



Frédéric Elie on
ResearchGate

Les conduites forcées: principes, aménagements, sécurités

Frédéric Elie

mai 2014

CopyrightFrance.com

La reproduction des articles, images ou graphiques de ce site, pour usage collectif, y compris dans le cadre des études scolaires et supérieures, est INTERDITE. Seuls sont autorisés les extraits, pour exemple ou illustration, à la seule condition de mentionner clairement l'auteur et la référence de l'article.

« Si vous ne dites rien à votre brouillon, votre brouillon ne vous dira rien ! »
Jacques Breuneval, mathématicien, professeur à l'université Aix-Marseille I, 1980

Abstract : Les conduites forcées ont pour fonction de transférer l'eau depuis les ouvrages d'aménée (galeries, canaux,...) jusqu'aux installations qui permettent de convertir l'énergie hydraulique en énergie électrique (turbines d'une usine hydro-électrique). Les ouvrages d'aménée peuvent provenir d'une retenue d'eau (lac, barrage).

Cet article présente les bases hydrodynamiques du fonctionnement d'une conduite forcée, principalement fondées sur les écoulements en charge en régime stationnaire ou bien non permanent. Les efforts importants auxquels sont soumises les conduites forcées (efforts d'origine mécanique, thermique, etc.) posent aussi le problème de la sécurité et de la fiabilité de ces ouvrages, que l'on présente également succinctement.



SOMMAIRE

- 1 – Définition
- 2 – Écoulements dans les conduites forcées
 - 2.1 – *Écoulements en charge en régime permanent*
 - 2.2 – *Écoulements en charge en régime non permanent*
 - 2.3 – *Effets de la courbure des conduites forcées sur l'écoulement et les efforts sur les parois*
 - a) Modification du profil de vitesse et zone de décollement dans la conduite
 - b) Efforts sur les parois de la conduite au niveau du coude
- 3 – Contraintes thermiques des conduites forcées
- 4 – Section économique d'une conduite forcée
- 5 – Dispositions constructives et de sécurité
- 6 – La conduite forcée de l'Argentière-La Bessée: brève présentation et historique
- Références

1 – Définition

Les conduites forcées ont pour fonction de transférer l'eau depuis les ouvrages d'aménée (galeries, canaux, ...) jusqu'aux installations qui permettent de convertir l'énergie hydraulique en énergie électrique (turbines d'une usine hydro-électrique). Les ouvrages d'aménée peuvent provenir d'une retenue d'eau (lac, barrage). Ils peuvent être soit à ciel ouvert (canaux), soit être des galeries fermées avec ou sans surface libre (quand l'eau emplit entièrement la galerie on dit que la galerie est en charge).

L'installation hydro-électrique est située plus bas que la retenue à laquelle se raccorde la conduite forcée. L'usine hydraulique supporte donc une pression qui est de l'ordre de la hauteur de chute, mais les effets de perte de charge réduisent cette valeur. Les conduites forcées suivent la forme des reliefs: pentes, obstacles, franchissement de ravins, etc.: elles sont donc formées de tronçons présentant des singularités où les pressions hydrodynamiques locales prennent des valeurs élevées, comme nous allons le voir. Cela exige des dispositions constructives délicates et l'histoire montre les risques de rupture auxquels elles sont soumises.

De nombreux exemples de conduites forcées existent de par le monde. Par exemple: Keban (Turquie), Hendrick Verwoerd (Afrique du Sud), etc. En France, on peut citer La Coche, Tignes-Malgovert, La Praz-Maurienne, Le Lignon, et bien d'autres. Personnellement je me suis intéressé à la conduite forcée de L'Argentière La Bessée (Alpes de Haute Provence, près de Briançon).

2 – Écoulements dans les conduites forcées

Les résultats théoriques et expérimentaux sur les écoulements en charge s'appliquent aux galeries d'aménée en charge et aux conduites forcées. Ils sont rappelés ci-après.

2.1 - *Écoulements en charge en régime permanent* (réf. [3], [4])

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 U (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 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 emplit complètement la section (écoulement en charge). Par analogie avec une section circulaire, de diamètre D , où $S = \pi D^2/4$, 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:

$$R_H = \frac{S}{X} \quad (1)$$

(On note parfois $D_H = 4R_H$ le **diamètre hydraulique**). Si l'eau emplit complètement la section circulaire on a $S = \pi D^2/4$ et $X = \pi D$ donc $R_H = D/4 = R/2$.

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

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

Le **nombre de Reynolds**, qui caractérise les effets relatifs des forces d'inertie et des forces de viscosité, est basé sur la dimension caractéristique D_H , le diamètre hydraulique:

$$Re = \rho \frac{U D_H}{\mu} \quad (3)$$

(μ : viscosité dynamique, ρ : masse volumique du liquide). La viscosité cinématique est $\nu = \mu/\rho = 10^{-6} m^2/s$ pour l'eau à 20°C.

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

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

- galeries d'amenée: $1 \leq U \leq 2 m/s$; $2 \leq D \leq 6 m$
- conduites forcées: $4 \leq U \leq 6 m/s$; $1 \leq D \leq 6 m$

Il s'ensuit 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 recourt 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 (réf. [5]).

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**:

$$U = C \sqrt{R_H j} \quad (4)$$

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: $H_s = \frac{P}{\rho g} + y + \frac{U^2}{2g}$ 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:

$$j = \frac{\Delta H_s}{L}$$

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

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

$$j = \frac{\Lambda}{D} \frac{U^2}{2g} \quad (5)$$

où Λ est le **coefficient de perte de charge**, fonction du nombre de Reynolds Re et de la rugosité. La

1 Elle est appelée ainsi car elle s'applique à tous régimes d'écoulement: laminaire ou turbulent.

comparaison avec (4), réécrit sous la forme $j = \frac{U^2}{R_H C^2}$ montre alors que:

$$\Lambda = \frac{8g}{C^2} \quad (6)$$

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

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

k_s est le **coefficient de rugosité de Strickler**, exprimé en $m^{1/3} s^{-1}$. 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:

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

La perte de charge $\Delta H_s = jL$ sur une longueur L de la conduite est donc: $\Delta H_s = \frac{U^2}{R_H C^2} L$, 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 (réf. [4]).

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:

Nature de la conduite	k (mm)
Matière synthétique (PVC)	0,007
acier	0,05
Acier rouillé	0,15 à 4
fonte	0,1 à 0,6
béton	1 à 3
ciment	3 à 5

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 $Re_c = 2500$.

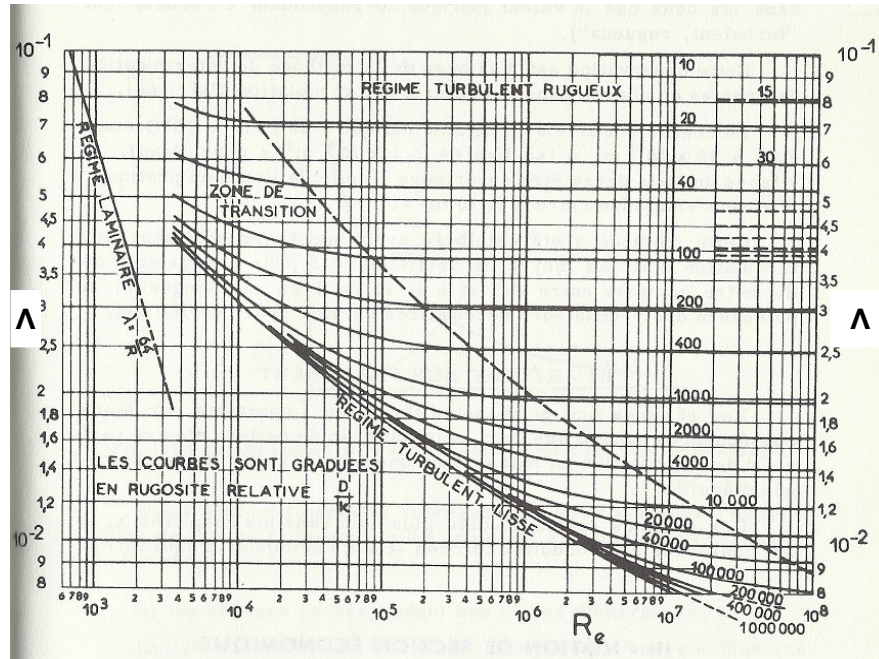


figure 1 – diagramme de Moody

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. Ainsi pour l'eau on a $U = 1 \text{ m/s}$ et $\nu = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, pour une galerie de diamètre $D = 2 \text{ m}$, sachant que pour l'air la viscosité cinématique est $\nu' = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (et la masse volumique $\rho' = 1,3 \text{ kg/m}^3$, on devra avoir une circulation d'air de vitesse U' telle que les nombres de Reynolds soient égaux:

$$\frac{U' D}{\nu'} = \frac{U D}{\nu} \rightarrow U' = U \frac{\nu'}{\nu} = 13 \text{ m/s} (98 \text{ km/h})$$

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

$$0,01 < \Lambda < 0,03$$

donc:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\Lambda}}, \quad k_s = \frac{C}{R_H^{1/6}} \quad \text{avec } R_H = 1 \text{ m par exemple:}$$

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

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

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:

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

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

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

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

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

pour $L = 1000 \text{ m}$, on a donc $\Delta H_s = 3,5 \text{ m}$. Finalement:

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

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

2.2 – Écoulements en charge en régime non permanent (réf. [6])

Les principaux régimes non permanents qui peuvent s'installer dans une conduite forcée sont les « **coups de bélier** » consécutifs 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 (réf. [6]) 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, une cheminée d'équilibre: celle-ci absorbe les ondes de compression qu'elle convertit en oscillations en masse de longue période. Voir [6] pour tous les détails.

2.3 – 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.

a) Modification du profil de vitesse et zone de décollement dans la conduite (figure 2)

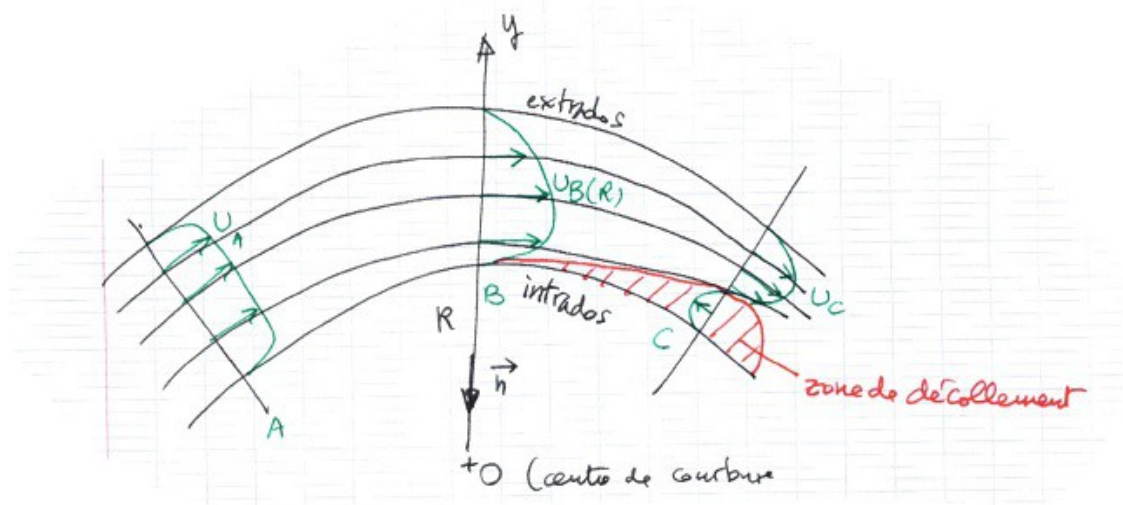


figure 2 – effet d'un coude sur l'écoulement

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: $U_B(R)$ (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:

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

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

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

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: $\vec{f} = \frac{U^2(R)}{R} \vec{n}$, et comme $\overrightarrow{\text{grad}} P = -\frac{\partial P}{\partial y} \vec{n}$ il vient:

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

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

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

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

$$-\rho U \frac{dU}{dR} = \rho \frac{U^2}{R} \rightarrow \frac{dU}{U} + \frac{dR}{R} = 0$$

soit:

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

Conclusion: au coude, le long de la normale, entre l'intrados et l'extrados, 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.

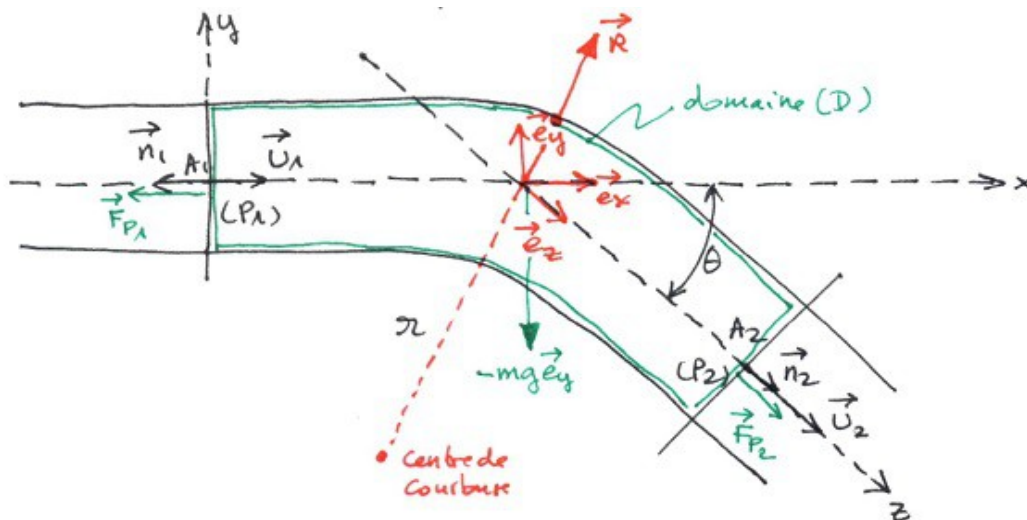


figure 3 – efforts dans un coude

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 (figure 3)

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);
- 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 (réf. [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):

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

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:

$$\frac{dm_1}{dt} = \rho S_1 U_1 \quad \frac{dm_2}{dt} = \rho S_2 U_2$$

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

$$Q_m = \rho S_1 U_1 = \rho S_2 U_2$$

donc $\frac{dm_1}{dt} = q_{m,1} = \frac{dm_2}{dt} = q_{m,2}$; par ailleurs le régime est supposé stationnaire: $\frac{d\vec{p}}{dt} = 0$. Le théorème d'Euler s'écrit donc ici:

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

où: $\vec{U}_1 = U_1 \vec{e}_x$, $\vec{U}_2 = U_2 \vec{e}_z$, $\vec{n}_1 = -\vec{e}_x$, $\vec{n}_2 = \vec{e}_z$ le 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 $U_1 = U_2 = U$ (en module).

De (13) on déduit donc:

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

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:

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

On a:

- poids: $\vec{F}_G = -mg \vec{e}_y$

- poussée hydrostatique: $\vec{F}_p = - \int_{A_1+A_2} P \vec{n} dS = - \int_{A_1} P_1 \vec{n}_1 dS_1 - \int_{A_2} P_2 \vec{n}_2 dS_2 = \vec{F}_{p1} + \vec{F}_{p2}$
 comme $P_1 = P_2 = P$, on a: $\vec{F}_p = - \int_{A_1-P} \vec{e}_x dS_1 - \int_{A_2} P \vec{e}_z dS_2 = PS(\vec{e}_x - \vec{e}_z)$
 (15) devient alors:

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

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

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

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):

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

(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 $\vec{R}$:

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

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

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

NB: En l'absence d'écoulement ($U = 0$), 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:

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

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 (figure 3bis):

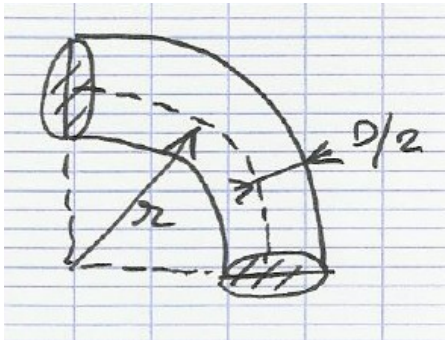


Figure 3bis

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

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

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

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

Application numérique: $\theta = \pi/2$
 $r = 1\text{m}$
 $D = 1\text{m}$
 $U = 0$ (pas d'écoulement)
 $P = 10$ bars

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

Avec $U = 10 \text{ m/s}$ (débit $Q = 7,5 \text{ m}^3/\text{s}$): $\sigma = 2,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$.

Avec $U = 30 \text{ m/s}$ (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 $\sigma_{\max}$ (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 $U = 10 \text{ m/s}$:

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

Pour $U = 30 \text{ m/s}$, on aurait $h \geq 7 \text{ mm}$. 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, comme indiqué en (a) (figure 2);
- 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 $\sigma = P$. Si $P = 10$ bars et $D = 1\text{m}$, il vient:

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

valeur qui, elle aussi, doit être majorée.

3 – Contraintes thermiques des conduites forcées

Si un tronçon de la conduite, de longueur L , est soumis à une variation de température ΔT , il acquiert un allongement ΔL égal à:

$$\Delta L = \alpha L \Delta T$$

où α est le coefficient de dilatation linéaire du matériau (exprimé en $^{\circ}\text{C}^{-1}$). Si le tronçon est fixé bloqué à ses deux extrémités, cet allongement entraîne l'apparition d'une contrainte mécanique σ dans les parois

telle que: $\frac{\sigma}{E} = \frac{\Delta L}{L}$ où E est le module d'Young. Par conséquent:

$$\sigma = E \alpha \Delta T \quad (21)$$

ce qui exprime que la contrainte est directement proportionnelle aux variations de température et est d'autant plus importante que le matériau est rigide (E grand) et dilatable (α grand).

Exemple numérique pour l'acier:

$$E = 210000 \text{ MPa} = 21000 \text{ daN/mm}^2$$

$$\alpha = 3 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\Delta T = 1^\circ\text{C}$$

$$\rightarrow \sigma = 630 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 630 \text{ bars} = 6,3 \text{ daN/mm}^2$$

Pour réduire les efforts dus à la dilatation thermique on procède de diverses manières:

- Les tronçons droits sont ancrés, tandis que les coudes sont laissés libres: ceux-ci absorbent alors les efforts dus à la dilatation thermique car ils peuvent mieux se déformer que les tronçons rectilignes. Cette disposition est visible par exemple sur le tronçon coudé de la conduite forcée de L'Argentière-La Bessée lorsqu'elle franchit la Durance.
- Les coudes sont ancrés, tandis qu'entre les tronçons rectilignes on insère des joints de dilatation.

4 – Section économique d'une conduite forcée

En plus des exigences physiques pour véhiculer une puissance hydraulique spécifiée, le choix du diamètre d'une conduite forcée, D , est aussi dicté par des exigences économiques: le coût de production d'énergie hydro-électrique ne doit pas être inférieur aux charges associées à l'exploitation de l'ouvrage: autrement dit, celles-ci doivent être le plus faibles possible. Comme elles sont principalement liées au diamètre D , on est donc conduit à rechercher la valeur de la section (appelée **section économique**) pour laquelle les charges annuelles d'utilisation et financières sont minimales.

Dans ce qui suit, on ramène les charges à l'unité de longueur de la conduite. Ces charges annuelles sont la somme de deux termes:

- Les charges liées à l'intérêt et à l'amortissement du capital investi dans l'ouvrage et aux dépenses d'entretien et de grosses réparations ⁽²⁾: c_1 .
- Les charges correspondant aux pertes d'énergie (par pertes de charge hydraulique notamment): c_2 .

En première approximation, les charges c_1 sont proportionnelles à la section $S = \pi D^2/4$ de la galerie:

$$c_1 = k_1 D^2 \quad (22)$$

on les estime donc indépendantes des conditions d'exploitation de l'usine hydro-électrique qu'alimente la conduite: elles résultent seulement du coût de réalisation de l'ouvrage.

NB: En toute rigueur, il faudrait tenir compte des coûts annuels d'intérêt et d'amortissement pour une période de plusieurs années n et remplacer (22) par:

$$c_1' = c_1 \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + 1 \right)$$

où i taux d'intérêt du capital investi c_1 ; n durée d'amortissement (par exemple $n = 40$ ans).

Les charges c_2 correspondent aux coûts annuels d'exploitation, lesquels sont directement liés aux pertes d'énergie consécutives aux pertes de charge dans la conduite. En effet, c'est lors de l'utilisation de l'ouvrage, c'est-à-dire lorsque l'eau y circule, que ces pertes surviennent. Or ces pertes sont assimilées à la puissance de la pompe qu'il faudrait fournir pour compenser exactement les pertes de charge. Cette puissance est donnée par la relation (10):

$$W_p = \rho g \Delta H_s Q$$

Comme $\Delta H_s = j L$ et compte tenu de (5), on a:

² Les charges d'entretien et de réparations sont en fait très faibles: elles représentent environ 0,5% du coût de construction.

$$W_p = \rho g L j Q = \rho g L \frac{\Lambda}{D} \frac{U^2}{2g} Q = \rho g L \frac{\Lambda}{D} \left(\frac{Q}{S} \right)^2 \frac{Q}{2g}$$

$$S = \pi D^2/4 \rightarrow W_p = \frac{8}{\pi^2} \rho L \Lambda \frac{Q^3}{D^5}$$

Ramenée à l'unité de longueur, $L = 1$, le coût c_2 est donc de la forme:

$$c_2 = K W_p = k_2 \frac{Q^3}{D^5} \quad (23)$$

où $k_2 = \frac{8K}{\pi^2} \rho \Lambda$ dépend du coefficient de perte de charge et du coût de l'énergie perdue, lesquels varient suivant les heures de la journée selon les besoins en énergie à fournir. On supposera néanmoins k_2 constant pour simplifier la notion de section économique.

La courbe (22) est un arc de parabole, et celle (23) un arc d'hyperbole. Le coût total $c = c_1 + c_2$ présente donc un minimum c_e correspondant au diamètre économique D_e (figure 4), avec:

$$c = c_1 + c_2 = k_1 D^2 + k_2 \frac{Q^3}{D^5}$$

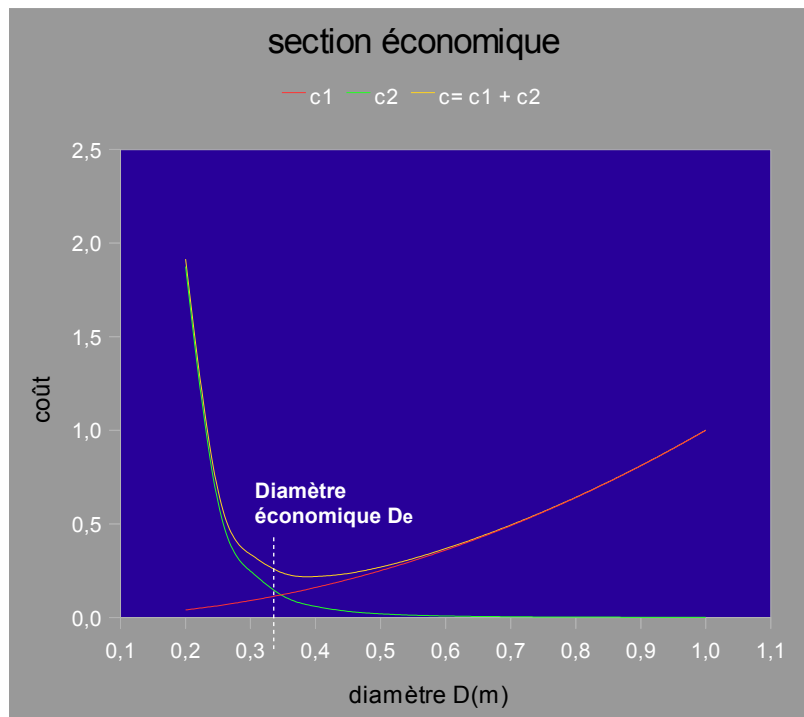


figure 4 – section économique d'une conduite (l'unité des coûts est arbitraire)

Minimum:

$$\frac{dc}{dD} = 2 k_1 D - 5 k_2 \frac{Q^3}{D^6} = 0$$

→ diamètre économique:

$$D_e = \left(\frac{5 k_2}{2 k_1} Q^3 \right)^{1/7} \quad (24)$$

Pour la plupart des conduites forcées la section économique correspond à des vitesses moyennes d'écoulement: $U_e = Q_e / S_e$ de l'ordre de 4 à 6 m/s, et les pertes de charges associées j sont comprises

entre 2 et 7% de la hauteur de chute.

5 – Dispositions constructives et de sécurité

Il existe principalement deux types de conduites forcées:

- conduites en acier;
- conduites en béton armé.

Elles peuvent être soit aériennes, soit enterrées, soit en galerie.

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 sur place. Les différents types de viroles sont:

- **viroles simples**: une tôle cylindrique soudée le long d'une génératrice par soudage à l'arc électrique ⁽³⁾. Les aciers utilisés sont à haute résistance à la rupture (54 daN/mm²);
- **viroles frettées**: pour des épaisseurs de tôle de la virole supérieures à 40 mm, la soudure n'offre plus suffisamment de garantie pour la tenue mécanique et le coût devient prohibitif. On utilise alors la technique de frettage: une virole frettée est un tube sur lequel on place à chaud des frettes, c'est-à-dire des anneaux d'acier découpés dans les lingots d'acier de résistance à la rupture plus grande que celle de la tôle (> 54 daN/mm²). Une fois mise en place autour de la tôle, les frettes refroidissent et acquièrent après refroidissement un diamètre légèrement plus petit que celui du tube: ainsi, celui-ci se retrouve soumis à une précontrainte de compression, uniformément répartie le long du tube si les frettes sont écartées d'une distance identique et suffisante (plusieurs centimètres).



Photo 1 – exemple de virole frettée par cerces

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

- **Viroles autofrettées** (procédé de G. Ferrand): il s'agit toujours de viroles frettées mais, à la différence des précédentes, le diamètre du tube est légèrement plus petit que celui des anneaux à froid. Les frettes sont disposées à froid autour du tube, puis celui-ci étant fermé aux extrémités, on y établit une pression hydraulique interne (pression de frettage) égale à 2P, où P est la pression de service. Ceci a pour effet de provoquer l'allongement de la virole, et comme elle est bloquée aux extrémités, elle vient se plaquer contre les frettes qui se tendent.

3 Emploi du soudage à l'arc électrique depuis 1930, fiabilisé depuis 1960. Auparavant les plus anciennes conduites utilisaient des rivetages et le soudage au gaz à l'eau.



(source: EDF)

Photo 2 – conduite forcée de Malgovert et barrage de Malgovert (Savoie)

Pour qu'une telle opération soit possible, il faut donc que l'acier de la virole soit doux (résistance à la rupture 35 daN/mm² et limite élastique 20 daN/mm²) et que les frettes soient en acier très haute résistance (90 à 120 daN/mm²). Inconvénient de la méthode: la contrainte par pression de frettage entraîne des déformations ondulées à l'intérieur du tube, ce qui introduit des pertes de charge supplémentaires. Avantage de la méthode: sa relative facilité de mise en œuvre par rapport au frettage à chaud.

La **centrale de Malgovert**, près de Bourg-St-Maurice, a été mise en service en 1953, elle abrite 4 groupes de production équipés chacun de deux turbines Pelton. Entre Les Brévières et la centrale, une galerie de 15 km amène l'eau jusqu'aux conduites forcées longues de 1550 m, qui alimentent la centrale de Malgovert par une hauteur de chute de 750 m. L'aménagement hydro-électrique de Tignes-Malgovert véhicule un débit de 50 m³/s, la puissance totale installée est de 392 MW. Les conduites forcées ont un diamètre de 2,1 à 2,2 mètres et les parois sont épaisses de 38 mm. La technologie est autofrettée, avec des viroles longues de 6 à 10 m. L'ensemble des 2 conduites forcées représente un poids total de 4250 tonnes.

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, 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).

Les conduites aériennes sont, par définition, apparentes; elles sont tenues par des ancrages en béton et en appui sur des pilettes. Elles présentent l'avantage d'être visitées et contrôlées facilement. En revanche, leurs inconvénients sont d'être exposées à des éboulements ou avalanches, de « défigurer » le paysage, et d'être sensibles aux variations climatiques.



Photo 3 – exemple de conduite forcée aérienne, avec ses appuis sur des pilettes et ses ancrages

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

La conduite peut aussi être **enterrée**, c'est-à-dire placée dans une tranchée recouverte par un remblai. L'inconvénient principal est que les inspections sont plus difficiles que pour les conduites aériennes, toutefois des systèmes de télésurveillance robotisés ont été mis au point.

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.

Les conduites forcées sont généralement fiables et robustes, mais lorsqu'elles arrivent, les avaries peuvent être importantes et avoir des conséquences humaines et matérielles graves, comme on peut le voir sur ce bref historique des incidents et accidents (sources: DRIRE Midi-Pyrénées et DRIRE PACA):

- Licq-Atherey (département 64), décembre 2000: rupture d'une virole suite à un essai des groupes à faible débit.
- Cleuson-Dixence (Suisse, canton du Valais), 12 décembre 2000: rupture du puits blindé au-dessus de l'usine hydro-électrique de Bieudron, près du Rhône. Conséquences: 27000 m³ d'eau ont inondé 100 hectares, emportant 7 chalets. On déplore 3 disparus.



Photo 4 – avarie de Licq-Atherey

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



Photo 5 – avarie de Cleuson Dixence

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

- Pragnères (haute vallée des Gaves, département 65): construite dans les années 1950, la centrale hydro-électrique de Pragnères, d'une puissance de 185 MW, a connu plusieurs avaries qui ont conduit EDF à faire rénover l'installation; 800 m de conduite forcée de la rive droite, sur les 1250 m, ont été remplacés (le dispositif compte un total de 4 km de conduites forcées):
 - Juin 2001: rupture d'une conduite annexe dans la station de pompage; dégâts en usine.
 - Juillet 2002: fuite de 15 m³/s à une tape d'accès d'une galerie en charge; dégâts importants dans le lit de la rivière (ponts emportés).
 - 2003: rupture de 2 frettes successives.
 - Février 2004: on constate que, dans la partie enterrée de la conduite, 3 frettes contigües sont cassées. Cette partie enterrée sera remplacée par un tronçon aérien.



Photo 6 – cassure de frettes (conduite forcée de Pragnères)

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

- Usine de Bancairon (vallée de la Tinée, département 06): mise en service en 1929, renouvelée en 1954, cette centrale produit 50 MW. Elle a connu un accident le 16 avril 2007: rupture du collecteur de jonction des deux conduites (épaisseur 70 mm), conduite forcée n°2 éventrée sur 3 m, à 200 m en amont de l'usine. Conséquences: de nombreux dégâts dans la salle des machines et sur la toiture de l'usine.

Depuis 2006, une circulaire ministérielle impose de répertorier les incidents sous forme d'Évènement Intéressant la Sûreté Hydraulique (EISH) et le décret du 11 décembre 2007 a introduit de nouvelles dispositions sur le classement des ouvrages, les études de sécurité et les revues. Pour l'ensemble des textes réglementaires concernant les installations hydro-électriques consulter [9], [10], [11].

NB: EDF Production Hydraulique exploite quelque 300 km de conduites forcées en acier réparties sur quelque 600 installations. Cela illustre l'importance des travaux d'inspections et de maintenance sur des ouvrages dont les plus anciens remontent à la première moitié du XXe siècle. Les principales dégradations affectent l'épaisseur des viroles et les inspections ont pour but de les détecter et de les prévenir. Comme techniques, on mentionnera sommairement comme contrôles non destructifs (CND):

- mesures par ultrasons classiques ou TOFD;
- mesures par courants de Foucault pulsés (technique INCOTEST®);
- visualisation par appareils de type A-SCAN;
- profilométrie laser ou optique;
- inspection télé-opérée (inspections visuelles automatisées et robotisées à l'intérieur de la conduite: robot de type chenille « crawler » développée par Inspector Systems et Applus/RTD, qui utilisent la technique par ultrason);

Pour plus de précisions voir [12].

6 – La conduite forcée de L'Argentière-La Bessée: brève présentation et historique



Photo 7 – siphon de la conduite forcée de L'Argentière-La Bessée franchissant la Durance à quelques kilomètres au sud de Briançon (photo: Frédéric Élie, 18/08/2008)

Ce qui est le plus remarquable, avec cette conduite forcée, est le « siphon » ⁽⁴⁾ qui enjambe la vallée de la Durance, avant d'alimenter la centrale hydro-électrique de L'Argentière. La conduite forcée véhicule les eaux de la Durance, captées à Prelles, 8 km en amont, vers l'usine de L'Argentière.

La conduite forcée est construite entre 1907 et 1910 sous la direction de l'ingénieur Gilbert Planche. Elle est constituée de viroles d'acier de diamètre $D = 2,65$ m. Le siphon, d'une portée de 64 m, surplombe le fond de la gorge de la Durance d'une hauteur de 110 m. La conduite forcée dérive les eaux de la Gyrone depuis la prise d'eau au barrage de Vallouise jusqu'à l'usine de L'Argentière.

Entre 1970 et 1980 d'importants travaux de modernisation ont été réalisés: ils ont affecté surtout les conduites de la chute, mais n'ont pas concerné le siphon.

Les conduites de chute sont au nombre de 2, formant un Y entre d'une part les prises d'eau de Vallouise, et de Prelles, et d'autre part la conduite qui mène à la centrale de L'Argentière. La galerie d'amenée depuis la prise de Prelles, en rive gauche, est longue de 6500 m, dont 1500 m enterrés, tandis que la galerie d'amenée depuis la prise de Vallouise en rive droite, au confluent du Gyr et de l'Onde (encore appelée Gyrone) représente une longueur de 8000 m dont 7500 m enterrés.

L'eau en provenance de Vallouise étant sur la rive droite de la Durance, il lui fallait franchir la Durance pour rejoindre l'autre branche issue de Prelles, et c'est la raison pour laquelle le siphon a été construit.

Après le siphon, les deux branches se rejoignent, sur la rive gauche de la Durance, en un tunnel commun, troisième branche du Y, long de 1500 m situé sous le Pertuis Rostan. Puis il se divise en 2 conduites forcées (qui ont remplacé vers les années 1980 les 4 initialement existantes) qui amènent l'eau en charge sur une chute de 174 m de hauteur qui alimente les turbines de l'usine de L'Argentière, située en rive droite (un deuxième siphon, beaucoup moins important, franchit donc de nouveau la Durance juste à l'entrée de l'usine).

Le grand siphon au-dessus de la gorge de la Durance a été labellisé par la Commission Régionale du Patrimoine et des Sites (CRPS) le 28 novembre 2000 (réf. [13]).



Photo 8 – arrivée des 2 conduites avant l'usine, avant franchissement de la Durance; on distingue les dernières chutes de hauteur 174 m
(photo: Frédéric Élie, 18/08/2008)



Photo 9 – ultime franchissement de la Durance par un petit « siphon » avant entrée dans l'usine hydro-électrique de L'Argentière
(photo: Frédéric Élie, 18/08/2008)

4 Cette appellation est impropre car la conduite est toujours sous pression au coude, alors qu'un siphon a pour fonction, au contraire, de créer une aspiration.

Références

- [1] R. Ginocchio: *Aménagements hydroélectriques* – Eyrolles 1959
- [2] EDF: *Connaissance de l'état des conduites forcées en métal* – Service de la Production Hydraulique, publ. N°27, avril 1969
- [3] sous la direction de Michel Hug : *Mécanique des fluides appliquée aux problèmes d'aménagement et d'énergétique* – Eyrolles, 1975
- [4] Frédéric Élie: *Canaux, rivières, crues* – site <http://fred.elie.free.fr>, mai 2014
- [5] J. Valembois: *Mémento d'hydraulique pratique* – éd. Eyrolles, 1958
- [6] Frédéric Élie: *Coup de bélier et cheminée d'équilibre* - site <http://fred.elie.free.fr>, mai 2014
- [7] Frédéric Élie: *Équilibre d'une plaque soumise à l'action d'un écoulement: une application du théorème d'Euler* – site <http://fred.elie.free.fr> , avril 2014
- [8] Luc Chevalier: *Mécanique des systèmes et des milieux déformables* – Ellipses, 2004
- [9] Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, direction de l'eau et de la biodiversité: *Entreprises hydro-électriques, Recueil de textes, octobre 2012* – Site: www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/REC-hydroelectricite-maj-Octobre-2012.pdf
- [10] Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, direction générale de l'aménagement du logement et de la nature - direction de l'eau et de la biodiversité: *Guide d'instructions relatif à la police des installations hydro-électriques d'une puissance inférieure ou égale à 4500 kW* – mise à jour sept. 2007 – site: www.developpement-durable.gouv.fr
- [11] Xavier Martin: *La réglementation sur la sécurité des ouvrages hydrauliques* – Risques Infos n°20, juin 2008 – site: www.irma-grenoble.com/PDF/risques-infos/N20/20article02.pdf
- [12] J. Delemontez, P. Bryla, D. Filliard: *Inspection et expertise des conduites forcées – à la recherche de techniques « tout terrain »* - EDF/Division Technique Générale
- [13] Louis Jacquignon: *Histoire de l'électricité dans les Hautes Alpes* – AHEF, 2000