

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence :/2019



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع/2019

Mémoire de Master

Filière : Hydraulique

Spécialité : Ouvrages Hydrauliques

Thème

**Etude globale sur le dimensionnement optimal
le plus économique dans les conduites forcées**

Nom et Prénom de l'étudiant :
BOUAZIZI Wafa

Encadreur :
Mr. ABDESSEMED Fouzi

Promotion Juillet 2019

Dédicace

A mes parentes

A mes frères et mes sœurs

A toutes la famille

A tout mes amies

Remerciements

*Mes remerciements vont à l'endroit de notre
Promoteur Mr. ABDESSEMED Fouzi*

*Au membre de jury qui en bien voulue examiner
Notre travail et de l'apprécier a juste valeur.*

*A tous les enseignants de hydraulique qui en
Contribués à notre formation*

A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin

A toute la promotion de l'hydraulique (2018 /2019)

INTRODUCTION GENERALE

01

Chapitre I : Les conduites forcées

I	Introduction	03
I.2	Définition	03
I.3	Principes de base	05
I.4	Les différentes phases d'énergies dans une centrale hydroélectrique	06
A	Energie cinétique	06
B	Viscosité d'un fluide	09
C	La dynamique des fluides incompressible	11
D	Débit	12
E	Conservation de la masse	14
F	Conservation du débit	14
G	Vitesse moyenne (dans la conduite forcée)	16
H	Pertes de charges	18
I.5	Ecoulement dans les conduites forcées	19
I.5.a	Ecoulement en charge en régime permanent	19
I.5.b	Ecoulement en charge en régime non permanent	26
I.5.c	Effets de la courbure des conduites forcées sur l'écoulement et les efforts sur les parois	26
I.6	Matériau de construction	33
I.7	Conclusion	42

Chapitre II : Dispositions constructives des conduites forcées

II	Introduction	43
II.1	Les différents types d'installations des conduites forcées	43
II.1.1	Conception hydraulique et exigences structurelles	43
II.1.2	Mise en place de la conduite sur le terrain	43
A	Conduites aériennes	44
B	Conduites enterrées	44

II.1.3	Le choix de l'emplacement des conduites	46
II.1.4	Les méthodes d'installation des conduites	48
II.2	Le paramètre de sécurité	51
A	Paramètres géométriques	51
B	Paramètres métallurgiques	51
C	Caractéristiques d'assemblages	51
D	Caractéristiques d'édification	51
E	Historique de l'ouvrage	51
II.3	Rôle des conduites forcées	52
II.4	Conclusion	55

***Chapitre III : Le dimensionnement le plus économique et optimal
dans les conduites forcées***

III.1	Introduction	56
III.2	Dimensionnement de la conduite forcée	56
III.2.1	Notion théorique de diamètre économique	56
III.2.2	Diamètre de la conduite forcée	57
III.3	Epaisseur de paroi	60
III.4	Conclusion	63

<i>CONCLUSION GENERALE</i>	64
-----------------------------------	----

<i>REFERENCES</i>	66
--------------------------	----

Liste des notations

V	Vitesse moyenne d'écoulement	[m/ s]
L	Longueur de conduite	[m]
D	Diamètre	[m]
A	Aire d'une section droite de conduite	[m ²]
Q	Débit volumique	[m ³ / s]
T _{ca}	Temps caractéristique	[s]
T _{cr}	Temps critique	[s]
T _{ferm}	Temps de fermeture	[s]
p	Pression statique	[Pa]
H	Hauteur piézométrique d'une section	[m]
Z	Altitude	[m]
α	Coefficient de dilatation linéaire du matériau	[°C ⁻¹]
g	Accélération terrestre	[m / s ²]
E _{eau}	Module d'élasticité de l'eau	[Pa]
σ	Contrainte	[Pa]
e	Épaisseur de conduite	[m]
ε	Déformation	[–]
R	Rayon	[m]
E _c	Module d'élasticité de conduite	[Pa]
λ	Coefficient de pertes de charge linéiques	[–]
ν	viscosité cinématique	[m ² / s]
ρ	masse volumique	[m ³ / s]

ξ	Coefficient de pertes de charge	[–]
K	Coefficients de rugosité selon Strickler	[–]
RH	Rayon hydraulique	[m]
T	couple	[N.m]
P	Puissance	[w]
n	vitesse de rotation	[tr/min]
ω	vitesse de rotation	[rad / s]
η	Rendement	[–]
I	moment d'inertie	[kg.m ²]
C	couple	[m.N]
Qe	débit d'équipement de la turbine	[m ³ /s]
Hpc	pertes de charge totales dans la conduite	[m]
η	rendement de l'unité de pompage.	

Liste Des Figures

Figure 1.1 : Centrale hydroélectrique de basse chute.

Figure 1.2 : Centrale hydroélectrique de moyenne chute.

Figure 1.3 : Centrale hydroélectrique de haute chute.

Figure 1.4 : Les quatre phases d'énergies dans une installation hydroélectrique.

Figure 1.5 : Variation de la viscosité en fonction de la température.

Figure 1-6 : tube de conduite forcée avec coude et turbine.

Figure 1-7 : Les lignes de courant entre deux sections.

Figure 1-8 : Profil des vitesses.

Figure 1.9 : Diagramme de Moody.

Figure 1.10 : conduite forcée en tuyau d'éternit.

Figure 2.1: exemple de conduite forcée aérienne, avec ses appuis sur des pilettes et ces
ancrages.

Figure 2.2 : schéma d'une installation d'une conduite forcée en fonte ductile.

Figure 2.3 : Conduite forcée.

Figure 2.4 : Conduite forcée avec des blocs d'ancrage en béton.

Figure 2.5 : conduite forcée avec blocs d'ancrage en béton et joints de dilatation.

Figure 2.6 : exemple de conduite forcée de conception rivetée.

Figure 2.7 : exemple de perte d'épaisseur localisée affectant les conduites forcées.

Figure 2.8 : Structure de conception ancienne : conduites forcées rivées.

Figure 2.9 : Structure de conception plus récente : conduites forcées soudées.

Figure 3.1 : optimisation économique.

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Différentes caractéristiques de matériaux.

Tableau 2.1: les avantages et les inconvénients des conduites

Tableau 2.2 :Les différents cas d'utilisation des conduites aérienne et enterrées

Résumé

Dans les installations hydro-électriques on utilise les conduites forcées pour transporter une quantité d'eau de la retenue qui est en générale un barrage vers les turbines située plus bas pour créer leur mouvements (énergie mécanique) qui va se transformer en énergie électrique donc cet organe joue un rôle très important dans ces installations, c'est pourquoi on doit choisir un bon dimensionnement (section optimal) de façon a faire un équilibre entre le domaine technique et le domaine économique.

تلخيص :

في المنشآت الكهرومائية ، يتم استخدام الأنابيب القسرية لنقل كمية من الماء من الخزان وهو عبارة عن سد للتوربينات الموجودة في الأسفل لإنشاء حركاتها (الطاقة الميكانيكية) والتي سوف تتحول إلى طاقة كهربائية لذلك يلعب هذا الجهاز دورًا مهمًا للغاية في هذه المنشآت هذا هو السبب في أننا يجب أن نختار مقياسًا جيدًا (القسم الأمثل) وذلك لموازنة المجال التقني والمجال الاقتصادي.

Summary:

In the hydro-electric installations the penstocks are used to transport a quantity of water of the reservoir which is generally a dam to the turbines located lower to create their movements (mechanical energy) which will turn into electrical energy so this organ plays a very important role in these facilities that is why we must choose a good sizing (optimal section) so as to balance the technical field and the economic field.

Introduction Générale

L'hydroélectricité est basée sur un concept simple : profiter de l'énergie gravitationnelle que produit la chute et le débit de masses d'eau en vue de la convertir en énergie mécanique puis électrique par le moyen d'un groupe turbine-alternateur.

La création d'un réservoir en amont permet de stocker l'eau, donc une énergie potentielle, puis de la turbiner et produire l'électricité « à la demande ». L'adjonction d'une fonction pompage permet en outre de transformer une production excédentaire, issue par exemple de parcs éoliens ou photovoltaïques, en énergie potentielle stockée dans le réservoir et utilisable en période de forte demande.

Cette capacité de transformation réversible d'énergie potentielle en énergie électrique, associée à la grande flexibilité des installations hydroélectriques, fait du stockage hydraulique non seulement le premier mode de stockage d'énergie dans le monde (entre 94 et 99 %, selon les sources, des capacités totales de stockage d'énergie) mais également un outil précieux pour la gestion des réseaux électriques.

On peut distinguer trois types de centrales hydrauliques aptes à réaliser du stockage d'énergie :

- Les centrales des aménagements hydroélectriques « au fil de l'eau » ;
- Les aménagements hydroélectriques de pompage-turbinage ;
- Les centrales des aménagements hydroélectriques dits « de lac ».

Les centrales hydroélectriques dits « de lac » sont des aménagements pour lesquels on a construit un ouvrage (barrage) permettant de constituer une réserve d'eau (réservoir) Ces réservoirs sont reliés aux centrales hydroélectriques par des tunnels, galeries et conduites forcées, permettant ainsi d'obtenir des hauteurs de chute importantes.

Au fil du temps, ces conduites forcées font l'objet d'améliorations spectaculaires grâce à l'utilisation de matériaux de plus en plus performants mais aussi grâce à l'inventivité des ingénieurs qui les ont mis en œuvre. À titre d'exemple, à partir de 1900, le fer rivé est remplacé par l'acier rivé puis, à partir de 1910, la soudure au gaz à l'eau remplace le rivetage

jusqu'à ce qu'apparaisse la soudure à l'arc électrique. On peut alors utiliser des aciers plus performants et réaliser ainsi des conduites capables de véhiculer un débit plus important sous une même pression.

Pour chaque installation hydroélectrique, le nombre et le diamètre des conduites sont des décisions importantes qui conditionnent l'économie de l'ensemble du projet. Un petit diamètre est peu coûteux mais les pertes de charge sont plus importantes ; un gros diamètre conduit à une augmentation de l'épaisseur des tôles laquelle doit tenir compte des pressions qui s'exercent sur les parois mais aussi des coups de bélier qui peuvent être importants. Dans la revue de la Houille Blanche de 1949, Georges Ferrand cite l'exemple de la chute d'Eget qui a exigé l'installation de 7 conduites soudées au gaz à l'eau pour une chute de 750 mètres et un débit total de $5,3 \text{ m}^3/\text{sec}$, alors qu'à Malgovert, sous la même hauteur de chute, 2 conduites, pour un débit total de $50 \text{ m}^3/\text{sec}$ ont suffi.

La tendance vers la conduite unique, capable de véhiculer le maximum de débit, a conduit des constructeurs à placer des frettes sur les parois (sorte d'anneaux métalliques) pour participer à la résistance et limiter ainsi l'épaisseur de la tôle.

Notre étude s'est focalisé justement sur l'aspect du diamètre économique ou de la section la plus économique de ces conduites forcées à laquelle dépend ces installations hydro-électriques à travers trois grands chapitres ;

Tout d'abord avec le 1^{er} chapitre où on s'est focalisé sur une définition précise de ces conduites forcées passant en revue leur évolution, la loi de l'écoulement exercée sur ce type de conduites ainsi que leur matériau de construction ;

Ensuite en 2^{ème} chapitre avec les dispositions constructives des conduites forcées passant par les différents types d'installation en prenant considération le paramètre de sécurité ;

Enfin en 3^{ème} et dernier chapitre par le dimensionnement le plus économique et optimal dans les conduites forcées passant par le dimensionnement technico-économique de conduite forcée, la section économique et optimale d'une conduite forcée avec des exemples de cas de figure.

I-1- Introduction

Une conduite forcée est un ensemble de tuyaux permettant d'amener l'eau sous pression d'une retenue d'eau ou réservoir (lac ou barrage) à travers des ouvrages d'aménagements ; soit à ciel ouvert (canaux), soit des galeries fermées avec ou sans surface libre ; quand l'eau remplit entièrement la galerie on dit qu'elle est en charge (notre cas d'étude) jusqu'aux installations qui permettent de convertir l'énergie hydraulique en énergie électrique (turbines installées dans la centrale hydroélectrique).

I-2- Définition

La centrale hydroélectrique est située plus bas que la retenue à laquelle se raccorde la conduite forcée et elle supporte une pression qui est de l'ordre de la hauteur de chute sachant que les pertes de charges réduisent cette valeur.

En général les conduites forcées suivent la forme des reliefs des terrains ; pentes, obstacles,...etc. En fonction des conditions topographiques et des possibilités technologiques de construction, elles peuvent être aériennes ou souterraines, réalisées dans des matériaux divers comme l'acier, le béton armé ou précontraint, les matériaux composites (PRV, PEHD, etc.) ou bien encore la fonte.

La conduite forcée est généralement maintenue par des ouvrages de génie civil : des massifs d'ancrage permettent de bloquer la conduite dans toutes les directions et de reprendre la majorité des efforts mécaniques transmis par celle-ci ; des pilettes permettent de supporter le poids de la conduite forcée et de l'eau qu'elle contient entre deux massifs d'ancrage lorsque celle-ci est aérienne. Selon la nature du terrain, ces ouvrages de génie civil nécessitent la mise en place de tirants actifs ou passifs pour la transmission des efforts dans le sol.

Dans une centrale hydroélectrique la conduite forcée est la canalisation qui relie une source d'eau à la turbine entraînant un générateur électrique. Ce nom de conduite « forcée » résulte du fait que de fortes pressions vont s'exercer sur les parois, ce que l'on comprend bien en se souvenant que la puissance engendrée par la chute d'un corps est le produit de son poids par la hauteur de sa chute. Pour obtenir de la puissance à partir d'une chute d'eau on peut, selon les sites, ou bien privilégier le poids, donc le débit, ce qui sera le cas des basses chutes

inférieures à 50 mètres (figure 1.1) et des moyennes chutes entre 50 et 200 m (figure 1.2), ou bien privilégier la hauteur de chute (figure 1.3).

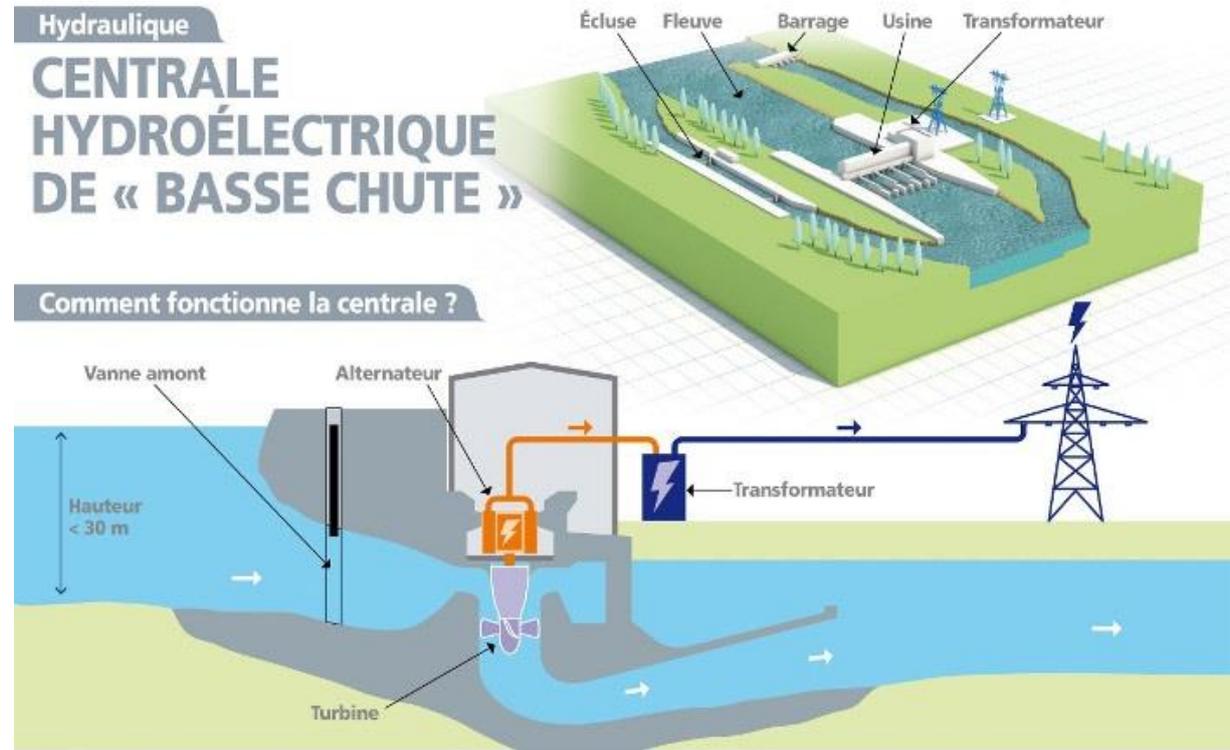


Figure 1.1 : Centrale hydroélectrique de basse chute.

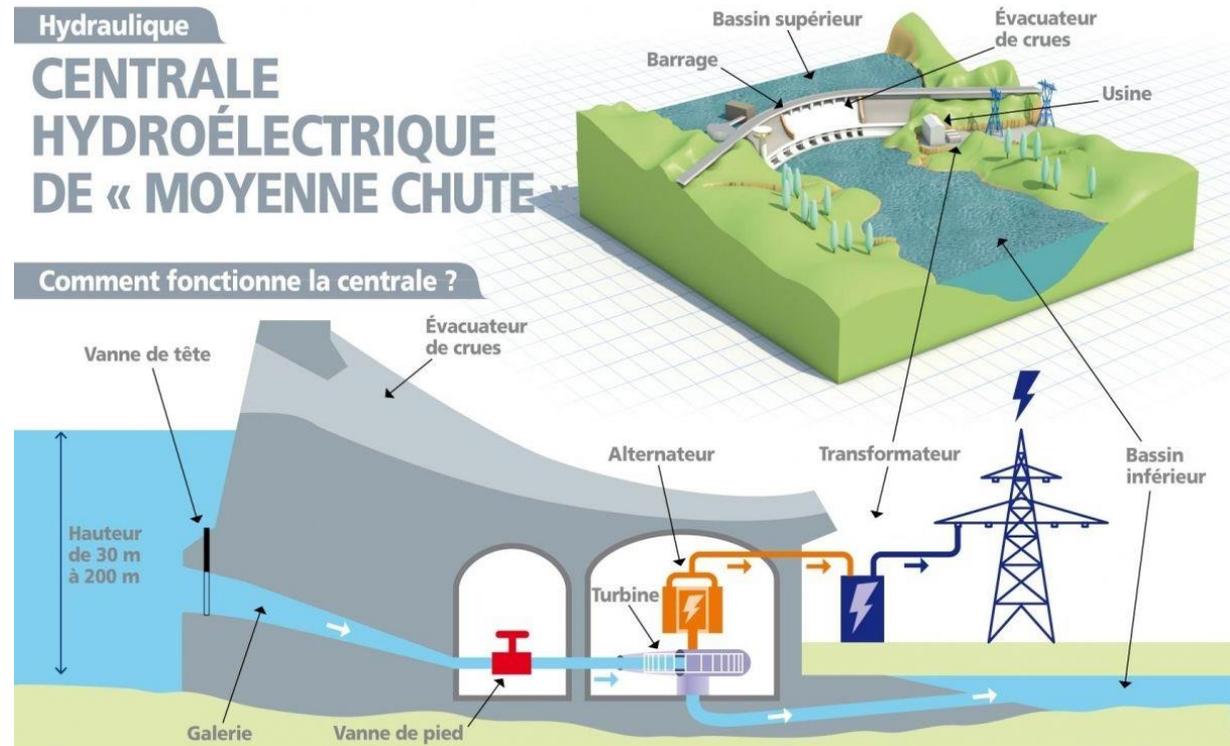


Figure 1.2 : Centrale hydroélectrique de moyenne chute.

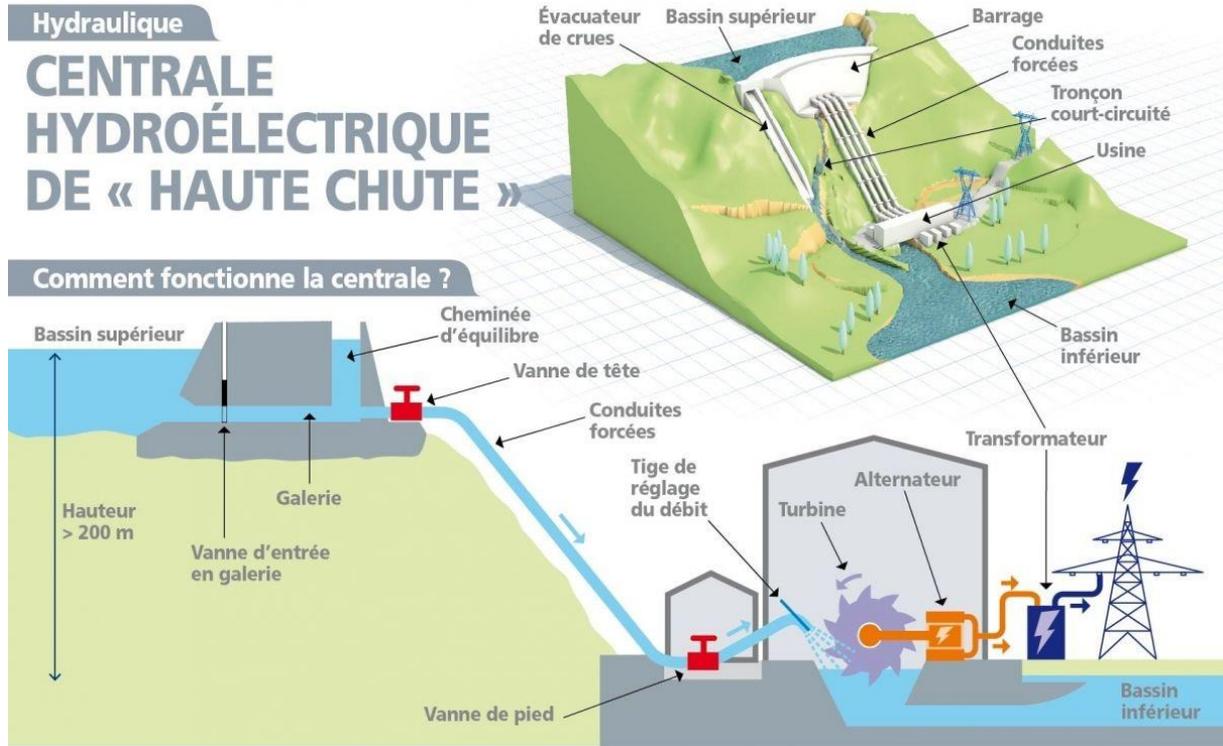


Figure 1.3 : Centrale hydroélectrique de haute chute.

I-3- Principes de base

Soit un corps de poids P tombant d'une altitude de H mètres à une altitude de h mètres. Pendant cette « chute » le corps accomplit un « travail » égal au produit du poids par la différence d'altitude $T = P \times (H-h)$. Imaginons une machine permettant d'utiliser ce travail de la pesanteur, soit un arbre horizontal reposant sur 2 paliers et portant une poulie sur laquelle est enroulé un fil soutenant le poids P . Ce poids, en tombant verticalement, fait tourner l'arbre qui va actionner un outil. En faisant abstraction des frottements divers, le travail transmis aux outils est égal à $P \times (H-h)$. Si $P = 15$ kgs $H = 20$ m $h = 12$ m le travail $T = 15 \times (20-12) = 120$ kgm.

Si maintenant le poids P met 12 secondes pour tomber la puissance produite sera de $120 \text{ kgm}/12 \text{ sec} = 10 \text{ kgm par seconde}$ ce qui sera la puissance théorique fournie par la machine. L'unité mécanique adoptée à l'origine de l'hydro-électricité a été le cheval-vapeur (CV) qui correspond à un travail uniforme de 75 kgm/sec puis on est passé à une nouvelle unité de puissance électrique le kilowatt (kW) qui correspond à un travail uniforme de 102 kgm/sec.

Chapitre 01 : Les conduites forcées

En réalité le mode de fonctionnement idéal sans frottement est irréalisable, il existe toujours des résistances passives et le travail utile sera égal au travail théorique moins le travail résistant, le rapport des deux portant le nom de rendement.

I-4- Les différentes phases d'énergies dans une centrale hydroélectrique

A- Energie cinétique

L'énergie cinétique d'un corps est l'énergie produite par ce corps du fait de son mouvement. Dans le cas d'un barrage, il s'agit de l'énergie fournie par la chute de l'eau dans la conduite forcée. Elle résulte directement de l'énergie potentielle.

Dans le cas idéal sans frottements, toute l'énergie potentielle (traduite par : $E_p = m.g.h$) est convertie en énergie cinétique (traduite par : $E_c = m.v^2/2$), d'après le théorème de Bernoulli.

Donc :

$$mgh = \frac{mV_i^2}{2}$$

d'où :

$$V_i^2 = 2gh$$

alors :

$$V_i = \sqrt{2gh}$$

Il y a bien une relation entre l'énergie potentielle et l'énergie cinétique. Il est donc facilement possible de voir un enchaînement logique, explicité par la formule, entre l'énergie potentielle et cinétique.

Chapitre 01 : Les conduites forcées

Dans le cas des barrages, cette énergie se focalise sur la chute de l'eau dans la conduite forcée .

Dans le cas des barrages, cette énergie se focalise sur la chute de l'eau dans la conduite

Forcée.

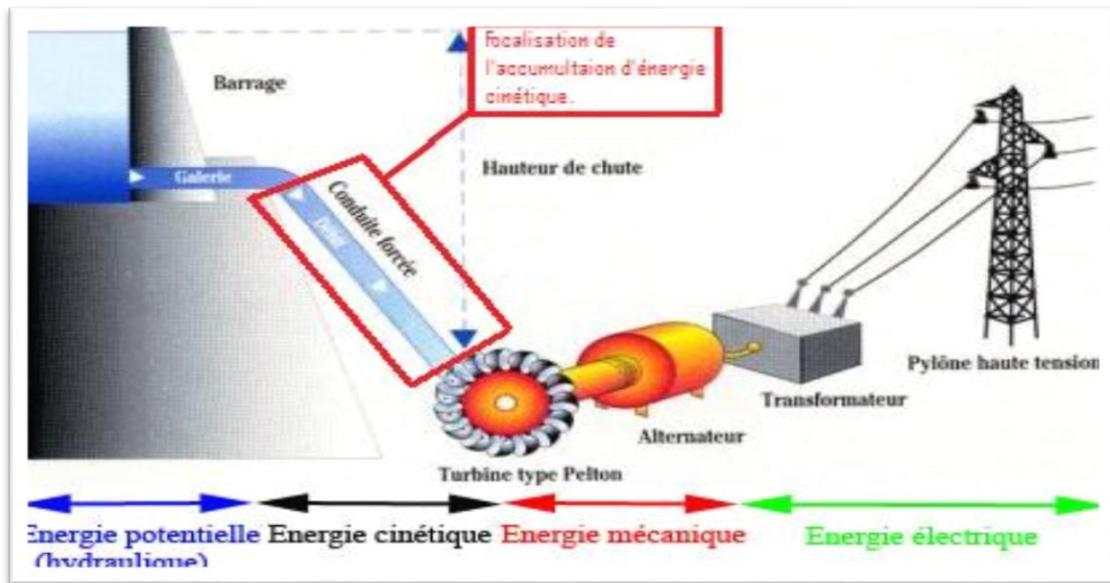


Figure 1.4 : Les quatre phases d'énergies dans une installation hydroélectrique.

La vitesse de l'eau lors d'une chute est traduite pas cette formule:

$$V_i = \sqrt{2gH}$$

g : intensité de l'apesanteur (9.81 N/Kg)

H : hauteur de chute (m)

V_i : vitesse de chute (m/s)

Connaissant la vitesse de l'eau, nous pouvons calculer l'énergie cinétique fournie par cette chute d'eau .

Chapitre 01 : Les conduites forcées

L'énergie cinétique d'un corps en mouvement est proportionnelle à sa masse, et au carré de sa vitesse.

$$E_c = 1/2 mv^2$$

On la note E_c :

m: la masse, v : la vitesse

Dans cette formule, la masse m est en kg, la vitesse en m/s, et l'unité d'énergie est le Joule, noté J.

On voit bien ici que plus la vitesse est grande, plus l'énergie cinétique est importante.

C'est pour cela que les barrages hydroélectriques sont de grandes tailles; cela leur permet une plus forte production d'énergie. L'équation présente clairement la vitesse comme un élément déterminant.

Cependant, la masse du corps a tout de même son rôle à jouer. L'énergie cinétique fournie par une masse de 10 kg en une chute de 50 mètres est plus forte que celle d'une masse de 1 kg pour une même chute.

Cette expression est comprise dans l'équation de Bernoulli qui nous permet de calculer l'énergie échangée entre le fluide et la turbine.

Exemple :

On considère 1kg d'eau qui chute du haut d'un barrage de 400 mètres.

Nous savons que le fluide est tombé en 10 secondes.

Chapitre 01 : Les conduites forcées

vitesse= distance/temps

$$V = 400/10 = 40 \text{ m/s}$$

L'énergie cinétique de cette masse d'eau est de: $E_c = (1/2)*1*40^2 = 800 \text{ J}$

Dans la conduite forcée la pression est intense, cela a aussi un effet sur l'énergie cinétique:

Plus la pression est forte, plus le débit d'eau déversé sur la turbine est importante.

B- Viscosité d'un fluide

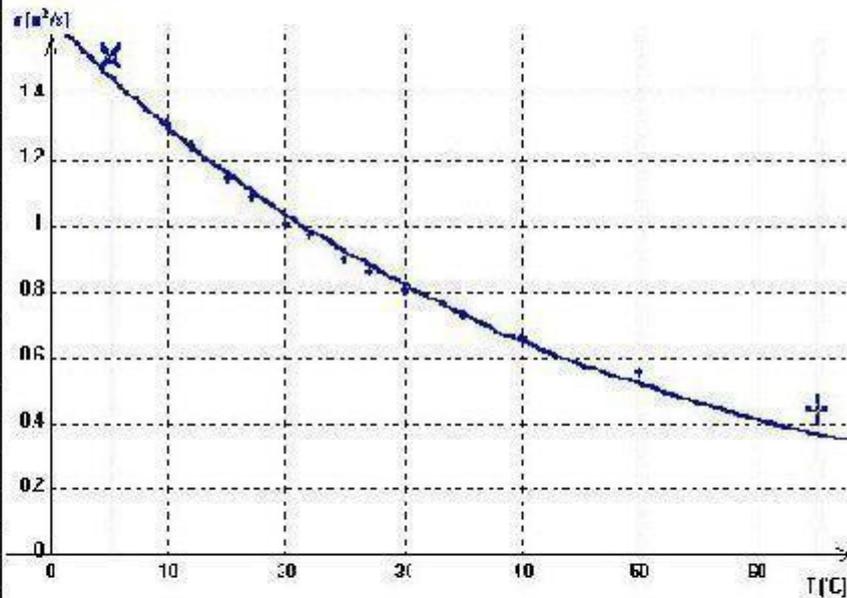
Dans le cas d'un barrage, nous pouvons nous intéresser à la viscosité de l'eau. En effet, selon les régions, le fleuve utilisé pour le lac de retenue peut être plus ou moins visqueux. La viscosité de l'eau affecte plus particulièrement la vitesse de l'eau pendant son voyage dans la conduite forcée. Plus le fluide est visqueux, plus les forces de frottements de celui-ci sur la paroi sont importantes.

Les pertes de charge nous permettent de comprendre pourquoi l'on obtient moins d'énergie cinétique que la quantité prévue par le calcul de l'énergie potentielle. En effet une partie de l'énergie est perdue en chaleur à cause des frottements.

Viscosité de l'eau :

Temp °C	Viscosité cinématique (x 10 ⁻⁶) m ² /s
5	1,520
10	1,308
11	1,275
12	1,241
13	1,208
14	1,174
15	1,141
16	1,115
17	1,088
18	1,061
19	1,034
20	1,005
21	0,985
22	0,963
23	0,941
24	0,919
25	0,896
26	0,878
27	0,856
28	0,841
29	0,823
30	0,804
35	0,727
40	0,661
50	0,556
65	0,442

Variation de la viscosité cinématique de l'eau avec la température



Quelques valeurs de la viscosité :
(à 20 °C sous la pression atmosphérique normale)

Figure 1.5 : Variation de la viscosité en fonction de la température.

Cette courbe permet de voir que plus la température d'un fluide augmente, moins il est visqueux.

La viscosité est un élément déterminant dans la dynamique des fluides incompressibles pour la partie vitesse d'un fluide.

C- La dynamique des fluides incompressibles

On ne peut pas parler d'énergie cinétique sans évoquer la dynamique des fluides incompressibles. En effet, elle donne lieu à de nombreuses applications dans le domaine des barrages, surtout dans la conduite forcée. Elle permet notamment de comprendre la structure de l'écoulement et de calculer les répartitions de variables comme la pression, la vitesse, la température et la masse volumique d'un fluide. Dans la conduite forcée, le fluide s'écoule autour d'un corps solide et la connaissance des distributions de pression et de la vitesse au voisinage des parois est particulièrement utile.

Un fluide est dit incompressible lorsque son volume demeure quasiment constant sous l'action d'une pression externe.

En réalité, tous les fluides sont compressibles, certains plus que d'autres. La compressibilité d'un fluide mesure la variation de volume d'une certaine quantité de ce fluide lorsqu'il est soumis à une pression extérieure. Ainsi si l'on bouche l'orifice de sortie d'une pompe à vélo et que l'on pousse sur la pompe, on voit que l'on peut comprimer l'air contenu à l'intérieur. En revanche si l'on faisait la même expérience avec de l'eau à l'intérieur, on ne pourrait quasiment pas déplacer la pompe: c'est parce que la compressibilité de l'eau est très faible. C'est pour cette raison que pour simplifier les équations de la mécanique des fluides, on considère souvent que les liquides sont incompressibles. En termes mathématiques, cela signifie que la masse volumique d'un tel fluide est supposée constante.

Chapitre 01 : Les conduites forcées

$$\rho = \rho_0 = \text{constante}$$

où :

$$\rho = \text{masse volumique}$$

Dans le cas d'un barrage, on étudie la dynamique des fluides dans la conduite forcée et les sections d'injections des turbines. Le diamètre du tube de la conduite forcée diminue en arrivant aux injecteurs. Nous pouvons ainsi nous poser les questions suivantes:

- Le débit varie-t-il?



Figure 1-6 : tube de conduite forcée avec coude et turbine.

D- Débit

Le débit **D** est le quotient de la quantité **Q** de fluide qui traverse une section droite de la conduite par la durée (**T**) de cet écoulement.

$$D=Q/T$$

Le débit est un élément indispensable pour calculer les diamètres des injecteurs aux niveaux des turbines pour éviter une rupture.

Chapitre 01 : Les conduites forcées

- **Débit-masse**

Si Δm est la masse de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps

Δt , par définition le débit-masse est en $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$:

$$q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

- **Débit-volume:**

Si ΔV est le volume de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le

temps Δt , par définition le débit-volume est en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$:

$$q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

- **Relation entre débit-masse et débit-volume**

La masse volumique est donnée par la relation :

d'où :

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

$$q_m = \rho q_v$$

E- Conservation de la masse

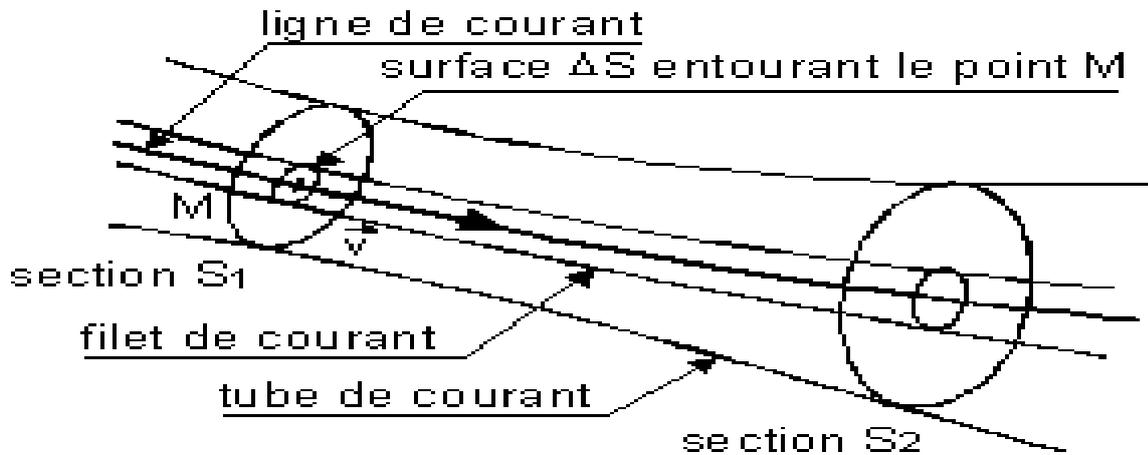


Figure 1-7 : Les lignes de courant entre deux sections.

Ligne de courant : En régime stationnaire, on appelle ligne de courant la courbe suivant laquelle se déplace un élément de fluide. Une ligne de courant est tangente en chacun de ses points au vecteur vitesse du fluide en ce point.

Tube de courant : Ensemble de lignes de courant s'appuyant sur une courbe fermée.

Filet de courant : Tube de courant s'appuyant sur un petit élément de surface DS .

La section de base DS du tube ainsi définie est suffisamment petite pour que la vitesse du fluide soit la même en tous ses points (répartition uniforme).

Il y a conservation de la masse.

F- Conservation du débit

Considérons un tube de courant entre deux sections S_1 et S_2 . Pendant l'intervalle de temps Dt , infiniment petit, la masse Dm_1 de fluide ayant traversé la section S_1 est la même que la masse

Chapitre 01 : Les conduites forcées

Dm_2 ayant traversé la section S_2

Un régime d'écoulement est dit permanent ou stationnaire si les paramètres qui le caractérisent (pression, température, vitesse, masse volumique, ...), ont une valeur constante au cours du temps.)

$$q_{m1} = q_{m2}$$

En régime stationnaire, le débit-masse (q_m) est le même à travers toutes les sections droites d'un même tube de courant.

Dans le cas d'un écoulement iso volume (toujours le même volume)

$$q_{v1} = q_{v2}$$

En régime stationnaire, le débit-volume (q_v) est le même à travers toutes les sections droites d'un même tube de courant

- **Débit en fonction de la vitesse v**

Le débit volume est aussi la quantité de liquide occupant un volume cylindrique de base S à une vitesse égale à v , correspondant à la longueur du trajet effectué pendant l'unité de temps, par une particule de fluide traversant S .

On a donc :

$$q_v = vS \quad \text{(autre formule du débit-volume)}$$

Toutes ces relations de débit permettent seulement de démontrer qu'il y a bien conservation de la masse et du débit lors de la chute de l'eau dans la conduite forcée. Comme évoqué

Chapitre 01 : Les conduites forcées

précédemment, elles permettent aussi de calculer le diamètre des injecteurs qui seront utilisés grâce à la relation suivante:

$$Q = S \cdot V \Rightarrow S = Q/V$$

Il est indispensable de faire ce calcul car si les injecteurs ont un diamètre trop petit, ils cassent et c'est la catastrophe, la turbine peut casser et par conséquent le lac de retenue peut déborder ce qui entrainerait un disfonctionnement total du barrage.

G- Vitesse moyenne (dans la conduite forcée) :

En général la vitesse v n'est pas constante sur la section S d'un tube ; on dit qu'il existe un profil de vitesse à cause des forces de frottement sur la paroi et du fait de l'écoulement turbulent.

Le débit-masse ou le débit-volume s'obtient en intégrant la relation :

$$q_v = vS$$

Sous l'effet des forces d'interaction entre les molécules de fluide et celles de la paroi, chaque molécule de fluide ne s'écoule pas à la même vitesse.

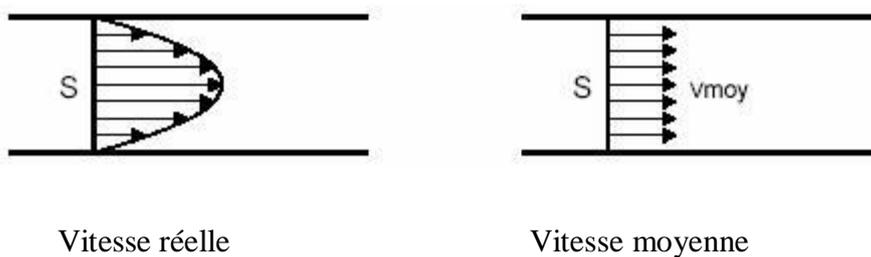


Figure 1-8 : Profil des vitesses

Si on représente par un vecteur, la vitesse de chaque particule située dans une section droite perpendiculaire à l'écoulement d'ensemble, la courbe des extrémités de ces vecteurs

Chapitre 01 : Les conduites forcées

représente le profil de vitesse. On voit bien sur ce schéma que plus la molécule de fluide est éloigné des parois, plus sa vitesse est importante. Tout s'explique: les molécules du fluide proche de la paroi ont plus de frottements que celles qui sont au centre (où il y a très peu de frottements).

Le mouvement du fluide peut être considéré comme résultant du glissement des couches de fluide les unes sur les autres. Plus le liquide est visqueux et plus les frottements sont élevés, donc la perte de charge augmente.

Dans une section droite S de la canalisation, on appelle vitesse moyenne v_m la vitesse telle que

$$v_{\text{moy}} = \frac{q_V}{S}$$

(autre forme de l'équation précédente)

La vitesse moyenne v est uniforme à travers la section S qui assure le même débit que la répartition des vitesses. Si l'écoulement est iso volume dans les différents tubes, cette vitesse est inversement proportionnelle à l'aire de la section droite.

D'où cette formule:

$$q_V = v_{1\text{moy}} S_1 = v_{2\text{moy}} S_2 = \text{Cte}$$

C'est l'équation de continuité.

La vitesse moyenne est de plus en plus grande au fur et à mesure que le diamètre de la section est faible.

Ces formules nous permettent donc de comprendre le comportement du fluide (eau) dans les

conduites du barrage. La conduite d'un barrage doit être de bonne taille pour que le débit soit normal pour éviter tout accident au niveau des turbines ou du lac de retenue.

H- Pertes de charges

On peut observer que la pression d'un liquide réel diminue tout au long d'une canalisation dans laquelle il s'écoule, même si elle est horizontale et de section uniforme, contrairement au théorème de Bernoulli. De plus, la pression du fluide diminue après le passage à travers un coude, une vanne ou un rétrécissement. On en conclue qu'un fluide réel, en mouvement, subit des pertes d'énergie dues aux frottements sur les parois de la canalisation (pertes de charge systématiques) ou sur les "accidents" de parcours (pertes de charge singulières).

Les expériences réalisées par Reynolds (1883) lors de l'écoulement d'un liquide dans une conduite cylindrique rectiligne dans laquelle arrive également un filet de liquide coloré, ont montré l'existence de deux régimes d'écoulement : laminaire et turbulent. Un écoulement laminaire a certes beaucoup moins de pertes de charges que l'écoulement turbulent. Pourtant, dans les barrages, l'écoulement est toujours turbulent. L'écoulement turbulent, malgré de fortes pertes de charges, produit beaucoup plus d'énergie qu'un écoulement laminaire. Dans la conduite forcée, les pertes de charges sont traduites par une petite émission de chaleur. C'est pour cela que l'on parle de rendement (de tant de %) : on doit tenir compte des pertes de charges, sinon la production envisagée est fautive.

I-5- Ecoulement dans les conduites forcées [1]

Les écoulements en hydraulique peuvent être soit à surface libre à travers des canaux à ciel ouvert ou en charge à section pleine dans les conduites dites en charge. Les formules ainsi que les résultats théoriques et expérimentales sur les écoulements en charge s'applique aussi sur les conduites forcées en régime permanent et non permanent ou instationnaire ;

I-5-a- Ecoulement en charge en régime permanent

Les écoulements, s'opérant dans une canalisation de contour fermé, à une pression différente de la pression atmosphérique sont dits en charge (aussi écoulements sous pression). Les canalisations sièges des écoulements en charge sont pratiquement toujours de section circulaire (résistance à la pression).

Si les caractéristiques géométriques et propriétés hydrauliques en chaque point d'un tube de courant sont indépendantes du temps, le régime hydraulique est dit permanent (par opposition au régime variable ou transitoire).

La description utilisée est celle des écoulements dits filaires. Un écoulement est filaire s'il répond à certains critères que l'observation valide a posteriori:

- Le liquide est confiné entre des parois, soit fermées (cas des conduites ou des galeries), soit ouvertes (cas des canaux, rivières).

- Les parois jouent un rôle prépondérant dans le régime d'écoulement (frottements, perte de charge).

- L'écoulement s'effectue dans une direction privilégiée et les lignes de courant sont parallèles aux parois suivant cette direction.

- On peut définir une section droite de la conduite ou du canal, et en chaque section l'état dynamique de l'écoulement peut être défini par la vitesse moyenne V (orientée suivant la direction privilégiée) et la pression P , et plus précisément la charge spécifique H_s .

D'abord, rappel de quelques définitions:

- Soit S la section de la conduite occupée par l'eau: on l'appelle section mouillée. Si l'eau remplit entièrement la conduite, c'est-à-dire est au contact de toutes les parois (absence d'une

Chapitre 01 : Les conduites forcées

surface libre) S se confond avec la section de la conduite. La ligne de la section qui est au contact de l'eau a pour longueur X , appelée périmètre mouillé. Elle est donc inférieure ou égale au périmètre total de la section de la conduite, l'égalité ayant lieu quand l'eau remplit complètement la section (écoulement en charge).

Par analogie avec une section circulaire, de diamètre D , ou $S = \pi D^2/4$, et où le rayon est $R = D/2$ et le périmètre $L = \pi D$, donc $R = 2S/L$, on définit le **rayon hydraulique** de la conduite par:

$$RH = S/X \quad (1)$$

On note parfois $DH = 4RH$ le diamètre hydraulique.

Si l'eau remplit complètement la section circulaire.

On a :

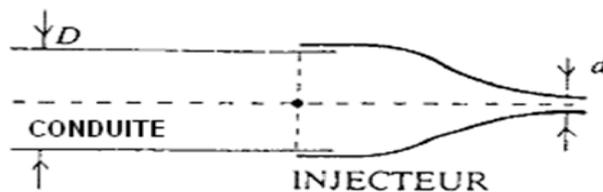
$$S = \pi D^2/4 \text{ et } X = \pi D \text{ donc } RH = D/4 = R/2.$$

Remarque:

Dans le cas d'un écoulement en charge dans une canalisation de forme cylindrique, le diamètre hydraulique est égal au diamètre géométrique. Pour des canaux de largeur importante vis-à-vis de leur profondeur, on aura $R=h$ avec h : tirant d'eau (profondeur).

- L'écoulement à travers la section S est avec une vitesse moyenne, supposée uniforme v le débit volumique à travers cette section est donc:

$$Q = vS \quad (2)$$



Le *nombre de Reynolds* qui caractérise les effets relatifs des forces d'inertie et des forces de viscosité, est basé sur la dimension caractéristique DH .

Chapitre 01 : Les conduites forcées

Le diamètre hydraulique:

$$Re = \frac{\rho V D_H}{\nu} \quad (3)$$

La viscosité cinématique est :

$$\nu = \mu/\rho = 10^{-6} m^2 / s$$

Pour l'eau à 20°C

μ : viscosité dynamique, ρ : masse volumique du liquide

Le régime devient turbulent pour $Re \geq 2500$.

Un écoulement est dit turbulent si une perturbation au lieu de disparaître s'amplifie et envahit tout l'écoulement aval. Les trajectoires (lignes de courant) s'enroulent et il se crée des tourbillons qui grossissent et se mélangent. La turbulence est essentiellement due à la viscosité des liquides.

On met en évidence les écoulements laminaires ou turbulents par l'expérience d'Osborne Reynolds (filet de permanganate de potassium dans l'eau).

Ordres de grandeur pour les galeries d'amenée et les conduites forcées:

- Galeries d'amenée: $1 \leq v \leq 2 m/s$; $2 \leq D \leq 6 m$
- Conduites forcées: $4 \leq v \leq 6 m/s$; $1 \leq D \leq 6 m$

Il s'en suit que pour ces ouvrages on a $Re \approx 10^6$ largement plus grand que la valeur critique $Re_c = 2500$ les régimes d'écoulement y sont donc toujours turbulents. C'est pourquoi on a recouru à des valeurs moyennes, et les effets de turbulence et de perte de charge sont inclus dans les coefficients de frottements qui interviennent dans la formule de Strickler comme nous allons le voir

Chapitre 01 : Les conduites forcées

Pour un écoulement permanent en charge dans une conduite forcée ou une galerie d'amenée, la vitesse moyenne en chaque section diminue avec les pertes de charges selon la formule de Strickler:

$$V=C\sqrt{RHj} \quad (4)$$

j est la perte de charge, c'est-à-dire la variation de la charge hydraulique spécifique par unité de longueur parcourue de la conduite, due aux forces de frottement et à la turbulence

Charge spécifique:

$$H_s = P/\rho g + y + v^2/2g$$

exprimée en mètres de hauteur d'eau.

J est exprimée en (m/m)mètre de hauteur d'eau perdue par mètre parcourue dans la conduite:

$$J = \Delta H_s / L$$

C'est un coefficient qui tient compte de la rugosité des parois (C : est sans dimension).

Pour une conduite circulaire de diamètre $D = 4RH$, on a la formule dite « universelle » (1):

$$j = \lambda v^2 / 2 g D \quad (5)$$

Où : λ est le coefficient de perte de charge qui est en fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité.

La comparaison avec (4), réécrit sous la forme $j = v^2 / RH C^2$ montre alors que:

$$\lambda = 8 g / C^2 \quad (6)$$

L'expérience montre que C 'est relié à la rugosité k_s et au rayon hydraulique RH par:

$$C = k_s RH^{1/6} \quad (7)$$

Le coefficient K_s est le coefficient de Strickler, exprimé en ($m^{1/3} s^{-1}$), son inverse est appelé coefficient de Manning.

Chapitre 01 : Les conduites forcées

Remarque:

K_s ne dépend que de la rugosité des parois

Il prend les valeurs suivantes :

Galerie revêtue de béton avec enduit lissé	$k_s = 100$
Galerie revêtue de béton brut de décoffrage	$70 < k_s < 80$
Galerie brute de perforation	$25 < k_s < 30$

(4) et (7) donnent une autre expression de la formule de Strickler:

$$v = k_s R_h^{2/3} \sqrt{j} \quad (8)$$

La perte de charge $\Delta H_s = jL$ sur une longueur L de la conduite est donc :

$$\Delta H_s = \frac{v^2}{R_h c^2} L$$

soit:

$$\Delta H_s = \left(\frac{4^5}{D^8} \right)^{2/3} \left(\frac{Q}{\pi k_s} \right)^2 L \quad (9)$$

Où :

ΔH_s en (m), D en (m), Q en (m^3/s), L en (m) et k_s en ($m^{1/3} s^{-1}$).

Remarques:

1 – L'équation de Strickler (4) joue le rôle de l'équation de Chézy pour les écoulements à surface libre dans les canaux et rivières, où j est remplacé par i , l'angle d'inclinaison du canal par rapport à l'horizontale, c'est-à-dire la pente .

2 – Si on cherche à déterminer les pertes de charge j par la relation (5), au lieu d'utiliser (6) pour déterminer λ , on emploie le diagramme de Moody (figure 1) qui donne un réseau de courbes $\lambda = f(Re)$ paramétrées par la rugosité relative D/k (où k est la hauteur moyenne des aspérités, à ne pas confondre avec k_s !) Quelques valeurs de hauteurs d'aspérité k :

Chapitre 01 : Les conduites forcées

Nature de la conduite	K en (mm)
Acier	0,05
Acier rouillé	0,15 à 4
Fonte	0,1 à 0,6
Béton	1 à 3
Ciment	3 à 5
PVC	0,007
PEHD	0,01

Sur le diagramme de Moody, on remarque que, lorsque D/k devient petit (rugosité importante), λ est pratiquement une fonction indépendante de Re , et une constante paramétrée seulement par D/k . C'est le régime turbulent rugueux, qui ne dépend plus du nombre de Reynolds. Autrement dit, λ , c'est-à-dire la perte de charge, est indépendante du fluide transporté, qu'il soit liquide ou gazeux, dès lors que l'on est au-dessus de $Re_c = 2500$.

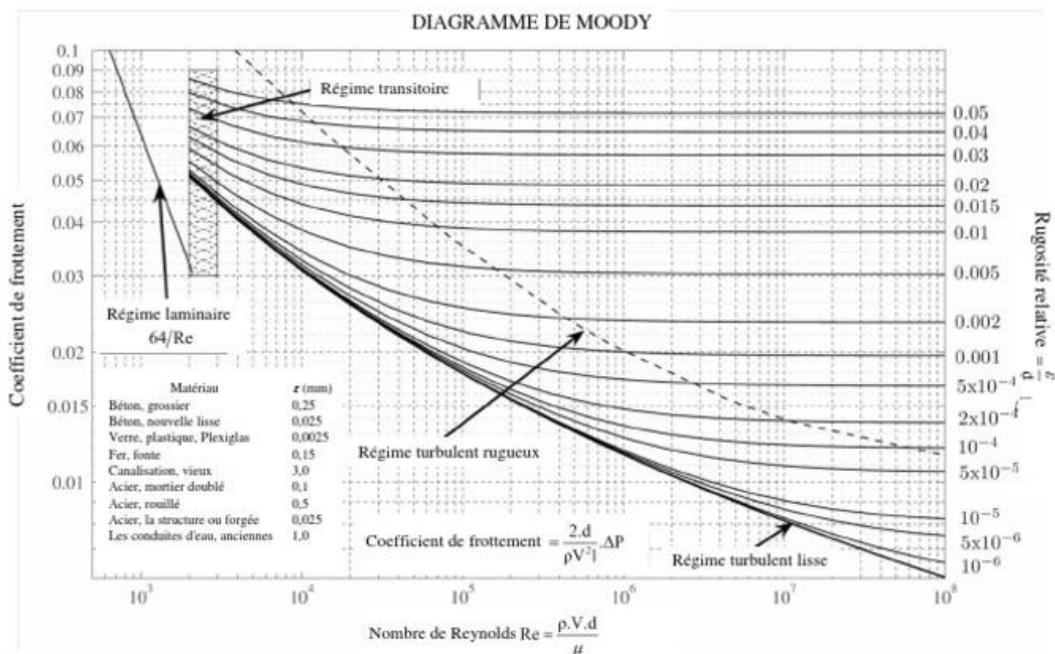


Figure 1.9 : Diagramme de Moody.

Ce constat permet alors de déterminer expérimentalement les pertes de charge dans une conduite véhiculant de l'eau par des mesures d'écoulement d'air pourvu que l'on ait un nombre de Reynolds critique identique entre l'air et l'eau.

Chapitre 01 : Les conduites forcées

Ainsi pour l'eau on a :

$V = 1$ (m/s) et $\nu = 1,1 \cdot 10^{-6}$ (m²/s), pour une galerie de diamètre $D = 2$ (m)

Sachant que :

pour l'air la viscosité cinématique est : $\nu' = 15 \cdot 10^{-6}$ (m²/s) et la masse volumique $\rho' = 1,3$ (kg/m³), on devra avoir une circulation d'air de vitesse V' telle que les nombres de Reynolds soient égaux:

$$V' D / \nu' = V D / \nu \rightarrow V' = V \nu' / \nu = 13 \text{ m/s}$$

Pour les conduites forcées on a les valeurs usuelles de λ :

$$0,01 < \lambda < 0,03$$

Donc : $C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$, $K_s = \frac{C}{R_H^{1/6}}$ avec $R_H = 1$ (m) par exemple :

$$50 < C < 88,5 \text{ (m}^{1/2} \text{ s}^{-1}\text{)}$$

$$50 < k_s < 88,5 \text{ (m}^{1/3} \text{ s}^{-1}\text{)}$$

La puissance hydraulique véhiculée par les pertes de charge, c'est-à-dire la puissance hydraulique qu'il faudrait employer pour les contrebalancer, est le produit de la pression, affectée des pertes de charge, et du débit volumique:

$$W_P = \rho g \Delta H_s Q \quad (10)$$

Ou ΔH_s est donnée par (9). Pour le test avec l'air, avec les données précédentes, on aurait donc:

$$D = 4R_H = 4 \text{ m}$$

$$Q' = V'S = V'\pi D^2/4 = 37 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta H_s = \left(\frac{4^5}{D^8}\right)^{2/3} \left(\frac{Q'}{\pi k_s}\right)^2 L = \left(\frac{4^5}{4^8}\right)^{2/3} \left(\frac{37}{\pi 50}\right)^2 L = 3,5 \cdot 10^{-3} L$$

Pour : $L = 1000(\text{m})$ on a donc $\Delta H_s = 3,5(\text{ m})$.

Finalement :

$$WP = \rho' g \Delta H_s Q' = 1,3 \times 9,81 \times 3,5 \times 37 = 1,6 \text{ kW}$$

Les compresseurs qui assurent la circulation d'air ont un rendement η inférieur à 100%, la puissance qu'ils doivent développer pour permettre à l'air de circuler dans le tunnel est donc égale à WP / η .

Pour $\eta = 30\%$ on aurait donc $1,6 / 0,3 = 5,5(\text{ kW})$ comme puissance minimale requise.

I-5-b- Ecoulement en charge en régime non permanent

Les principaux régimes non permanents qui peuvent s'installer dans une conduite forcée sont les régimes transitoires ou le phénomène du coup de bélier consécutif à des variations brusques de débit (dus par exemple à une diminution rapide de la section de passage lors de la fermeture d'une vanne en aval). On montre qu'un système d'ondes de compression s'installe, dont la vitesse de propagation est liée à la vitesse du son dans l'eau et aux propriétés mécaniques des parois de la conduite.

Les efforts qui en résultent sur les parois peuvent alors être très importants jusqu'au point de présenter un risque de détérioration.

Pour s'en prémunir, on dispose alors toujours, entre l'entrée de la conduite et l'ouvrage d'amenée, un système anti-bélier qui est, dans la plupart des cas représenté par une cheminée d'équilibre: celle-ci absorbe les ondes de compression qu'elle convertit en oscillations en masse de longue période.

I-5-c – Effets de la courbure des conduites forcées sur l'écoulement et les efforts sur les parois

Ces effets sont de deux types:

– Modification du profil de vitesse à l'intérieur de la conduite, avec apparition de zones de décollement, dues aux effets de force centrifuge induite par la courbure.

– Efforts du fluide appliqués sur les parois de la conduite, somme de deux efforts: la poussée hydrostatique, et la force centrifuge de l'écoulement au niveau du coude.

Chapitre 01 : Les conduites forcées

a) -Modification du profil de vitesse et zone de décollement dans la conduite.

A cause de la courbure au niveau du coude, le profil de vitesse initialement parallèle et uniforme en amont (section A), évolue avec le rayon de courbure R de la ligne de courant considérée: $v_B(R)$ (section B au niveau du coude). En effet, appliquons le théorème de Bernoulli sur une même ligne de courant entre les sections A et B:

$$\frac{1}{2} \rho v_A^2 + P_A + \rho g y_A = \frac{1}{2} \rho v_B^2 + P_B + \rho g y_B$$

Si la cote entre la section d'entrée A et le coude B est la même ($y_A = y_B$), il vient:

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 = cste \quad (11)$$

Sur la normale, portée par \vec{n} , à la ligne de courant au niveau du coude, le théorème de l'hydrostatique indique que le gradient de pression est égal aux forces volumiques extérieures appliquées:

$$\overrightarrow{\text{grad}} P = \rho \vec{f}$$

Ici, \vec{f} se réduit à l'accélération centripète:

$$\vec{f} = \frac{v^2(R)}{(R)} \vec{n} \quad \text{et comme} \quad \overrightarrow{\text{grad}} P = - \frac{\partial P}{\partial y} \vec{n}$$

Il vient:

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \rho \frac{v^2}{R}$$

Or en B: $\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial P}{\partial R}$ par conséquent:

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \rho \frac{v^2}{R}$$

En utilisant (11), on obtient donc la relation entre la vitesse moyenne et le rayon de courbure dans la section normale du coude :

Chapitre 01 : Les conduites forcées

$$-\rho v \frac{dv}{dR} = \rho \frac{v^2}{R} \rightarrow \frac{dv}{v} + \frac{dR}{R} = 0$$

Soit :

$$v(R) = \frac{cste}{R} \quad (12)$$

Au coude, le long de la normale, entre l'entrée et la sortie, le profil de vitesse moyenne décroît comme le rayon de courbure R.

A charge constante, les vitesses les plus élevées sont dans la zone voisine de l'intrados, et les vitesses les plus faibles sont dans la zone voisine de l'extrados. Suite à la relation de Bernoulli, à l'inverse, la pression est plus grande près de l'extrados et plus faible près de l'intrados. Ainsi, la présence d'un coude a pour effet de rompre la symétrie de l'écoulement et d'en affecter l'uniformité. Une pression faible près de l'intrados peut être responsable de l'apparition d'une zone de sillage consécutive à une zone de décollement du fluide sur la paroi, avec courants de retour (recirculation), comme illustrée à la section C sur la figure 2.

Cette zone de basse pression peut être le siège de phénomènes de cavitation (apparition de phases gazeuses se séparant de la phase liquide) très énergétiques et susceptibles d'attaquer la paroi de la conduite. En outre, elle introduit des pertes de charge élevées qui amoindrissent considérablement le rendement de l'ouvrage. On évite ces inconvénients en utilisant des dispositifs d'aspiration dans la zone de décollement qui permettent de relaminariser l'écoulement après le coude.

b)- Efforts sur les parois de la conduite au niveau du coude. Les efforts exercés sur les parois du coude résultent de trois actions:

- La poussée hydrostatique \vec{f}_p qui existe même en l'absence d'écoulement, et due à la seule force pressante du liquide;

- La force de pesanteur du liquide dans le tronçon coudé, \vec{f}_G (elle sera négligée par la suite) :

Chapitre 01 : Les conduites forcées

– Les efforts dus à la courbure du coude. On désigne par \vec{R} l'ensemble des efforts. Pour les calculer on va utiliser le théorème d'Euler pour les fluides ([7] [8]).

Théorème d'Euler: Dans un domaine (D) occupé par un fluide, délimité par les sections A_1 et A_2 et les parois du tube (en vert sur la figure 3) la variation de la quantité de mouvement est égale à la somme des forces extérieures \vec{F} appliquées au domaine, et du flux de variation de la masse échangée entre l'entrée et la sortie du domaine (donc aux sections A_1 et A_2 dans le cas qui nous intéresse ici):

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F} + (q_{m,1}\vec{V}_1 - q_{m,2}\vec{V}_2)$$

avec : $q_{m,1} = dm_1/dt$ variation de masse à la section d'entrée A_1 , et $q_{m,2} = dm_2/dt$ variation de masse à la section de sortie A_2 , où \vec{p} est la quantité de mouvement du fluide. On a pour les débits de masse:

$$dm_1/dt = \rho V_1 S_1 \quad dm_2/dt = \rho V_2 S_2$$

Or, si l'on néglige les frottements, le débit se conserve:

$$Q_m = \rho V_1 S_1 = \rho V_2 S_2$$

Donc : $dm_1/dt = q_{m,1} = dm_2/dt = q_{m,2}$ par ailleurs le régime est supposé stationnaire:

$$\frac{d\vec{P}}{dt}$$

Le théorème d'Euler s'écrit donc ici:

$$Q_m (\vec{V}_1 - \vec{V}_2) = - \vec{F} \quad (13)$$

où:

$$\vec{V}_1 = V_1 \vec{e}_x, \vec{V}_2 = V_2 \vec{e}_x, \vec{n}_1 = -\vec{e}_x, \vec{n}_2 = \vec{e}_z$$

Tronçon entre A_1 et le coude étant choisi horizontal (Ox), et le tronçon entre le coude et A_2 étant incliné d'un angle θ sur l'horizontale Ox. Par ailleurs, le tube est de section constante:

$S_1 = S_2 = S$, d'où il s'ensuit que $V_1 = V_2 = V$ (en module). De (13) on déduit donc:

$$\vec{F} = -\rho S V^2 (\vec{e}_x - \vec{e}_z) \quad (14)$$

Chapitre 01 : Les conduites forcées

Or \vec{F} est la somme des forces de pesanteur \vec{F}_G , de pression hydrostatique \vec{F}_p , et de réaction de la paroi \vec{R} que l'on cherche:

$$\vec{F} = \vec{F}_G + \vec{F}_p + \vec{R} \quad (15)$$

– Poids: $\vec{F}_G = -mg \vec{e}_y$

– Poussée hydrostatique:

$$\vec{F}_p = - \int_{A_1+A_2} P \vec{n} ds = - \int_{A_1} P_1 \vec{n} ds_1 - \int_{A_2} P_2 \vec{n} ds_2 = \vec{F}_{P_1} + \vec{F}_{P_2}$$

Comme :

$$P_1 = P_2 = P, \text{ on a: } \vec{F} = - \int_{A_1-P} \vec{e}_x dS_1 - \int_{A_2} P \vec{e}_z dS_2 = PS (\vec{e}_x - \vec{e}_z)$$

(15) devient alors:

$$- \rho S V^2 (\vec{e}_x - \vec{e}_z) = -mg \vec{e}_y + PS (\vec{e}_x - \vec{e}_z) + \vec{R}$$

D'où l'on tire l'effort au coude cherché:

$$\vec{R} = mg \vec{e}_y - PS (\vec{e}_x - \vec{e}_z) - \rho S V^2 (\vec{e}_x - \vec{e}_z) \quad (16)$$

Or le vecteur unitaire porté par l'axe du tronçon incliné est :

$$\vec{e}_z = \cos \theta \vec{e}_x - \sin \theta \vec{e}_y ,$$

en remplaçant dans (16):

$$\vec{R} = -(1 - \cos \theta) (P + \rho V^2) S \vec{e}_x + [mg + (P + \rho V^2) S \cdot \sin \theta] \vec{e}_y \quad (17)$$

(17) donne l'expression complète et vectorielle de l'effort exercé sur les parois du coude. Si l'on néglige le poids devant les efforts de pression et de dynamique de l'écoulement, (17) permet de calculer une expression simplifiée du module de \vec{R} :

$$R^2 = 2 (P + \rho V^2)^2 S^2 (1 - \cos \theta)$$

Chapitre 01 : Les conduites forcées

Comme : $1 - \cos \theta = 2 \sin^2 \frac{\theta}{2}$ il vient finalement:

$$R = 2 (P + \rho V^2) S \sin \frac{\theta}{2} \quad (18)$$

NB: En l'absence d'écoulement ($V = 0$), il y a toujours dans un coude les efforts dus à la poussée hydrostatique:

$$R = F_p = 2 P S \sin \frac{\theta}{2}$$

Ils disparaissent quand le tronçon est horizontal ($\theta = 0$).

Si A est la surface intérieure du coude, la force R , donnée par (18), qui s'exerce sur elle, correspond à une contrainte mécanique:

$$\sigma = \frac{R}{A} = 2 \frac{S}{A} (P + \rho V^2) \sin \frac{\theta}{2}$$

Si le coude est un angle droit, $\theta = \pi/2$, de rayon de courbure r et de diamètre D , le tronçon compris entre A_1 et A_2 peut être assimilé à un quart de tore de rayon moyen r et donc les sections droites ont pour diamètre D . La surface du tore est alors donnée par: $4\pi r^2 D/2$, par conséquent la surface intérieure du coude est :

$$A = \frac{1}{4} (4\pi^2 r \frac{D}{2}) = \frac{\pi^2}{2rD}$$

Comme $S = \pi D^2/4$, la contrainte σ s'écrit alors:

$$\sigma = 2\pi \frac{D^2}{4} \frac{1}{\frac{\pi^2}{2} r D} (P + \rho V^2) \sin \frac{\theta}{2}$$

Alors :

$$\sigma = \frac{1}{\pi} \frac{D}{r} (P + \rho V^2) \sin \frac{\theta}{2} \quad (19)$$

Application numérique: $\theta = \pi/2$

$$r = 1 \text{ m}$$

$$D = 1 \text{ m}$$

$$U = 0 \text{ (pas d'écoulement)}$$

Chapitre 01 : Les conduites forcées

$P = 10$ bars

$\sigma = 2,25 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = 0,02 \text{ daN/mm}^2$, en l'absence d'écoulement.

Avec :

$V = 10$ (m/s) (débit $Q = 7,5 \text{ m}^3/\text{s}$):

$\sigma = 2,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$.

Avec :

$V = 30$ m/s (débit $Q = 22,5 \text{ m}^3/\text{s}$):

$\sigma = 4,3 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$.

L'épaisseur h des parois de la conduite doit être suffisante pour que la contrainte appliquée σ soit inférieure à la contrainte admissible σ_{\max} (on considère seulement ici les contraintes hydrodynamiques, sans les contraintes thermiques, bien plus importantes comme on le verra plus loin). La condition est:

$$h \geq \frac{D \sigma}{2 \sigma_{\max}} \quad (20)$$

Avec : $\sigma_{\max} = 3 \text{ daN/mm}^2 = 3 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$, on a, avec par exemple $V = 10$ (m/s):

$$h \geq \frac{1 \times 2,5 \cdot 10^5}{2 \times 3 \cdot 10^7} = 4 \text{ mm}$$

Pour $V = 30$ (m/s), on aurait $h \geq 7$ (mm) . Ces valeurs sont largement sous-évaluées par rapport aux applications pratiques qui doivent tenir compte de divers facteurs externes:

- Corrosion.
- Dépression intérieure due à la courbure.
- Contraintes de flexion sous l'effet du poids de la conduite et des efforts au niveau de ses ancrages.
- Contraintes thermiques. En outre, la seule présence de la pression de service P fait que (20) doit s'appliquer .

avec :

$$\sigma = P. \text{ Si } P = 10 \text{ bars} \quad \text{et} \quad D = 1\text{m}$$

il vient:

$$h \geq \frac{DP}{2\sigma_{\max}} = \frac{1 \times 10 \cdot 10^5}{2 \times 3 \cdot 10^7} = 16 \text{ mm}$$

Valeur qui, elle aussi, doit être majorée.

I-6- Matériau de construction

Plusieurs matériaux peuvent être utilisés pour la construction de conduites forcées. Le choix des matériaux se fait principalement en fonction de la hauteur de chute et généralement conditionné par différents aspects techniques et économiques comme : (la pression, les joints, le diamètre, les pertes de charge, le poids, l'accessibilité au site, le terrain, le type de sol, la durée de vie, la maintenance, le transport, le cout, etc....).

Plusieurs matériaux peuvent être utilisés pour la construction de conduites forcées : fonte, PEHD, béton à âme en tôle, l'acier ;(le polyéthylène ; ciment ; métal ; bois ; le béton armé etc...).

Pour les fortes chutes et les diamètres importants, la construction mécano soudée est souvent le meilleur choix. Toutefois, les tubes soudés en spirale sont à considérer, s'ils existent dans la dimension requise, car leur prix est compétitif. Pour des hautes chutes, les conduites en fonte ductile ou en acier sont souhaitables, mais pour des moyennes et basses chutes, l'acier est moins approprié [2].

Les conduites en acier : sont formées d'une succession de viroles en tôle fabriquées en usine et assemblées l'une à l'autre par soudage. Il s'agit en effet de la technologie historique de fabrication de ces ouvrages, celle-ci étant intimement liée aux savoir-faire et progrès de la métallurgie ainsi qu'aux moyens de mise en œuvre possibles (manutention des tuyaux sur site notamment). Sachant que l'acier est adapté à une situation de haute chute car c'est un matériau très résistant.

Chapitre 01 : Les conduites forcées

La question d'un enduit de protection s'est ensuite posée. Toutefois, selon l'avis d'experts hydrauliques, la conduite en acier n'est pas sujet au phénomène de corrosion, et d'autre part aucun matériau n'est adapté que ce soit d'un point de vue technique ou d'un point de vue économique.

En effet, actuellement il est possible d'enduire la conduite avec du ciment ou du polyuréthane. Le polyuréthane est d'ailleurs un matériau intéressant à première vue puisqu'il permet la réduction des pertes de charge dans la conduite. Cependant, le ciment peut s'effriter (ce qui pourrait être néfaste pour la turbine Pelton), et le polyuréthane a un coût d'achat trop élevé par rapport à l'électricité produite en tenant compte de la diminution des pertes de charge. (solution retenue : conduite forcée en acier sans enduit).

Circonstances dans lesquelles on emploie la fonte, le ciment ou la tôle :

Lorsqu'on examine les grandes installations de forces hydrauliques faites pendant ces dernières années dans divers pays, on constate qu'à peu d'exceptions près, les matériaux employés pour la construction des conduites forcées sont le ciment et la tôle d'acier. On rencontre bien plus rarement la fonte.

Pour le ciment et la tôle s'expliquent par les avantages économiques certains que procure l'emploi de ces matériaux, lesquels sont, d'ailleurs, dans beaucoup de cas, les seuls à pouvoir satisfaire aux conditions techniques imposées par ces installations. Mais, dans plusieurs cas cependant, ces avantages peuvent ressortir en faveur des conduites en tuyaux de fonte.

Le ciment a l'avantage de se prêter au moulage sur place en forme circulaire à grands diamètres, forme résistante qui permet d'admettre l'eau sous pression. La résistance à la rupture des tuyaux en ciment est, on le sait, notablement accrue par l'insertion d'armatures métalliques.

Dans le cas des gros débits, il n'y a donc pas lieu d'être surpris de voir la conduite en fonte peu employée. L'illogisme qu'il y aurait à remplacer une conduite en ciment armé de grande section par plusieurs conduites en fonte de section moindre apparaît de suite, au point de vue économique du moins. Par exemple pour une même charge par mètre, la vitesse de l'eau est plus grande quand le diamètre est plus grand, que, par conséquent, il faudrait un

Chapitre 01 : Les conduites forcées

nombre de conduites en fonte tel que la somme de leurs sections soit plus grande que la section de la conduite unique en ciment. Il en résulterait, sans nul doute, une plus grande dépense d'installation. [3]

Les conduites forcées en béton armé peuvent remplacer les conduites en acier pour les moyennes et basses chutes, où la pression de service est faible ou peu élevée, et de ce fait la vitesse, donc le débit, relativement élevés, donc avec de grandes sections. Le béton armé peut être ordinaire ou armé précontraint. Le béton ordinaire offrant une faible résistance à la traction, les conduites en béton ordinaire possèdent des armatures circulaires et longitudinales qui utilisent de l'acier (en fait, la quantité d'acier nécessaire est de 50% supérieure à celle d'une conduite forcée en acier, mais choisi de moindre qualité, donc moins coûteux). Les conduites en béton ordinaire supportent une pression maximale admissible de 60 m de hauteur de chute d'eau (6 bars). [1]

La pénurie de fer a également aidé aux recherches d'un matériau de remplacement pour les conduites forcées en acier des usines hydro-électriques. On a introduit avec succès les tuyaux en éternit à petites et moyennes sections pour hautes pressions (voir fig. 1.09) ainsi que les tuyaux en béton centrifugé pour les grands diamètres et les basses pressions. Ces tuyaux ont permis à notre économie publique de suppléer à un tonnage important de conduites métalliques.



Figure 1.10 : conduite forcée en tuyau d'éternit.

Chapitre 01 : Les conduites forcées

La nécessité d'épargner l'acier a aussi développé l'emploi combiné du fer et du béton centrifugé pour l'exécution des conduites forcées. Le tuyau en béton centrifugé est caractérisé par une grande étanchéité de la paroi et par un excellent coefficient hydraulique (très faible résistance à l'écoulement). L'état extrêmement lisse de la paroi intérieure s'obtient automatiquement par la centrifugation qui projette les composants grossiers du béton à l'extérieur tandis qu'à l'intérieur se forme une couche polie riche en ciment. Des mesures effectuées sur des conduites forcées en béton centrifugé ont prouvé que le coefficient hydraulique ne diminuait pas au cours du temps.

Les tuyaux en béton centrifugé de fabrication normale sont prévus pour des pressions de fissuration de 5 à 17 at., les diamètres intérieurs correspondants allant de 160 à 10 cm. En renforçant la paroi et l'armature, on peut obtenir des tuyaux résistant à des pressions intérieures encore plus élevées. Les limites supérieures pour la sollicitation à la pression intérieure sont fixées d'une part par la distance minimum entre les armatures et d'autre part par le comportement des tuyaux à parois épaisses vis à vis de la pression intérieure. Comme la traction annulaire spécifique n'est pas répartie uniformément à travers la paroi, la tension des fibres intérieures peut déjà dépasser la contrainte admissible tandis que celle des fibres extérieures est encore bien au-dessous. C'est pourquoi on s'est adapté depuis quelque temps à la fabrication de tuyaux à parois minces frettés de fils d'acier précontraints.

Les tuyaux en béton centrifugé pour conduites forcées sont assemblés par emboîtement. L'étanchéité du joint est assurée, comme pour les tuyaux en fonte, par une corde goudronnée enroulée et fortement matée; l'évasement aménagé reçoit ensuite une composition bitumeuse coulée à chaud ou une pâte de ciment.

Le béton possède une précieuse propriété que le fer ne connaît pas: c'est le colmatage automatique. Les pores se colmatent par la recristallisation des sels du béton qui ont été dissouts au contact de l'eau.

Les conduites en béton ont en outre l'avantage de n'exiger pratiquement aucun entretien. Il faut simplement éviter qu'elles puissent être attaquées par des matières nuisibles au ciment. Il est donc recommandable d'examiner l'eau passant par la conduite de même que celle du terrain entourant les tuyaux. L'analyse chimique établira le degré de danger par rapport au ciment.

Lorsque les tuyaux en béton devront être posés dans des terrains nocifs pour le ciment, il faudra les recouvrir d'un enduit protecteur et drainer les eaux agressives.

Pour le calcul des tuyaux en béton, on tiendra compte des moments de flexion provoqués par le propre poids du tuyau, par le remplissage d'eau et par la pression des remblais, à cause des contraintes de traction résultant de la pression intérieure — mise en charge. Les résultats de ces calculs étant acquis, on déterminera la section du tuyau d'après la théorie du béton armé.

Le procédé de fabrication des tuyaux centrifugés permet de disposer les armatures exactement à l'endroit où le calcul statique donne le meilleur rendement.

Lorsque le terrain n'est pas homogène, les conduites forcées sont placées sur des socles reposant en terrain résistant. Ces socles ont une épaisseur d'env. 40 à 50 cm. et doivent être disposés sous la cloche d'emboîtement avec un angle d'appui de 90° au minimum.

Dans les structures en béton armé pour le transport de l'eau, une des qualités essentielles est la protection de la surface intérieure; cette protection est nécessaire et essentielle pour garantir l'imperméabilité parfaite de la surface intérieure en maintenant caractéristiques excellentes de flux et une haute résistance aux agents chimiques.

Il y a aussi d'autres matériaux polymères (comme le PVC et polyéthylènes PE), les deux sont utilisées dans les systèmes géothermiques en raison de leurs similarités, les conduites en polychlorure de vinyle (PVC) et celles en polyéthylène à haute densité ont aussi de nombreuses différences. Elles sont considérées comme étant les deux principales catégories de conduites utilisées en construction souterraine. Ce qui suit examine de plus près les caractéristiques qui distinguent ces fournitures d'exploitation géothermiques l'une de l'autre, ainsi qu'une comparaison des deux produits.

➤ **Un aperçu des conduites en PVC**

Souvent utilisés dans les projets de construction, les tuyaux en PVC sont un polymère de vinyle (une conduite en PVC de 0,4 m de diamètre peut être utilisée jusqu'à une chute maximum de 200 mètres) parce qu'il est souvent plus économique, plus léger et plus facile à utiliser que l'acier et ne nécessite pas de protection contre la corrosion.

Chapitre 01 : Les conduites forcées

Les tuyaux en PVC sont habituellement installés sous terre avec une couverture minimum d'un mètre. En raison de leur résistance réduite aux rayons UV, ils ne peuvent pas être utilisés en surface à moins d'être peints, enrobés ou revêtus. Le rayon minimum de courbure d'un tuyau en PVC est relativement grand (100 fois le diamètre d'une conduite), et son coefficient de dilatation thermique est cinq fois plus élevé que pour l'acier. Ils sont également fragiles et inappropriés pour des sols rocheux. De plus, les conduites en PVC n'ont pas de forme prédéfinie.

Les avantages:

- ✓ Bonne résistance à la corrosion.
- ✓ Disponible sur le marché.
- ✓ Une pose de canalisation facile.

Leur inconvénient est le risque de rupture.

➤ Un aperçu des conduites en PE

PE résulte de l'association de nombreuses molécules simple de la famille des plastiques d'origine pétrochimique selon une réaction de polymérisation, qui a lieu dans un réacteur chimique sous une pression et une température donnée, en présence de catalyseurs.

Il existe différents modes de polymérisation: le procédé "haute pression" et les procédés "basses pressions".

Les conditions de synthèse du polyéthylène influent énormément sur la structure du produit final. Le PE est semi-cristallin à la température ambiante, c'est-à-dire que deux phases coexistent: une phase amorphe caoutchoutique, et une phase cristalline (rigide). On classe habituellement les PE, selon leurs propriétés à 20 °C, en trois types:

- Le PE basse densité (PEbd)
- Le PE moyenne densité (PEmd)
- Le PE haute densité (PEhd)

-Caractéristiques de la matière PE :

Les conduites en PEHD sont fabriquées à partir de pétrole, sont plus résistantes et plus solides que celles en PVC. Ce type de tuyauterie est semi-cristallin et a tendance à être plus dispendieux que les tuyaux en PVC. De plus, les tuyaux en PEHD sont capables de résister à

Chapitre 01 : Les conduites forcées

des températures plus élevées, les joints offrent une plus grande résistance à la pression, et sont plus résistantes à l'abrasion que les conduites en PVC. Elles ont la capacité d'amortir et d'absorber les chocs, ce qui a pour effet de minimiser les variations de puissance lorsque le système est utilisé. Ce qui fait qu'elles sont souvent un choix de prédilection pour les applications souterraines.

Les conduites en polyéthylène peuvent être utilisées pour transporter de l'eau dans toutes les sortes de sols. Cependant, lorsque les sols sont fortement contaminés, il faut juger au cas par cas de l'aptitude de ces conduites à être employées.

Les avantages des conduites en PE :

- ❖ Bonne résistance à la corrosion interne, externe, microbiologique et à l'entartage, grâce à l'inertie chimique du tuyau qui évite la dissolution et l'abrasion de métaux même si l'eau n'est pas parfaitement équilibrée :
- ❖ Disponibilité sur le marché ;
- ❖ Facilité de pose (bonne flexibilité), puisque on les trouve en couronnes ou en tourets jusqu'au Ø160 .ils s'adaptent donc bien au terrain ; possibilité d'enroulement en couronne pour les petits diamètres.
- ❖ Fiabilité au niveau des branchements (réduction de risque de fuite) ; ce qui améliore l'étanchéité du réseau.
- ❖ La conduite étant auto butée on supprime quasiment tout massif de butée.
- ❖ Bonne caractéristique hydraulique (coefficient de rugosité très faible).
- ❖ Durée de vie prouvée par l'expérience et le test de vieillissement théoriquement de 50 ans à une température de 20°C.
- ❖ Un matériau souple donc s'adaptant bien à la topographie du terrain.

Cependant, ces structures en polymère doivent être conçues et dimensionnées de façon à supporter les contraintes (mécaniques et environnementales) auxquelles elles sont exposées en service (ne résistent pas aux fortes pressions mises en jeu). La durabilité de ces structures est également une notion importante à prendre en compte dans l'estimation de leur durée de vie. En effet, elles sont souvent exposées à des contraintes environnementales sévères (exposition aux UV, aux produits chimiques, etc...), qui induisent en général une modification de la nature même du matériau. La déformation plastique des thermoplastiques semi cristallins a longtemps constitué un sujet d'actualité pour la communauté scientifique.

Chapitre 01 : Les conduites forcées

Dans les mêmes conditions expérimentales, on peut retrouver un grand nombre de types de comportement à savoir la viscoélasticité, l'hyper-élasticité, la plasticité...etc. Une des caractéristiques les plus remarquables des thermoplastiques semi cristallins est leur faculté à subir une grande déformation plastique avant la rupture à température ambiante [4].

Dans le cas d'applications techniques, ces matériaux peuvent être exposés à des environnements agressifs conduisant à une altération de leurs propriétés. La dégradation des polymères a une grande influence sur leur comportement mécanique. Selon l'interaction chimique, les additifs peuvent modifier leur structure chimique et, par conséquent, réduire leur activité.

Actuellement, l'une des raisons principales est la crainte encore ressentie par les industriels envers les matériaux semi-cristallins dont ils ne maîtrisent pas totalement l'évolution du comportement dans le temps. Le polymère est en effet amené à subir des conditions climatiques extérieures qui peuvent altérer la structure chimique des macromolécules ou des adjuvants (vieillessement thermique ou chimique), la composition du matériau (pénétration ou départ de petites molécules), ou son état physique (taux de cristallinité, fraction de volume libre, contrainte interne,...), tous ces phénomènes peuvent faire évoluer les propriétés mécaniques des polymères au cours du temps.[5-6]

Dans les pays en voie de développement, la conduite en bois renforcée par des cerces de tôles d'acier constitue une variante pouvant être utilisée pour des diamètres allant jusqu'à 5,5 mètres et des chutes allant jusqu'à 50 mètres (jusqu'à 120 mètres pour un diamètre de 1,5 mètres).

Les avantages sont : une flexibilité s'adaptant aux conformités du terrain, la facilité de pose sur sol pratiquement sans mise à niveau, aucun besoin de joints de dilatation et aucune nécessité de supports en béton ou de protection contre la corrosion. Une conduite en bois est assemblée à partir de douves individuelles et de bandes ou cerces en acier qui lui permettent d'être facilement transportée, même sur un terrain difficile.

Les inconvénients sont : des pertes, particulièrement pendant les opérations de remplissage, la nécessité de garder le tuyau rempli d'eau lorsque la turbine est en

Chapitre 01 : Les conduites forcées

maintenance, et un entretien important comme par exemple le revêtement par pulvérisation de goudron tous les cinq ans. Le tableau 1.1 indique les principales propriétés des matériaux adaptés pour les conduites forcées.[5]

Tableau 1.1 : Différentes caractéristiques de matériaux

Matériau	Module d'élasticité de Young E (N/mm ²) E9	Coefficient de dilatation linéaire a (m/m°C) E6	Résistance à la rupture maximale (N/mm ²) E6	n
Acier soudé	206	12	400	0,012
Polyéthylène	0,55	140	5	0,009
Chloride polyvinyle (PVC)	2,75	54	13	0,009
Ciment amianté	n/a	8,1	n/a	0,011
Fonte	78,5	10	140	0,014
Fonte ductile	16,7	11	340	0,013

Pour des diamètres plus petits, il faut choisir entre:

- Des conduites en acier mécano soudées, munies d'un assemblage en tulipe et joints toriques, qui évitent le soudage au chantier, ou de brides soudées boulonnées sur site ;
- Des conduites en béton centrifugé ou précontraint ;
- Des tuyaux en fonte ductile emboîtés en tulipe avec joints;
- Des conduites en amiante ciment ;
- Des conduites en plastique renforcé de verre (GRP) ;
- Et des tuyaux en plastique PVC ou en polyéthylène (PE).

I-7- Conclusion

Dans ce chapitre on a fait le tour sur les conduites forcées, l'écoulement dans ce type de conduite en régime permanent et non permanent ainsi que les effets de courbure pour finir avec leur matériau de construction, dans le chapitre qui suit on va voir la disposition constructive de ces conduites forcées.

II-Introduction :

L'installation des conduites forcées peut se faire de deux manières soit elles sont enterrées, soit elles sont aériennes et ceci selon les conditions et les exigences du site ou du terrain en question.

II-1- Les différents types d'installations des conduites forcées

Le mot conduite désigne indistinctement les conduites aériennes (tronçons implantés en surface, ou remblayés ou implantés en galerie [7] mais non encastrés au massif rocheux traversé) ou les conduites souterraines (tronçons réalisés avec des viroles « bloquées au rocher » qui sont encastrées dans un massif rocheux). Pour certaines installations, la conduite forcée est raccordée à un réseau de galeries souterraines en charge.

II-1-1- Conception hydraulique et exigences structurelles [5]

Une conduite forcée est caractérisée par un matériau, un diamètre, une épaisseur de paroi et un type de joints :

- ❖ Le matériau est sélectionné selon les conditions de sol, l'accessibilité, le poids, le système de jonction et le coût,
- ❖ Le diamètre est sélectionné pour réduire les pertes de frottement dans la conduite forcée jusqu'à un niveau acceptable,
- ❖ L'épaisseur de paroi est sélectionnée pour résister à la pression hydraulique interne maximale, incluant une surpression transitoire.

II-1-2- Mise en place de la conduite sur le terrain [6]

On distingue deux types de tronçons de conduites forcées :

- Les conduites bloquées au terrain dont l'ensemble des équipements est encastré au rocher ;
- Les conduites non bloquées au terrain qui, par complémentarité, rassemble les conduites aériennes, remblayées ou libres dans une galerie.

Par convention, les premières sont dites « souterraines », les secondes « aériennes ».

- Identification de tronçons selon le type d'installation :

- Aérienne : en extérieur ou en galerie,
- Souterraine : en tranchée remblayée ou bloquée au rocher, en siphon, sur un pont, etc.

Le choix qui se pose dans cette partie concerne la disposition souterraine ou aérienne de la conduite forcée :

A - Conduites aériennes

Les conduites « aériennes » sont apparentes, et reposent sur des massifs d'ancrage en béton ou en maçonnerie en appui sur des pilettes.



Figure 2.1: exemple de conduite forcée aérienne, avec ses appuis sur des pilettes et ces ancrages.

(Source: Sécurité des conduites forcées - Bureau d'Étude Technique et de Contrôle des Grands Barrages (STEEGB/BETCGB))

B - Conduites enterrées

Dans ce cas, les conduites sont placées dans une tranchée et recouvertes par un remblai. Leurs avantages ainsi que leurs inconvénients sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 1.2 : les avantages et les inconvénients des conduites

Types de conduites	Avantages	Inconvénients
Conduites aériennes	<ul style="list-style-type: none">- Concerne l'entretien et la visite aisé des conduites.- Elles présentent l'avantage	<ul style="list-style-type: none">- Grand nombre de massifs d'ancrage à implanter le long de la conduite;- Risque de rupture en cas

Chapitre II : Dispositions constructives des conduites forcées

	<p>d'être visitées et contrôlées facilement</p> <p>- Elles sont visibles et accessibles et peuvent être surveillées visitées et entretenues facilement [13]</p>	<p>d'avalanches ou d'éboulements;</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aspect jugé disgracieux dans certains sites touristiques; - Influence des variations de température importante, donc il faut prendre en compte les effets des déformations lors de la pose de la conduite sur le massif d'ancrage (mise en place technique délicate). - Sont exposées aux éléments extérieurs: température, éboulements, intempéries de toute sorte et malveillance.
<p>Conduites enterrées</p>	<p>-Sont protégés des éléments extérieurs : température, éboulements, intempéries de toute sorte et malveillance.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Leur surveillance et leur entretien sont impossibles. - Les inspections sont plus difficiles que pour les conduites aériennes. -Leur installation est coûteuse car le prix de la tranchée et celui du remblaiement sont souvent très élevés.

La conduite peut également être placée dans une galerie ou un puits blindé, de diamètre plus grand que celui de la conduite, et dans certains cas, un bourrage est réalisé entre les parois de la galerie et ceux de la conduite. Le coût de ces réalisations est nettement plus élevé que pour les conduites aériennes ou simplement enterrées. C'est pourquoi on limite cette technologie aux cas où la conduite doit franchir une crête montagneuse. [8]

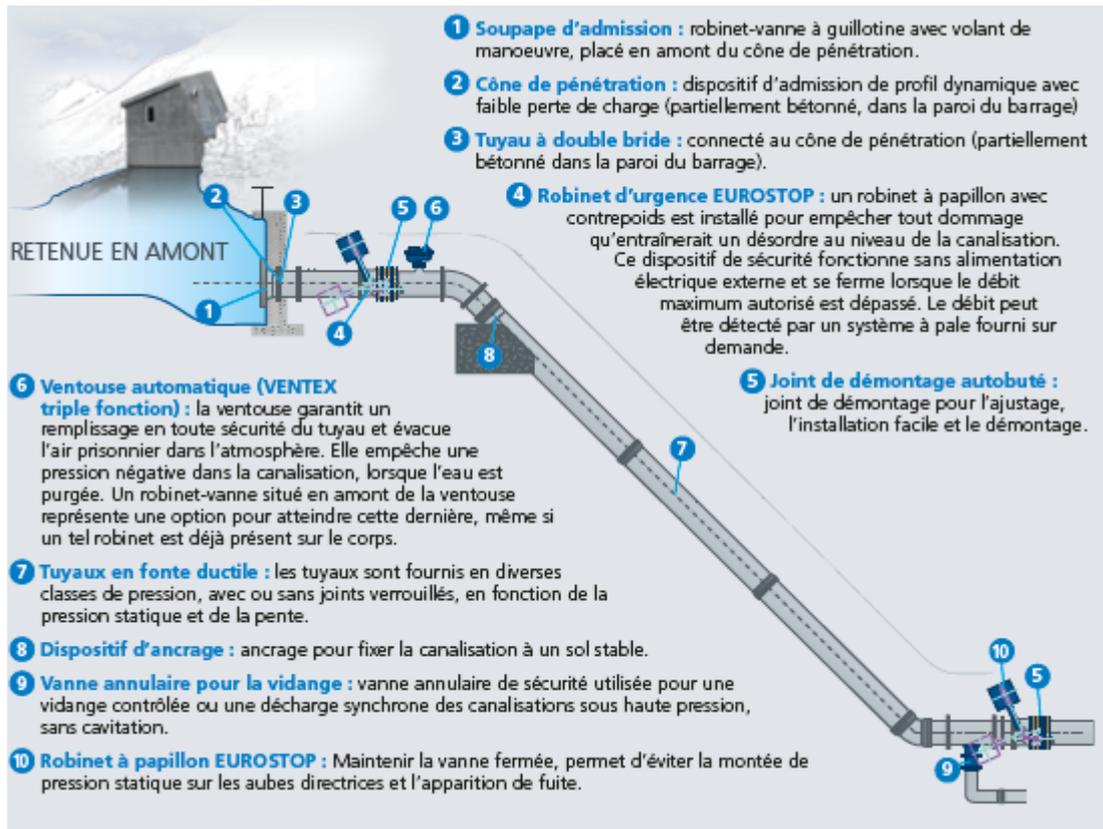


Figure 2.2 : schéma d'une installation d'une conduite forcée en fonte ductile.

Source : Saint Gobain PAM – Catalogue HYDROPAM – Edition 2018.

II-1-3- Le choix de l'emplacement des conduites [8]

Le choix de l'emplacement des conduites est très important. Il faut, dans la mesure du possible, éviter d'avoir à traverser des agglomérations, des routes, des voies de chemins de fer, des rivières. Il faut rechercher les terrains stables à l'abri des avalanches et des éboulements, trouver un tracé rectiligne en plan, une pente générale aussi uniforme que possible.

Les pentes de 50 à 100 % sont celles qui conviennent le mieux, ou -dessous les conduites ne sont pas économiques et au-dessus on rencontre de grandes difficultés à tous les points de vue: montage, stabilité, travaux de génie civil, entretien. L'examen de la nature du terrain traversé par les conduites joue un rôle dans le choix du type de canalisation. Dans le choix de la solution à adopter il faut aussi tenir compte du nombre et du diamètre des conduites.

Chapitre II : Dispositions constructives des conduites forcées

Tableau 2.2 : Les différents cas d'utilisation des conduites aérienne et enterrées

Cas de conduites aériennes	Cas de conduites enterrées
En roche dure, l'exécution de tranchées profondes n'est pas à envisager	Les conduites sont situées dans des régions touristiques où les sites sont classés, ou si elles sont installées près de lieux stratégiques ou frontaliers
En terrains marécageux, la tranchée, la pose et l'entretien sont trop onéreux	Lorsque les conduites traversent des zones d'avalanches ou d'éboulis
Pour les traversées de torrents et rivières ou c'est plus facile de passer en-dessus, sur piles, sur passerelles ou par traversée auto portante en arc	Certains tuyaux de faible épaisseur ou de construction délicate doivent être protégés contre les éléments extérieurs.
Pour les conduites en forte pente le remblaiement des conduites en tranchées est difficile et coûteux, car le maintien des remblais exige des travaux préparatoires importants.	
Pour une conduite de grand diamètre ou plusieurs conduites parallèles, les travaux de terrassement et de remblaiement deviennent prohibitifs	
Pour des conduites de petits diamètres	

Remarque :

Les traversées de routes, voies de chemin de fer, nécessitent des ouvrages d'art appropriés, mais les conduites peuvent aussi être noyées dans des massifs de béton à ces passages.

Que les conduites soient aériennes ou enterrées, il est nécessaire que les tuyaux reposent sur le sol par l'intermédiaire de piliers stables et qu'elles soient convenablement ancrées en des points judicieusement choisis et absolument fixes.

Si elles sont enterrées, les travaux de remblaiement et le drainage des eaux d'infiltration seront à voir de près. Pour le remblaiement il est recommandé de remplir la partie inférieure de la tranchée jusqu'au niveau de la génératrice inférieure des conduites, de pierres bien posées et calée formant un drain.

Les eaux d'infiltration pourront être amenées hors du tracé des conduites par des drains latéraux disposés de loin en loin en des points convenables. Le reste de la tranchée sera ensuite comblé à l'aide de déblais jusqu'à un mètre environ au-dessus de la génératrice supérieure des tuyaux.

Il s'agit en somme, de cas d'espèces que le bon sens et l'expérience permettront facilement de solutionner; la formule mixte sera parfois la meilleure. L'examen du prix de revient pourra aussi être un élément déterminant dans la décision à prendre, mais de toute façon celle-ci dépendra en grande partie de l'avis du spécialiste dont on devra tenir le plus grand compte.

II-1-4- Les méthodes d'installation des conduites [5]

L'acheminement de l'eau en direction de la centrale à partir de la prise (définition d'une conduite) peut paraître simple. Toutefois, le choix de l'agencement le plus économique pour une conduite forcée n'est pas une tâche facile. Les conduites forcées peuvent être apparentes ou enterrées, en fonction de facteurs tels que la nature du sol lui-même, le matériau pour la conduite forcée, les températures ambiantes et les contraintes environnementales.

Une conduite forcée de petit diamètre en PVC, par exemple, peut être posée sur le sol en fond de fouille selon sa configuration, à l'aide de sable et de gravier autour de la conduite pour fournir une bonne isolation. De petites conduites installées de cette manière ne nécessitent pas de blocs d'ancrage ni de joints de dilatation.

Les conduites forcées plus grandes ne sont généralement enterrées que si un minimum d'excavation de roche est exigé. Les conduites forcées enterrées doivent être soigneusement peintes et revêtues pour protéger l'extérieur de la corrosion, mais en supposant que le revêtement de protection n'est pas endommagé lors de l'installation, la maintenance ultérieure devrait être minime. Sur le plan environnemental, la solution est optimale car le sol peut revenir à son état d'origine, et la conduite forcée ne constitue pas d'obstacle à la faune ni à la flore.

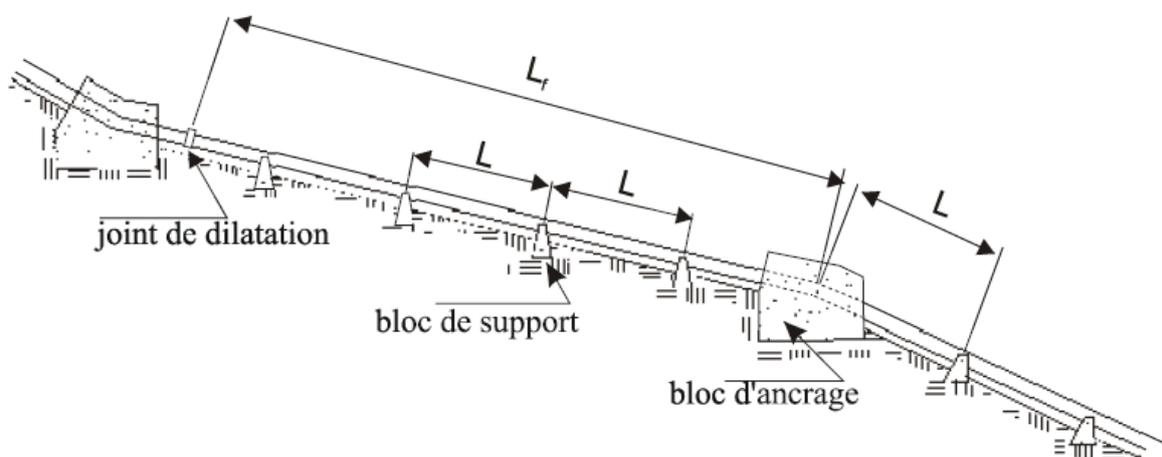


Figure 2.3 : Conduite forcée.

Chapitre II : Dispositions constructives des conduites forcées

Une conduite forcée installée au-dessus du sol peut être conçue avec ou sans joints de dilatation. Les variations de température sont particulièrement importantes si la turbine ne fonctionne pas de manière continue, ou lorsque la conduite forcée est vidée pour une réparation, ce qui entraîne une dilatation ou une contraction thermique. Habituellement, la conduite forcée est construite en lignes droites ou presque droites, avec des blocs d'ancrage en béton à chaque coude et avec un joint de dilatation entre chaque bloc d'ancrage (figure 2.4).

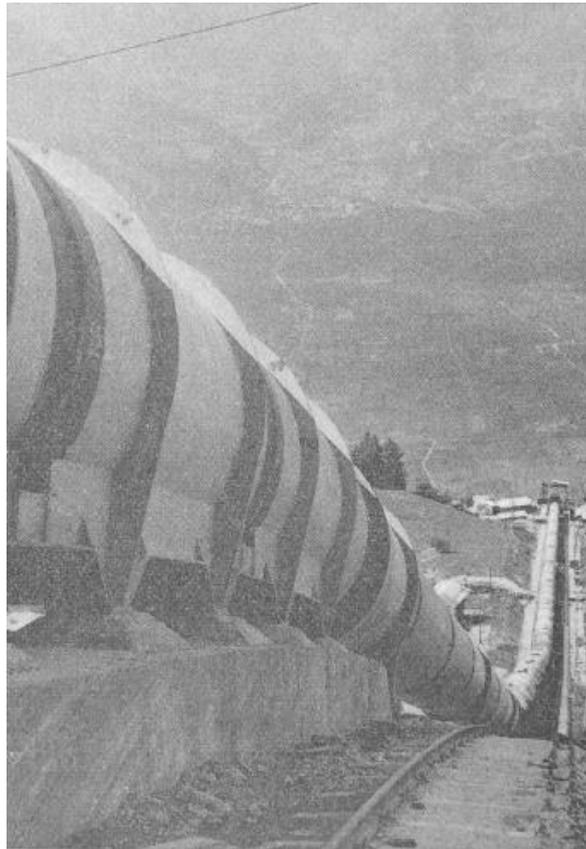


Figure 2.4 : Conduite forcée avec des blocs d'ancrage en béton.

Les blocs d'ancrage doivent résister à la poussée de la conduite forcée ainsi qu'aux efforts induits par sa dilatation ou sa contraction. Les fondations doivent donc, si possible, être réalisées sur de la roche. Si, en raison de la nature du sol, les blocs d'ancrage demandent de grands volumes de béton, entraînant des coûts élevés, en solution alternative il peut être possible d'éliminer chaque deuxième bloc d'ancrage et tous les joints de dilatation, permettant aux coudes de bouger légèrement. Dans ce cas, il est souhaitable de poser les sections droites de la conduite forcée sur des berceaux en acier, adaptés aux contours de la conduite et couvrant généralement 120 degrés de la section (figure 2.5).

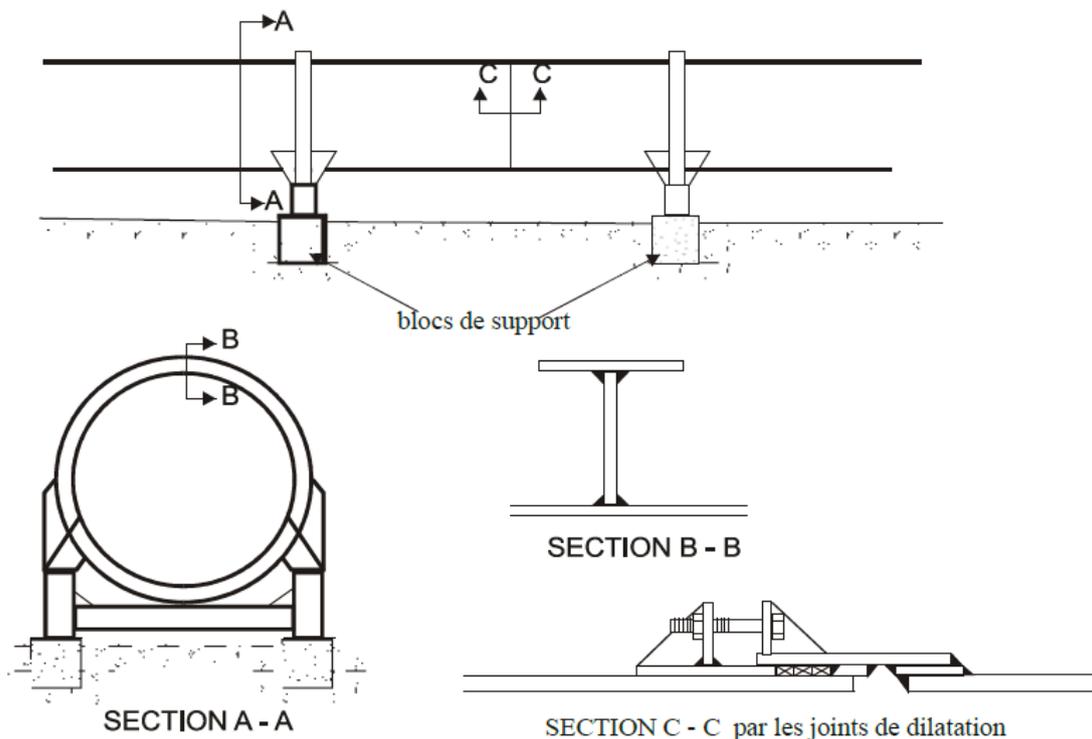


Figure 2.5 : conduite forcée avec blocs d'ancrage en béton et joints de dilatation.

Le berceau peut être constitué de profilés et de plaques d'acier, avec un matériau auto lubrifié placée entre le berceau et la conduite pour réduire les forces de frottement. Les déplacements peuvent être absorbés par les joints de dilatation, ou en concevant le tracé de la conduite avec des coudes libres de leur mouvement. Si la conduite forcée utilise un principe d'assemblage en tulipe avec des joints toriques, alors la dilatation et la contraction seront absorbées au niveau des joints.

II-2- Le paramètre de sécurité [9]

Les caractéristiques de conception des conduites forcées font de chaque ouvrage un objet d'examen unique. En effet, les paramètres suivants varient d'une conduite à l'autre :

A - Paramètres géométriques : ce sont les épaisseurs, les diamètres extérieur et intérieur, les longueurs de tôles. Une singularité est que ces paramètres varient sur une même conduite compte tenu des variations de pression hydraulique entre le sommet et le bas de l'ouvrage.

B - Paramètres métallurgiques : l'étalement des conceptions dans le temps (plus de cent ans) entraîne la coexistence d'aciers de propriétés mécaniques et métallurgiques variées (tôle en acier à faible limite d'élasticité renforcé par système de frettes pour les ouvrages anciens aux viroles en aciers à haute limite élasticité qui sont maintenant incontournables pour les ouvrages les plus récents).

C - Caractéristiques d'assemblages : pour les plus anciens ouvrages, ce sont les conceptions rivetées qui dominent : joints circulaires et axiaux aujourd'hui le soudage de tôles de fortes épaisseurs ne représentant plus un problème sur le chantier,

D - Caractéristiques d'édification : les ancrages et appuis au relief sont réalisés par des interfaces en béton disposés à intervalles réguliers, caractéristiques topologiques : l'adaptation au relief géologique induit des pentes, des variations de pentes et quelquefois des changements de direction qui varient aussi bien d'un ouvrage à l'autre que sur un même ouvrage, la mise en place de tronçons enterrés peut être également rendu nécessaire.

E - Historique de l'ouvrage : les conditions d'entretien et d'exploitation induisent par exemple un état des revêtements internes et externes anti-corrosion très dispersés selon les ouvrages. Les remplacements partiels de tronçon peuvent également laisser subsister sur une conduite des caractéristiques d'assemblages différentes. Les sollicitations subies (pressions, agressions géologiques,...) sont aussi propres à chaque ouvrage.

La liste de ces paramètres est non-exhaustive et doit être pris en compte par les inspecteurs et ingénieurs pour établir le diagnostic de santé de l'ouvrage.



Figure 2.6 : exemple de conduite forcée de conception rivetée.



Figure 2.7 : exemple de perte d'épaisseur localisée affectant les conduites forcées.

Ces pertes d'épaisseurs affectent aussi bien la paroi externe que la paroi interne des conduites.

II-3- Rôle des conduites forcées

L'application de ces principes de base à une chute d'eau équipée s'effectue, en amont, par la construction d'un barrage en travers du courant ce qui permet de régulariser le débit mais aussi de surélever l'altitude du point de départ A et d'augmenter ainsi la hauteur de la chute. Derrière ce barrage se formera un lac artificiel qui pourra en montagne être utilisé lors des périodes creuses en hiver avant la fonte des neiges.

Le site qui se prête le mieux à la construction d'un barrage et d'une importante retenue d'eau est souvent éloigné de celui où peut être implantée une centrale. Dans ce cas, la conduite forcée qui va supporter la pression due à la différence de niveau, doit rester la plus courte possible dans un but économique, d'où la réalisation d'une première galerie à faible pente jusqu'à l'aplomb de la centrale.

Chapitre II : Dispositions constructives des conduites forcées

Une cheminée d'équilibre est placée entre la galerie et la conduite forcée pour amortir les variations de pression qui peuvent intervenir lors d'un changement brutal de débit. Cette variation dénommée « coup de bélier » est souvent provoquée par la fermeture des vannes en pied de conduite forcée. La cheminée permet aussi de laisser entrer l'air lors de la vidange et joue alors le rôle de « reniflard », dispositif utilisé pour éviter que la conduite ne s'écrase sous l'effet de la pression atmosphérique en cas de vidange brusque.

À l'aval, un collecteur répartit l'eau vers les turbines. Lorsque les vannes du bas sont fermées et celles du haut ouvertes, la conduite est à l'état de repos, un manomètre placé en bas permet de mesurer la charge statique soit la hauteur d'eau. Lorsqu'on ouvre la vanne du bas, le manomètre indique une pression qui va diminuer au fur et à mesure de l'ouverture de la vanne cela va permettre de mesurer la perte de charge dans la conduite.

Cette perte correspond au travail absorbé par les frottements contre les parois ou par les changements de direction. Elle dépend de la nature des parois de la conduite, de sa longueur de son diamètre, de la vitesse de l'eau. Les conduites soudées qui ont remplacé les conduites rivées ont permis de diminuer cette perte de charge de près de 40%.



Figure 2.8 : Structure de conception ancienne : conduites forcées rivées.



Figure 2.9 : Structure de conception plus récente : conduites forcées soudées.

II- 4- Conclusion

Dans ce chapitre on s'est concentré sur les différents types d'installations passant par la conception hydraulique et la mise en place, le choix de l'emplacement ainsi que la méthode d'installation des conduites en prenant en considération le paramètre de sécurité. On s'est tirées sur le choix des conduites forcées aérienne vue l'entretien et la visite aisé des conduites, l'avantage d'être visitées et contrôlées facilement, elles sont visibles et accessibles et peuvent être surveillées visitées et entretenues facilement.

Chapitre III : Le dimensionnement le plus économique et optimal dans les conduites forcées

III-1-INTRODUCTION :

Il s'agit dans cette partie de déterminer les caractéristiques géométriques : son diamètre, son épaisseur et sa longueur.

III-2- Dimensionnement de la conduite forcée

III-2-1- Notion théorique de diamètre économique

La détermination du diamètre de la conduite dépend essentiellement de considérations économiques. On est conduit à rechercher la valeur particulière du diamètre pour lequel les dépenses annuelles résultant de l'existence et de l'utilisation de la conduite (charges financières et d'exploitation) sont les plus faibles possibles.

Les charges annuelles sont la somme de deux termes :

a)-Les charges correspondant à l'intérêt et à l'amortissement du capital investi dans la conduite (C_I).

- Ces charges sont calculées de la façon suivante :
- On calcule le coût de la conduite de longueur L pour un diamètre donné,
- On calcule le coût nécessaire à la construction de la conduite (transport et création des tranchées),
- On calcule les coûts annuels d'intérêts et d'amortissement (C_{am}) sur une période de 40 ans.

On utilise la formule suivante :

$$C_{am} = C_{tot} \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Avec :

C_{tot} : coût total de construction (capital à investir)

i : Taux d'intérêts du capital investi C_{tot}

n : Durée d'amortissement (40 ans)

Chapitre III : Le dimensionnement le plus économique et optimal dans les conduites forcées

- On calcule les dépenses annuelles d'entretien et de réparations qui s'élèvent à environ 0,5% des coûts de construction.

b) - Les charges correspondant aux pertes d'énergie (c2).

- Ces charges correspondent aux coûts annuels d'exploitation. Il s'agit de calculer (virtuellement) la puissance de pompage (P_p) qu'il faudrait fournir pour vaincre les pertes de charge liées au diamètre de la conduite. Cette puissance est définie de la sorte :

$$P_p = \frac{\rho g Q_e h_{pc}}{\eta}$$

Avec :

Q_e : débit d'équipement de la turbine (m^3/s).

h_{pc} : pertes de charge totales dans la conduite (m).

η : rendement de l'unité de pompage.

Les pertes de charge se déterminent grâce à la formule de Strickler :

$$v = k_s R_H^{2/3} \sqrt{j} \quad \text{donc} \quad h_{pc} = jL = \left(\frac{4^{5/3} Q_e}{\pi k_s D^{8/3}} \right)^2 L$$

Avec :

D : diamètre de la conduite (m)

R_h : rayon hydraulique ($D/4$ pour une conduite circulaire) (m)

j : perte de charge par mètres (m/m)

k_s : coefficient de rugosité de Strickler ($m^{(1/3)}/s$)

L : longueur de la conduite (m)

Les dépenses annuelles totales (dep) sont la somme des charges ci-dessus :

$$dep = c1 + c2.$$

La courbe représentative des variations de dep en fonction du diamètre D de la conduite, pour une valeur donnée du débit, présente un minimum pour une certaine valeur De . De est le diamètre économique de la conduite forcée.

III-2-2- Diamètre de la conduite forcée

Le diamètre est choisi en optimisant le coût de la conduite forcée par rapport aux pertes de puissance qu'elle génère. Pour mémoire, la puissance électrique disponible est donnée par l'équation :

Chapitre III : Le dimensionnement le plus économique et optimal dans les conduites forcées

$$P_h = \rho \cdot Q \cdot gH \cdot \eta \quad P \text{ [W]}$$

Où :

Q = débit en m^3/s

gH = énergie hydraulique massique à disposition

ρ = masse volumique de l'eau en kg/m^3

η = rendement total

La chute nette (encore largement utilisée) correspond à gH/g ou g est la constante de gravité. Elle équivaut à la chute brute (dénivellation) moins la somme de toutes les pertes, incluant les pertes par turbulence et frottement (pertes de charge) dans la conduite forcée, qui sont pratiquement proportionnelles au carré de la vitesse d'écoulement. Pour transporter un certain débit, une conduite forcée de petit diamètre va nécessiter une vitesse d'eau plus élevée qu'une conduite forcée de grand diamètre, et par conséquent, les pertes vont être plus grandes. Sélectionner un diamètre aussi petit que possible va minimiser le coût de la conduite forcée mais augmenter les pertes d'énergie et vice versa.

Un simple critère pour le choix du diamètre est de limiter la perte de charge à un certain pourcentage. Une perte d'énergie de 4 % est habituellement admise. Une approche plus rigoureuse consiste à sélectionner différents diamètres possibles, en calculant la puissance disponible et l'énergie annuelle produite. La valeur de cette perte d'énergie par rapport à la durée de vie de la centrale est calculée et déterminée pour chaque diamètre (figure 3.1).

Parallèlement, le coût de la conduite pour chaque diamètre est également déterminé. Les deux courbes sont superposées graphiquement et le diamètre optimal sera celui le plus près de la valeur optimale. En fait, les pertes de charge principales dans une conduite forcée sont les pertes de frottement. Les pertes de charge causées par les turbulences au passage de la grille amont, à l'entrée de la conduite, dans les coudes, les dilatations, les contractions et les vannes sont des pertes mineures. Par conséquent, une première approche va suffire pour calculer les pertes de frottement, en utilisant par exemple l'équation de Manning :

Chapitre III : Le dimensionnement le plus économique et optimal dans les conduites forcées

$$h_f/L = 10.3 (n^2 Q^2 / D^{5.333}) \quad (5.16)$$

En examinant l'équation ci-dessus, on peut voir qu'en divisant le diamètre par deux, on aurait les pertes multipliées par 40. De là, il s'en suit :

$$D = (10,3 \cdot n^2 \cdot Q^2 \cdot L / h_f)^{0.1875} \quad (5.17)$$

Si nous limitons h_f à $4H/100$, D peut être calculé en connaissant Q, n et L, par l'équation:

$$D = 2.69 (n^2 Q^2 L / H)^{0.1875} \quad (5.18)$$

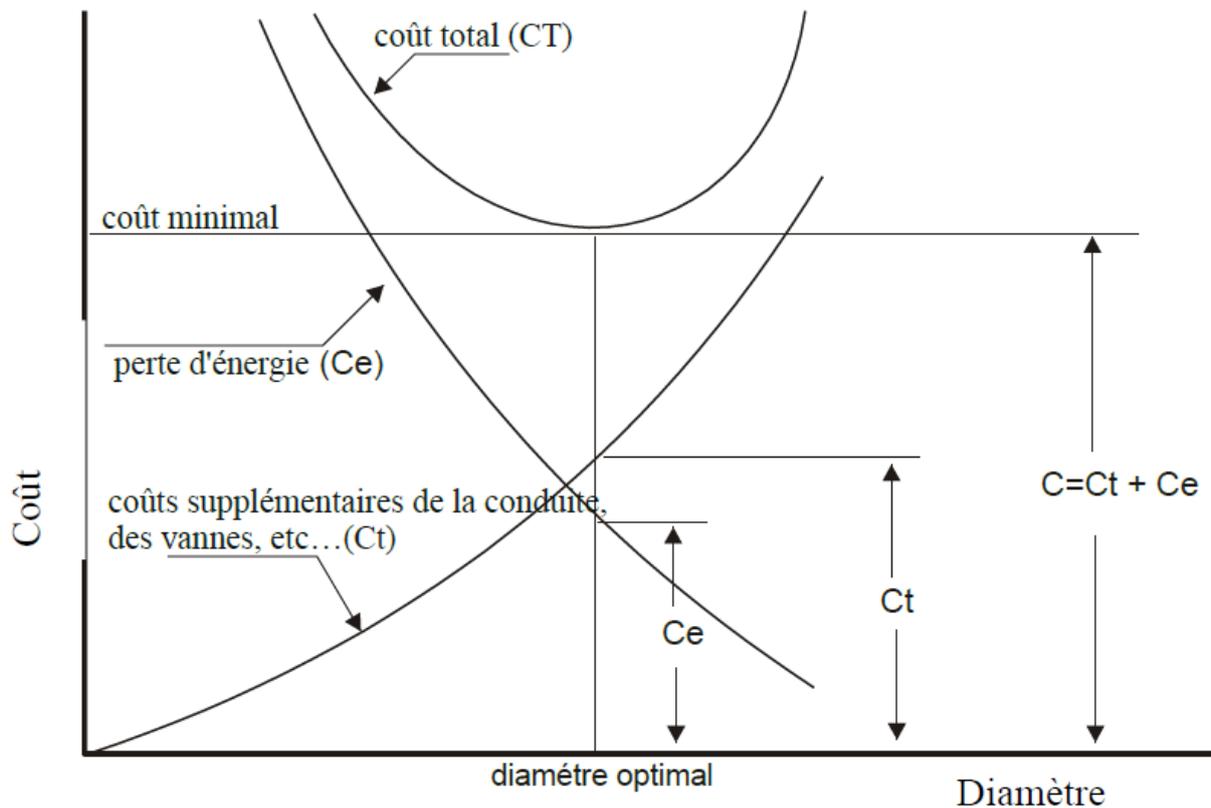


Figure 3.1 : optimisation économique.

III-3- Epaisseur de paroi

Chapitre III : Le dimensionnement le plus économique et optimal dans les conduites forcées

Cette épaisseur de tube est en fait calculée en appliquant les méthodes de la résistance des matériaux. En effet, il faut tenir compte de la pression de l'eau (majorée de la valeur de la surpression ΔP due au coup de bélier), du poids propre de la conduite, des efforts thermiques et hydrauliques.

L'épaisseur de paroi exigée dépend du matériau de la conduite, de sa résistance maximale à la traction, et de sa limite élastique, de son diamètre et de la pression d'exploitation. Dans les écoulements permanents (débit supposé constant dans le temps), la pression à un point quelconque le long de la conduite forcée est équivalente à la charge d'eau au-dessus de ce point (diminuée des pertes de charge jusqu'à ce point). L'épaisseur de paroi est dans ce cas calculée par l'équation :

$$e = P_1 \cdot D / 2\sigma_f$$

Où :

e = épaisseur de paroi en m

P_1 = pression hydrostatique en N/mm^2

D = diamètre interne de conduite en m

σ_f = contrainte admissible en N/mm^2

Dans des conduites en acier, l'équation ci-dessus est modifiée comme suit :

$$e = (P_1 \cdot D / 2 \sigma_f \cdot K_f) + e_s$$

Où :

e_s = épaisseur supplémentaire pour prendre en compte la corrosion

$k_f = 1$ pour des conduites sans soudure

$k_f = 0,9$ pour soudures inspectées au rayon X

$k_f = 1,0$ pour des soudures inspectées aux rayons X et stabilisées

σ_f = contrainte admissible ($140 N/mm^2$)

La conduite doit être assez rigide pour être manipulée sans danger de déformation sur le terrain. ASME (American Society of Mechanical Engineers) recommande une épaisseur

Chapitre III : Le dimensionnement le plus économique et optimal dans les conduites forcées

minimum en mm équivalente à 2,5 fois le diamètre en mètres augmenté de 1,2 (mm). D'autres organisations recommandent une épaisseur minimum :

$$T_{\min} = (D+508)/400, \text{ où toutes les dimensions sont en (mm)}$$

Dans des grands aménagements, il peut être commode d'utiliser une conduite forcée ayant un diamètre uniforme, dans ce cas c'est l'épaisseur qui s'adapte en fonction des pressions hydrostatiques.

Une certaine portion de conduite forcée peut se trouver sous la ligne piézométrique et imploser sous des pressions inférieures à la pression atmosphérique. La dépression d'implosion sera donnée par en(kN/mm²) :

$$P_c = 882500 (e/D)^3 \quad (5.20)$$

Où :

e et D sont respectivement l'épaisseur de paroi et le diamètre de la conduite (mm). Cette dépression peut être évitée en installant une conduite d'aération ayant un diamètre en cm donné par :

$$d = 7,47 \sqrt{\frac{Q}{\sqrt{P_c}}} \quad (5.21)$$

Avec:

d = diamètre de la conduite d'aération en cm

Q = débit en m³/s

P_c = dépression d'implosion en kN/mm²

pour $P_c \leq 0.49 \text{ kN/mm}^2$; ou si cette valeur est dépassée:

$$Q_d = 8.94 \sqrt{Q}$$

Des changements brusques de débit peuvent survenir lorsque l'opérateur de la centrale ou le système de commande manœuvre rapidement les organes réglants de la turbine. De manière occasionnelle, le débit peut être coupé de manière brutale lors d'un déclenchement en pleine charge, ou simplement parce qu'un corps étranger est venu se bloquer entre le pointeau et la buse d'une turbine Pelton.

L'onde de pression qui survient avec un changement brusque de vitesse d'écoulement est connue sous le nom de coup de bélier; et bien que transitoire, il peut entraîner des

Chapitre III : Le dimensionnement le plus économique et optimal dans les conduites forcées

pressions dangereusement hautes et basses, dont les effets peuvent être dramatiques: la conduite forcée pouvant éclater en raison des surpressions ou s'écraser en raison de dépression. Les surpressions induites par le phénomène de coup de bélier peuvent avoir une amplitude plusieurs fois supérieures à la pression statique due à la chute. Elles doivent être prises en compte lors du calcul de l'épaisseur de la conduite forcée.

La vitesse de l'onde de pression c (m/s) dépend de l'élasticité de l'eau et du matériau de la conduite selon la formule :

$$C = \sqrt{\frac{K/\rho}{(1 + \frac{kD}{Et})}} \quad (5.22)$$

où

k = module de compressibilité de l'eau $2,1 \times 10^9$ N/m²

E = module d'élasticité du matériau de conduite (N/m²)

D = diamètre de la conduite (m)

t = épaisseur de paroi (mm)

ρ = masse volumique (kg/m³)

Le temps que met l'onde de pression pour atteindre l'organe de coupure lors de son retour, après une fermeture brusque, est connu sous le nom de temps critique :

$$T = 2L/c \quad (5.23)$$

Pour une fermeture instantanée (l'onde de pression atteint l'organe réglant après sa fermeture), l'augmentation de pression, en mètres de colonne d'eau, due au coup de bélier est :

$$P = c(\Delta v/g) \quad (5.24)$$

Où :

Δv : est le changement de vitesse.

Chapitre III : Le dimensionnement le plus économique et optimal dans les conduites forcées

III-4-Conclusion

En conclusion, nous pouvons dire que nous avons montré la démarche à suivre pour déterminer le diamètre de la conduite forcée. Cette démarche s'appuie sur une étude précise des dépenses annuelles induites par la construction et l'exploitation de la conduite.

Conclusion générale

Une conduite forcée est un ensemble de tuyaux permettant d'amener l'eau sous pression d'une retenue d'eau ou réservoir (lac ou barrage) à travers des ouvrages d'aménagements ; soit à ciel ouvert (canaux), soit des galeries fermées avec ou sans surface libre ; quand l'eau remplit entièrement la galerie on dit qu'elle est en charge (notre cas d'étude) jusqu'aux installations qui permettent de convertir l'énergie hydraulique en énergie électrique (turbines installées dans la centrale hydroélectrique).

Cette capacité de transformation réversible d'énergie potentielle en énergie électrique, associée à la grande flexibilité des installations hydroélectriques, fait du stockage hydraulique non seulement le premier mode de stockage d'énergie dans le monde (entre 94 et 99 %, selon les sources, des capacités totales de stockage d'énergie) mais également un outil précieux pour la gestion des réseaux électriques.

Au fil du temps, ces conduites forcées font l'objet d'améliorations spectaculaires grâce à l'utilisation de matériaux de plus en plus performants mais aussi grâce à l'inventivité des ingénieurs qui les ont mis en œuvre. On peut alors utiliser des aciers plus performants et réaliser ainsi des conduites capables de véhiculer un débit plus important sous une même pression.

En général les conduites forcées suivent la forme des reliefs des terrains ; pentes, obstacles,...etc. En fonction des conditions topographiques et des possibilités technologiques de construction, elles peuvent être aériennes ou souterraines, réalisées dans des matériaux divers comme l'acier, le béton armé ou précontraint, les matériaux composites (PRV, PEHD, etc.) ou bien encore la fonte.

Pour chaque installation hydroélectrique, le nombre et le diamètre des conduites sont des décisions importantes qui conditionnent l'économie de l'ensemble du projet. Un petit diamètre est peu coûteux mais les pertes de charge sont plus importantes ; un gros diamètre conduit à une augmentation de l'épaisseur des tôles laquelle doit tenir compte des pressions qui s'exercent sur les parois mais aussi des coups de bélier qui peuvent être importants.

La tendance vers la conduite unique, capable de véhiculer le maximum de débit, a conduit des constructeurs à placer des frettes sur les parois (sorte d'anneaux métalliques) pour participer à la résistance et limiter ainsi l'épaisseur de la tôle.

Notre étude s'est focalisé justement sur l'aspect du diamètre économique ou de la section la plus économique de ces conduites forcées a laquelle dépend ces installations hydro-électriques à travers trois grands chapitres ;

Tout d'abord avec le 1er chapitre ou on s'est focalisé sur une définition précise de ces conduites forcées passant en revue leur évolution, la loi de l'écoulement exercée sur ce type de conduites ainsi que leur matériau de construction ;

Ensuite en 2ème chapitre avec les dispositions constructives des conduites forcées passant par les différents types d'installation en prenant considération le paramètre de sécurité ; Dans ce chapitre on s'est concentré sur les différents types d'installations passant par la conception hydraulique et la mise en place, le choix de l'emplacement ainsi que la méthode d'installation des conduites en prenant en considération le paramètre de sécurité. On s'est tirées sur le choix des conduites forcées aérienne vue l'entretien et la visite aisé des conduites, l'avantage d'être visitées et contrôlées facilement, elles ont aussi un avantage d'être visibles et accessibles et peuvent être surveillées visitées et entretenues facilement.

Enfin en 3ème et dernier chapitre par le dimensionnement le plus économique et optimal dans les conduites forcées passant par le dimensionnement technico-économique de conduite forcée.

En conclusion, nous pouvons dire que nous avons montré la démarche à suivre pour déterminer le diamètre de la conduite forcée. Cette démarche s'appuie sur une étude précise des dépenses annuelles induites par la construction et l'exploitation de la conduite.

Références bibliographiques et sitographiques :

[1] : Frédéric Élie, mai 2014 : Les conduites forcées (principes, aménagements, sécurités), France.

[2]: BEKBOUKISamih (2016) : Etude du phénomène du coup de bélier dans les conduites forcées - cas des centrales hydroélectriques de moyenne chute ,unv Mohamed khider, Biskra.

[3] : La Houille Blanche, N°5 (Mai 1903), CONDUITES FORCÉES EN FONTE. TUYAUX FRETTÉS : CONFÉRENCE FAITE AU GROUPE TECHNIQUE DE LYON Dans sa séance du 7 mai 1903 MATÉRIAUX EMPLOYÉS POUR LA CONSTRUCTION DES CONDUITES FORCEES,France , pp. 139-144.

[4] : Melle KEDDAR Sarah (2013) : Vieillissement thermique du polyéthylène haute densité : Comportement mécanique et structurale ,UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAÏD – TLEMEN.

[5] : Layman's Guide(2005) : PETITE HYDROELECTRICITE (GUIDE TECHNIQUE POUR LA REALISATION DE PROJET) , Belgique.

[6]_ INERIS : institut national de l'environnement industriel et des risques (2013) : Référentiel pour la réalisation d'une étude de dangers relative aux conduites forcées principales et aux matériels annexes.

[7]_ Projet d'arrêté définissant les caractéristiques des conduites forcées au-delà desquelles une étude de dangers est requise, le plan de cette étude de dangers et en précisant le contenu [archive] (2016).

[8]_ LA HOUILLE BLANCHE(1949) : CONDUITES FORCÉES AÉRIENNES OU ENTERRÉES ,France, or <https://doi.org/10.1051/lhb/1949035>.

[9]_ J. Delemontez - P. Bryla – D. Filliard EDF / Division Technique Générale21, avenue de l'Europe BP41.

Liens internet :

<https://www.encyclopedie-energie.org/conduites-forcees-les-innovations-de-lentreprise-bouchayer-viallet-a-grenoble/>

<https://www.encyclopedie-energie.org/stockage-hydraulique-et-production-deelectricite/>

<https://www.hydrostadium.com/catalogue/produit/conduite-forcee>

http://www4.ac-nancy-metz.fr/physique/ancien_site/PHYS/Bts-Cira/mecaflu/Mecaflu_BTS_web.htm

<https://www.encyclopedie-energie.org/conduites-forcees-les-innovations-de-lentreprise-bouchayer-viallet-a-grenoble/>

<file:///C:/Users/alia%20computer/Desktop/memoiriii/HYD1.pdf>

<file:///C:/Users/alia%20computer/Desktop/memoiriii/gdim%201940.pdf>

<http://www.plastechplus.ca/nouvelles/les-differences-entre-le-pvc-et-le-pehd-69.aspx>

<https://www.encyclopedie-energie.org/conduites-forcees-les-innovations-de-lentreprise-bouchayer-viallet-a-grenoble/>

<http://tpe.barrages.2008.free.fr/index.php/energie-cinetique.html>