

Bertrand Joly
Quentin Houéry
Pierre Chauvet
Yoann Le Fur

ESTIA 2008

Mécanique des fluides :
LES FOILS

SOMMAIRE

- 1) Fonctionnement des foils
 - a. Principe
 - b. Fonctionnement
 - c. Forces mises en jeu
 - d. Coefficients aérodynamiques
 - e. La portance
 - f. Calcul de la portance
 - g. La traînée

- 2) Limites d'utilisation des foils
 - a. la cavitation
 - b. la ventilation

1) fonctionnement des foils

a) principe

Pour augmenter la vitesse d'un bateau (à voile ou à moteur) sans en augmenter de manière démesurée la puissance motrice, il faut faire face aux problèmes de traînée sur la coque, aux frottements de l'eau et à la résistance des vagues à l'avancement. Pour passer outre ces difficultés, il existe trois solutions : réduire la surface de contact avec l'eau et lui donner une forme aérodynamique (c'est le cas des bateaux multicoques), réduire la partie immergée (comme c'est le cas sur les aéroglisseurs) ou enfin déjauger, c'est-à-dire sortir la coque du bateau hors de l'eau et l'y maintenir. Cette dernière solution peut être envisagée grâce à des surfaces portantes comparables à des ailes. Ce sont les foils qui, au delà d'une certaine vitesse, vont fournir une force verticale capable de contrer l'effet de la force de pesanteur. Ce système présente de plus l'avantage de réunir de très bonnes performances à la fois du point de vue de l'efficacité (avec une diminution très importante de la traînée totale par rapport à une embarcation classique) et, en navigation, de la stabilité et de la pilotabilité (ce qui permet aux véhicules qui en sont équipés de tenir de nombreux records de vitesse). Toutefois, l'existence d'une vitesse minimale pour permettre le déjaugage impliquera aussi la nécessité d'élaborer une coque présentant de faibles frottements.

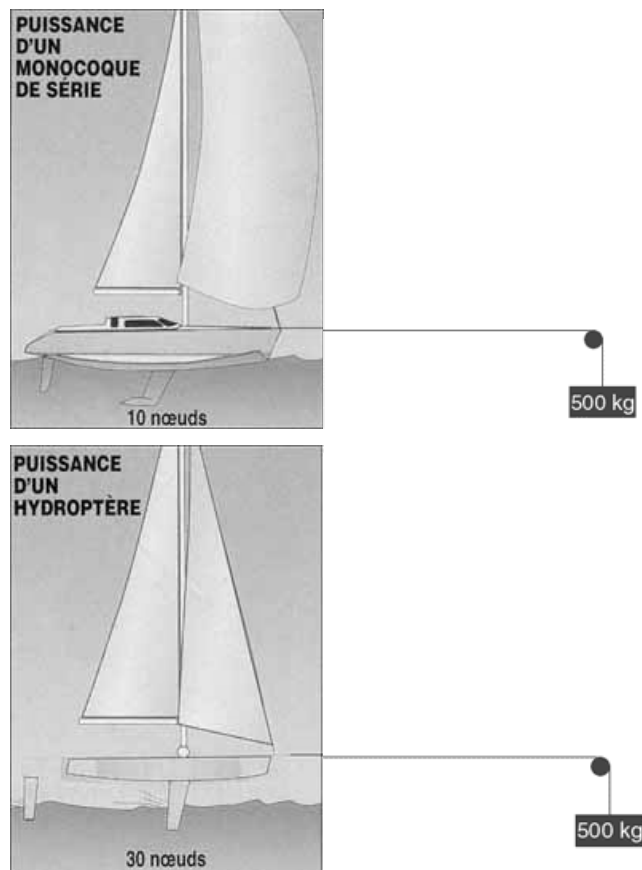


Schéma 1 :

On voit que pour une même puissance le bateau équipé de foils (hydroptère) se déplace plus rapidement qu'un bateau classique.

b) Fonctionnement

Les foils sont bombés et légèrement inclinés par rapport à la direction d'écoulement de l'eau. Deux chemins sont possibles pour les filets d'eau :

- soit ils passent au dessus sur la surface extérieure : l'extrados
- soit ils passent au dessous sur la surface inférieure : l'intrados

Dessus le chemin est plus long, la vitesse est donc plus élevée et il se crée une dépression. De même au dessous, il se crée une surpression.

On peut mettre en évidence ce phénomène à l'aide du théorème de Bernoulli qui dit que la charge de l'écoulement est constante sur une ligne de courant.

Ce théorème est applicable dans le cas d'un fluide parfait, incompressible, en régime permanent, et si les efforts répartis dérivent d'un potentiel. On peut considérer l'eau de mer comme un fluide parfait et incompressible, et si le bateau avance à vitesse constante dans une eau homogène, on peut faire l'hypothèse du régime permanent. D'où :

$$P^* + \frac{1}{2}\rho V^2 = cste$$

$$\text{Ou encore } P + \rho gz + \frac{1}{2}\rho V^2 = cste \quad , \text{ avec } P^* = P + \rho gz$$

$$\text{Donc } C = z + \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} = cste$$

On obtient donc :

$$\frac{V_e^2}{2} + \frac{P_e}{\rho} = \frac{V_i^2}{2} + \frac{P_i}{\rho}$$

Où V_e et P_e sont respectivement la vitesse et la pression sur l'extrados.

Et V_i et P_i la vitesse et la pression sur l'intrados.

$$\text{Or } V_e > V_i \text{ donc } P_e < P_i$$

Il en résulte une force : la portance, qui maintient le bateau hors de l'eau.

La traînée est due à la viscosité du fluide, ici, de l'eau qui fait naître des forces de frottements. La somme de celle ci et de la portance donne une résultante hydrodynamique.

c) Forces mises en jeu

Les forces exercées par le fluide sur le foil peuvent être décomposées en deux catégories qui se distinguent par la nature du phénomène physique qui les provoque :

- la première catégorie comprend les forces de pression qui sont dues au mouvement même du foil par rapport au fluide. Ces forces, perpendiculaires au profil en tout point, peuvent être modélisées par une résultante unique, perpendiculaire à la direction principale de l'écoulement et dirigée vers le haut : la portance.
- la seconde catégorie comprend les forces de viscosité qui sont dues à la nature visqueuse du fluide. Ces forces, tangentes au profil en tout point, peuvent être modélisées par une résultante unique, parallèle à la direction principale de l'écoulement et de sens contraire au mouvement du foil : la traînée.

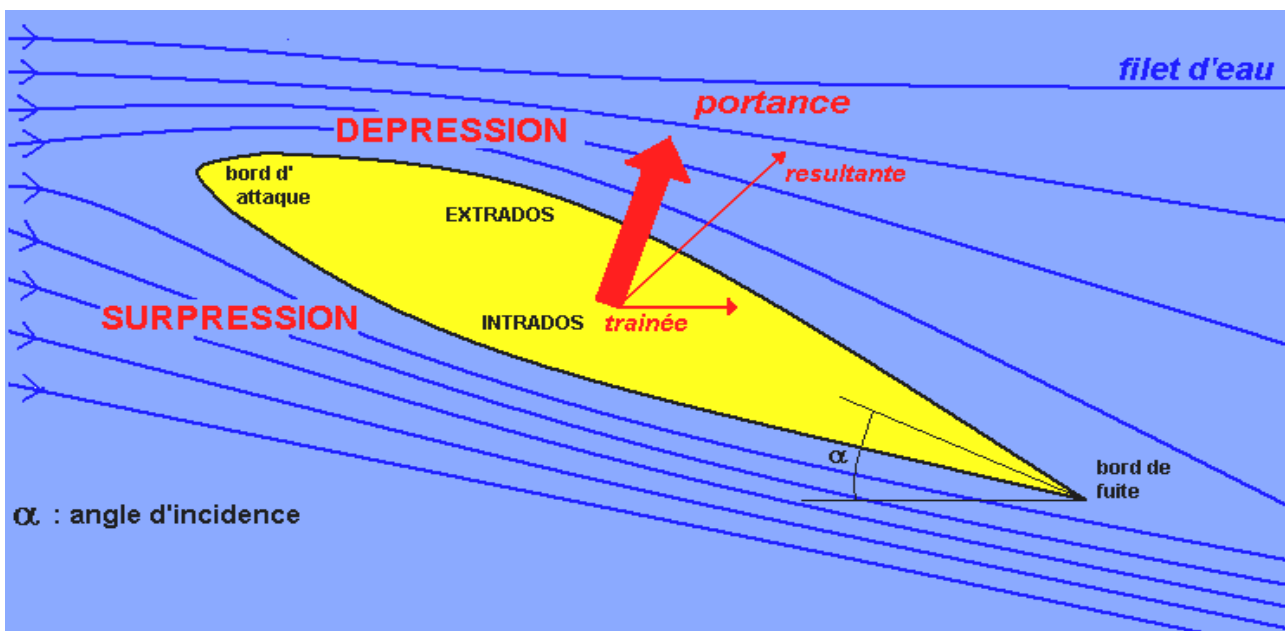


Schéma 2 : modélisation des forces de portance et de traînée en fonction des lignes de courant.

d) Coefficients aérodynamiques

Afin de comparer les aptitudes des différents foils, on a déterminé des coefficients adimensionnels appelés coefficients aérodynamiques :

- C_x , coefficient de traînée : intensité de la traînée sur une aile de même profil que l'aile considérée, de surface 1 m^2 et placée dans une veine d'air de pression dynamique $1 \text{ kg} / \text{m}^2$.

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho S V_\infty^2}$$

- Cz, coefficient de portance : intensité de la portance sur une aile de même profil que l'aile considérée, de surface 1 m² et placée dans une veine d'air de pression dynamique 1 kg / m².

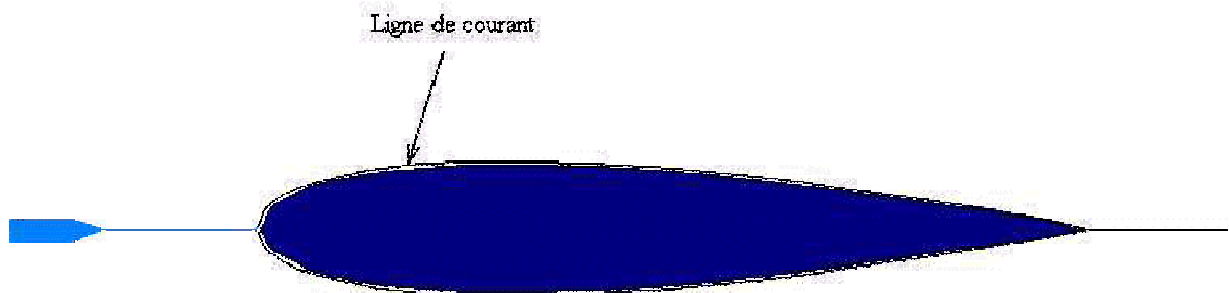
$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho S V_\infty^2}$$

e) La portance

La portance est la force qui permet à l'hydrofoil de sortir de l'eau. On cherche donc à la rendre maximale.

Le fluide s'écoule de part et d'autre du foil en suivant les lignes de courant qui se séparent au bord d'attaque et se rejoignent au bord de fuite. Considérons deux particules infiniment voisines. Elles sont situées respectivement sur la ligne de courant qui passe par le bord d'attaque et suit l'extrados, et sur la ligne de courant qui passe par le bord d'attaque et suit l'intrados. D'après le principe des temps de transition égaux, les deux particules se rejoignent au bord de fuite. Examinons différentes configurations :

- Le profil symétrique est placé parallèlement à la vitesse de l'écoulement



Les deux particules se déplacent à la même vitesse. La portance de l'aile est nulle.

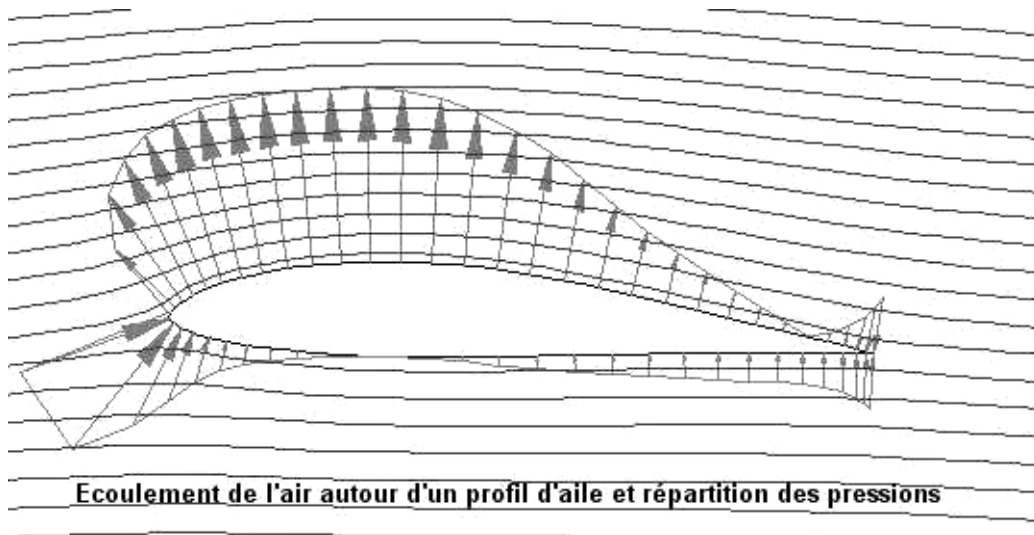
- Le profil symétrique est placé avec une incidence faible par rapport à la vitesse de l'écoulement

La particule qui se déplace sur l'extrados a plus de chemin à parcourir. En conséquence, elle doit accélérer et atteindre une vitesse supérieure à celle de l'autre particule.

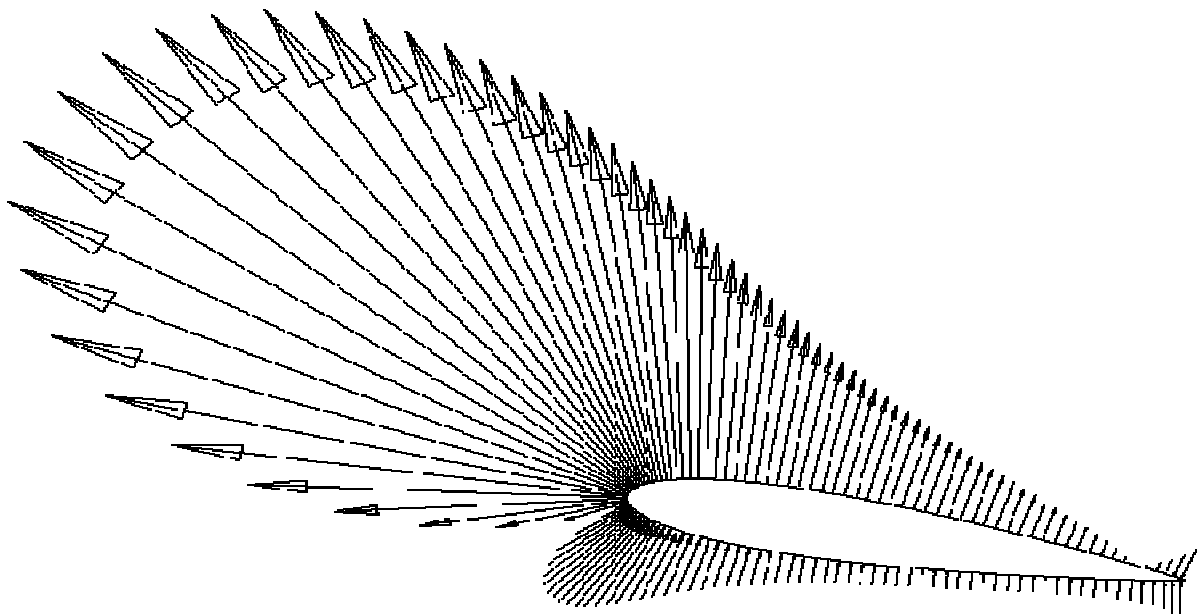
Théorème de Bernoulli :

$$\frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} = cste$$

En application du théorème de Bernoulli, la survitesse sur l'extrados entraîne une dépression. De plus, la particule se déplaçant sur l'intrados ralentit sa course donc on a sous vitesse et surpression sur l'intrados. Cependant, il est à noter que la dépression de l'extrados est toujours plus importante que la surpression de l'intrados comme l'illustre la figure :



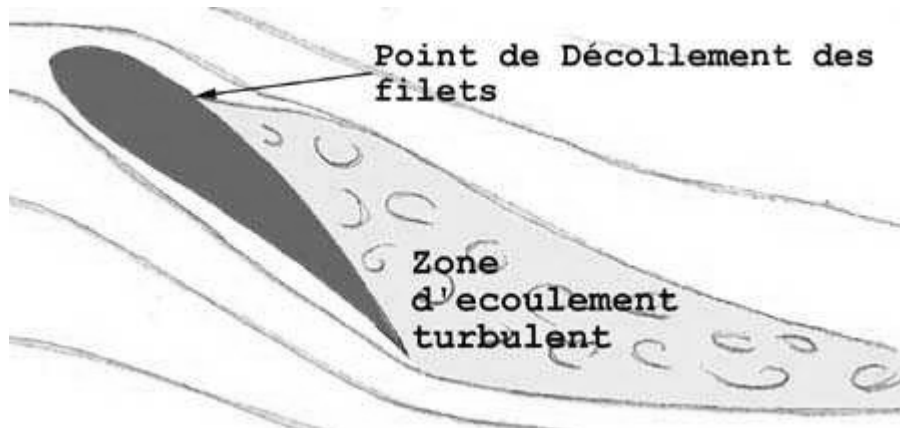
Dans le cas d'un profil asymétrique, il est inutile d'incliner le profil pour créer la portance.



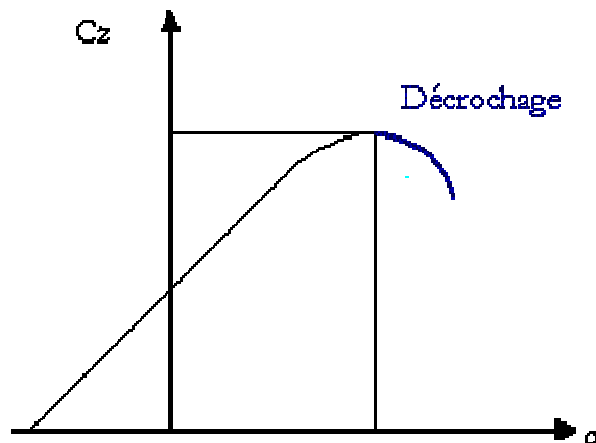
Répartition des pressions obtenue pour une incidence de 11°

- Le profil symétrique est placé avec une incidence forte par rapport à la vitesse de l'écoulement

Dans le cas d'une incidence trop importante, la ligne de courant qui se trouve sur l'extrados ne peut pas "coller" au profil sur toute sa longueur : on dit qu'il y a décollement. En conséquence, il se crée une zone de recirculation due à la viscosité du fluide. Dans cette zone, l'écoulement devient turbulent, il y a formation de tourbillons. C'est ce qu'on appelle le décrochage.



Le coefficient de portance augmente avec l'angle d'incidence jusqu'à une valeur où il chute brusquement à cause du phénomène de décrochage.



f) Calcul de la force de portance

Pour dimensionner les foils d'un navire, il faut déterminer la poussée verticale (soit la portance) qu'exerce le fluide sur le foil, et qui permet de faire déjauger le navire.

On a vu par le théorème de Bernoulli que cette force provient d'une différence de pression entre

l'intrados et l'extrados, tel que :

$$P_e - P_i = \frac{V_i^2 - V_e^2}{2\rho}$$

Si l'on applique la loi de conservation de la quantité de mouvement, on peut déterminer la force qu'exerce le foil.

La loi de conservation de la quantité de mouvement donne :

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = -\Delta(\langle \rho V_n \vec{V} \rangle S + \langle P \rangle \vec{S}) + \vec{F}_{ext} + M\vec{g}$$

Donc

$$F_{ext} = \frac{\rho S}{2} (V_e^2 - V_i^2)$$

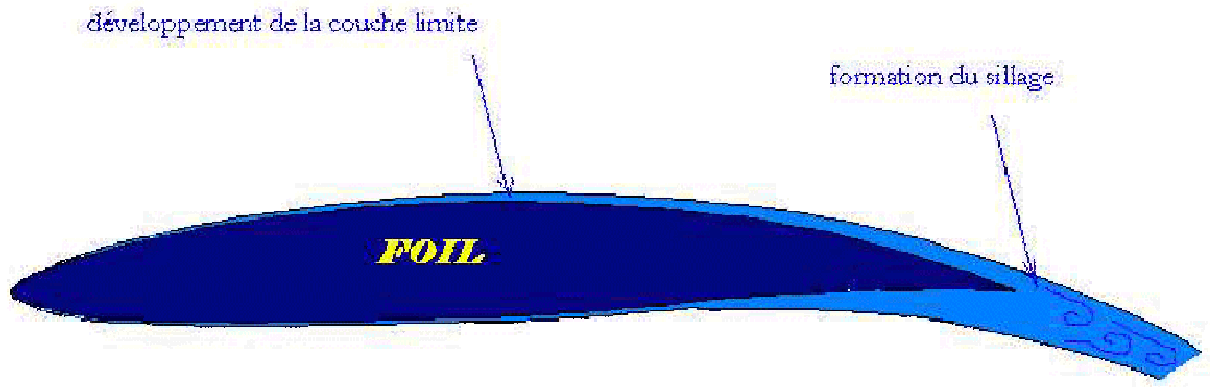
Pour que le navire déjauge à partir d'une vitesse donnée, il faut que $F_{ext}(V)$ soit supérieure à Mg (ou F_{ext} est la force de portance du foil en fonction de la vitesse du bateau, et M la masse du bateau (ou la masse du bateau divisée par le nombre de foils)).

g) La traînée

La traînée est la force qui s'oppose au mouvement du foils. On cherche donc à la rendre minimale.

La traînée se décompose en deux parties : traînée de profil et traînée induite.

- Traînée de profil : elle est due à la viscosité du fluide qui fait naître des forces de frottement. En effet, dans une zone très proche de la paroi, l'écoulement est ralenti par le frottement du fluide sur la paroi. Cette zone, proche de la paroi, où la viscosité est prépondérante est appelée couche limite.
- Traînée induite : elle est due au fait que l'allongement de l'aile n'est pas infini. En conséquence, au bord de fuite, le fluide venant de l'extrados et celui venant de l'intrados n'ont ni la même vitesse, ni la même pression. La conséquence de l'homogénéisation de ces grandeurs en aval de l'aile est la naissance de tourbillons contravariants; l'ensemble de ces tourbillons dissipateurs d'énergie est appelé le sillage.



2) LIMITES D'UTILISATION DES FOILS

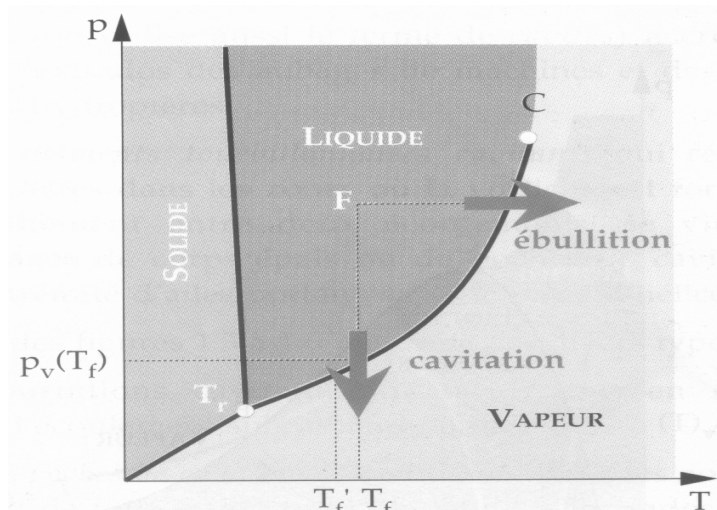
a) La cavitation

Phénomène fréquent et souvent fort méconnu, la cavitation se produit au niveau des milieux liquides soumis à de brutales variations de pression. Mise en évidence par Osborne REYNOLDS en 1894, la cavitation se manifeste par l'apparition de petites bulles ou d'énormes cavités, qui se forment puis implosent en quelques millisecondes. Elle est à l'origine de nuisances graves telles que l'érosion des matériaux, le bruit et les chutes de performances dans les installations hydrauliques ou marines.

- Définition :

La cavitation est un phénomène de discontinuité apparaissant au sein d'un fluide en raison d'une baisse complète de la pression, sans changement important de la température.

La compréhension de ce phénomène passe par l'étude du diagramme P-T suivant :

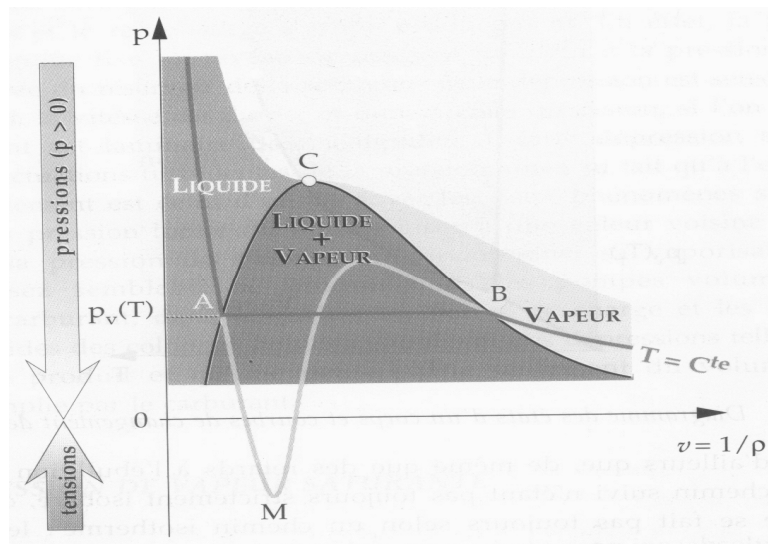


La cavitation prend des formes très différentes selon la configuration d'écoulement où elle se produit, les propriétés physiques du liquide lui-même, les contraintes qui lui sont appliquées.

▪ Les conditions d'apparition :

La cavitation survient lors d'une importante baisse de pression qui "mathématiquement" aurait tendance à descendre en dessous de la pression du vide. En supposant l'équilibre thermodynamique obtenu, il faut considérer l'importance de la pression de vapeur saturante du liquide à la température de l'écoulement (proche de zéro). Cette grandeur peut servir de premier seuil de référence dans l'apparition de la cavitation.

Ci-dessous le diagramme P-V :



Deux phénomènes permettent d'effectuer l'évaporation du liquide:

- ou bien on élève la température à P constante jusqu'à la température d'ébullition

- ou bien on abaisse la pression jusqu'à atteindre la courbe de vaporisation pour la valeur $P_v(T_f)$ de la pression. C'est ce chemin qui est à la source du phénomène de cavitation. Le critère simplifié d'apparition de la cavitation s'écrit :

$P_c \# P_v(T_f)$ avec T_f : température de l'écoulement

Cependant cela ne suffit pas toujours à faire apparaître la cavitation en raison de retard statique (différence entre la pression de vapeur saturante et la pression réelle d'apparition de la cavitation) et de retard dynamique dû aux phénomènes de d'inertie qui accompagnent la mise en place des cavités de vapeur. Généralement $P_c < P_v(T_f)$. On introduit aussi afin de caractériser la plus

ou moins grande facilité avec laquelle la cavitation apparaît dans une installation un paramètre adimensionnel appelé "indice de cavitation". Cet indice est défini par le rapport : P_0 : pression à l'infini V_0 : vitesse à l'infini P_{cav} : pression dans la cavité = P_v .

Le numérateur représente sensiblement la surpression par rapport à la pression critique de cavitation et le dénominateur permet de calculer la survitesse tolérable pour atteindre cette surpression critique. Dans une installation donnée, la cavitation se produira toujours pour la même valeur de l'indice. Plus celui-ci sera faible et plus les risques de cavitation seront grands.

- Situations typiques d'apparition et de développement de la cavitation

La géométrie des parois peut entraîner des survitesses locales et donc des dépressions.

Les rugosités des parois peut donner lieu à des sillages cavitants de très petite taille.

Le cisaillement entre 2 écoulements de vitesses différentes entraîne de grandes fluctuations turbulentes de pression.

Les mouvements vibratoires des parois qui provoquent des champs de pression alternatifs.

Les parois solides immergées soumises à la vaporisation des particules situées dans leur voisinage.

b) La ventilation

La ventilation est un phénomène mal connu qui apparaît souvent sur les hydrofoils. Il se traduit par une chute brutale de la portance lorsque le foil s'approche trop de la surface: dans cette situation, de l'air est aspiré le long des attaches verticales ce qui diminue la portance. La ventilation peut aussi apparaître sur les surfaces horizontales. Les foils en V y sont très sensibles car ils présentent un faible angle avec l'eau. Ce phénomène est très difficile à étudier théoriquement en raison de l'importance de l'interface eau/air. La solution est donc apparue expérimentalement: pour empêcher la ventilation, il suffit de bloquer le passage de l'air le long des attaches. Pour réaliser cela, on rajoute des « fences » ou barrières sur les parties verticales des foils (voir figure). Cette méthode donne de très bons résultats et permet de faire disparaître complètement la ventilation.

