

PROJET MECANIQUE DES FLUIDES

PROSIT 7 - WORKSHOP

02/10/2020

Table des matières

1 PREAMBULE :	2
Choix d'une pompe centrifuge & dimensionnement complet de la pompe [1]	4
Schématiser la situation	5
Ecrire l'équation de Bernoulli	6
Déterminer la valeur du nombre de Reynolds, de la rugosité relative (utiliser Moody)	7
Déterminer les pertes de charges régulières avec le facteur de frottement (Diag Moody)	7
Déterminer les pertes de charges singulières	7
Déterminer la charge en pompe. Vérifier que le Hmt dépend bien du débit volumique	7
Tracer la caractéristique du circuit	8
Déterminer la pompe la plus appropriée	8
Quantifier la puissance hydraulique	9
Quantifier la puissance absorbée (électrique)	9
Vérifier la présence de cavitation	9
Association des pompes	11
2 CONCLUSION GENERALE DU WORKSHOP	12
3 RESSOURCES	13
4 RÉFÉRENCE	14
5 COMPÉTENCES DU PROSIT	15
6 ANNEXE	16

1 PREAMBULE :

Ce workshop est tiré en grande partie de la ressource [1] en libre accès sur internet par La Fondation Unit (Université Numérique Ingénierie et Technologie) Hydraulique pour le génie des procédés.

L'objectif de ce workshop est d'être capable de choisir une pompe centrifuge. Le dimensionnement complet est attendu. La démarche est exposée dans les différents points abordés.

Les pompes centrifuges sont les plus courantes dans l'industrie chimique au sens large, du fait de leur simplicité de conception, de leur coût généralement moindre qu'une pompe volumétrique équivalente et de leur aptitude à transporter des liquides même chargés (de particules solides).

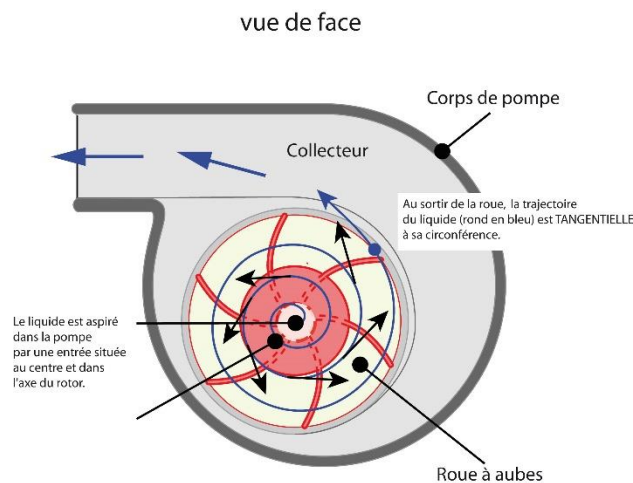


Figure 1 Vue de face en coupe d'une pompe centrifuge[1]

Une pompe centrifuge accélère le fluide qui la traverse en lui communiquant un mouvement de rotation, donc une certaine puissance hydraulique.

Cette énergie hydraulique peut être vue comme la somme d'une énergie cinétique déterminée par le mouvement liquide dans le tube et d'une énergie potentielle stockée soit sous la forme d'un accroissement de pression soit sous celle d'une augmentation de hauteur (théorème de Bernoulli)

La puissance hydraulique fournie par la pompe est donnée par la relation :

$$P_{\text{hydraulique}} = \rho g Q h$$

Dans laquelle :

- $P_{\text{hydraulique}}$ est exprimée en watts
- ρ est la masse volumique du liquide (kg/m^3)
- g est l'accélération de pesanteur soit $9,81 \text{ m/s}^2$
- Q est le débit volumique du liquide exprimé en m^3/s
- h est la hauteur manométrique de la pompe exprimée en mètres de colonne d'eau

La hauteur manométrique est la hauteur d'une colonne de liquide qui déterminerait une pression statique égale à la pression de refoulement.

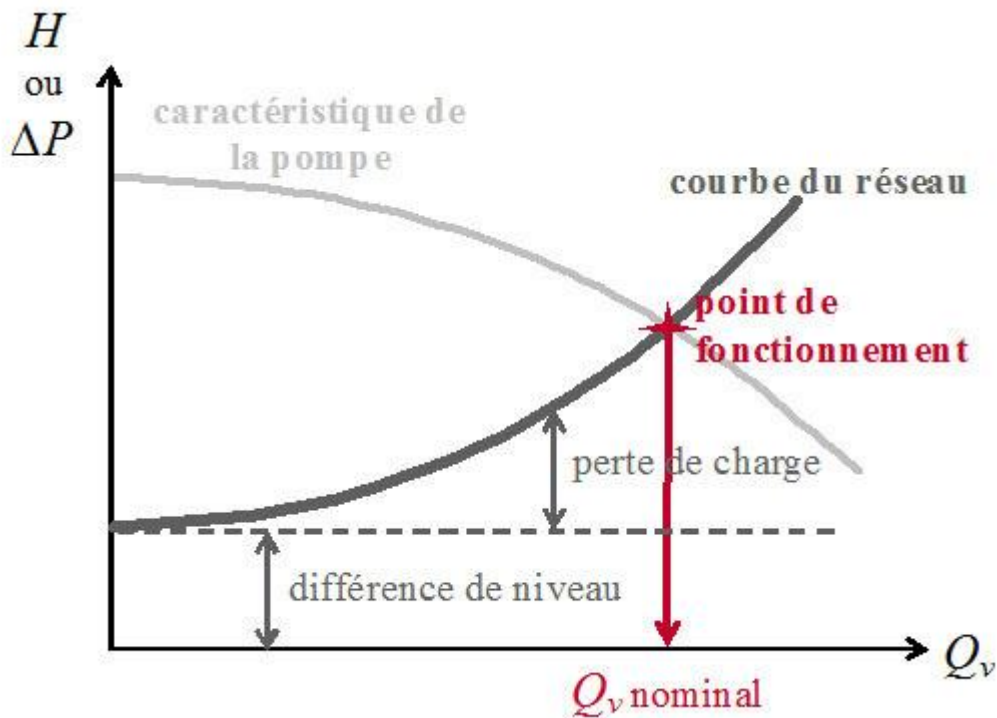
Le terme ρgh est souvent appelé charge hydraulique. Il est homogène à une pression.

La puissance mécanique à fournir à la machine est bien évidemment toujours supérieure à la puissance hydraulique fournie au liquide et on appelle rendement de la pompe le coefficient η de proportionnalité qui lie ces deux paramètres.

On appelle puissance à l'arbre la puissance mécanique requise pour faire fonctionner la pompe. On a donc la relation :

$$P_{\text{hydraulique}} = \eta P_{\text{à l'arbre}}$$

La courbe du réseau (également appelée caractéristique du circuit) représente l'énergie par unité de poids H ou encore l'énergie par unité de volume ΔP à fournir au fluide pour le faire circuler avec un débit Q_v . Elle tient donc compte de l'élévation éventuelle du fluide, et des pertes de charge dans le circuit de refoulement, comme illustré sur la figure ci-dessous. L'intersection de la courbe du réseau et de la caractéristique de la pompe définit le point de fonctionnement et donc le débit nominal.



Le rendement varie en fonction du point de fonctionnement, et dépend également de la machine. Pour les machines usuelles, les catalogues de constructeurs indiquent qu'il se situe le plus souvent entre 70 % et 90 %.

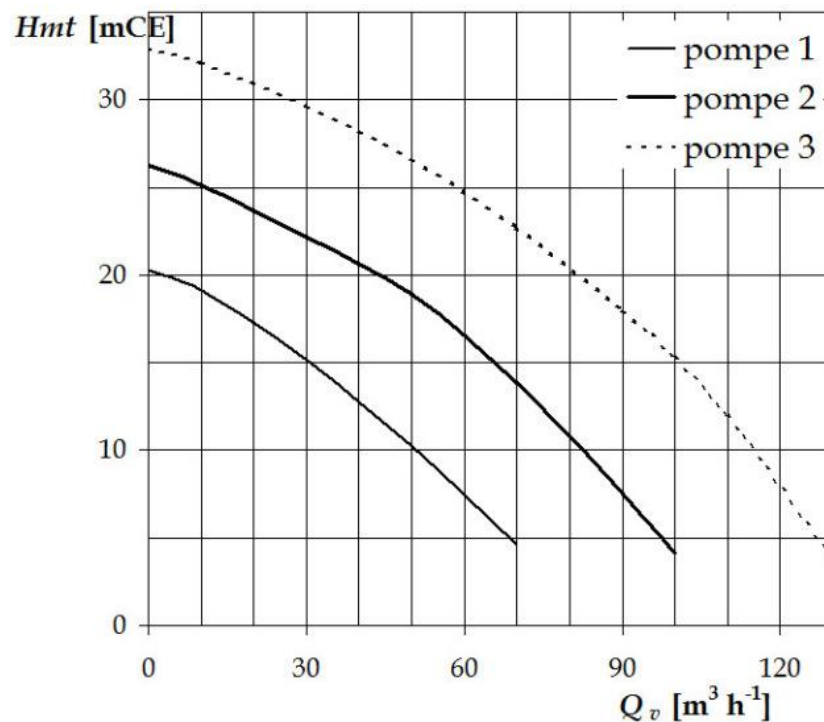
Pour aller plus loin, les ressources [2][3] sont intéressantes.

Choix d'une pompe centrifuge & dimensionnement complet de la pompe [1]

On souhaite remplir une cuve de stockage au moyen d'une pompe centrifuge qui débiterait $50 \text{ m}^3/\text{h}$ à travers le circuit suivant :

- en amont de la pompe, 20 m de conduite rectiligne horizontale de diamètre 100 mm, en acier inoxydable de rugosité 0,02 mm, branchée directement en partie basse de la paroi du bac d'alimentation : rétrécissement brusque ($k = 0,5$) & clapet anti-retour ($k = 0,5$). Le niveau supérieur du bac d'alimentation est à 2 m au-dessus de l'axe de la pompe.
- en aval, 35 m de conduite identique (même diamètre, même rugosité), comprenant deux coudes de coefficient $k = 0,25$. Le liquide qui sort en jet horizontal à 17 m au-dessus du niveau supérieur du bac d'alimentation est recueilli dans la cuve de stockage.

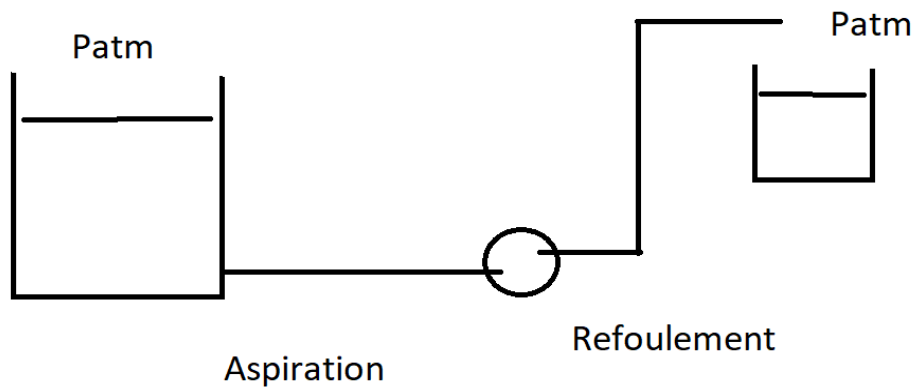
Le liquide pompé a les caractéristiques suivantes : masse volumique de 1000 kg m^{-3} ; viscosité de $1,14 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$; pression de vapeur de 5500 Pa .



Déterminer la caractéristique du circuit. Parmi les trois pompes pour lesquelles vous disposez de courbes caractéristiques, laquelle est adaptée à votre besoin ? Quelle sera la puissance fournie au fluide et la puissance absorbée (rendement = 62%) ? Le NPSH requis de la pompe choisie étant de $0,43 \text{ bar}$, calculer le NPSH disponible et vérifier le bon fonctionnement de la pompe.

Schématiser la situation

Afin de bien comprendre la situation, il est nécessaire de réaliser un schéma qui présente le circuit et ses caractéristiques en complétant le schéma suivant :



Ecrire l'équation de Bernoulli

Le premier point A est à la surface libre du réservoir. Le second B sera à la sortie du refoulement.

$$p_A + \frac{1}{2}\rho \cdot V_A^2 + \rho \cdot g \cdot z_A + \Delta p_{pompe} = p_B + \frac{1}{2}\rho \cdot V_B^2 + \rho \cdot g \cdot z_B + \Delta p_f$$

Dans laquelle :

- p_A, p_B sont les pressions aux points considérés (exprimées en Pa)
- z_A, z_B sont les positions aux points considérés (exprimées en m)
- V_A, V_B sont les vitesses aux points considérés (exprimées en m/s)
- ρ est la masse volumique du liquide (kg/m^3)
- g est l'accélération de pesanteur soit $9,81 \text{ m/s}^2$
- Δp_{pompe} est l'énergie apportée par la pompe (exprimée en Pa) convertible en Hmt la hauteur manométrique telle que $\Delta p_{pompe} = \rho g H_{mt}$
- Δp_f représente les pertes de charge en Pa

En simplifiant l'expression car $p_A = p_B = p_{atm}$, $V_A = 0 \text{ m/s}$ à la surface du réservoir et

$$z_B - z_A = 17 \text{ m}$$

On obtient :

$$\Delta p_{pompe} = \frac{1}{2}\rho \cdot V_B^2 + \rho \cdot g \cdot (z_B - z_A) + \Delta p_f$$

L'expression de la vitesse du fluide en B en fonction du diamètre D de la conduite et du débit Q est

$$U = V_B = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Déterminer la valeur du nombre de Reynolds, de la rugosité relative (utiliser Moody)

Le terme Δp_f représente les pertes de charge. Celles-ci dépendent du régime d'écoulement.

Le nombre de Reynolds est exprimé comme suit et sa valeur est :

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} = 1.5 * 10^5$$

La rugosité relative conditionne beaucoup les frottements, ici sa valeur est :

$$\frac{e}{D} = 2 * 10^{-4}$$

Déterminer les pertes de charges régulières avec le facteur de frottement (Diag Moody)

$\Delta p_{f,régulière} = \frac{\lambda}{2} * \rho * U^2 * L/D$ avec ici la longueur L est la somme des longueurs d'aspiration et de refoulement $L_{asp} + L_{ref}$ et $U = \frac{4Q}{\pi D^2}$.

Il faut alors déterminer le facteur λ grâce au diagramme de Moody (voir Annexe)

$$\lambda \sim 0.02$$

Déterminer les pertes de charges singulières

Les pertes singulières sont décrites dans l'énoncé.

$$\Delta p_{f,singulière} = \sum_{i=1}^4 k_i \frac{\rho}{2} \left(\frac{4Q}{\pi D^2} \right)^2$$

Déterminer la charge en pompe. Vérifier que le Hmt dépend bien du débit volumique

On a vu que la charge de la pompe est $\Delta p_{pompe} = \frac{1}{2} \rho \cdot V_B^2 + \rho \cdot g \cdot (z_B - z_A) + \Delta p_f$.

En utilisant les résultats précédents, on peut remarquer que Δp_{pompe} ne dépend que du débit Q élevé au carré. L'expression est :

$$\Delta p_{pompe} = \frac{1}{2} \rho \cdot \left(\frac{4Q}{\pi D^2} \right)^2 + \rho \cdot g \cdot (z_B - z_A) + \lambda \cdot \rho \cdot \left(\frac{4Q}{\pi D^2} \right)^2 \cdot \frac{L}{2D} + \sum_{i=1}^4 k_i \frac{\rho}{2} \left(\frac{4Q}{\pi D^2} \right)^2$$

Tracer la caractéristique du circuit

Δp_{pompe} est donc une fonction parabolique du débit Q de la forme $\Delta p_{pompe} = A + BQ^2$.

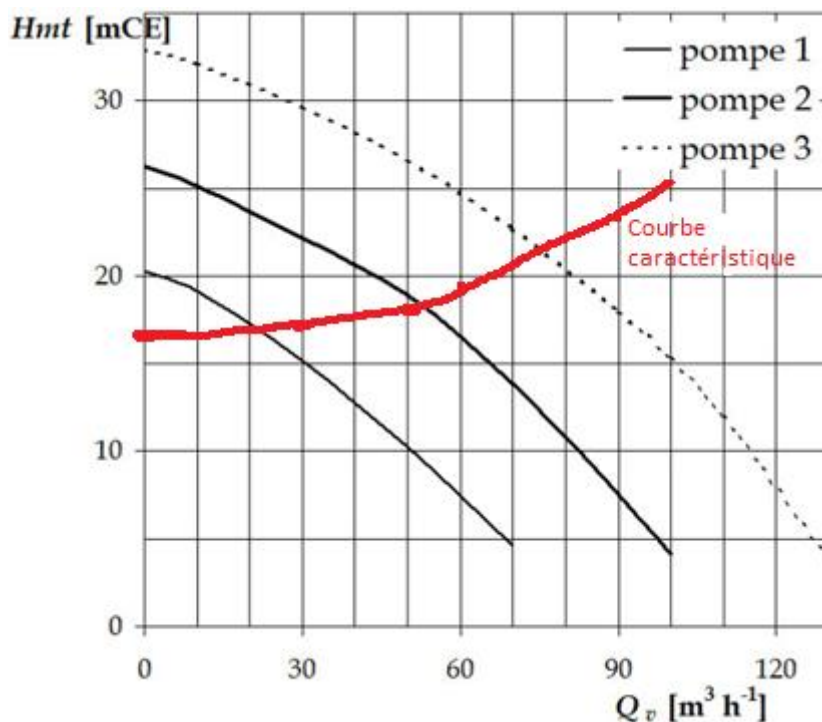
Déterminer la valeur de la hauteur manométrique H_{mt} .

$\Delta p_{pompe} = \rho g H_{mt}$ donc

$H_{mt} [\text{en m}] = A + BQ^2$ avec $A = 17 \text{ m}$ et $B = 10\,064 \text{ m}$ pour ces valeurs Q est en m^3/s

Déterminer la pompe la plus appropriée

En reprenant la courbe présente dans l'énoncé de H_{mt} en fonction du débit Q . Tracé de la caractéristique de la pompe dans son circuit.



Pour un débit de $50 \text{ m}^3/\text{h}$, la hauteur manométrique est de 18.9mCE environ.

Le choix de la pompe 2 est alors évident. Pour rappel, ce résultat dépend de la valeur du facteur de frottement qui dépend du débit.

Quantifier la puissance hydraulique

La puissance hydraulique est donnée par la formule.

$$P_{\text{hydraulique}} = \rho g Q h$$

En l'appliquant sur le problème, on trouve

$$P_{\text{hydraulique}} = 2.58 \text{ kW}$$

Quantifier la puissance absorbée (électrique)

La puissance absorbée est donnée par la formule.

$$P_{\text{absorbée}} = P_{\text{hydraulique}} / \eta$$

En l'appliquant sur le problème, on trouve

$$P_{\text{absorbée}} = 4.16 \text{ kW}$$

Vérifier la présence de cavitation

Il faut déterminer le NPSH. Ce nombre se dimensionne sur la base de la section d'aspiration sur le circuit et il dépend du débit. En revanche, le NPSH requis dépend de la pompe et du débit (données fournisseur). Pour un circuit donné et une pompe donnée, il existe une limite pour le débit à ne pas dépasser.

Pour éviter le phénomène de *cavitation*, il faut remplir une condition sur un nombre appelé NPSH (*net positive suction head*). Il est nécessaire que le NPSH disponible (donnée liée au circuit) soit supérieur au NPSH requis (donnée fournisseur).

On définit le NPSH selon la différence entre la charge à l'entrée de la pompe et la charge associée à la pression de vapeur saturante $\frac{P_{\text{vap}}}{\rho g}$ du fluide (où P_{vap} est la pression de vapeur saturante, à la température considérée) :

$$NPSH = \left(\frac{P_{\text{asp}}}{\rho g} + z_{\text{asp}} + \frac{U_{\text{asp}}^2}{2g} \right) - \frac{P_{\text{vap}}}{\rho g}$$

En utilisant le théorème de Bernoulli sur le tronçon de l'aspiration :

$$\frac{P_{\text{atm}}}{\rho g} + 0 + z_A - \frac{\Delta P_{f,asp}}{\rho g} = \frac{P_{\text{asp}}}{\rho g} + z_{\text{asp}} + \frac{U_{\text{asp}}^2}{2g}$$

alors

$$NPSH_{dispo} = \left(\frac{P_{atm}}{\rho g} + z_A - z_{asp} - \frac{U^2_{asp}}{2g} - \frac{\Delta P_{f,asp}}{\rho g} \right) + z_{asp} + \frac{U^2_{asp}}{2g} - \frac{P_{vap}}{\rho g}$$

$$NPSH_{dispo} = \left(\frac{P_{atm}}{\rho g} + h - \frac{\Delta P_{f,asp}}{\rho g} \right) - \frac{P_{vap}}{\rho g}$$

Donc

$$NPSH_{dispo} = 11 \text{ m} > NPSH_{requis} = 4.3 \text{ m.}$$

Il n'y a pas de cavitation.

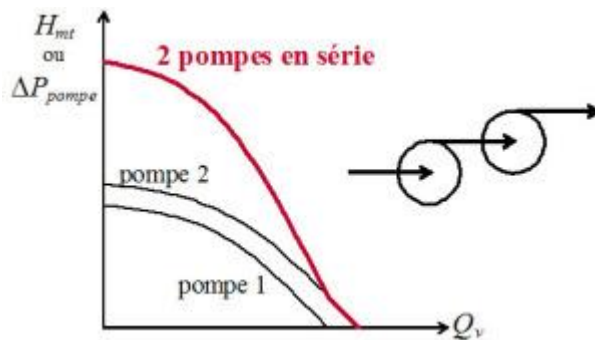


Figure 2 Usure par cavitation d'un impulseur de pompe centrifuge

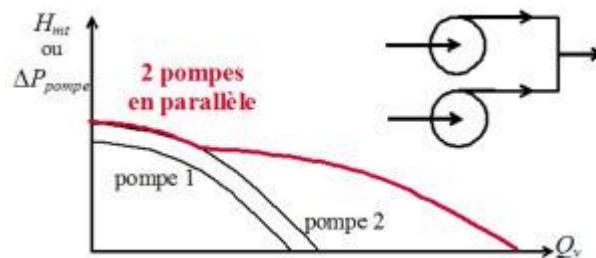
Pour éviter la cavitation, il faut par conséquent de préférence :

- Monter la pompe en charge (pour que la hauteur h soit négative et de valeur absolue maximale)
- Travailler à basse température (où la pression de vapeur saturante est plus faible)
- Limiter les pertes de charge sur le circuit d'aspiration

Association des pompes



- **en série** pour augmenter la pression de sortie ; pour un débit donné, la pression (ou la hauteur manométrique totale) fournie par l'ensemble des deux pompes est la somme des pressions (ou des hauteurs manométriques) que fournirait chacune d'elle si elle était seule comme illustré sur la figure ci-dessus.



- **en parallèle** pour augmenter le débit ; pour une pression (ou une hauteur manométrique totale) donnée, le débit fourni par l'ensemble des deux pompes est la somme des débits que fournirait chacune d'elle seule comme le montre la figure ci-dessus.

2 CONCLUSION GENERALE DU WORKSHOP

Le dimensionnement d'une pompe centrifuge suit toujours la même méthode.

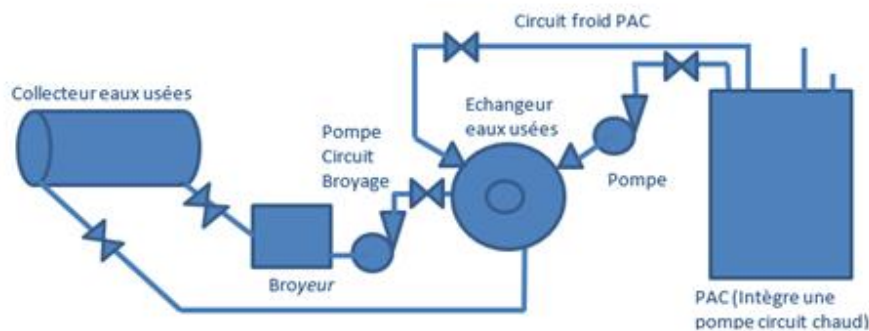
Il faut écrire l'équation de Bernoulli généralisée entre deux points parfaitement caractérisés du circuit (entrée/sortie). Il faut évaluer les pertes de charge et enfin calculer le ΔP_{pompe} ou Hmt .

Si le rendement de la pompe est connu, on peut déterminer la puissance électrique consommée.

Si le NPSH requis est donné par le fournisseur, le risque de cavitation peut être évalué.

Maintenant que la méthodologie a été vue, il est intéressant de l'appliquer au projet. En utilisant la schématisation simplifiée du circuit d'eau usées et de raccordement à la PAC, on voit la nécessité de dimensionner la pompe utilisée pour ce circuit. Un fichier excel regroupant la démarche, le choix des diamètres de la tuyauterie, le choix de la pompe pourra être présenté. Une pompe étant déjà présente dans la PAC, le travail va se concentrer sur le circuit avec le broyeur.

Circuit simplifié d'eaux usées et raccordement PAC



Choix et dimensionnement des circuits chaud et froid de la PAC et du circuit des eaux usées.

- Le circuit chaud relie l'échangeur eaux usées à la PAC. Il devra comporter 7 coudes normaux en U, 8 m de tuyauterie, 2 vannes à opercule à passage direct et une pompe. Le débit d'entrée est fixé à 6 l/s.
- Le circuit froid relie la PAC au ballon tampon Il devra comporter 6 coudes normaux en U, 4 m de tuyauterie et deux vannes à opercule à passage direct. **La pompe de ce circuit est intégrée à la PAC elle n'est pas à traiter**
- Le circuit eaux usées sera dimensionné en fonction de l'échangeur et le broyeur. Les pertes de charge dans l'échangeur sont estimées à 50 000 Pa.
- Le choix du broyeur doit être justifier dans la gamme du fabricant.
- Les diamètres des tuyauteries seront exposés et adaptés aux constituants du circuit.

3 RESSOURCES

[1] http://gpip.cnam.fr/ressources-pedagogiques-ouvertes/hydraulique/co/0module_hydraulique_5.html

[2] [https://www.azprocede.fr/Cours_GC/pompe centrifuge principe.html](https://www.azprocede.fr/Cours_GC/pompe_centrifuge_principe.html)

[3] [https://beatricepresson.weebly.com/uploads/7/6/8/4/76842859/ue0 pompes.pdf](https://beatricepresson.weebly.com/uploads/7/6/8/4/76842859/ue0_pompes.pdf)

4 RÉFÉRENCE

Version	Date	Concepteurs	Relecteurs	Commentaire
1	08/09/2020	GAR	EBN	

5 COMPÉTENCES DU PROSIT

Pompes centrifuges

- Circuit en charge/aspiration
- Pompes en série, en //
- Sélectionner une pompe centrifuge

6 ANNEXE

