

## CAVITATION - HAUTEUR DE CHARGE NETTE A L'ASPIRATION D'UNE POMPE CENTRIFUGE (NPSH)

La **Cavitation** est la vaporisation d'un fluide soumis à une pression inférieure à sa pression de vapeur. Pour une pompe centrifuge ce phénomène apparaît dans les zones de faible pression au bord d'attaque des aubes de la roue ; ses effets sont destructeurs par nature et multiples suivant le stade de développement : Bruit, vibrations, destruction de matière par érosion et chutes des performances allant jusqu'au décrochage total de la hauteur d'élévation de la pompe.

La hauteur de charge nette à l'aspiration couramment **Net Positive Suction Head** ou **NPSH** est un paramètre important de dimensionnement des groupes électropompes qui influe directement sur le coût d'une installation de pompage par le biais de la charge requise à l'entrée de la pompe pour assurer son bon fonctionnement vis-à-vis de la **cavitation**.

La question est de savoir quelle est la marge de sécurité à prendre entre le **NPSH requis** par le Constructeur de la pompe et le **NPSH disponible** à l'installation, un domaine où les règles du jeu ne sont pas clairement définies et souvent mal appréhendées. Penser que l'on dispose de suffisamment de charge à l'aspiration d'une pompe parce que l'on excède la valeur de NPSH requis indiqué sur les courbes de performances de la pompe n'est pas une garantie pour que le fonctionnement et les performances de cette pompes soient véritablement acceptables.

De nombreux facteurs affectent la valeur d'un NPSH donné ou calculé dans des conditions précises, comme la température et la nature de l'effluent, sa teneur en gaz dissous et bulles d'air, les variations possibles du plan d'eau dans la bêche de pompage, le niveau effectif de perte de charge dans la tuyauterie d'aspiration, la qualité de l'écoulement à l'entrée de la roue, la maîtrise de la plage de fonctionnement ....Lorsque l'installation de pompage est réalisée, diagnostiquer un état de cavitation plus ou moins avancée est une chose, en prédire les conséquences dans le temps et y apporter des solutions correctives satisfaisantes est plus difficile et très souvent source de conflits.

L'objectif est ici de rappeler les définitions, de donner quelques recommandations d'installation et précautions à prendre en termes d'exploitation de manière à limiter les risques dus à la cavitation.

### NPSH quoi ?

La question mérite d'être posée.... La norme **EN 9906** qui régit les essais de fonctionnement pour la réception des pompes rotodynamiques nous précise que le NPSH est " la hauteur de charge nette absolue au-dessus de la hauteur équivalente à la pression de vapeur indiquée au plan de référence du NPSH " et rappelle " qu'il est de la responsabilité du Fabricant d'indiquer la position de ce plan par rapport à des points de référence précis sur la pompe".

Cette même norme précise aussi que le **NPSH requis**, historiquement appelé **NPSHR**, est le "NPSH minimal donné par le constructeur de la pompe pour obtenir une performance spécifiée à un débit spécifié, une vitesse spécifiée et un liquide spécifié (apparition d'une cavitation visible, augmentation de bruit et de vibrations dues à la cavitation, début de chute de hauteur d'élévation ou de perte de rendement, limitation de l'érosion due à la cavitation).

Le NPSHR est une valeur mesurée, c'est une donnée Constructeur. Plusieurs critères peuvent être retenus, correspondant à différents stades dans l'évolution de la cavitation et choisis selon le niveau de performances souhaité de la pompe, de durée de fonctionnement et de type d'application.

Le **NPSH3** est le critère couramment utilisé pour les pompes dites Industrielles; c'est une valeur critique du NPSHR correspondant à une chute arbitraire de 3% de la hauteur totale d'élévation de la pompe. Sauf indications contraires, la courbe de NPSH requis donnée par le Constructeur est celle du NPSH3 mais il est préférable de se le faire confirmer car certains indiquent une courbe de NPSHR basée sur le critère 3% en intégrant une marge de sécurité variable suivant le type de pompe. L'indication portée sur les courbes de performances de la pompe est alors :

$$\text{NPSHR} = \text{NPSH3\%} + \text{Marge}$$

Pour éviter toute mauvaise interprétation, il est préférable que le Constructeur valorise cette marge.

Le **NPSH disponible** noté aussi dans la littérature anglo-saxonne **(NPSH)<sub>A</sub>**, est le NPSH de l'installation. C'est la charge nette absolue disponible à l'entrée de la pompe. Sur une installation, la valeur du **(NPSH)<sub>A</sub>** peut être mesurée si l'on peut trouver une section droite de mesure convenable (**S<sub>E</sub>**) où l'écoulement est stable, sans prérotation, en amont immédiat de la bride d'entrée de la pompe ; dans ce cas, on mesure la pression statique relative (**p<sub>E</sub>**).

$$(NPSH)_A = [(P_{atm} + p_E - P_v) / (\rho \cdot g)] + [V_E^2 / 2 \cdot g]$$

Plus généralement, la valeur du **(NPSH)<sub>A</sub>** est calculée à partir des données spécifiques à l'installation. En prenant le cas général d'un équipement de pompage alimenté à partir d'un réservoir où le liquide est à surface libre, la formulation est la suivante :

$$(NPSH)_A = Z + [P_0 / (\rho \cdot g)] + [V_0^2 / 2 \cdot g] - [P_v / (\rho \cdot g)] - \Delta H_{asp}$$

Expression pour laquelle,

- **[Z]** est la hauteur géométrique, exprimée en mètre (m) entre le niveau liquide dans le réservoir et le plan de référence de la pompe. Si la pompe fonctionne en charge, cette hauteur est positive ; elle est négative si elle est en aspiration.
- **[P<sub>0</sub> / ρ.g]** est la pression absolue exprimée en (mcl) s'exerçant à la surface du liquide dans le réservoir.
- **[V<sub>0</sub><sup>2</sup> / 2.g]** est la pression dynamique exprimée en (mcl) liée à l'état de vitesse d'écoulement existant à la surface du liquide. Ce terme est généralement négligé.
- **[P<sub>v</sub> / ρ.g]** est la tension de vapeur du liquide exprimée en (mcl) . Pour de l'eau à 20°C et à la pression atmosphérique normale (P<sub>v</sub> / ρ.g) ~ 0.2 mcl
- **[ΔH<sub>asp</sub>]** est la perte de charge, exprimée en (mcl), générée dans le circuit d'alimentation entre le niveau liquide dans le réservoir et l'aspiration de la pompe.
- **[ρ]** est la masse volumique du liquide considéré, exprimée en (kg/m<sup>3</sup>) et **[g]** l'accélération due à la pesanteur (~ 9.81m/s<sup>2</sup>)



Fig 1. Erosion par cavitation d'une roue de pompe centrifuge  
Doc : XYLEM

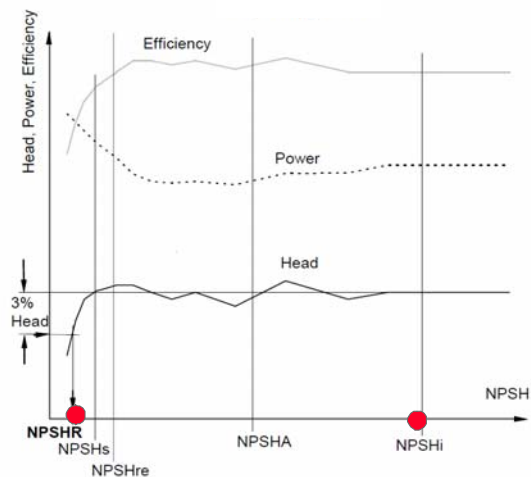


Fig 2. Courbes de détermination du NPSHR

## Les principaux stades dans l'évolution de la cavitation et effets

Les principaux stades dans l'évolution de la cavitation, sont généralement désignés par les NPSH spécifiques suivants,

- (NPSH)<sub>I</sub> comme *Incipient* - C'est le premier stade ; il correspond à l'apparition des premiers germes de cavitation ( fluide vaporisé ), visibles à l'œil nu, dans les zones en dépression situées à l'entrée des aubes de la roue. A ce stade de développement, cette forme de cavitation primitive n'est pas jugée dangereuse pour le fonctionnement de la pompe.
- (NPSH)<sub>B</sub> - Cette valeur de NPSH correspond à l'apparition d'un niveau de bruit défini à l'avance, en augmentation par rapport au bruit normal mesuré hors cavitation dans une large bande de fréquences. Sur site, la première manifestation d'une pompe qui cavite est donc le bruit, un crépitement qui, à un stade de cavitation plus avancé devient très caractéristique, assimilé à un bruit de roulement de cailloux dans une bétonnière. Ce bruit est fort gênant mais tant qu'il n'affecte pas les performances de la pompe et ne sont pas accompagnés de détériorations, il est le plus souvent accepté ; certaines pompes sont et seront toujours bruyantes, l'alternative est le capotage et / ou l'insonorisation du local.
- (NPSH)<sub>E</sub> - A ce stade les figures de cavitation deviennent instables et lâchent des microbulles de vapeur dans l'écoulement qui sous l'effet du gradient de pression vont imploser dans les zones fluides où la pression redevient supérieure à la pression de vapeur. L'implosion répétée à fréquence élevée de ces poches de vapeur à la surface des aubes de la roue va progressivement altérer la structure cristalline du matériau et créer des cavités très caractéristiques du phénomène d'érosion par cavitation dont les effets sont particulièrement destructeurs dans le temps. Le (NPSH)<sub>E</sub> caractérise la première phase et correspond à un début de risque d'érosion.
- (NPSH)<sub>V</sub> - Comme pour le bruit, cette valeur de NPSH peut être caractérisée par un accroissement significatif du niveau de vibration généré par la pompe, défini à l'avance et mesuré par rapport à sa signature vibratoire en fonctionnement normal de la pompe, hors cavitation. Les vibrations génèrent une augmentation du bruit mais surtout provoquent des dégâts au niveau des paliers et des garnitures mécaniques si la pompe en est équipée ( trépidations, grippages, augmentation du débit de fuite,... ).
- (NPSH)<sub>C</sub> - C'est la valeur du NPSH qui correspond à un début de décrochage de la hauteur totale d'élévation produite par la pompe. A ce stade la cavitation s'est déjà bien développée. Le critère de chute arbitraire de hauteur totale d'élévation est celui le plus largement utilisé dans la pratique. La valeur critique correspondant à une chute de 3% caractérise le NPSH3 appelé aussi " cavitation industrielle "
- (NPSH)<sub>G</sub> - Cette valeur de NPSH a pour intérêt de caractériser une chute quasi-totale ( globale ) de la hauteur totale d'élévation de la pompe. Dans la pratique une chute de 10 à 15% est choisie.

Pour illustration, la figure 3, montre la forme caractéristique de quelques unes de ces courbes de NPSH en fonction du débit et pour une vitesse de rotation donnée de la pompe. L'allure relative de ces courbes varie avec le type de pompe que l'on peut caractériser par leur vitesse spécifique ( $n_s$ ) mais présente globalement une forme en V plus ou moins prononcée.

- En partie droite, pour les débits supérieurs au débit optimum de tracé de la pompe, ces courbes sont rapidement croissantes.
- A débits partiels, en partie gauche, intervient l'influence d'un débit dit de recirculation à l'entrée de la roue, caractérisé par une augmentation des niveaux de bruit et de vibration, ceci d'autant plus marqué que la vitesse spécifique de la pompe est importante. Pour les pompes à faibles et moyennes vitesses spécifiques, le niveau de bruit diminue à faibles débits, jusqu'au débit nul.

Dans le cas de pompes purement radiales à faible vitesse spécifique, la chute de performances apparaît brusquement, presque sans transition. La courbe de (NPSH)<sub>C</sub> est continuellement ascendante.

Pour les ( $n_s$ ) moyens, les courbes se creusent et ceci d'autant plus que le ( $n_s$ ) sera élevé. En fait, la courbe de (NPSH)<sub>G</sub>, caractérisant la chute de pression globale, n'existe pas pour les pompes à écoulement axial ( pompe à hélice ) et le critère 3% ne suffit pas à préserver l'intégrité mécanique de la pompe dans le temps ( vibrations, érosion ) sauf si elle est peu utilisée ( cas du relevage en bassin d'orage, par exemple ). Pour des utilisations plus intensives, il est fortement recommandé de choisir un critère de NPSH plus précoce.

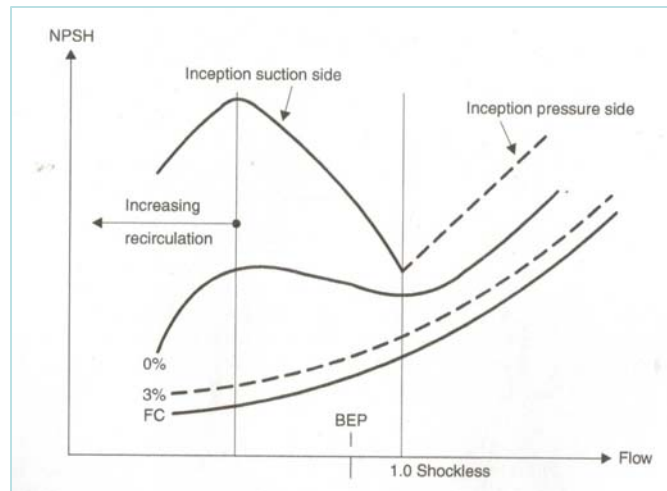


Fig. 3 Courbes caractéristiques des NPSH d'une pompe centrifuge ( Doc. SULZER )

On comprend alors toute l'importance d'une bonne communication entre le Constructeur et l'Installateur / l'Utilisateur.

### Recommandations pour limiter les risques de cavitation

La cavitation de la pompe pour un débit et une vitesse de rotation donnés dépend donc des conditions d'aspiration et de la charge existant à l'entrée de la roue où elle prend naissance.

La première règle est de veiller à ce qu'en tous points de plage de fonctionnement utilisée par la pompe, le critère de cavitation choisi soit respecté en prenant une certaine marge de sécurité, ce qui se traduit par la relation :

$$\text{NPSH}_A > \text{NPSHR} + \text{marge}$$

Le NPSHR retenu de la pompe est très généralement le NPSH3% mais nous avons vu que cela n'était pas suffisant pour certaines applications intensives et plus particulièrement pour les pompes à vitesse spécifique élevée. Interviennent aussi la plage et les conditions de fonctionnement, la température, la nature du liquide pompé ou tout simplement une exigence particulière du cahier des charges en termes de niveau vibratoire et / ou de bruit admissibles sur le site. La deuxième règle est donc le bon choix du critère de cavitation à retenir.

Concernant le  $\text{NPSH}_A$  à respecter sur site, la littérature technique donne des informations souvent contradictoires sur le sujet. Le Standard ANSI / HI 9.6.1 – Edition 2012, a pour réputation de donner des recommandations plutôt conservatives : La marge de sécurité est alors définie par le ratio,

$$\text{NPSH margin ratio} = (\text{NPSH})_A / \text{NPSH3\%}$$

Ratio variable de 1.05 à 1.3 voire même 1.5 suivant les applications, le type de pompe et le matériau de la roue. Pour plus d'informations se référer à ce Standard, comparer avec les recommandations données par le Constructeur et en cas de doutes ne pas hésiter à demander son arbitrage.

Pour les applications Industrielles courantes, en eaux brutes et eaux usées, l'expérience montre qu'une marge de sécurité ~ 0.6 à 1.0 m est suffisante pour les pompes opérant dans leur zone de fonctionnement préférentielle ( POR ).

#### - Limiter la perte de charge à l'aspiration

Optimiser la charge disponible à l'entrée de la pompe consiste aussi à chercher à limiter les pertes de charge dans son circuit d'alimentation, à commencer par limiter les vitesses d'écoulement (1.5 à 2 m/s) ; les variations de sections doivent être progressives et dans la mesure du possible, éviter l'utilisation d'accessoires et de composants hydrauliques potentiellement source de pertes de charge difficiles à maîtriser, un bon exemple étant l'utilisation d'une crépine d'aspiration en eaux chargées.

#### - Maintenir de bonnes conditions d'alimentation à l'entrée de la pompe.

Au-delà du fait qu'il s'agit d'eau propre et froide, les courbes de NPSHR données par les Constructeurs sont établies pour des conditions d'écoulement à l'entrée de la roue réputé uniforme, sans turbulences ni vortex et entrainement d'air. Sur site, ces conditions de fonctionnement ne sont pas souvent respectées.

L'influence de perturbations hydrauliques, d'entraînement de gaz dissous, de bulles d'air à l'aspiration d'une pompe est difficilement quantifiable en termes d'altération possible des NPSH disponible et requis. Les effets sont par ailleurs très variables d'un type d'hydraulique à l'autre, roue fermée ou ouverte. De parfaits exemples du genre sont un vortex de radier cavitant, présent à l'aspiration d'une pompe immergée ou une alimentation totalement déséquilibrée dans le plan de symétrie d'une pompe à plan de joint ; un autre classique est la chute d'effluent dans la bêche de pompage au droit des groupes installés et chacun a pu constater les dégâts provoqués par cavitation liée à un problème de colmatage en pompage d'eaux usées..... Les exemples sont nombreux.

Concernant la 'stabilisation' des écoulements à l'entrée de la pompe, les recommandations sont multiples suivant la configuration hydraulique de l'installation, qu'il s'agisse de pompes immergées ou de pompes fonctionnant en fosse sèche, l'autre critère étant la nature des effluents. Dans ce domaine, on se référera aux nombreuses brochures de recommandations, aujourd'hui disponibles, notamment celles éditées par les Constructeurs. Voir aussi notre fiche technique N°1 ( Conditions d'écoulement requises à l'aspiration des pompes ).

La teneur en bulles d'air occluses et en gaz dissous dans le fluide pompé a une grande influence sur le processus de développement de la cavitation et par conséquent sur les courbes de NPSH de la pompe. Il n'existe cependant pas de lois générales extrapolables à l'ensemble des pompes pour en quantifier les effets : De nombreux essais montrent que 2 à 3% de taux d'air en volume est déjà problématique ! La bonne pratique est tout simplement de tout mettre en œuvre pour qu'il n'y ait pas d'entraînement d'air à l'aspiration de la pompe (accompagner une chute d'effluent, chambre ou réservoir de dégazage, etc....).

#### **- Maîtrise de la plage de fonctionnement de la pompe.**

Cela paraît évident et pour de multiples raisons autres que la cavitation, mais l'est beaucoup moins sur le terrain car la plage de fonctionnement calculée ou spécifiée au projet n'est pas toujours en phase avec les valeurs mesurées sur le site, en exploitation.

Est-il nécessaire de rappeler que les problèmes de cavitation ne se limitent pas au fonctionnement en bas de courbe Q/H de la pompe ; le fonctionnement à débits partiels peut l'être tout autant et les risques augmentent avec les pompes à vitesses spécifiques élevées.

La première action est donc de se livrer à un véritable diagnostic des conditions réelles de fonctionnement in situ de la pompe et vérifier qu'elle opère dans la plage de débit fixée par le Constructeur. Dans le meilleur des cas une modification des niveaux de régulation ou un changement de diamètre de roue peuvent régler le problème ; à l'extrême c'est la pompe qui n'est pas adaptée.

#### **- Choix du matériau de la roue.**

Parmi les effets de la cavitation, il y a l'érosion et l'on prendra soin en termes de diagnostic de la distinguer de l'abrasion bien que dans certaines applications, notamment en réseaux d'assainissement, les traces d'érosion par cavitation voisinent souvent avec celles dues à l'érosion par abrasion.

Les matériaux utilisés pour les roues sont plus ou moins sensibles à cette érosion ; un choix judicieux du matériau peut donc prétendre réduire les risques d'érosion par cavitation et par là-même augmenter la durée de vie / de fonctionnement de cette roue.

Pour des raisons économiques le matériau le plus couramment utilisé pour les pompes centrifuges est la fonte grise avec ses variantes. Pour les pompes à écoulement axial, beaucoup plus sensibles aux effets de la cavitation, la fonte est à éviter : Les hydrauliques sont généralement réalisées en bronze d'aluminium. Dans l'échelle de résistance exprimée en perte de poids par heure de fonctionnement (mg/h), la fonte est de loin la moins performante par opposition aux aciers inoxydables. Une alternative est le revêtement céramique ou polyamide mais leur mise en œuvre, plutôt délicate, doit être confiée à des spécialistes.

## Quelques documents et Normes de référence

- [1] - Norme **ISO/EN 9906** (Mai 2012) – Pompes Rotodynamiques – Essais de fonctionnement pour la réception : Niveaux 1, 2 et 3
- [2] – Standard **ANSI / HI 9.6.1** : 2012 - Rotodynamic Pumps – Guideline for NPSH Margin
- [3] – Pompes Centrifuges, Hélico-centrifuges et Axiales : Cavitation – J.F Lapray (T.I / B 4 313)