le liquide.*

Dans tous les pays, physiciens et ingénieurs cherchent toujours à mieux pénétrer ce phénomène hydrodynamique pour donner une explication satisfaisante de l'érosion qu'il provoque.

Nous présentons nous-même ici une petite contribution à l'explication de l'effet de cavitation de la première catégorie.

Mr. M. G. DRIESSEN, chef du service des recherches mécaniques des Mines de l'Etat, a exécuté quelques essais qui nous ont servi à mieux comprendre les phénomènes.

A la station de pompage du Haarlemmermeer, le Leeghwater, nous avons éprouvé de grosses difficultés par cavitation, difficultés qui s'accroissaient à l'automne.

Parmi les raisons qui pouvaient être la cause du désaccord entre nos résultats d'essais sur modèles réduits et les pompes industrielles en service à Wieringermeer, nous avons pensé à la différence de nature des eaux.

A Delft nous avons fait nos essais avec de l'eau pure provenant de la distribution de la ville.

Par contre l'eau du Wieringermeer était trouble, vaseuse, souillée par des travaux de dragage effectués dans les canaux. La première question était donc de savoir si les impuretés de l'eau pouvaient jouer un rôle essentiel dans la production des cavitations.

La figure 6 représente un des tuyaux convergent-divergent en verre avec lesquels les essais furent exécutés.

Les résultats sont surprenants. Les voici représentés sur figure 7.

La cavitation dans l'eau pure, saturée d'air à la pression atmosphérique,

commençait à une dépression équivalente à cinq mètres de colonne d'eau, c'est à dire à la pression absolue de 0,5 atmosphère (vide de 50 %).

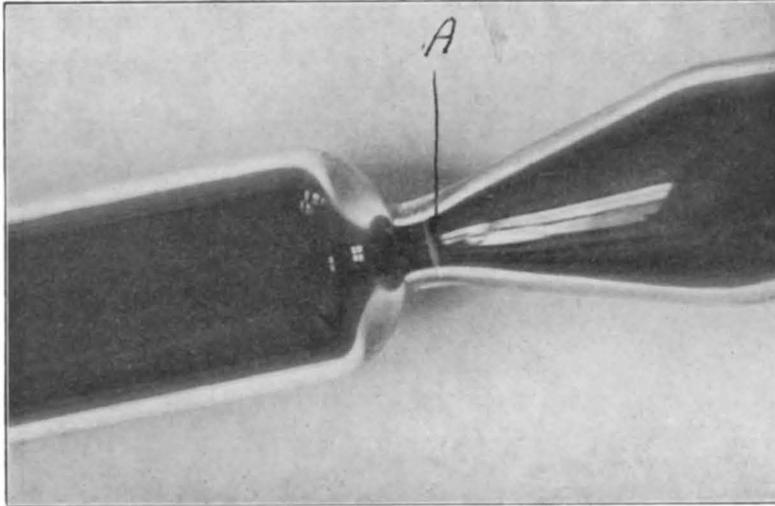


Fig. 6. Tuyaux convergent-divergent pour essais de cavitation. A. endroits rendus mats par la cavitation. Le trait blanc est dû à l'effet érosif d'eau pure.

Par contre avec de l'eau à laquelle on avait ajouté 0,5 gramme de poudre de charbon par litre, la cavitation commençait à une dépression équivalente à un mètre de colonne d'eau, c'est à dire à la pression absolue de 0,9 atmosphère (vide de 10 %).

La tension de la vapeur d'eau aux différentes températures est également indiquée sur la figure 7. On voit qu'elle est bien inférieure aux pressions absolues précitées.

Ce n'est donc pas l'ébullition de l'eau qui produit la cavitation de la première catégorie, mais comme le remarqua DIJXHOORN, en prenant connaissance de nos essais, c'est le dégagement de l'air dissout dans l'eau, quand on diminue la pression absolue, qui est la genèse de ce phénomène.

Aux températures d'hiver, quand la cavitation est souvent la plus intense, on peut négliger la tension de la vapeur d'eau dans les bulles et ne considérer que les dégagements d'air.

Le commencement et la disparition de la cavitation sont décelés respectivement par une augmentation et une diminution subite du débit, et mieux encore par un bruit caractéristique de la cavitation de la première catégorie; ce bruit symptomatique nous rappelle le gazouillement de l'eau chauffée jusqu'à la libération de l'air.

5. *Essai d'explication de l'érosion des parois par cavitation: influence de l'énergie capillaire (de tension superficielle).*

Nous croyons que l'érosion due à la cavitation est due à une force généralement négligée en hydrodynamique par suite de sa faible grandeur,

de 73 dynes: cm soit 0,075 grammes par cm: la tension superficielle des surfaces des bulles d'air.

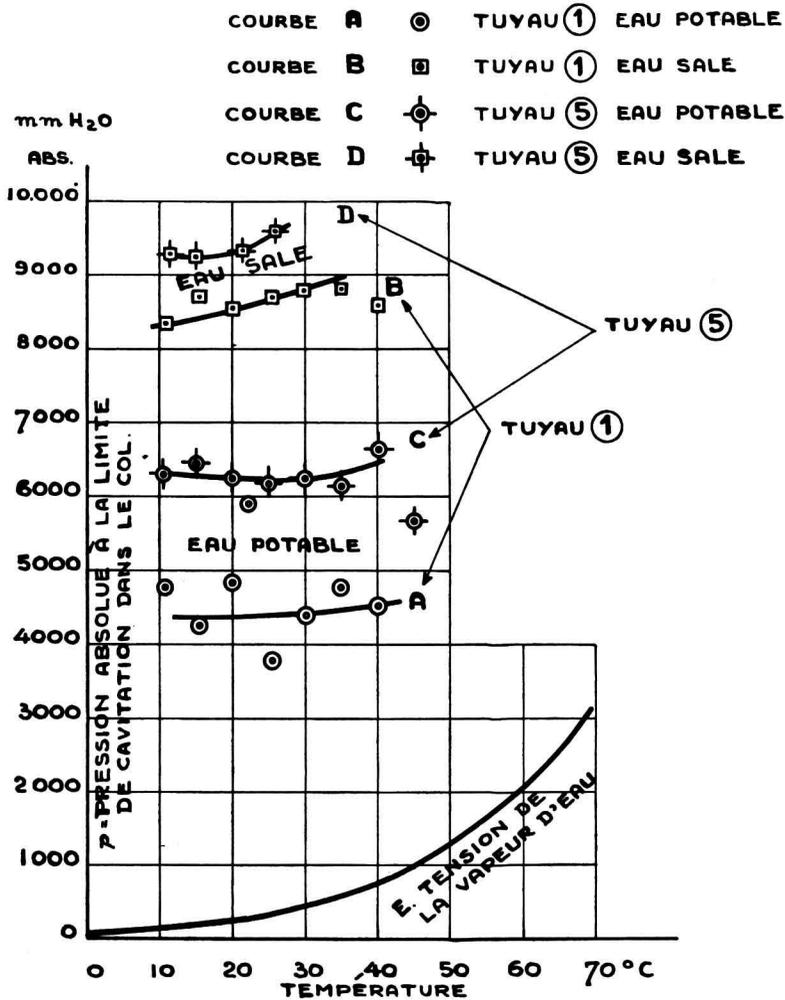


Fig. 7. Pression absolue à la limite de cavitation pour de l'eau pure et de l'eau sale en fonction de la température.

Les pressions dans l'eau pure, saturée d'air à la pression atmosphérique, ainsi que dans l'une des bulles, sont représentées sur la figure 8.

Si l'air dans la bulle n'était pas à la pression atmosphérique, il serait ou bien vite absorbé par l'eau, ou de l'air se dégagerait de l'eau jusqu'à établir cette pression. Par effet de la loi DE HENRI la pression de l'air contenu dans une bulle a la tendance de se mettre en équilibre avec la pression de saturation. En tout cas, même si on admet de grandes poches ou bulles de vapeur, à l'instant précis de leur disparition, elles contiennent nécessairement des restes d'air à la pression d'eau d'au moins une atmosphère.

Quand il y a équilibre entre la pression intérieure dans la bulle, la

pression extérieure dans le liquide et la tension superficielle on a: ¹⁾

$$\Delta p = \frac{2\gamma}{r}.$$

Nous désignons par γ la tension superficielle en gr/cm,
par Δp , la surpression de l'air dans la bulle par rapport à la pression
dans le liquide,

et par r , le rayon.

Pour $r = 0$ $p = \infty$.

La naissance des bulles implique donc une pression infinie.

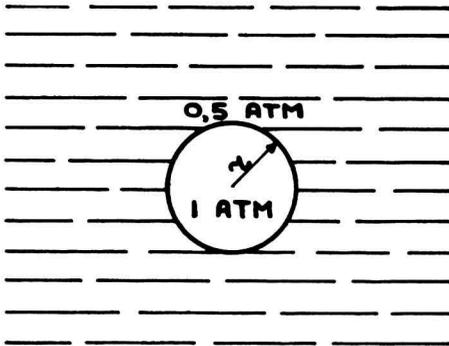


Fig. 8. La pression de l'air dans une bulle flottant dans l'eau saturée d'air à pression atmosphérique tient équilibre à la pression de l'eau et la tension superficielle.

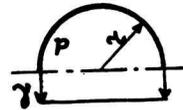


Fig. 9. Equilibre de la surface tendue avec la pression intérieure.

Cependant ce résultat mathématique n'est pas physiquement exact. Pour les bulles avec un rayon inférieur à 10^{-6} cm la tension superficielle γ ne peut plus être considérée comme constante. Ce coefficient commence à diminuer, d'abord lentement puis rapidement pour devenir zéro quand le rayon r devient zéro.

Les conclusions ne sont pas influencées par l'abaissement de la valeur de γ pour les bulles très petites.

L'eau pure ne peut ni bouillir, ni „caviter”; l'air en dissolution ne peut pas y être mis en liberté par abaissement de la pression par rapport à celle à laquelle il a été dissout.

MEYER a démontré qu'avec de l'eau pure contenant de l'air en dissolution dans un vase propre on peut avoir des pressions négatives de plus de 100 atmosphères ²⁾.

¹⁾ L'équation d'équilibre d'une demi-sphère nous donne:

$$2 F r \gamma = F r^2 \Delta p$$

soit

$$\Delta p = \frac{2\gamma}{r} \text{ et } r = \frac{2\gamma}{\Delta p}.$$

²⁾ MÜLLER-POUILLETs Lehrbuch der Physik 11 Aufl., dritter Band, erste Hälfte Thermodynamik 1926 S. 301, labile Zustände (negative Drucke).

La cavitation de l'eau (ébullition) peut être retardée par l'absence d'impuretés, même si on la surchauffe.

En vertu d'une loi dûe à KIRCHHOFF ¹⁾, la dépression dans le liquide est maximum le long des parois qui guident son écoulement.

D'après cette loi, les bulles d'air prennent donc naissance sur les parois, ou bien sur les surfaces des particules solides entraînées par le liquide. Mais ces surfaces agissent sur le dégagement de l'air exactement comme les catalyseurs qui amorcent les réactions chimiques. Il est même facile de vérifier par l'expérience que les surfaces nettes de toute impureté ne sont pas capables de mettre en liberté l'air ou des gaz dissous en excès dans l'eau; il faut disposer de surfaces souillées d'un quatrième facteur déterminant, appelé collecteur dans la technique du traitement des minerais par flottaison (en anglais *collecting agents* ou *collectors*); en général ce 4ème facteur déterminant de la cavitation peut être un produit constitué de 16 atomes de carbone, ou plus.

Il nous paraît vraisemblable que les bulles d'air prennent naissance sur les lignes où les trois autres facteurs déterminants, paroi solide, collecteur et liquide, se rencontrent.

Un essai instructif consiste à faire bouillir de l'eau distillée dans un vase, dont on a graissé un peu le fond, puis ensuite dans un autre vase très propre où l'on a ajouté un peu de soude caustique pour dissoudre les traces de graisse qui se trouvent dans l'air et dans l'eau. Dans le premier vase, l'eau bout régulièrement à 100°C, alors que dans l'autre l'eau peut être surchauffée et ne bout qu'avec des explosions singulières.

Les bulles d'air naissent dans la couche limite et pour chacune des valeurs de la dépression, elles ne peuvent exister au-dessous d'un certain diamètre.

De quel diamètre sont les bulles nouveau-nées?

Nous avons:

$$r = \frac{2\gamma}{\Delta p} \text{ soit } \frac{2\gamma}{p_i - p_e}, \quad \begin{array}{l} p_i = \text{pression intérieure,} \\ p_e = \text{pression extérieure.} \end{array}$$

Dans notre cas d'expérience l'eau pure commençait à „caviter” pour

$$p_i - p_e = 0,5 \text{ atm.} = 500 \text{ gr. cm}^2 \quad r = \frac{2 \times 0,075}{500} = 0,0003 \text{ cm.}$$

Des bulles d'un diamètre inférieur à 6 microns ne peuvent donc pas exister pour de l'eau pure. Ces bulles grossissent rapidement quand la dépression augmente, toujours en se remplissant d'air, mais dans la cavitation de la première catégorie elles restent petites. D'après les lois de la physique, les plus grandes bulles doivent s'agrandir au dépens des petites;

¹⁾ G. KIRCHHOFF, Vorlesungen über Mechanik 1876, S. 186.

J. ACKERET, Experimentale und theoretische Untersuchungen über Hohlraum-bildung (Kavitation) im Wasser 1930, S. 8.

quand les bulles se rapprochent et entrent en contact, elles doivent se combiner.

Mais quand l'eau est impure, contaminée de quelques particules d'huile ou de matières organiques, elle a tendance à former une mousse et de nombreuses petites bulles subsistent.

L'expérience montre que beaucoup de bulles restent petites et isolées, particulièrement si ces bulles se trouvent dans la couche limite.

L'eau humecte le métal, entre dans ses pores, forme une combinaison quasi-chimique (affinité eau-métal); la vitesse de l'eau en contact direct avec le métal est nulle.

Les bulles d'une fraction de millimètre sont entraînées lentement dans la couche laminaire, mais les plus grandes, celles qui empiètent dans la couche turbulante, sont, ou entraînées, ou cisailées.

(*Fin dans le prochain numéro*).

Physics. — *Relaxation phenomena in the transition from the supraconductive to the non-supraconductive state.* By W. H. KEESOM and P. H. VAN LAER. (Abstract of Communication N^o. 240c from the KAMERLINGH ONNES Laboratory at Leiden).

(Communicated at the meeting of January 25, 1936).

In measurements on behalf of a closer investigation of the thermal properties of tin in connection with the transition from the supraconductive to the non-supraconductive state, we observed that the transition from one state to the other in crossing the threshold value curve by heating, a constant magnetic field being applied, takes place with a relaxation of several seconds (10—40, ordinarily about 30). This relaxation appeared not to depend on the rapidity of the introduction of heat.

If on the contrary the transition from the supraconductive to the non-supraconductive state was realized by increasing by degrees the external magnetic field, no such relaxation was observed. It seems, therefore, as if a certain time measurable in seconds is needed for the increased thermal vibrations of the atomic lattice to be transmitted to the system of the supraconductive electrons so as to cause the system to pass to the state of non-supraconductivity. On the other hand the increased magnetic field directly attacks the system of the supraconductive electrons in such a way that the transition to the non-supraconductive state follows immediately.

These experimental facts are in harmony with the views that, the threshold value being reached, there is a weak coupling between the atomic lattice and the system of supraconductive electrons, that between the external magnetic field and the system of supraconductive electrons there is a strong coupling, as is the case between the non-supraconductive electrons and the atomic lattice.