Service d'incendie et de secours
Division EM
Bureau de l'instruction

Manuel incendie

CHAPITRE 2 **L'hydraulique**

Dossier Instruction SPP		Réf.	**DI.1.1.2** Version n° 1
Création	App Mautone	Date	10.10.2010
Mise à jour	-	Date	-
Mise en ligne	Hottinger	Date	28.02.2021

FEU

Table des Matières

Manuel incendie - L'hydraulique

1. Préambule 3

2. Formules et unités 4

2.1. Surface, volume 4

3. Débit 5

4. Pression 6

5. Les principes de base 7

5.1. Principe d'Archimède 7

5.2. Principe de Pascal 7

6. La pression 10

6.1. La pression atmosphérique 11

6.2. La pression statique 11

6.3. La pression dynamique 12

7. Les pompes 13

7.1. Les pompes volumétriques 14

7.2. Les pompes centrifuges 15

8. L'aspiration 17

9. La cavitation 22

10. Système d'amorçage 24

11. L'Elévation manométrique totale (EMT) 24

12. Les vannes 25

13. Phénomènes 27

13.1. Perte de charge 27

13.2. Le coup de bélier 30

13.3. La force de recul 31

14. Schéma de principe 32

15. Exercices et calculs 33

16. Diagrammes et tabelles 35

16.1. Diagramme des pertes de charges en fonction du Ø pour 100m 38

17. Récapitulatif des formules et unités 39

1. Préambule

L'hydraulique désigne l'étude des liquides sous pression.
Hydraulique est dérivé du mot grec *hydraulikos*, composé de :

hydôr : eau
aulos : tuyau

Qui est mû par l'eau. Qui fonctionne à l'aide d'un liquide.

Quatre mille ans avant JC, les Egyptiens construisaient déjà des digues et barrages pour contrôler les crues du Nil et irriguer leurs terres. En 250 avant JC, Archimède de Syracuse découvre un principe, qui portera son nom.
En 1650, l'hydraulique moderne prend sa source grâce à Blaise Pascal et ces principes de base. La science dite des « mécaniques des fluides » débute.

Dans la mécanique des fluides, on trouve 2 grandes familles :

L'hydrostatique et l'hydrodynamique.

L'hydrostatique est l'étude de l'équilibre, de la pression et des liquides.
L'hydrodynamique est l'étude des liquides en mouvement.

L'oléohydraulique, branche appartenant à l'hydraulique, est une des plus répandue dans des domaines d'applications très nombreux (machines agricoles, machines-outils, sidérurgie, aviation, engins de travaux publics) et ces avantages sont incontestables, le plus apprécié étant la possibilité de poursuivre et de transmettre des forces avec des puissances élevées.
Ces avantages sont cependant liés à certains inconvénients, tels que le rendement et surtout les pertes de charges.

Tuyaux, motopompe, tonne-pompe, lances, pression, débit, pompes… Voilà quelques mots qui rattachent l'hydraulique au monde des sapeurs-pompiers.

Historiquement, ce n'est qu'en 1611 qu'apparaît la première pompe à incendie. Elle était actionnée à la force des bras, d'où le nom de pompe à bras.
De nos jours, le principe de la pompe n'a pas vraiment évolué mais la technologie des systèmes de gestion annexes a fait un bon en avant depuis une dizaine d'année, grâce à l'électronique et l'informatique.

Le domaine de l'hydraulique est vaste et ce document est axé sur l'hydraulique liée au métier de sapeur-pompier. Il a pour but de comprendre certains principes, phénomènes et la technique afin de pouvoir gérer de façon optimale une mission.

C'est dans cette logique liée à la profession que ce document est réalisé.

2. Formules et unités

Afin de pouvoir sereinement comprendre, manipuler et calculer des composants hydrauliques, il est important de voir ou de revoir les formules de base ainsi que les unités de mesure.

Les différentes formules qui suivent utilisent les unités du Système International (SI). Les sapeurs-pompiers ont pour habitude d'utiliser d'autres unités plus adaptées au métier. A la fin du présent document, un tableau récapitulatif des formules avec les symboles ainsi que les transformations d'unités y est présenté.

2.1. Surface, volume

La surface désigne la partie apparente d'un corps de 2 dimensions.

Pour un carré, elle s'exprime par la formule :

$$S = côté \times côté$$

Pour un disque, elle s'exprime par la formule :

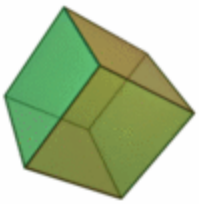
$$S = \frac{\pi \times d^2}{4} \quad \text{ou} \quad S = \pi \times r^2$$

En hydraulique, c'est la surface circulaire qui nous intéresse le plus et ce afin de pouvoir, entre autres, calculer un débit.

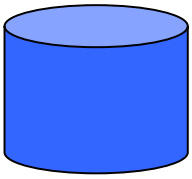
Le volume est la quantité d'espace en 3 dimensions d'une substance ou d'une forme.

Afin d'obtenir un volume, il faut rajouter une épaisseur à la surface.

Le volume physique s'exprime en [m³]



Le volume liquide s'exprime en [ℓ]



1[ℓ] = 1[dm³] = 0,001[m³]

Applications : volume d'eau dans une citerne de tonne-pompe, quantité d'eau dans des tuyaux, etc.

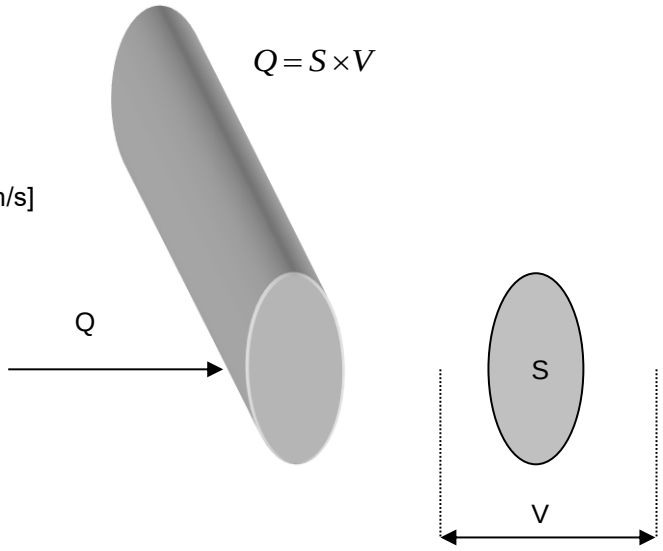
3. Débit

Le débit permet de mesurer un volume traversant une section donnée par une unité de temps.

Le calcul du débit est exprimé par la formule suivante :

$$Q = S \times V$$

Q = debit [m^3/s]
S = surface [m^2]
V = vitesse d'écoulement [m/s]



L'unité [m^3/s] est trop importante pour les débits utilisés par des sapeurs-pompiers. Les [ℓ/min] sont plus appropriées et c'est l'unité utilisée en Suisse.
A noter que les français utilisent l'unité des [m^3/h].

1 [m^3/s] = 60 [m^3/min] = 60000 [ℓ/min]

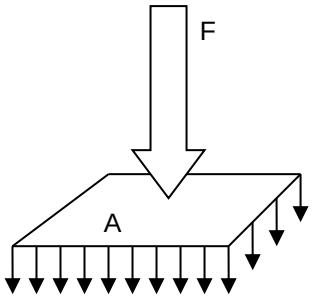
Le débit d'un liquide est en tout point identique pour une canalisation ou un tuyau où il circule. La canalisation peut présenter des différences de diamètre, le débit sera toujours identique et seule la vitesse du liquide va varier.

Application : calcul des consommateurs.

4. Pression

La pression est une force appliquée sur une surface. Elle s'exerce perpendiculairement à la surface considérée. On l'obtient par :

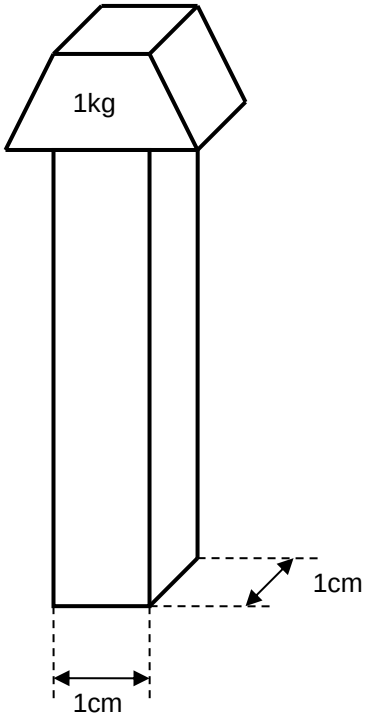
$$p = \frac{F}{A}$$



p = pression [Pa]
F = force [N]
A = surface [m^2]

La pression que représente un Pascal [Pa] est faible. C'est pourquoi, l'unité bar [bar] dérivée est utilisée.

1 bar [bar] =10^5 Pascal [Pa] = 10 mètres colonne d'eau [mCE]



1 [bar] représente 1 kilogramme [kg] sur une surface de 1 centimètre carré [cm^2].

Applications : pression dans une pompe, pression à la lance, etc.

5. Les principes de base

Comme toute science, l'hydraulique est régit par des principes de base qui ont été démontrés et approuvés.

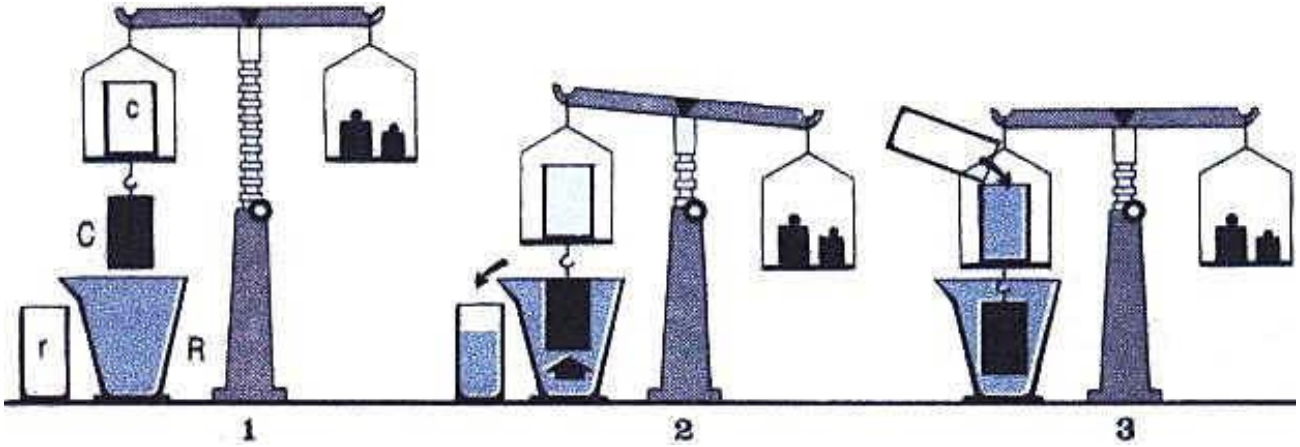
De manière générale, un liquide utilisé dans un système hydraulique est dit incompressible. Cela implique que, lors d'une diminution de section [S], la vitesse [V] de l'eau augmente et inversement.

5.1. Principe d'Archimède

« Tout corps plongé dans un fluide subit une poussée verticale de bas en haut égale au poids du volume déplacé »

Cette poussée provient de l'augmentation de la pression du fluide avec la profondeur : la pression étant plus forte sur la partie inférieure d'un objet immergé que sur sa partie supérieure, il en résulte une poussée globalement verticale orientée vers le haut.

Schéma du principe d'Archimède :



Une fois le volume C immergé, le liquide déplacé dans le réservoir R correspond au volume C. L'équilibre est rétabli quand le liquide dans le réservoir R est ajouté dans le réservoir C.

Application : bateaux, sous-marins, plongeurs, etc.

5.2. Principe de Pascal

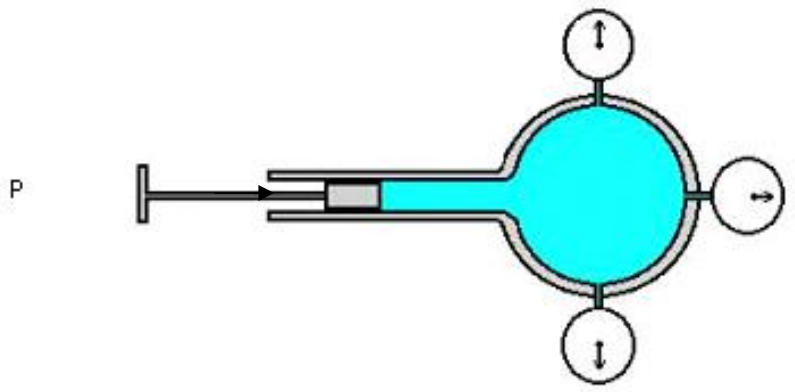
« Dans un liquide en équilibre de masse volumique uniforme, la pression est la même en tout point du liquide et cela aussi longtemps que ces points sont à la même profondeur. »

Donc :

- Toute variation de pression exercée en un point d'un liquide en équilibre se transmet intégralement dans toutes les directions.

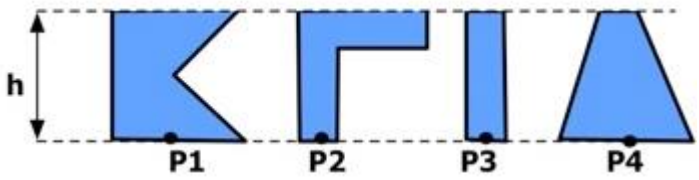
Exemple :

Si en un point quelconque d'un liquide homogène en équilibre, la pression vient à être modifiée, cette modification affecte intégralement et instantanément la pression en tout point du liquide en agissant dans toutes les directions avec la même valeur.



Un autre principe est applicable :

- La pression sur le fond d'un liquide dans un contenant ouvert dépend de la hauteur de la colonne de ce dernier ainsi que de sa densité et non de sa forme.



P1 = P2 = P3 = P4

La formule de la pression à une profondeur donnée dans un fluide homogène en équilibre peut donc s'exprimée par :

$$p = r \acute{} \; g \acute{} \; h$$

p = pression [Pa]
ρ = masse volumique [kg/m^3]
g = accélération de la pesanteur [m/s^2]
h = hauteur [m]

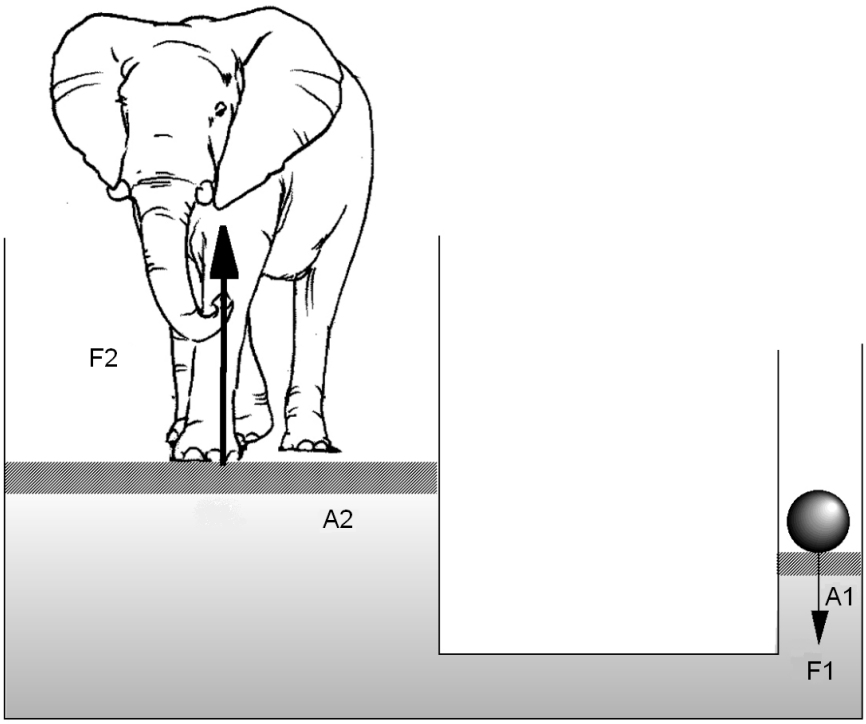
Du principe de Pascal découlent 3 règles :

- égalité de pression;
- égalité du volume déplacé;
- égalité de travail.

Avec l'égalité de pression, l'équation suivante peut-être écrite :

$$p = \frac{F1}{A1} = \frac{F2}{A2}$$

L'application la plus connue de cette formule est le vérin hydraulique :



Le rapport de la force F1 sur la surface A1 est le même que le rapport F2 sur A2.

6. La pression

Le travail du machiniste sur une tonne pompe est un travail qui demande concentration car, hormis la problématique de la quantité d'eau, il doit être en mesure de gérer en tout temps la pression de refoulement de la pompe à incendie en fonction de l'évolution de l'intervention.

Trois types distincts de pression peuvent être définis :

- la pression atmosphérique;
- la pression statique;
- la pression dynamique.

La connaissance de la pression atmosphérique est utile pour comprendre l'aspiration dans la pompe à incendie.
Les pressions statiques et dynamiques sont quant à elles utilisées pour le travail du machiniste.

La pression dynamique réglée par le machiniste varie entre autres, en fonction de l'agrégat auquel il donne de l'eau. Les fabricants donnent toujours une pression de travail de cet agrégat et il est important de s'y tenir.

6.1. La pression atmosphérique

L'atmosphère terrestre est l'enveloppe gazeuse entourant la Terre. Elle se compose en majeur partie de 2 gaz : l'azote et l'oxygène. Quelques autres gaz rares viennent compléter ce mélange.

La pression atmosphérique est la pression qu'exerce ce mélange gazeux constituant l'atmosphère sur une surface quelconque au contact de cette atmosphère.

Cette pression varie avec:

- l'altitude;
- la météo.

La pression atmosphérique peut se mesurer à l'aide d'un baromètre à mercure dont le principe fut découvert par Torricelli en 1664 (voir chapitre aspiration).

La pression atmosphérique dépend donc de l'altitude. Plus on monte en altitude, moins la pression atmosphérique est grande car moins il y a de masse d'air au-dessus du point de mesure (la pression dépend de la hauteur, principe de Pascal).
Afin d'avoir un ordre d'idée, cette masse est quantifiable. Elle représente 1,29 [kg/m^3] au niveau de la mer à 20 [°C].

Cette diminution de pression est exponentielle, mais à des altitudes viables, la courbe est quasi linéaire.

Sa mesure de référence se situe au niveau de la mer, elle est de :

1013,25 Hectopascal [HPa]

1013,25 [HPa] = 101325 [Pa] = 1013,25 [mbar]= 1,01 [bar]

La météo influence également la pression atmosphérique. L'air froid est dense, il fait monter la pression contrairement à l'air chaud qui est plus léger et fait descendre la pression.

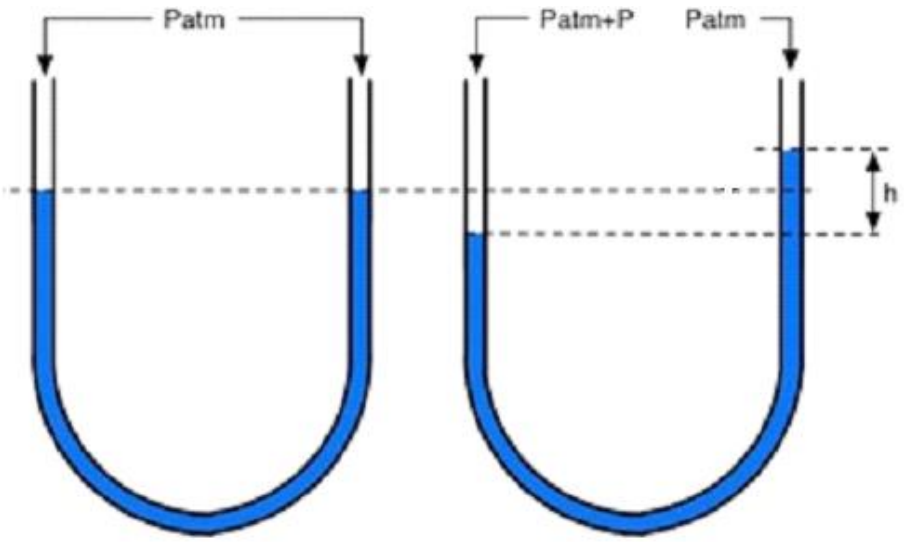
Cette fluctuation due aux conditions météorologiques est très faible et sera négligée pour les calculs liés aux hauteurs d'aspiration, seule l'altitude sera prise en compte.

6.2. La pression statique

La pression statique est la pression dans un liquide au repos.

Lorsqu'on veut déterminer une pression statique en un point dans un contenant ouvert, elle est tout simplement égale à la hauteur qui se trouve au-dessus de ce point.

Exemple : Le manomètre en U. Ajouter à la pression atmosphérique Patm dans le tube de gauche une pression P, on obtient dans le tube de droite une hauteur h égale à la pression P en [mCE].



Pour un machiniste, une pression statique représente la pression à l'intérieur de sa pompe sans consommateur.
Cette pression doit être réglée et sera atteinte avant d'ouvrir une vanne et de passer en pression dynamique.

6.3. La pression dynamique

La pression dynamique est la pression dans un liquide en mouvement.

Elle est toujours inférieure à la pression statique. Pourquoi ?

Parce que tout liquide en déplacement subit une perte de charge, donc une chute de pression liée à plusieurs phénomènes (voir chapitre perte de charge).

La perte de charge soustraite à la pression statique, nous donne la pression dynamique.

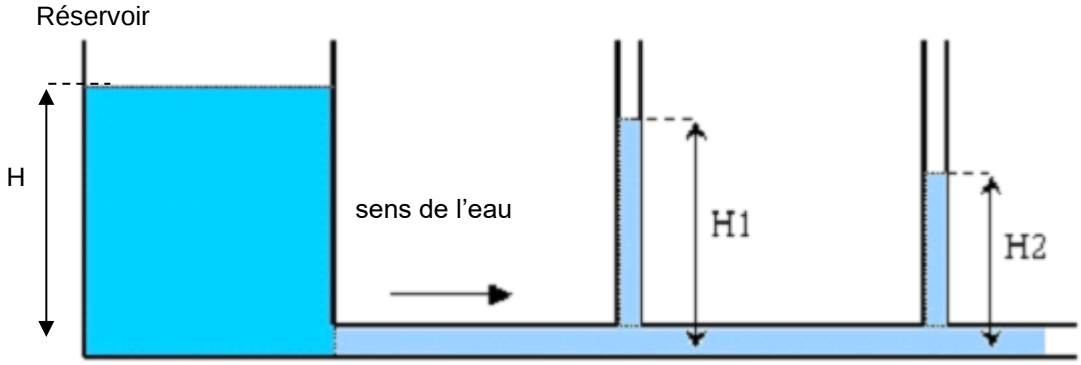
Exemple :

Une conduite est alimentée par un réservoir. Deux tubes verticaux y sont reliés.
En équilibre, la pression mesurée dans la conduite est uniformément égale à la hauteur de liquide H, c'est une pression statique.
Mais, si au bout de la conduite, l'eau peut sortir et se trouve mise en mouvement, c'est une pression dynamique.

Dès lors, 2 constats peuvent être effectués dans les tubes verticaux :

- les hauteurs H1 et H2 sont inférieurs à celle du réservoir H
- plus le tube est loin du réservoir, plus la hauteur de l'eau est faible (H1 > H2).

Cette différence est liée aux pertes de charges.



sortie de l'eau

Application : sur le manomètre d'une pompe indiquant la pression de refoulement, celle-ci diminuera au moment de l'ouverture d'une vanne. Cette ouverture créera un mouvement du liquide et ainsi, il en résultera une pression dynamique.

7. Les pompes

La pompe est la pièce maîtresse contre la lutte des incendies. Elle a pour but de déplacer un liquide d'un point à un autre, en l'aspirant et en le refoulant.
Une pompe est un appareil qui transforme une énergie mécanique en énergie hydraulique.

Dans le monde des sapeurs-pompiers, c'est l'eau qui est principalement manipulée mais l'émulsifiant ou les produits chimiques sont des liquides fréquemment rencontrés.

Les constructions des pompes, leurs capacités de débits et de pressions peuvent être bien différentes. C'est pourquoi elles peuvent être divisées en 2 grands groupes :

- les pompes volumétriques (alternatives et rotatives);
- les pompes centrifuges.

Dans les tonnes-pompes ou les motopompes, les 2 sortes de pompes peuvent être utilisées mais elles n'ont pas la même fonction !

Les pompes volumétriques sont généralement utilisées comme pompe à injection d'émulsifiant ou comme pompe d'amorçage.

Les pompes centrifuges sont utilisées comme pompes principales afin d'amener l'eau à l'objectif.

Pompe à vapeur Magirus 1900

Autopompe Brändle 2008

7.1. Les pompes volumétriques

Les pompes volumétriques ne sont quasi plus utilisées comme pompes principales pour la lutte contre l'incendie. Elles restent indispensables pour leur capacité, contrairement aux pompes centrifuges, à créer une aspiration (voir chapitre aspiration).

Elles se caractérisent par une forte augmentation de la pression, un débit faible voire saccadé.

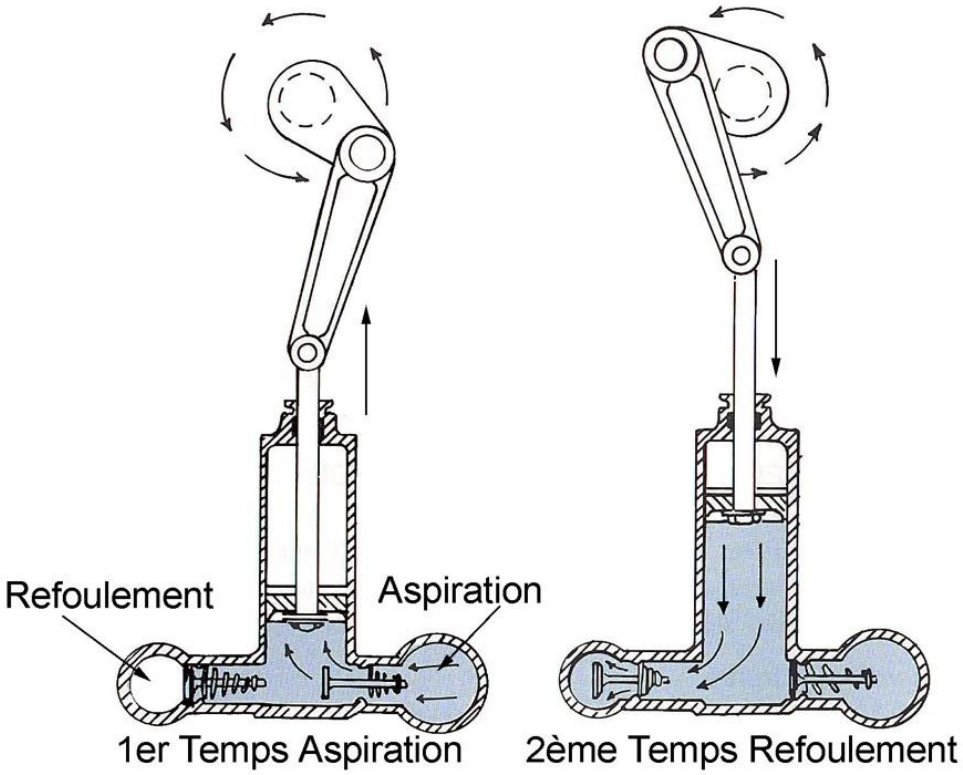
Fonctionnement :

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile, rigoureusement ajusté. Son fonctionnement repose sur le principe suivant :

- exécution d'un mouvement cyclique;
- lors d'un cycle, le volume déterminé de liquide pénètre dans un compartiment avant d'être refoulé à la fin.

Ce mouvement permet le déplacement du liquide entre l'orifice d'aspiration et l'orifice de refoulement.

La pompe à piston est la plus simple et la plus ancienne des pompes volumétriques et schématise bien le principe de ce type de pompe :



Il existe beaucoup de types de pompes volumétriques, tels qu'à pistons, à membranes, à palettes, à rouleaux, à engrenages, à vis, etc.

Leur principe de fonctionnement reste identique, se basant sur un déplacement de volume.

7.2. Les pompes centrifuges

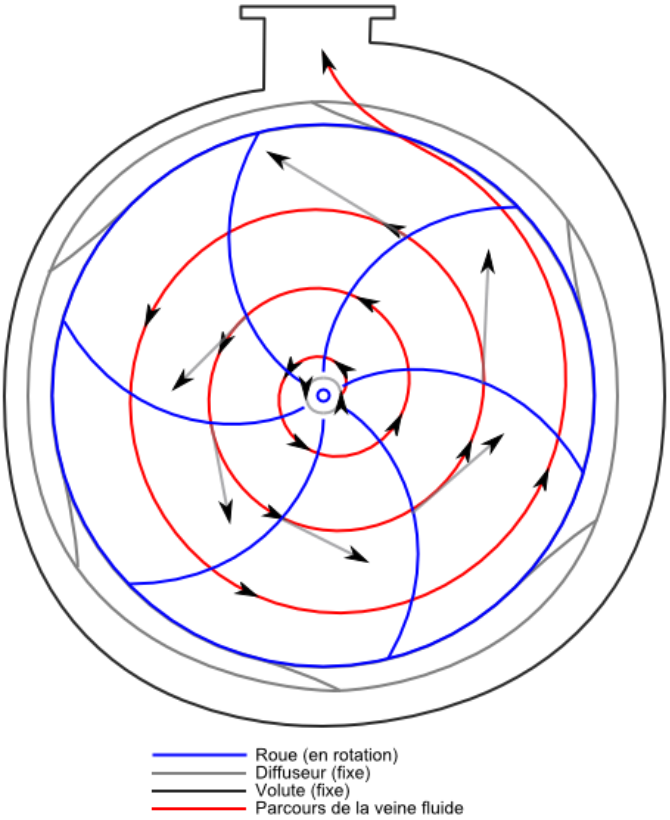
Les pompes centrifuges utilisées chez les sapeurs-pompiers sont fortement appréciées car elles permettent d'avoir une plage d'utilisation intéressante : de 2 à 25 [bar] en pression de sortie et un débit allant jusqu'à 10'000 [ℓ/min] ! Elles sont moins chères qu'une pompe volumétrique et demandent peu d'entretien.

Fonctionnement :

L'adjectif centrifuge signifie : qui tend à éloigner loin du centre de rotation.
Les pompes centrifuges sont composées d'un rotor (roue) munis de diffuseurs en forme de spirale ce qui a pour effet de chasser l'eau vers l'extérieur et ainsi, transformer l'énergie cinétique en énergie de pression.

Schéma du principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge, vue de face :

L'entrée d'eau se fait par l'axe de rotation. L'eau est ensuite centrifugée par la rotation de la roue (rotor).



L'augmentation de la pression et du débit se fait avec l'augmentation de la vitesse de la roue. La roue étant entraînée grâce au moteur du camion, un machiniste désirant augmenter la pression d'une lance, augmentera le régime moteur du camion.

Rotor d'une pompe centrifuge

Afin d'augmenter la pression de sortie, les pompes centrifuges peuvent être équipées de plusieurs rotors montés sur le même arbre de transmission. L'eau circule ainsi d'un rotor à l'autre et une augmentation de pression se produit à chaque fois. Dans ce cas, on les appellera des pompes centrifuges à x (nombres) étages. Le nombre d'étages correspond au nombre de rotors.

Les pompes centrifuges ne peuvent pas effectuer d'aspiration car leurs principes de construction favorisent l'espace entre les différentes parties. Elles ont donc besoin d'être remplies d'eau pour fonctionner, par un moyen auxiliaire, qu'on appelle système d'amorçage (voir chapitre système d'amorçage).

Pompe Godiva 7500 [ℓ/min] à 10 [bar].

8. L'aspiration

L'alimentation d'une pompe peut se faire de plusieurs manières. Soit "en charge" (par une citerne au-dessus de la pompe ou en relais), soit "en aspiration".

L'aspiration n'est quasiment plus utilisée surtout en milieu urbain mais très pratique en campagne quand une rivière ou un puit est à proximité et que le point d'eau du réseau est éloigné.

L'aspiration dans les pompes est possible grâce à la pression atmosphérique.

C'est la pression de l'air sur le plan d'eau ainsi que le vide effectué par la pompe d'amorçage qui permet l'arrivée de l'eau à la pompe.

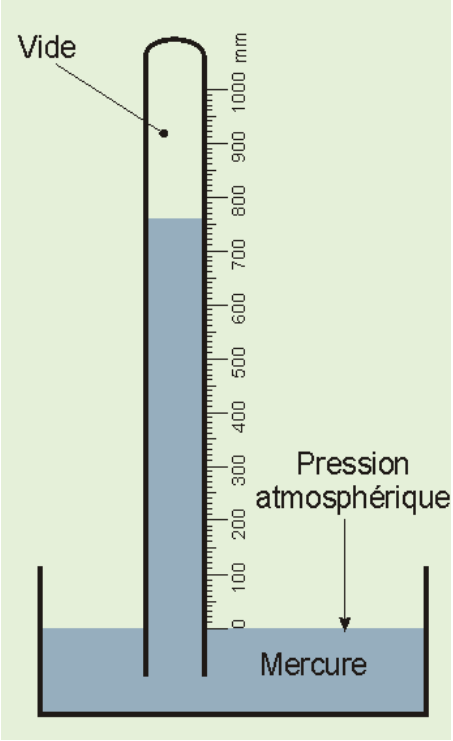
La mise en aspiration consiste à créer un vide, en expulsant l'air dans la conduite d'aspiration et le corps de la pompe. Ainsi, l'eau sera poussée par la pression atmosphérique jusqu'au corps de pompe.

Comme décrit auparavant, l'altitude est le facteur principal qui détermine une hauteur d'aspiration.

Ce phénomène s'explique par le principe de Torricelli.

En 1644, pour trouver une raison à l'impossibilité pour les fontainiers de Florence d'aspirer l'eau à plus d'une dizaine de mètres de hauteur, Torricelli reprend les travaux de Galilée. Il remplit avec du mercure (densité ρ = 13,6 [kg/m^3]) un long tube de verre qu'il retourna ensuite dans un récipient contenant aussi du mercure.
Il constate alors que le mercure descend jusqu'à une hauteur de 760 [mm] indépendamment du diamètre du tube. Cette hauteur de la colonne de mercure est toujours constante à quelques petites variations près d'un jour à l'autre.

Torricelli interpréta ce résultat en affirmant que c'est la pression exercée par le poids de l'atmosphère qui "pousse" le mercure dans le tube.



Le poids d'une colonne de mercure de 760 [mm] de hauteur est équivalent au poids d'une colonne d'eau de même diamètre et de 10,33 [m] de hauteur. Avec cette expérience, Torricelli put donc expliquer qu'il est impossible de pomper de l'eau par aspiration à plus de 10,33 mètres du niveau de la mer.

Cette valeur est théorique puisque d'autres facteurs viennent se greffer et diminuent cette hauteur, notamment :

- L'altitude, qui a pour effet de faire diminuer la pression atmosphérique comme expliqué au chapitre sur la pression atmosphérique.

- La température, car l'eau émet des vapeurs à partir de 4 [°C] et ces dernières diminuent la qualité du vide. Exemple : à 15 [°C], la perte est de 17, 1 [mbar].

- Les entrées d'air intempestives dans les tuyaux d'aspiration ou dans la pompe dues par exemple à la mauvaise étanchéité des joints.

- Exemple pour une hauteur d'aspiration au niveau de la mer :

$$Haspi = \frac{h \times \rho}{1000}$$

Haspi = hauteur d'aspiration [m].
h = hauteur du mercure à l'altitude désirée [mmHg] (pression barométrique).
ρ = densité du mercure.
1000 = facteur de division pour la transformation d'unité.

Pour une hauteur d'aspiration au niveau de la mer : 760 [mmHg].

$$Haspi = \frac{760 \times 13.6}{1000} = 10.33[m]$$

On estime, toutes déductions faites, que la hauteur d'aspiration théorique aura un facteur de rendement de 0.8.

Il faut multiplier cette hauteur théorique par ce facteur :

$$10.33 \times 0.8 = 8.26[m]$$

La hauteur pratique d'une aspiration au niveau de la mer est donc de 8.26 [m].

Pour trouver la hauteur de mercure à l'altitude désirée, une diminution de :

[mmHg] par 100 [m] d'altitude sera pris en compte.

Exemple pour une hauteur d'aspiration à Zermatt :

Altitude à Zermatt : 1620 [m].

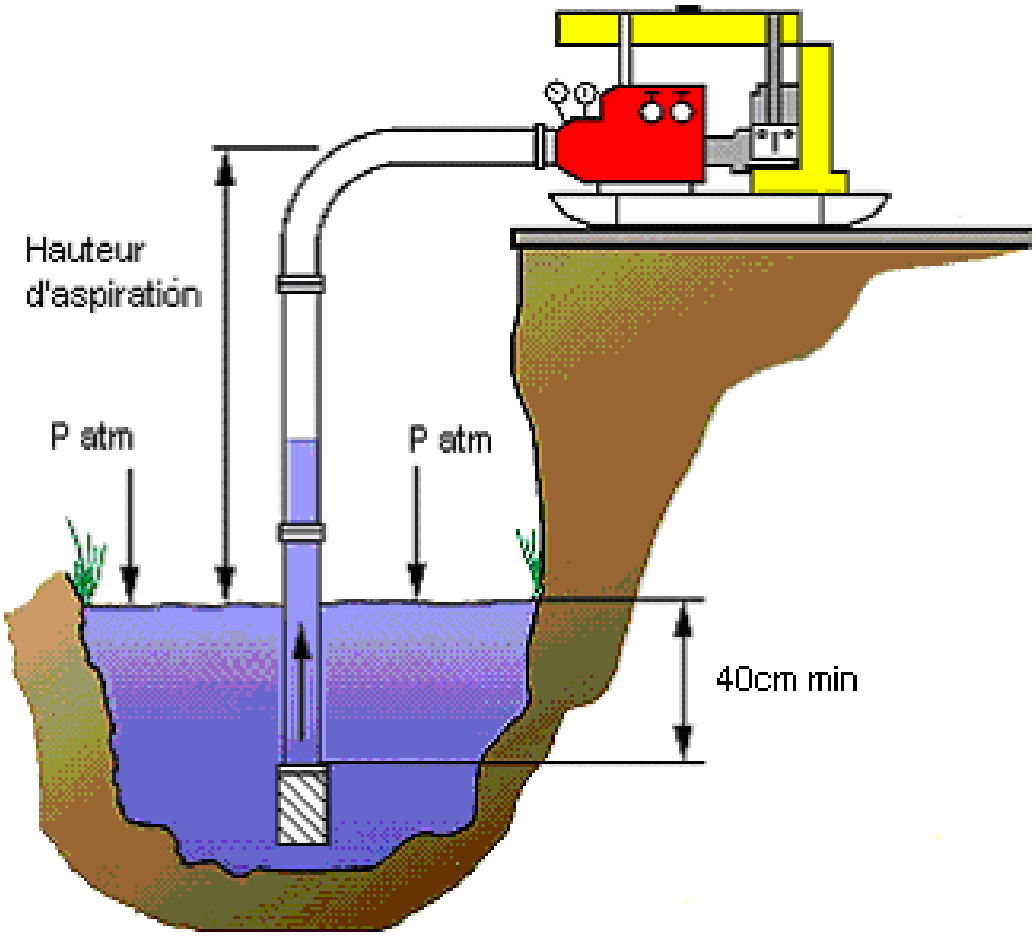
Hauteur de mercure à Zermatt : 760 - 162 = 598 [mmHg].

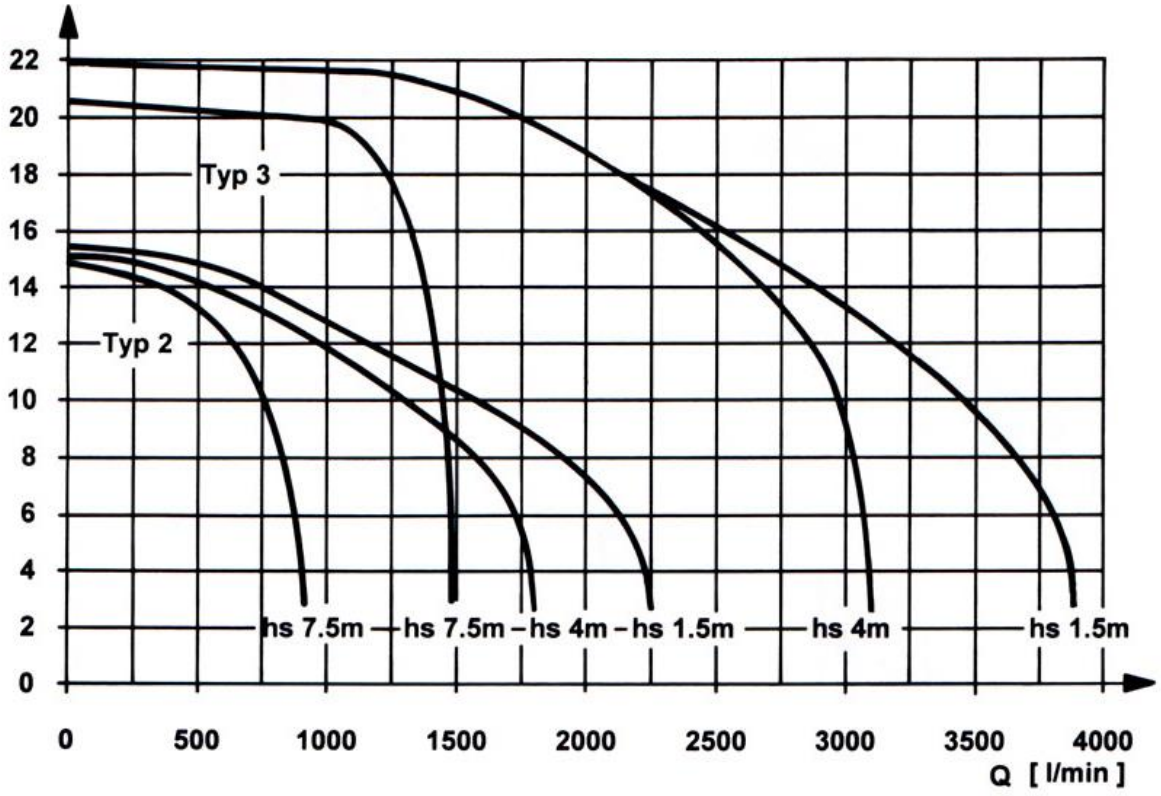
$$Haspi = \frac{h \times \rho}{1000} \times 0.8$$

$$Haspi = \frac{598 \times 13.6}{1000} \times 0.8 = 6.5m$$

La hauteur pratique d'une aspiration à Zermatt est donc de 6.5 [m].

Afin d'éviter la formation de tourbillon et l'infiltration d'un trop grand volume d'air dans le tuyau d'aspiration, il faut que la crépine soit plongée au minimum de 40 [cm] sous le niveau de l'eau.





Le diagramme suivant met en avant la chute du débit due à la hauteur d'aspiration.
Avec un même type de pompe mais une hauteur d'aspiration différente, le rendement ne sera pas le même.

Plus la hauteur d'aspiration est grande, moins la pompe peut fournir une quantité d'eau à une pression élevée.

Pompes centrifuges avec pression nominale de refoulement de 10 bar

Désignation abrégée	Pression de refoulement nominale p_N bar	Débit nominal Q_N l/min	Pression limite $p_{a\ lim}$ bar	Pression d'essai dynamique p_{pd} bar	Pression de fermeture p_{a0} bar
FPN 10 - 750	10	750	17	22,5	10 à 17
FPN 10 - 1000	10	1000	17	22,5	10 à 17
FPN 10 - 1500	10	1500	17	22,5	10 à 17
FPN 10 - 2000	10	2000	17	22,5	10 à 17
FPN 10 - 3000	10	3000	17	22,5	10 à 17
FPN 10 - 4000	10	4000	17	22,5	10 à 17
FPN 10 - 6000	10	6000	17	22,5	10 à 17

9. La cavitation

La cavitation peut se résumer en une phrase :

La cavitation est une formation de bulles de vapeur due à une baisse de pression.

Elle apparaît lorsque :

- la pompe cherche à aspirer de l'eau plus vite qu'elle ne peut en fournir;
- qu'il y a peu de pression de refoulement et un grand débit (débit libre).

Afin d'expliquer au mieux ce phénomène destructeur de pompes, les phases de ce phénomène ont été séquencées :

- A l'entrée de la pompe, l'eau est soumise à une dépression.

- Cette dépression fait descendre la pression de l'eau en dessous de sa pression de vapeur saturante (pression à laquelle un fluide passe de l'état liquide à l'état gazeux).

- Sans changer de température, une partie de cette eau se met en ébullition et il s'en dégage des bulles de vapeur.

- Ce mélange eau – vapeur arrive dans la pompe où se produit l'élévation de pression produite par le rotor.

- La pression engendrée par la pompe sur ce mélange est plus importante que la pression de vapeur saturante.

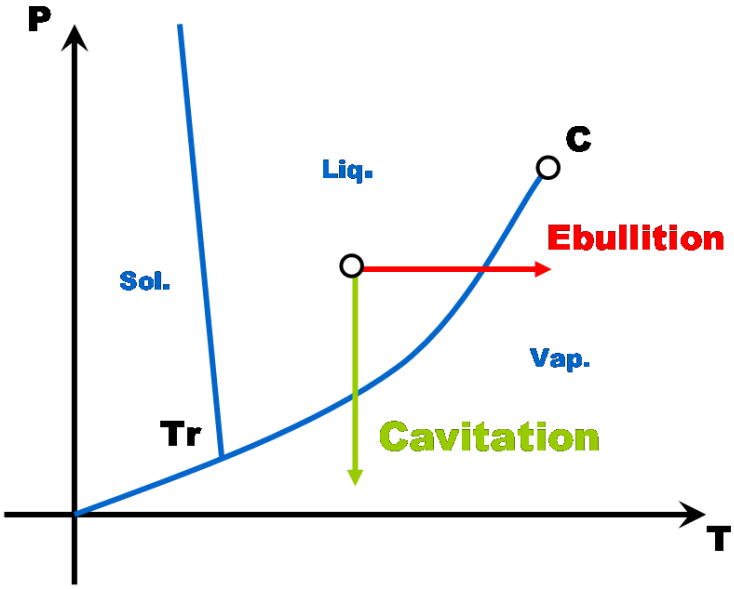
- Cela a pour effet de condenser (revenir à l'état liquide) les bulles de gaz au contact du rotor.

- Il se produit une implosion de bulles qui peut être si violente que la pression et la température à l'intérieur de ces bulles peuvent être très élevées (plusieurs milliers de bars, plusieurs milliers Kelvin)

- Cette implosion émet une onde de choc dans le liquide qui permet de disperser, désagglomérer ou briser des particules solides, ou encore de nettoyer ou éroder des surfaces solides.

Tableau de la réaction de l’eau entre la pression et la température :

Une goutte d’eau se vaporise soit par une augmentation de la température, soit par une diminution de la pression



Par ce phénomène répété,

une pompe qui cavite s'use rapidement !

La cavitation se caractérise par un bruit de gravier à l’intérieur de la pompe.

Rotor ayant subi le phénomène de cavitation.

Un moyen afin d’arrêter ce phénomène et ainsi éviter de détruire la pompe est la diminution de la vitesse de rotation.

En réduisant les tr/min, le débit de la pompe diminuera et l’équilibre sera rétabli.

10. Système d'amorçage

Pour fonctionner, une pompe centrifuge doit être remplie d'eau. Si l'eau provient du réservoir d'eau de la tonne, la pompe se remplit par gravitation. En revanche, si on désire faire une aspiration, un système auxiliaire est nécessaire afin d'effectuer le travail qu'une pompe centrifuge ne peut pas faire.

Ce système est appelé "système d'amorçage".

Un système d'amorçage peut-être couplé avec la pompe centrifuge. Il peut s'enclencher dès que la pression est trop basse et se déclencher dès que la pompe est en charge.
Si ce système s'enclenche automatiquement, alors le nom communément employé prend tous son sens : "système autoamorçant".

Les principaux systèmes utilisés sont :

- La pompe auxiliaire

  Ce système est très répandu et fonctionne en utilisant une pompe volumétrique de type à membrane ou à piston
- L'anneau d'eau

  Principe identique aux pompes volumétriques mais utilisant un déplacement de volume air-eau afin de créer l'aspiration.
- L'éjecteur de gaz d'échappement

  Ce système fonctionne grâce au principe du venturi en utilisant les gaz d'échappement. On les trouve principalement sur des motopompes.

11. L'Elévation manométrique totale (EMT)

La pompe doit fournir une pression équivalente à celle correspondante à la différence entre l'entrée et la sortie. On appelle cette différence :

L'élévation manométrique totale.

Deux cas de figure peuvent se présenter pour le calcul de cette EMT :

- Pompe en aspiration.

Dans ce cas, l'EMT sera l'addition entre la hauteur d'aspiration exprimée en [mCE] et la pression de refoulement.

- Pompe en charge.

Quand la pompe est en charge, L'EMT correspondra à la pression de refoulement moins la pression d'entrée.

Cette élévation peut s'exprimer en [bar] ou en [mCE].

En mettant en relation l'EMT et le débit, on obtient un rendement qui est propre à chaque pompe et la caractérise.

La lecture du diagramme ci-dessous permet un constat flagrant :

À un certain débit, l'EMT chute drastiquement et ce, en fonction du type de pompe.

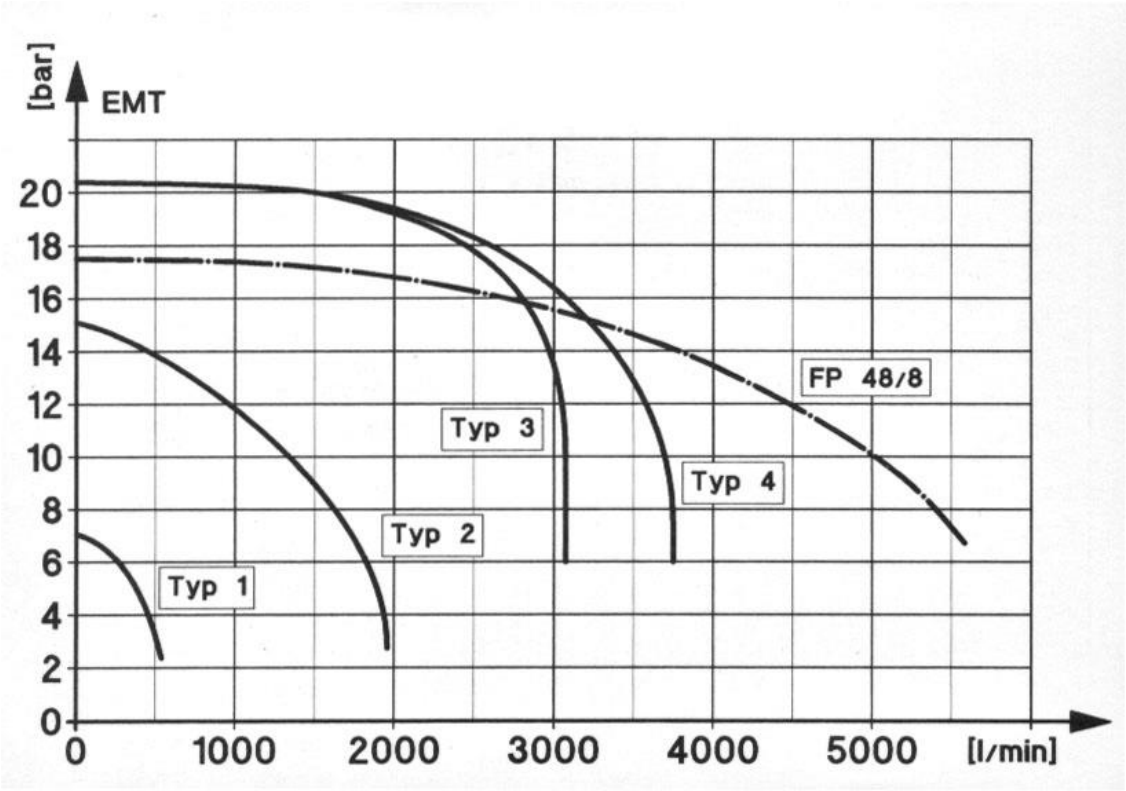


Tableau de la marque Vogt.

Le choix d'une pompe, s'effectue en fonction de ces besoins. Ces besoins sont la relation EMT – débit.

12. Les vannes

Les vannes sont des éléments indispensables dans un dispositif hydraulique. Elles servent à arrêter ou à modifier un débit (dans le cas d'une lance à débit variable).
Le dispositif intérieur de fermeture (afin de stopper le débit) peut-être différent d'un type de vanne à une autre et ce, en fonction de son utilité et du liquide par lequel elle est traversée.

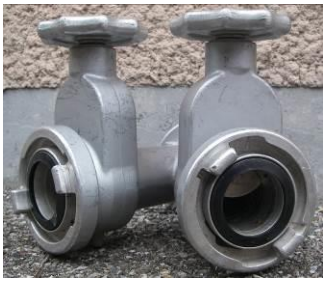
La commande de fermeture/ouverture peut être effectuée de différentes manières :

- manuellement, par levier ou volant;
- pneumatiquement;
- électriquement.

Afin de limiter les coups de bélier, les vannes à commandes manuelles se manipulent doucement !

Vanne papillon à commande manuelle par un levier

Vanne à boule, à commande manuelle



Vanne guillotine, à commande manuelle

Vanne à boule, à commande pneumatique

Vanne à boule, à commande électrique

Avec les technologies qui évoluent, d'autres systèmes tels que des débitmètres, des sondes à pression peuvent apparaître à proximité d'une vanne.

13. Phénomènes

Un certain nombre de phénomènes vient se greffer dès que l'eau est en mouvement.
Les phénomènes traités sont :

- les pertes de charges;
- le coup de bélier;
- la force de recul.

Les 2 premiers cas sont liés au travail du machiniste. Quant à la force de recul, le porte-lance en fera vite les frais s'il n'apprend pas à la dompter !

13.1. Perte de charge

La perte de charge est la dissipation de l'énergie hydraulique au cours d'un déplacement de liquide d'un point A à un point B. C'est un phénomène omniprésent, dont le machiniste doit absolument tenir compte à chaque fois qu'il fournira de l'eau.

La perte de charge est aussi régie par plusieurs règles importantes :

- Elle est proportionnelle à la longueur de la conduite.
  Plus il y a de mètres de tuyaux, plus la perte de charge est importante.

- Elle est proportionnelle au carré du débit pour un même diamètre.

Si le débit double, la perte de charge sera multipliée par 4.

- Elle est indépendante de la pression, seul le débit compte.

La pression n’intègre pas la notion de vitesse contrairement au débit. Et quand la vitesse augmente, le frottement augmente.

- Elle est inversement proportionnelle au diamètre du tuyau.

Plus le diamètre est important, moins il y a de pertes de charges, d’où l’avantage d’utiliser des conduites de transport de diamètre important.

Il existe plusieurs types de pertes de charges :

- les pertes de charges linéaires produites par le frottement de l’eau sur les parois des conduites;
- les pertes de charges singulières produites par tous les phénomènes locaux tels que les changements de section ou de direction de la conduite, du passage de l’eau au travers de divisions, etc.
- les pertes de charges liées au dénivelé positif.

L’addition de tous ces facteurs ajoutée à la pression désirée à la fin de la conduite déterminera la bonne pression de refoulement à régler à la pompe !

Comment se calcule une perte de charge?

Il faut tout d’abord tenir compte des 3 facteurs mentionnés ci-dessus.

Les pertes de charge linéaires sont quantifiables à l’aide de diagrammes ou de tabelles (voir chapitre diagrammes et tabelles).

Les pertes de charges singulières sont impossibles à chiffrer dans la pratique. Comment chiffrer une perte de charge résultante d’un tuyau qui change de direction ?
C’est pourquoi ces pertes de charges sont considérées dans le diagramme et tabelles des pertes de charges linéaires.

Le facteur dénivelé est très important car il fait augmenter la perte de charge significativement, soit de :

1 [bar] pour 10 [m] de dénivellation positive.

Mais si on ajoute à la pompe 1 [bar] pour 10 [m] positif, il ne faut pas oublier de soustraire 1 [bar] pour 10 [m] négatif !

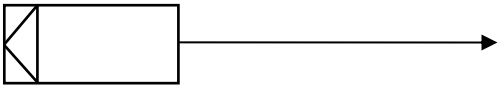
Dans la pratique, le dénivelé se compte avec 3 mètres par étage.

Exemple :

4 étages = 12 mètres = 1.2 [bar] de pertes de charges liées au dénivelé.

- Exemple 1 :

TP 50 [m] Ø55 [mm]



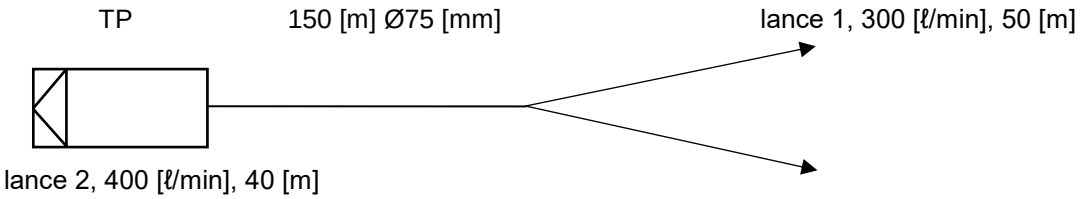
lance 1, 250 [ℓ/min]

Quelle est la pression de refoulement que doit régler le machiniste tonne en sachant que la pression de travail d'une lance est de 6 [bar] ?

1) Trouver la perte de charge à l'aide de la tabelle :
   a. lance 1, Ø55 [mm], 50 [m], 250 [ℓ/min] = 0.3 [bar].

2) Additionner la perte de charge à la pression désirée à la lance :
   a. 0.3 + 6 = 6.3 [bar].

- Exemple 2 :



Quelle est la pression de refoulement que doit régler le machiniste tonne en sachant que la pression de travail d'une lance est de 6 [bar] et que le Ø des conduites est de 55 [mm] ?

1) Trouver la perte de charge de chaque élément à l'aide de la tabelle :
   a. lance 1, 300 [ℓ/min], 50 [m] = 0.41 [bar].
   b. lance 2, 400 [ℓ/min], 40 [m] = 0.56 [bar].

2) Lorsqu'une conduite se divise, les pertes de charge ne s'additionnent pas. C'est le cas le plus défavorable qu'il faut prendre pour l'addition :
   a. Cas le plus défavorable : lance 2, 0.56 [bar].

3) Pour trouver la perte de charge du tuyau de 75 [mm], il faut prendre en considération le débit total :
   a. 300 [ℓ/min] + 400 [ℓ/min]= 700 [ℓ/min]
   b. Ø75, 700 [ℓ/min], 150 [m, selon tabelle = 1.16 [bar].

4) Pour finir, il faut additionner le tout et y ajouter la pression désirée aux lances :
   a. 1.16 + 0.56 + 6 = 7.72 [bar].

Ces valeurs sont théoriques.

En pratique, il n'est pas possible de régler une pression aussi précisément. L'important étant que le machiniste ait un ordre de grandeur quant à la pression qu'il doit régler et ce, en tenant compte des pertes de charge.

13.2. Le coup de bélier

Le coup de bélier est un phénomène inévitable mais limitable ! C'est un choc dû à l'arrêt ou la variation brusque de l'écoulement d'un liquide dans une conduite.

Cette cause est surtout due à la fermeture trop rapide d'une vanne. Elle peut aussi arriver lors d'une ouverture trop rapide d'une vanne.

Pour quantifier ce choc, il existe une formule simplifiée :

CB = 10 x Vitesse de l'eau

Exemple :

Pour une lance à main raccordée à un tuyau d'un diamètre de 55 [mm] et ayant un débit de 400 [ℓ/min], la vitesse de l'eau sera de 2.81 [m/s].

CB = 10 x 2.81 = 28.1 [bar] !

Avec un débit modeste déjà, les conséquences d'un coup de bélier sont importantes : rupture de conduite, dégât sur la pompe, soulèvement d'une lance-canon.
Ces dégâts peuvent également engendrer de graves accidents pour les intervenants !
C'est pourquoi, toute ouverture/fermeture d'une vanne doit être effectuée lentement afin de limiter ce choc.

Plus la conduite est rigide, comme par exemple une colonne sèche, plus le coup de bélier est important !

A noter que sur certains modèles de tonne-pompe, un système de protection anticoup de bélier est installé sur chaque refoulement afin de protéger la pompe.

13.3. La force de recul

Action = Réaction !

C'est par cette loi fondamentale de la physique, développée par Newton, que la force de recul se résume le mieux.

Rien ne sert d'exprimer cette force par des formules, il convient mieux d'avoir un ordre d'idée sur sa grandeur et de savoir de quoi elle dépend.

Cette force dépend :

- de la pression;
- de la section de la conduite;
- du débit de l'eau.

Un autre paramètre est la forme du jet. A pression, surface et débit égaux, un jet plein aura une plus grande force de recul qu'un jet creux.

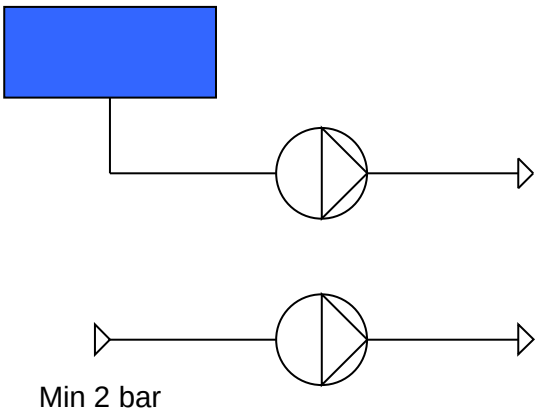
Voici quelques chiffres afin d'avoir un ordre de grandeur :

Une lance à main à jet creux débitant 400 [ℓ/min] à 6 [bar] : 22.5 [kg] de recul.
Une lance canon à jet creux débitant 2000 [ℓ/min] à 10 [bar] : 145 [kg] de recul.

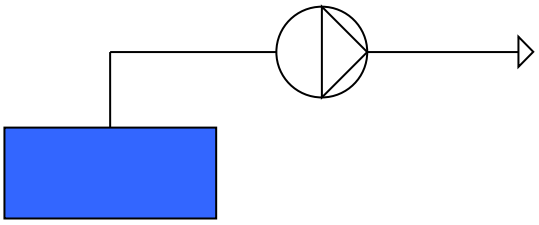
Conséquence de cette valeur, les lances-canons ne doivent pas gicler avec un angle inférieur à celui fixé par le constructeur. A cette fin, elles sont équipées d'une sécurité sous forme de butée qui peut être retirée afin de pouvoir abaisser encore plus le jet. Dans ce cas de figure, il est impératif d'arrimer la lance canon au sol à l'aide de pieux.

14. Schéma de principe

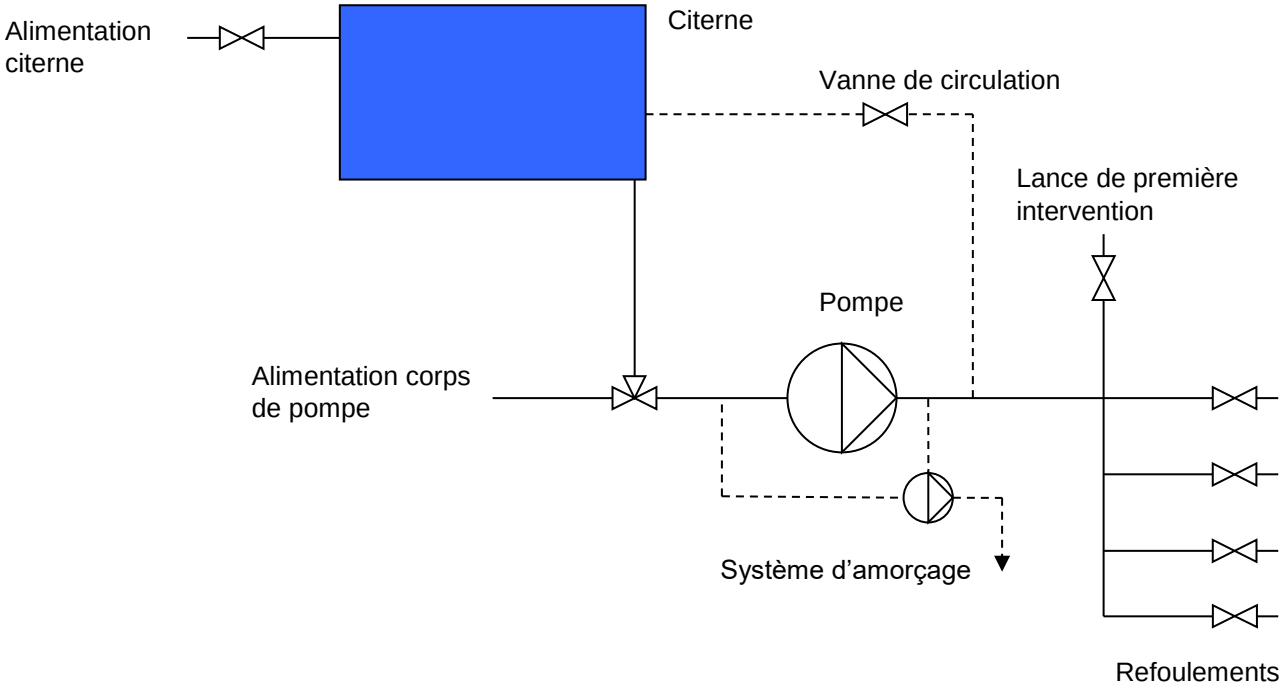
Pompe en charge



Pompe en aspiration



Cheminement de l'eau d'une tonne-pompe



15. Exercices et calculs

Exercice 1

Quel est le débit d'un tuyau de 75 [mm], sachant que la vitesse de l'eau à l'intérieur est de 3.77 [m/s] ?

Exercice 2

Quelle est la vitesse de l'eau dans un tuyau de 110 [mm] ayant un débit de 1500 [ℓ/min] ?

Exercice 3

Quelle est la pression due au coup de bélier dans un tuyau de 110 [mm] avec un débit de 2000 [ℓ/min] ?

Exercice 4

Combien font 12 [m^3/s] et 90 [m^3/h] en [ℓ/min] ?

Exercice 5

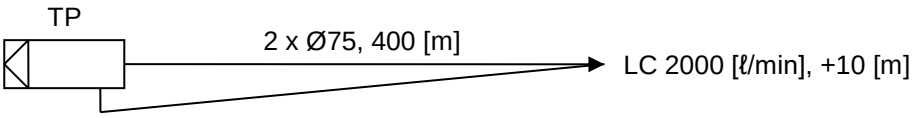
Quelle est la hauteur d'aspiration théorique dans les villes suivantes :

- Cossonay, 570 [m] ?
- Neuchâtel, 479 [m] ?
- La Chaux-de-Fonds, 1036 [m] ?
- Genève, 373 [m] ?

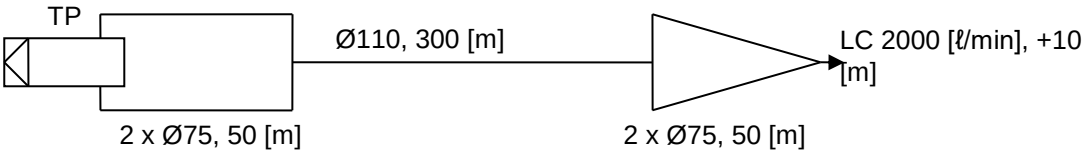
Exercice 6

Calculer la pression de refoulement que le machiniste doit fournir :

Cas 1

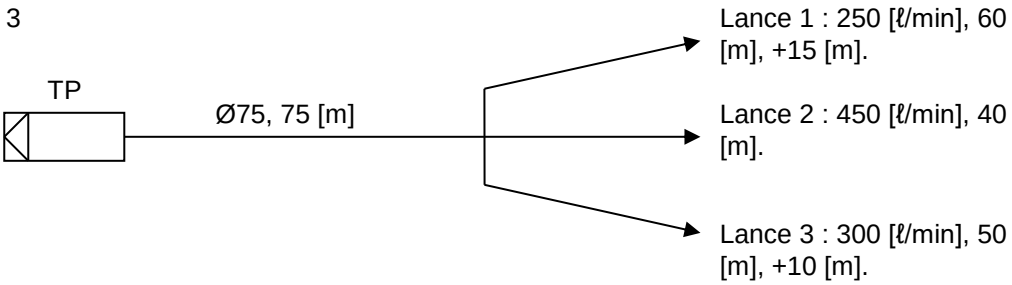


Cas 2



Quelle analyse peut-on faire entre le cas 1 et le cas 2 ?

Cas 3



16. Diagrammes et tabelles

Tabelles des pertes de charges de la FSSP.

Ø55mm

Q en [l/min]	V en [m/s]	Longueur de la conduite en [m] 10	20	30	40	50	60	80	100	150	200	300
100	0.70	0.01	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08	0.10	0.13	0.20	0.26	0.39
150	1.05	0.03	0.05	0.08	0.10	0.13	0.15	0.20	0.25	0.38	0.50	0.75
200	1.40	0.04	0.08	0.12	0.16	0.20	0.24	0.32	0.40	0.60	0.80	1.20
250	1.75	0.06	0.12	0.18	0.24	0.30	0.36	0.48	0.60	0.90	1.20	1.80
300	2.10	0.08	0.16	0.25	0.33	0.41	0.49	0.66	0.82	1.23	1.64	2.46
350	2.46	0.11	0.22	0.33	0.44	0.55	0.66	0.88	1.10	1.65	2.20	3.30
400	2.81	0.14	0.28	0.42	0.56	0.70	0.84	1.12	1.40	2.10	2.80	4.20
450	3.16	0.17	0.34	0.51	0.68	0.85	1.02	1.36	1.70	2.55	3.40	5.10
500	3.51	0.21	0.42	0.63	0.84	1.05	1.26	1.68	2.10	3.15	4.20	6.30
600	4.21	0.29	0.58	0.87	1.16	1.45	1.74	2.32	2.90	4.35	5.80	8.70
700	4.91	0.39	0.77	1.16	1.54	1.93	2.31	3.08	3.85	5.78	7.70	11.55
800	5.61	0.51	1.01	1.52	2.02	2.53	3.03	4.04	5.05	7.58	10.10	15.15
900	6.31	0.64	1.28	1.92	2.56	3.20	3.84	5.12	6.40	9.60	12.80	–
1000	7.02	0.79	1.57	2.36	3.14	3.93	4.71	6.28	7.85	11.78	15.70	–
												pertes de charge en [bar]

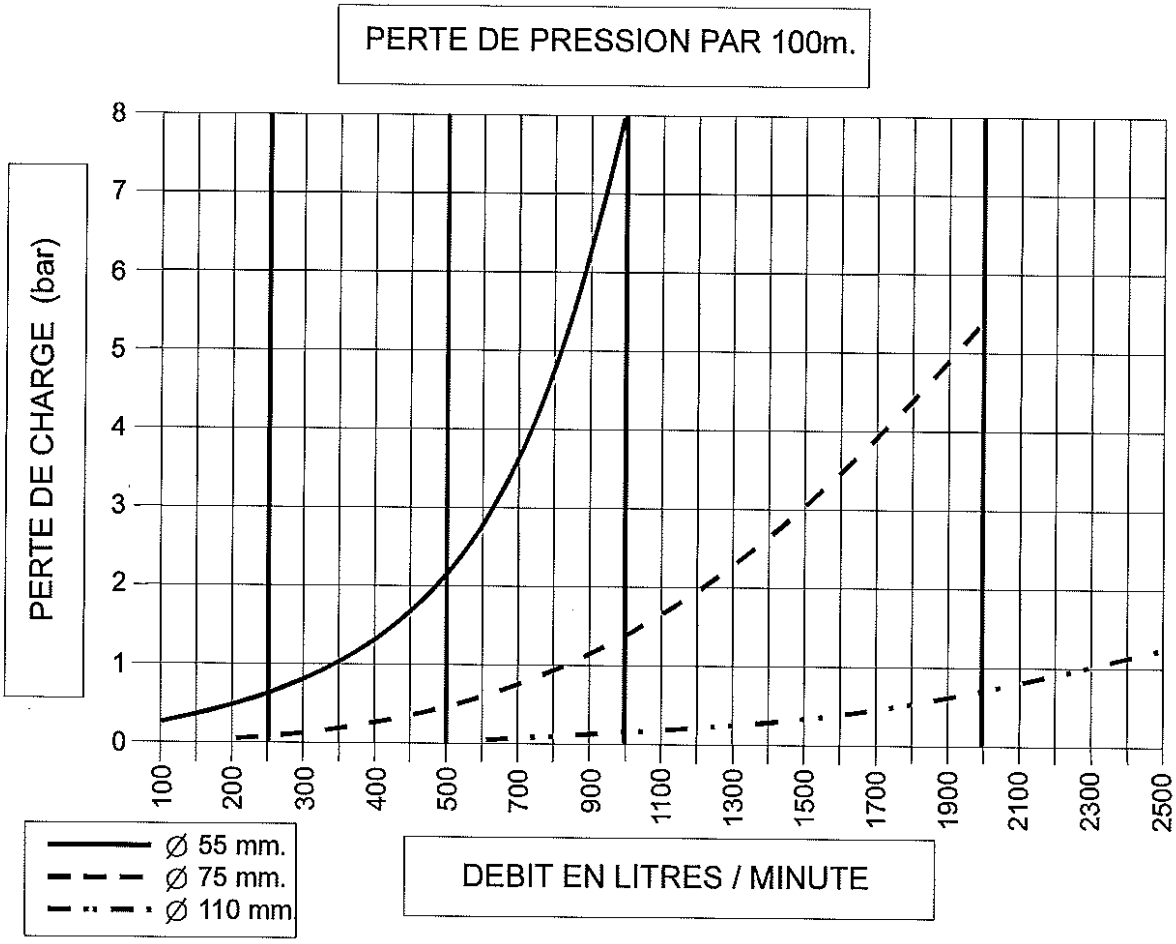
Ø75mm

Q en [l/min]	V en [m/s]	Longueur de la conduite en [m]										
		100	*150*	*200*	*300*	*400*	*500*	*600*	*700*	*800*	*900*	*1000*
200	0.75	0.07	0.11	0.14	0.21	0.28	0.35	0.42	0.49	0.56	0.63	0.70
250	0.94	0.11	0.17	0.22	0.33	0.44	0.55	0.66	0.77	0.88	0.99	1.10
300	1.13	0.16	0.24	0.32	0.48	0.64	0.80	0.96	1.12	1.28	1.44	1.60
350	1.32	0.22	0.33	0.44	0.66	0.88	1.10	1.32	1.54	1.76	1.98	2.20
400	1.51	0.28	0.42	0.56	0.84	1.12	1.40	1.68	1.96	2.24	2.52	2.80
450	1.70	0.35	0.53	0.70	1.05	1.40	1.75	2.10	2.45	2.80	3.15	3.50
500	1.89	0.42	0.63	0.84	1.26	1.68	2.10	2.52	2.94	3.36	3.78	4.20
600	2.26	0.58	0.87	1.16	1.74	2.32	2.90	3.48	4.06	4.64	5.22	5.80
700	2.64	0.77	1.16	1.54	2.31	3.08	3.85	4.62	5.39	6.16	6.93	7.70
800	3.02	0.98	1.47	1.96	2.94	3.92	4.90	5.88	6.86	7.84	8.82	9.80
900	3.40	1.25	1.88	2.50	3.75	5.00	6.25	7.50	8.75	10.00	11.25	–
1000	3.77	1.50	2.25	3.00	4.50	6.00	7.50	9.00	10.50	–	–	–
1100	4.15	1.75	2.63	3.50	5.25	7.00	8.75	10.50	–	–	–	–
1200	4.53	2.05	3.08	4.10	6.15	8.20	10.25	–	–	–	–	–
1300	4.90	2.35	3.53	4.70	7.05	9.40	11.75	–	–	–	–	–
1400	5.28	2.68	4.02	5.36	8.04	10.72	–	–	–	–	–	–
1500	5.66	3.05	4.58	6.10	9.15	–	–	–	–	–	–	–
1600	6.04	3.45	5.18	6.90	10.35	–	–	–	–	–	–	–
1700	6.41	3.85	5.78	7.70	11.55	–	–	–	–	–	–	–
1800	6.79	4.25	6.38	8.50	–	–	–	–	–	–	–	–
1900	7.17	4.70	7.05	9.40	–	–	–	–	–	–	–	–
2000	7.55	5.20	7.80	10.40	–	–	–	–	–	–	–	–
												pertes de charge en [bar]

Ø110mm

Q en [l/min]	V en [m/s]	Longueur de la conduite en [m] 100	150	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
600	1.05	0.11	0.17	0.22	0.33	0.44	0.55	0.66	0.77	0.88	0.99	1.10
700	1.23	0.14	0.21	0.28	0.42	0.56	0.70	0.84	0.98	1.12	1.26	1.40
800	1.40	0.17	0.26	0.34	0.51	0.68	0.85	1.02	1.19	1.36	1.53	1.70
900	1.58	0.21	0.32	0.42	0.63	0.84	1.05	1.26	1.47	1.68	1.89	2.10
1000	1.75	0.25	0.38	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
1100	1.93	0.29	0.44	0.58	0.87	1.16	1.45	1.74	2.03	2.32	2.61	2.90
1200	2.10	0.33	0.50	0.66	0.99	1.32	1.65	1.98	2.31	2.64	2.97	3.30
1300	2.28	0.38	0.57	0.76	1.14	1.52	1.90	2.28	2.66	3.04	3.42	3.80
1400	2.46	0.44	0.66	0.88	1.32	1.76	2.20	2.64	3.08	3.52	3.96	4.40
1500	2.63	0.49	0.74	0.98	1.47	1.96	2.45	2.94	3.43	3.92	4.41	4.90
1600	2.81	0.55	0.83	1.10	1.65	2.20	2.75	3.30	3.85	4.40	4.95	5.50
1700	2.98	0.61	0.92	1.22	1.83	2.44	3.05	3.66	4.27	4.88	5.49	6.10
1800	3.16	0.67	1.01	1.34	2.01	2.68	3.35	4.02	4.69	5.36	6.03	6.70
1900	3.33	0.73	1.10	1.46	2.19	2.92	3.65	4.38	5.11	5.84	6.57	7.30
2000	3.51	0.80	1.20	1.60	2.40	3.20	4.00	4.80	5.60	6.40	7.20	8.00
2100	3.68	0.87	1.31	1.74	2.61	3.48	4.35	5.22	6.09	6.96	7.83	8.70
2200	3.86	0.94	1.41	1.88	2.82	3.76	4.70	5.64	6.58	7.52	8.46	9.40
2300	4.03	1.02	1.53	2.04	3.06	4.08	5.10	6.12	7.14	8.16	9.18	10.20
2400	4.21	1.09	1.64	2.18	3.27	4.36	5.45	6.54	7.63	8.72	9.81	10.90
2500	4.38	1.18	1.77	2.36	3.54	4.72	5.90	7.08	8.26	9.44	10.62	11.80
2600	4.56	1.26	1.89	2.52	3.78	5.04	6.30	7.56	8.82	10.08	11.34	–
2700	4.74	1.34	2.01	2.68	4.02	5.36	6.70	8.04	9.38	10.72	–	–
2800	4.91	1.43	2.15	2.86	4.29	5.72	7.15	8.58	10.01	11.44	–	–
2900	5.09	1.53	2.30	3.06	4.59	6.12	7.65	9.18	10.71	–	–	–
3000	5.26	1.63	2.45	3.26	4.89	6.52	8.15	9.78	11.41	–	–	–
												pertes de charge en [bar]

16.1. Diagramme des pertes de charges en fonction du Ø pour 100m



17. Récapitulatif des formules et unités

Surface:

$$S = \frac{\pi \times d^2}{4}$$

$$S = \pi \times r^2$$

$$S = côté \times côté$$

Pression:

$$p = \frac{F}{A}$$

Débit:

$$Q = S \times V$$

Hauteur d'aspiration :

$$Haspi = \frac{h \times \rho}{1000} \times 0.8$$

Coup de bélier :

$$CB = 10 \times V$$

Symbole	Nom	Unité SI		Relations
S	section	mètre carré	[m^2]	
π	pi	constante	3.14	
d ou Ø	diamètre	mètre	[m]	
p	pression	Pascal bar mètre colonne d'eau	[Pa] [bar] [mCE]	1 bar = 10^5 Pascal = 10 mCE
F	force	Newton	[N]	1 Newton = 1 kg x m/s^2
A	surface	mètre carré	[m^2]	
Q	débit	mètre cube par seconde	[m^3/s]	1 m^3/s = 60000 l/min
V	vitesse d'écoulement	mètre par seconde	[m/s]	
h	hauteur de mercure	millimètre de mercure	[mmHG]	
ρ (rhô)	Densité			13.6 pour le mercure
CB	coupe de bélier	kilogramme	[kg]	

Préfixe Système SI

méga	kilo	hecto	déca		déci	centi	milli	micro
M	k	h	da		d	c	m	µ
Million	Millier	Cent	Dix		Dixième	Centième	Millième	Millionième
1000000	1000	100	10	1	0.1	0.01	0.001	0.000001

<u>Sources et Références</u> :

- FSSP
- Fortec, formulaire technique
- L'Hydraulique, R-P Juillerat
- SIS Genève
- Wikipedia