

Adduction et distribution d'eau

par **Hugues GODART**

Ingénieur civil des Mines

Ingénieur en chef à la Générale-des-eaux

1. Transport de l'eau	C 5 195 - 2
1.1 Généralités	— 2
1.2 Écoulements à surface libre.....	— 2
1.3 Construction des aqueducs à surface libre	— 4
1.4 Écoulements en charge.....	— 4
2. Conduites	— 8
2.1 Nature des conduites. Prescriptions diverses	— 8
2.2 Robinetterie et équipements divers	— 15
2.3 Pose des conduites	— 18
2.4 Protection des conduites.....	— 20
2.5 Rénovation des conduites.....	— 21
2.6 Protection contre les retours d'eau	— 24
3. Réservoirs.....	— 25
3.1 Généralités	— 25
3.2 Équipement hydraulique.....	— 26
3.3 Dispositifs de régulation	— 26
3.4 Calcul de la capacité des réservoirs	— 27
3.5 Choix de la cote d'implantation.....	— 28
4. Compteurs d'eau	— 28
4.1 Généralités	— 28
4.2 Compteurs.....	— 28
4.3 Relevé des compteurs.....	— 32
4.4 Étalonnage et entretien des compteurs.....	— 33
5. Rendement d'un réseau.....	— 33
5.1 Définitions	— 33
5.2 Détermination du rendement	— 34
5.3 Paramètres agissant sur le rendement	— 36
5.4 Recherche des fuites	— 36
6. Élévation mécanique de l'eau	— 37
6.1 Pompes à mouvement alternatif.....	— 37
6.2 Pompes centrifuges.....	— 37
6.3 Moteurs utilisés pour la commande des pompes	— 38
6.4 Usines de refoulement	— 39
6.5 Conduites de refoulement	— 40
6.6 Évolution de la fonction et du matériel.....	— 40
Pour en savoir plus.....	Doc. C 5 205

Troisième volet du triptyque concernant l'eau dite potable, la distribution représente le seul dont une partie est perceptible par l'utilisateur, à partir du compteur. C'est aussi la partie qui paraît à la fois la plus simple (des bouts de tuyaux) et la plus ténébreuse (réseau souterrain). On imagine également qu'elle a peu évolué : et pourtant, quel chemin parcouru depuis les aqueducs romains, les premières canalisations en bois et les puits à balancier ou les

norias pour élever l'eau ! La fonte ductile, les PVC bi-orientés, les polyéthylènes, les tuyaux composites (ciment âme tôle, PRV...), les revêtements internes et externes permettent des qualités de durabilité et de sécurité sanitaire de haut niveau. Ces matériaux et les techniques de pose ont évolué vers des opérations à coûts et gênes réduits (fonçage, forage dirigé, remplacement in situ...)

*L'**étanchéité des réseaux** est une quête permanente des bons gestionnaires, tant pour réduire la facture du client, qui n'a pas envie de payer pour des fuites (les réseaux urbains bien gérés peuvent afficher des rendements de 90 %), que pour maintenir un haut niveau de sécurité sanitaire pour le consommateur ; les moyens actuels permettent des détections rapides, précises, sur tous les matériaux et dans tous les environnements. La **gestion des réseaux**, de plus en plus centralisée et informatisée, s'appuie sur des équipements et dispositifs de régulation qui reposent sur des principes classiques et des technologies de pointe. Le **comptage de l'eau** enfin permet une répartition juste des charges entre les utilisateurs, et les compteurs actuels sont d'une très grande précision, permettant de détecter et d'enregistrer des débits de l'ordre du litre par minute.*

Au cours des derniers lustres, les techniques de pompage n'ont pas évolué de façon spectaculaire, mais les rendements de moteurs ont été améliorés, les groupes à vitesse variable se sont perfectionnés, les étanchéités sont meilleures et plus durables. Notons que nous traiterons dans cet article des adductions en général, et des notions d'écoulement à surface libre et en charge, qui sont bien intégrées à la notion de réseaux et de canalisations. Un dernier clin d'œil à l'aube du troisième millénaire : les ordinateurs ont fait logiquement leur entrée en force dans ce domaine bien terre à terre, et pourtant, le technicien ne manque pas de se servir de tables et d'abaques pour bien des estimations rapides.

1. Transport de l'eau

1.1 Généralités

Le transport est nécessaire entre le point de captage et le point d'utilisation ; dans la pratique ces points sont relativement éloignés l'un de l'autre, quelquefois ils peuvent se trouver à des distances considérables. Du point de vue technique, on est conduit à séparer les ouvrages d'adduction et ceux de distribution.

Les premiers sont généralement de grandes dimensions (relativement aux seconds), les écoulements y sont le plus souvent unidirectionnels. Par contre, la distribution, sauf dans des installations anciennes, se fait par des **ouvrages maillés** où le sens des écoulements est variable et où les débits sont très fluctuants en fonction des besoins des usagers qui diffèrent beaucoup au cours d'une même journée et suivant l'époque de l'année.

Cependant les relations liant débit, pression, dimensions de l'ouvrage de transport et nature de ses parois restent les mêmes pour l'adduction et la distribution.

Il faut distinguer encore les écoulements à surface libre et les écoulements dans les ouvrages en charge. La distribution ne fait appel qu'aux seconds (sauf des cas très particuliers de distributions anciennes dans des régions en voie de développement).

Tous les **écoulements** dans les ouvrages d'adduction et de distribution s'opèrent en **régime turbulent**.

1.2 Écoulements à surface libre

On se reportera à l'article [A 1 870] *Mécanique des fluides* dans le traité Sciences fondamentales.

La pression atmosphérique s'établit au niveau de la surface libre. Dans le cas où la section transversale (dimensions, forme, nature des parois) et la pente longitudinale sont fixes, le régime est uniforme ; si elles se modifient le régime d'écoulement est dit varié.

1.2.1 Régime uniforme

1.2.1.1 Calcul du débit

Les pentes du fond de l'ouvrage et de la surface libre sont identiques ; la perte de charge est égale à la pente. La vitesse d'écoulement est donnée par la formule de **Chézy** :

$$V = C\sqrt{RI}$$

avec	V	vitesse,
	C	coefficient,
	R	rayon hydraulique (rapport de la surface mouillée au périmètre mouillé),
	I	pente (= $\tan \alpha$).

Le débit se déduit immédiatement :

$$Q = SC\sqrt{RI}$$

avec	S	section mouillée.
------	-----	-------------------

De très nombreuses études théoriques et expérimentales ont conduit, depuis le XVIII^e siècle à exprimer le coefficient C de différentes façons, toutes à peu près satisfaisantes dans la pratique.

Bazin a proposé la formule suivante :

$$C = \frac{87}{1 + (\gamma / \sqrt{R})}$$

dans laquelle γ , coefficient numérique dépendant de la rugosité des parois, prend les valeurs données dans le tableau 1.

Actuellement, la formule qui est généralement utilisée est celle de Strickler-Manning :

$$C = k R^{1/6}$$

d'où :

$$V = k R^{2/3} I^{1/2}$$

Toute la difficulté pratique réside dans l'appréciation correcte du coefficient k .

Pour les projets, dans le cas où l'on ne dispose pas de données expérimentales, on adopte dans chaque fourchette indiquée (tableau 2) une valeur intermédiaire.

1.2.1.2 Section mouillée

La formule de débit permet de déduire, par des calculs simples, les dimensions optimales de la section mouillée d'un conduit à ciel ouvert, c'est-à-dire celles qui conduisent au débit le plus élevé possible pour une pente donnée. Ainsi :

- pour un canal ouvert de radier circulaire, c'est la section en demi-cercle (remplissage du canal jusqu'au diamètre horizontal) ;
- pour un canal trapézoïdal isocèle, c'est le trapèze circonscrit à la demi-circonférence dont le diamètre se trouve sur la ligne d'eau et dont le rayon est égal à la profondeur du canal ;
- pour un canal rectangulaire, c'est le rectangle dont la largeur est égale à deux fois la hauteur d'eau ;
- pour les aqueducs fermés à surface libre, on peut déterminer une hauteur de débit maximal qui dépend directement de la forme de l'aqueduc (figure 1) ; dans le cas d'un aqueduc fermé circulaire de diamètre \varnothing , le débit maximal s'obtient pour un remplissage à 0,95 \varnothing ; dans la pratique, pour éviter la mise en charge, on utilise les aqueducs avec un tirant d'eau maximal de 0,75 \varnothing ; le débit est alors de 0,85 fois le débit maximal possible.

1.2.2 Régime varié

Les écoulements dans les aqueducs se font en dessous de la vitesse critique et par tronçons où le régime est uniforme. Le régime varié s'établit aux extrémités de ces tronçons, en particulier lors des modifications de la section de l'aqueduc et de sa pente, lors de la jonction (ou de la séparation) de deux aqueducs. Dans la pratique, le régime varié n'intéresse qu'une partie relativement courte de l'aqueduc. Ce régime se rencontre notamment au moment des *accidents de parcours* : chutes, seuils de jaugeage, entrée et sortie de siphon.

L'étude détaillée des régimes variés s'appuie sur les théorèmes d'hydrodynamique, sur le théorème de Bernoulli et sur le théorème d'Euler (cf. article [A 1870] *Mécanique des fluides* dans le traité Sciences fondamentales) qui permettent de déterminer la forme de la ligne d'eau et notamment les remous en amont et le ressaut éventuel en aval.

Dans les adductions d'eau potable, l'économie générale de l'aqueduc se détermine, dans ses grandes lignes, en régime permanent pour le débit maximal. Les écoulements en régime varié n'intéressent, dans les conditions normales de fonctionnement, que quelques tronçons réduits en nombre et en longueur. Par contre, des capteurs de vitesse ou de niveau, permettant de déce-

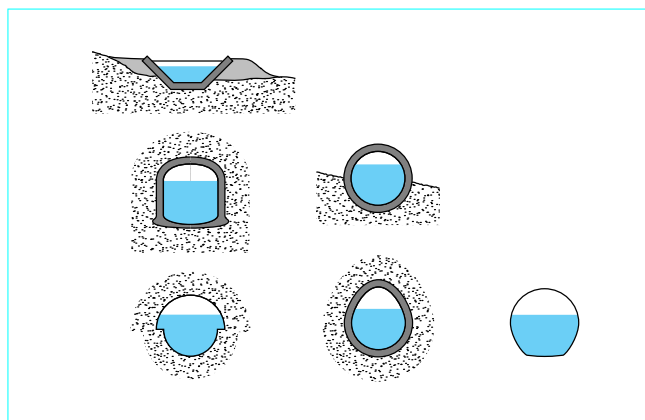


Figure 1 – Différentes formes de section d'aqueducs fermés

Tableau 1 – Valeurs du coefficient γ de la formule de Bazin (avec R en m)

Parois	γ
Très unies (ciment, bois)	0,06
Unies (planches, briques, pierre de taille)	0,16
Unies en ciment (en service depuis plus de 20 ans) .	0,20
Maçonnerie de moellons.....	0,46
De nature mixte (terres très régulières, perrés)	0,85
Terre ordinaire	1,30
Terre de résistance exceptionnelle (galets, herbes) .	1,75

Tableau 2 – Valeurs du coefficient k de la formule $V = k R^{2/3} I^{1/2}$ (avec V en m/s et R en m)

Parois	Bon état	Mauvais état
Très lisses (ciment lisse)	100	77
Enduit ciment. Bois non raboté	91	67
Béton.....	83	56
Maçonnerie correcte.....	77	59
Maçonnerie grossière.....	59	33
Aqueduc métallique lisse	91	67
Aqueduc tôle ondulée	45	31
Terre unie	40	33
Terre irrégulière	29	22
Terre envahie de végétaux.....	25	20

ler l'établissement inattendu d'un régime varié ou du régime critique, constituant des téléindicateurs d'incidents graves et fournissent, s'ils sont disposés convenablement, la localisation de l'endroit où se sont produits les désordres dans l'adduction.

1.3 Construction des aqueducs à surface libre

Remarque : il existe encore des canaux et aqueducs ouverts servant à l'alimentation en eau potable. Ce sont des réalisations anciennes. La réglementation actuelle (datant de 1935 sur ce point) interdit, en France, l'amenée de l'eau destinée à l'alimentation humaine avec de tels ouvrages.

1.3.1 Types d'adductions d'eau potable

L'obligation de couvrir les aqueducs a conduit tout naturellement, dans le cas des adductions modernes destinées à l'eau potable, à abandonner les canaux de section trapézoïdale ou rectangulaire et à utiliser des ovoïdes ou des conduites circulaires de grand diamètre.

Les aqueducs à surface libre, pour éviter l'établissement de régime critique, sont toujours de pente faible ; les sections séparées par des différences de niveau importantes sont reliées par des sections en charge équipées de dispositifs d'asservissement au débit des deux sections.

1.3.2 Formes des sections

Les formes des sections des aqueducs fermés sont très variables. Pour chaque forme, le calcul permet de déterminer la relation débit - tirant d'eau et, par voie de conséquence, les dimensions à prévoir.

L'obligation d'un tracé à faible pente conduit à lui faire couper les courbes de niveau suivant un angle faible, en effaçant toutefois les accidents de terrains peu importants par des déblais ou remblais.

Pour les aqueducs préfabriqués, donc à joints multiples, la stabilité des terrains est primordiale et doit être étudiée avec le plus grand soin. Si la stabilité est convenable, on dispose les longueurs préfabriquées simplement sur un lit de sable. Dans le cas contraire, on est amené à prévoir des supports, voire des ouvrages plus importants (dalles, murs de soutènement, etc.) (figure 2).

Le passage des grandes coupures topographiques ne se fait plus comme jusqu'au XIX^e siècle par de majestueux aqueducs, mais à l'aide de siphons (figure 3).

1.4 Écoulements en charge

1.4.1 Généralités

L'eau remplit totalement le conduit et la pression y est supérieure à la pression atmosphérique. Cette pression dépend des conditions régnant aux limites amont et aval de la conduite et du débit instantané.

Les variations de débit provoquent des ondes de pression qui peuvent être considérables si toutes les précautions nécessaires ne sont pas prises (coups de bélier). Pour cet ensemble de raisons les conduites sont de section circulaire et les joints entre les tronçons de conduite (tous les 6 m) demandent à être étudiés spécialement. Les variations de direction, sauf dans certains cas comme celui des conduites en acier soudé, demandent des butées ; les points hauts doivent recevoir des ventouses (§ 2.2.5) pour empêcher la formation des occlusions d'air qui perturberaient les écoulements ; dans certains cas il faut prévoir des dispositifs protecteurs contre les coups de bélier. Enfin, et principalement dans les réseaux de distribution, on utilise des pièces dites *spéciales* (coudes, tés, Y, etc.) où les pertes d'énergie sont supérieures à celles provoquées par l'écoulement dans un tronçon linéaire standard.

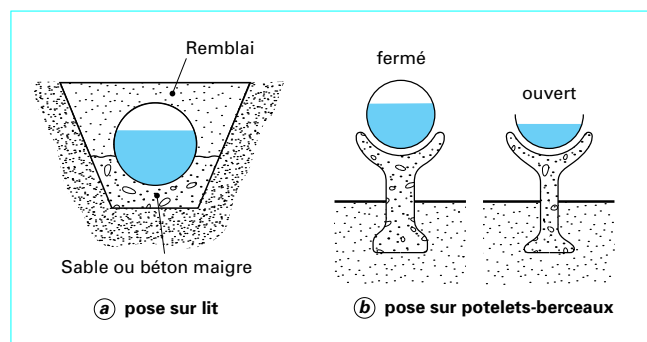


Figure 2 – Pose des aqueducs

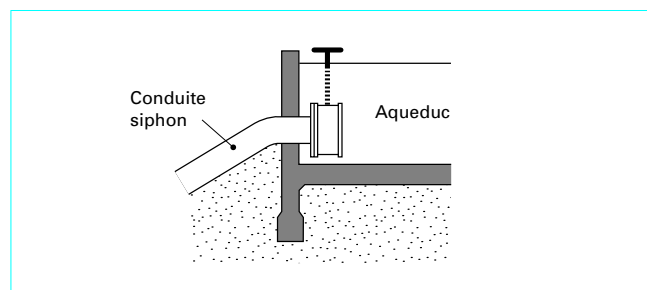


Figure 3 – Tête de siphon

Les variations de débit sont communément rencontrées dans les écoulements en charge ; les conduites d'adduction souvent alimentées par pompage n'y échappent pas, ces variations sont permanentes dans les réseaux de distribution où l'on constate, pour une conduite donnée, de fréquentes inversions du sens des écoulements.

1.4.2 Régime uniforme

L'écoulement est toujours turbulent et les parois doivent être considérées comme rugueuses (au sens de la mécanique des fluides). De très nombreuses études depuis le XIX^e siècle ont été menées visant la détermination de la perte de charge en fonction du débit et de la section.

La formule générale est de la forme :

$$\Delta H = \frac{\lambda}{D} \frac{V^2}{2g}$$

avec ΔH perte de charge unitaire,
 D diamètre,
 V vitesse de l'écoulement.

La détermination de λ a été affinée par les chercheurs successifs et la valeur la plus communément donnée est celle de **Colebrook** :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{k}{3,7D} + \frac{2,52}{Re \sqrt{\lambda}} \right)$$

avec Re nombre de Reynolds $= VD/\nu$,
 k paramètre lié à la rugosité de la paroi (tableau 3),
 ν viscosité cinématique.

Tableau 3 – Valeurs du coefficient k de la formule de Colebrook

Nature	k (en 10^{-4} m)
Fonte vieille.....	20
Fonte neuve sans revêtement	10
Fonte revêtue de ciment	5
Béton coulé.....	5
Fonte revêtue de ciment centrifugé.....	2,5
Béton centrifugé.....	2,5
Acier ou béton lisse.....	1
Fonte revêtue de ciment lisse	0,5
Béton précontraint	0,5
Amiante-ciment	0,25

Dans une première approximation on peut négliger éventuellement le deuxième terme de la parenthèse pour les écoulements rencontrés dans la pratique de la distribution d'eau, ce qui évite le calcul de λ par itération ; on obtient alors la formule de **Nikuradsé** :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{k}{3,7D} \right)$$

Cependant les ordinateurs et même certaines calculatrices programmables permettent très facilement d'utiliser directement la relation de Colebrook (trois itérations suffisent largement pour déterminer λ avec une précision suffisante).

Il existe également de nombreux abaques (cf. article *Écoulement des fluides dans les tuyauteries* dans le traité Génie mécanique).

Il existe aussi des logiciels (exemple : société Diadème Ingénierie) et des logiciels spécifiques aux entreprises concernées.

En exprimant V en m/s, D en m, ν en m^2/s , nous avons :

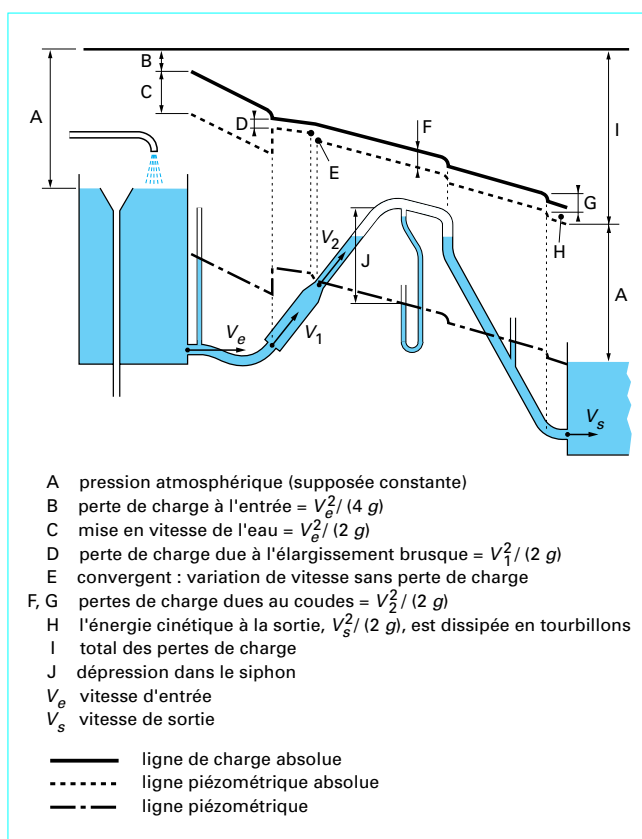
$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

avec pour ν des valeurs en fonction de la température données dans le tableau 4.

1.4.3 Ligne de charge et ligne piézométrique

La conduite en charge peut suivre un profil en long indépendant de la ligne d'énergie de l'écoulement ; c'est d'ailleurs le grand avantage qu'elle présente vis-à-vis des écoulements libres qui sont prisonniers des courbes de niveau avec un léger gradient négatif. C'est pourquoi le tracé d'une conduite en charge (profil en long) doit être accompagné de la ligne des pressions disponibles en chaque point (c'est-à-dire de la ligne piézométrique) et ceci pour chaque débit envisagé (figure 4). Cette ligne de niveau se détermine par application de la loi de Bernoulli. Dans la pratique, le calcul se fait pour le débit maximal considéré comme uniforme et en négligeant, dans un premier temps, les pertes de charge singulières (perte à l'entonnement, aux coudes, rétrécissement, etc.) ; pour en tenir compte on majore la perte de charge d'un certain pourcentage résultant de l'expérience (5 à 15 %).

En chaque point de la conduite, on calcule aussi la pression en débit nul, la pression pour le débit maximal, la cote par rapport au sol. En un simple coup d'œil, on constate si la pression est suffisante pour répondre aux besoins, sans pour cela dépasser la valeur de sécurité vis-à-vis de la rupture de la conduite.

**Figure 4 – Ligne de charge et lignes piézométriques dans l'écoulement de l'eau par gravité entre deux réservoirs****Tableau 4 – Valeurs de la viscosité cinématique ν de l'eau en fonction de la température**

Température (°C)	ν (en 10^{-6} m ² /s)
0	1,80
5	1,50
10	1,29
15	1,12
18	1,04
20	0,99

1.4.4 Régime varié. Coup de béliet

On se reportera à l'article [A 1 870] *Mécanique des fluides* dans le traité Sciences fondamentales.

Les canalisations ayant été calculées pour des pressions et des débits maximaux, tant que la demande ne dépasse pas le débit prévu et que la résistance de la conduite reste capable d'absorber les surpressions, la quantification des variations du débit et de la pression ne présente pas d'intérêt pratique notamment tant que les variations de débit restent lentes.

Au début du XX^e siècle, Allievi a proposé une relation donnant la valeur de la surpression (dépression) en un point donné d'une conduite en fonction du temps. Si l'on considère une conduite alimentée sous pression amont constante et que l'on ferme rapidement une vanne située en aval, l'utilisation du théorème des quantités de mouvement et de l'équation de continuité a permis à Allievi de formuler les équations différentielles du phénomène et de les intégrer. Pour se rapprocher des conditions réelles, il faut introduire dans l'équation de continuité des paramètres physiques : compressibilité de l'eau et élasticité des parois. Si l'on prend comme axe de référence celui de la conduite avec pour origine l'origine de celle-ci, et que l'on prend comme origine des temps le début de la variation provoquée du débit, les relations d'Allievi s'écrivent :

$$\Delta P = F_1\left(t - \frac{x}{a}\right) + F_2\left(t + \frac{x}{a}\right)$$

$$V - V_0 = -\frac{g}{a}\left[F_1\left(t - \frac{x}{a}\right) - F_2\left(t + \frac{x}{a}\right)\right]$$

avec F_1 et F_2 fonctions à déterminer dans chaque cas d'espèce :

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho\left(\frac{1}{K} + \frac{D}{Ee}\right)}}$$

$\rho = g/\omega$ (ω : poids volumique de l'eau),
 K compressibilité volumique de l'eau,
 D diamètre de la conduite,
 E module d'Young de la paroi,
 e épaisseur de la paroi.

Allievi a donné une valeur pratique pour la célérité des ondes a (en m/s) :

$$a = \frac{9\,900}{\sqrt{48,3 + k(D/e)}}$$

avec par exemple $k = 0,5$ pour l'acier,
 1 pour la fonte.

Les **célérités moyennes** a , en fonction de la nature du matériau de la conduite, sont données dans le tableau 5.

Dans le cas où la pression amont reste constante (par exemple réservoir à niveau constant de grand volume) et pour une conduite de longueur L , les équations se simplifient : $F_1 = F_2 = F$ et s'écrivent :

$$\Delta P = F\left(t - \frac{x}{a}\right) - F\left(t - \frac{2L-x}{a}\right)$$

$$V = V_0 - \frac{g}{a}\left[F\left(t - \frac{x}{a}\right) + F\left(t - \frac{2L-x}{a}\right)\right]$$

Toute la difficulté réside à déterminer les fonctions F_1 et F_2 ; cela peut se faire dans quelques cas simples, mais qui quantifient bien ce que l'on peut observer dans la pratique.

Par exemple, une fermeture brusque (non instantanée, c'est-à-dire pour laquelle la durée reste inférieure à $2L/a$) du cas d'espèce cité ci-avant (conduite isolée, pression amont constante) conduit à une surpression maximale :

$$\Delta P_H = \frac{aV_0}{g}$$

à l'extrémité de fermeture et en tout point d'abscisse x tel que $x < L - \frac{aT}{2}$,

$$\Delta P_{H_x} = \frac{2V_0}{gT}(L-x)$$

en un point d'abscisse x tel que $L - \frac{aT}{2} < x < L$,

avec T temps de fermeture $< 2L/a$.

En fait, on observe un phénomène périodique de propagation de l'onde de surpression avec une période égale à $4L/a$ (figure 5).

Dans la réalité, les pertes de charge créées par les oscillations de la masse d'eau conduisent à un amortissement de l'onde de surpression.

Dans le cas d'une fermeture dite lente, c'est-à-dire pour laquelle $T > 2L/a$, la surpression maximale est donnée par la formule de **Michaud** :

$$\Delta P = \frac{2V_0L}{gT}$$

L'ouverture brusque d'une vanne sur l'extrémité de la conduite conduirait à des considérations analogues. Dans la réalité, des difficultés complémentaires apparaissent du fait que les conditions ne sont pas celles d'une conduite isolée, homogène, à pression amont constante. La méthode graphique dite Schnyder-Bergeron est d'une application aisée (cf. article [A 1 870] *Mécanique des fluides* dans le traité Sciences fondamentales). L'ordinateur permet d'aborder à présent avec succès les cas les plus complexes et de définir la nature, les dimensions et le point d'application des dispositifs de protection contre les coups de bélier.

1.4.5 Réseaux de distribution

1.4.5.1 Réseaux ramifiés

On ne peut, par définition, y décrire une boucle en suivant les canalisations. Les conditions régnant dans un tronçon de cet arbre de conduites sont déterminées par les conditions de pression régnant à l'extrémité amont et le débit qui y transite, et qui est la somme des consommations propres au tronçon et de celles de l'ensemble des tronçons aval qu'il alimente. Le profil en long de l'ensemble s'établit tronçon par tronçon sans difficultés particulières si le réseau est alimenté à partir de l'amont de l'ensemble (à partir du tronc de l'arbre). S'il existe des réservoirs d'extrémités ou de flanc (figure 6a), le sens des écoulements peut s'inverser dans un tronçon, ou même, une conduite peut recevoir simultanément de l'eau de chacune de ses extrémités. Il existe alors un point neutre qui est déterminé par un calcul simple à partir de la formule de Colebrook (§ 1.4.2). Les réservoirs d'extrémité ou de flanc présentent un grand intérêt dans les réseaux ramifiés de grande extension (réseaux d'adduction ou réseaux de distribution), notamment dans les syndicats de communes rurales. Ils permettent, en période de faible consommation, d'alimenter les réservoirs à débit réduit qui, en période de pointe, assurent les besoins accrus des usagers établis dans leur voisinage. Le diamètre des canalisations peut alors être plus faible que dans le cas d'une alimentation unique amont.

Tableau 5 – Célérités moyennes en fonction de la nature du matériau de la conduite

Conduite	a
Polyéthylène BD	200
Polyéthylène HD	400
PVC	500
Fonte.....	1 100 à 1 200
Âme tôle de Bonna.....	1 200
Acier	1 300

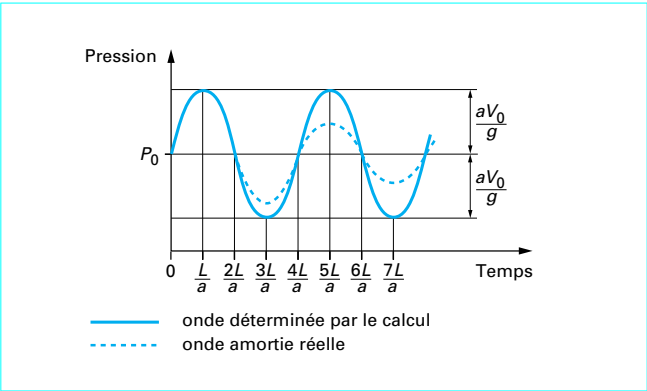


Figure 5 – Surpression par fermeture brusque à l'extrémité (charge amont constante)

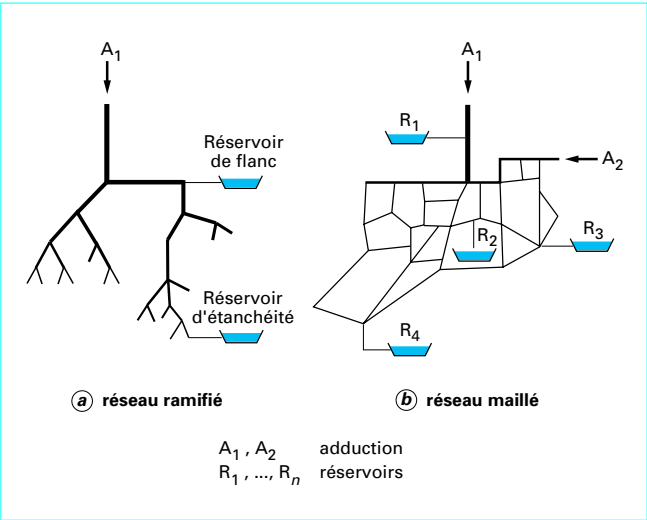


Figure 6 – Réseaux de distribution

Nota : une association de communes avec un objet limité bien déterminé est appelée **syndicat**, par exemple, syndicat de distribution d'eau, syndicat d'assainissement, etc. ; tout ce qui n'est pas visé par l'objet reste de la compétence de chaque commune.

1.4.5.2 Réseaux maillés

Ils présentent l'avantage évident de sécurité (rupture d'une conduite) en supprimant la notion d'amont et d'aval dans l'alimentation d'un tronçon. De surcroît, ils homogénéisent les débits des tronçons en fonction des fluctuations locales de la demande (figure 6b).

La détermination de la valeur des débits et du sens des écoulements n'est pas évidente et demande une approche analytique dont la plus connue est celle proposée par **Hardy-Cross** (figure 7).

La modélisation du réseau peut se faire en situation actuelle, ce qui permet de disposer d'une bonne représentation de la configuration de la répartition des débits et des pressions, mais également en situation future ; dans ce dernier cas les projets peuvent être établis en serrant au plus près les contraintes débit et pression exigées et, par conséquent, permettent de réduire d'autant les investissements.

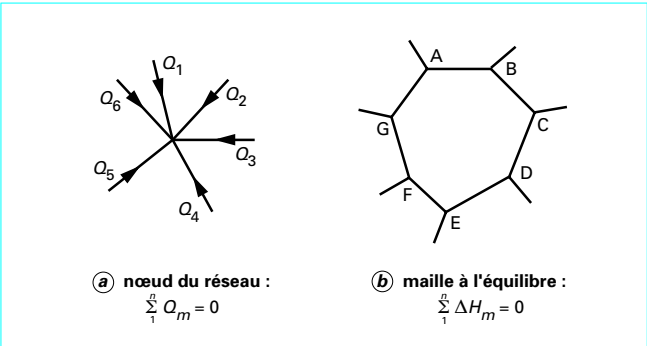


Figure 7 – Méthode de Hardy-Cross pour la détermination des débits et du sens des écoulements

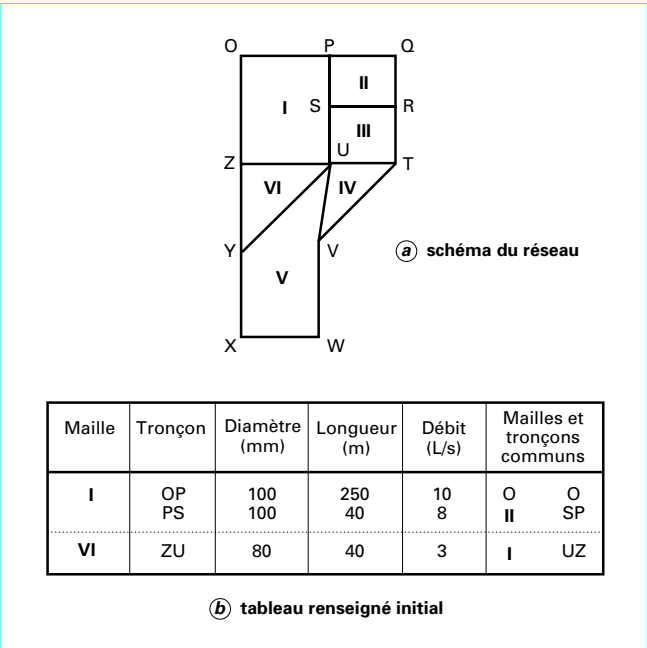


Figure 8 – Schéma renseigné du réseau

La modélisation sur ordinateur permet de multiplier les variantes et options, ce qui, pour l'ingénieur, facilite le dialogue d'optimisation concepteur-décideur.

Pour appliquer la méthode de Hardy-Cross, il faut au préalable établir un schéma renseigné du réseau (indispensable de toute façon, à l'exploitant comme au concepteur, en dehors même de l'application de la méthode) (figure 8). Ce schéma renseigné fournira pour chaque tronçon, la longueur, le diamètre, le degré de vétusté, les consommations des usagers branchés sur le tronçon, la cote du terrain, les contraintes de pression de service et la pression maximale à ne pas dépasser, compte tenu de la nature et de l'état de la conduite.

La méthode proprement dite consiste à établir au départ une répartition arbitraire des débits sous les deux conditions ci-après :

- la somme des débits à chaque sommet reste nulle ;
- chaque tronçon assure la satisfaction des besoins des usagers qui sont branchés sur lui.

Cette répartition arbitraire qui échappe à l'obligation du respect des pressions est assez aisée à établir à vue. Elle peut même être établie automatiquement par l'ordinateur si l'on répartit les consommations de chaque tronçon aux sommets qui le limitent.

À partir de cette répartition arbitraire, on demande à l'ordinateur d'assurer l'équilibrage des débits de façon que, la somme des débits à chaque sommet restant nulle, la somme des pertes de charge des tronçons d'une même maille devienne nulle.

L'approche d'Hardy-Cross consiste à faire le calcul par approximations successives, en linéarisant la relation fournissant la perte de charge qui est quadratique par rapport au débit : $\Delta H = A Q^2$.

Si l'on pose ΔQ la variation de débit le long de la maille qui conduirait à annuler la perte de charge, on obtient pour n tronçons :

$$\sum_1^n \Delta H = \sum_1^n A_n (Q_n + \Delta Q)^2$$

avec ΔQ commun pour les tronçons d'une même maille.

En négligeant pour l'itération le terme ΔQ^2 , on obtient :

$$\Delta Q = \frac{\sum_1^n A_n Q_n^2}{2 \sum_1^n A_n Q_n}$$

L'expérience montre que la convergence de l'itération est très rapide.

On obtient ainsi la répartition des débits en équilibre dans le réseau maillé.

Il suffit de changer les débits de chaque tronçon (débit de pointe, débit de nuit), de les changer dans un seul tronçon (construction d'un immeuble, établissement d'un gros consommateur industriel, d'un hôpital, etc.) ou d'ajouter une nouvelle maille (extension, zone industrielle, etc.) pour obtenir rapidement la nouvelle configuration qui en résulterait.

De surcroît, si les pressions d'alimentation sont fixées, par déduction des pertes de charge, on obtient la pression à chaque sommet, à condition de connaître la cote topographique.

C'est par conséquent un instrument incomparable pour l'exploitant et le projeteur.

Il faut néanmoins souligner que la méthode (comme toute autre approche de la réalité de la configuration du réseau) demande de préférence un *calage* qui permet de compenser l'imprécision inévitable sur la rugosité des conduites, sur l'influence des pertes de charge particulières, voire, pour une partie du réseau, sur la disposition et le diamètre des conduites.

Ce calage permet de mieux coller à la réalité si les pressions et débits calculés en un point sont légèrement différents de ceux mesurés. Lorsque la différence apparaît considérable, elle indique, puisque la méthode est sûre, l'existence d'aberrations du schéma renseigné et, souvent, la localisation de ces dernières.

1.4.5.3 Coups de bélier en distribution

Ce point est souvent oublié. Pourtant le phénomène peut être observé du fait de surpresseurs d'immeubles, de défenses contre l'incendie, d'ouverture ou de fermeture rapide de diverses vannes, de clapets, etc. Dans ces cas, il faut attirer l'attention non seulement sur la surpression qui peut dépasser la pression maximale admissible dans les tuyaux (risque de rupture), mais aussi, et peut être surtout, sur le **risque de pression négative** ; si celle-ci devient inférieure à 10 m, il peut s'ensuivre un phénomène de cavitation (la pression absolue, de 10,33–10 m, atteint la valeur limite de la tension de vaporisation de l'eau $\approx 0,25$ m, ce qui crée une poche de

vide). On risque une implosion par aplatissement du tuyau. On risque également des entrées d'impuretés plus ou moins souillées et pathogènes dans l'eau du réseau.

2. Conduites

2.1 Nature des conduites. Prescriptions diverses

On se reportera à l'article *Éléments normalisés pour tuyauteries sous pression* dans le traité Génie mécanique.

2.1.1 Contraintes techniques et réglementaires

2.1.1.1 Contraintes techniques

■ Les **contraintes concernant la partie intérieure de la conduite** sont d'ordre : physique, chimique et biologique.

■ Contraintes physiques

Pressions relativement élevées, jusqu'à 16 bar pour des canalisations standardisées.

Comportement hydraulique : on entend par là la facilité d'écoulement de l'eau. Celle-ci peut être obtenue par la nature même du produit constituant la structure du tuyau, ou par des revêtements internes le plus souvent en mortier de ciment, voire en résine époxy. On obtient ainsi des coefficients de rugosité faibles, ce qui entraîne des pertes de charge minimisées et des dépenses énergétiques optimisées, en pompage notamment. Avec certaines eaux, mal débarrassées des matières en suspension ou de nature incrustante, cette rugosité peut faciliter avec le temps des dépôts allant jusqu'à une obstruction quasi totale de la section du tuyau. Selon les cas, les phénomènes en jeu sont d'ordre physique ou/et chimique comme indiqué ci-après.

■ Contraintes chimiques

Les revêtements précédents, comme les natures inertes de certains tuyaux, ont également pour but de limiter les phénomènes de corrosion induits par la qualité de certaines eaux véhiculées (pH acide, faible pouvoir tampon...). Cette optimisation chimique évite certains dépôts sanitaires indésirables ainsi que la formation de couche interne rugueuse (cf. ci-dessus). Les obstructions à base de tartre (en général calcite ou aragonite) et celles à base de fer sont les plus fréquentes et les plus spectaculaires.

La structure en contact avec l'eau ne doit pas altérer les qualités organoleptiques de celle-ci, et encore moins relarguer des substances indésirables voire toxiques.

■ Contraintes biologiques

La nature de la couche interne ne doit pas faciliter les développements ou reviviscences de micro-organismes susceptibles d'être pathogènes, ni d'organismes supérieurs du type *Nais* (vers), *Asellus aquaticus* (crustacé microscopique), larves de chironomes (moustiques...), etc. Précisons que, pour autant, l'intérieur des conduites en service n'est pas un milieu stérile : il existe notamment contre la paroi interne un « biofilm » qu'il convient de maîtriser.

■ La **partie extérieure des conduites** est également soumise à trois types de contraintes :

- **contraintes chimiques** : la nature des terrains et en particulier leur humidité et leur agressivité, sont des facteurs de corrosion ;
- **contraintes mécaniques** : la stabilité des terrains, les variations brusques de température, les poinçonnements accidentels,

les vibrations, etc., sont des facteurs de casse. L'épaisseur des conduites en fonction du matériau constitutif répond également à des contraintes mécaniques, en particulier de pression et de dépression éventuelles ;

— **contraintes électriques** : selon les types de conduites, cette contrainte concerne plus ou moins directement l'extérieur du tuyau ; les courants dits « vagabonds » rencontrés dans les sols ont des origines très diverses : courants telluriques un peu mystérieux, courants liés à des protections cathodiques de tiers, courants liés à des rails, etc.

2.1.1.2 Contraintes réglementaires

Les canalisations utilisées pour la distribution de l'eau potable doivent satisfaire à des contraintes réglementaires liées essentiellement à la nature alimentaire du produit véhiculé : « les matériaux utilisés dans les systèmes de production ou de distribution et qui sont au contact de l'eau destinée à la consommation humaine ne doivent pas être susceptibles d'altérer la qualité de l'eau » (Art. 7 du décret 89.3 du 3/01/89 complété par le décret du 5/04/95). Ces matériaux doivent répondre aux conditions de l'arrêté interministériel du 29/05/97 relatif aux matériaux et objets utilisés dans les installations fixes de production, de traitement et de distribution d'eau destinée à la consommation humaine (Art. 5 et annexes I et II).

L'autre type de contrainte est normatif. Les normes, presque toutes fixées actuellement au niveau européen, prennent en compte les éléments sanitaires précédents. Elles répondent également, autant que possible, aux problèmes évoqués dans le cas des contraintes techniques (§ 2.1.1.1).

Rappelons ici un autre type de contraintes : il s'agit des contraintes de pose, fixées par divers documents techniques spécialisés (Fascicule 71 *Fourniture et pose de conduites d'adduction et de distribution d'eau*) auxquels le lecteur se reportera si nécessaire.

2.1.2 Matériaux constitutifs, revêtements

Les tuyaux peuvent être constitués d'un matériau unique ou présenter une structure composite :

— **matériau unique** : il s'agit des fontes et en particulier de la fonte ductile, le poly(chlorure de vinyle) (PVC), le polyéthylène (PE), l'acier et certains bétons non armés. Le plomb est interdit. Dans les réseaux intérieurs, on trouve du cuivre, du métal galvanisé, du PVC ;

— **matériau composite** : le principal est le béton à âme tôle de Bonna ; il faut également mentionner le polyester renforcé verre (PRV). Les tuyaux en amiante-ciment sont à présent interdits à la pose, et divers tuyaux en PVC renforcé fibre de verre comme le VP ne sont plus produits.

Compte tenu des contraintes précédemment évoquées, les tuyaux en matériau unique sont en fait très souvent revêtus intérieurement, voire intérieurement et extérieurement. Les revêtements intérieurs actuels sont à base de ciment ou de résine époxy. À l'extérieur, on trouve souvent des peintures bitumineuses ou époxy.

2.1.3 Raccordements, diamètres, longueurs

On peut également classer les tuyaux en fonction des types de raccordement utilisés selon trois grandes familles.

Raccordement par emboîtement : il y a en général alors un joint assurant l'étanchéité. Les tuyaux en fonte, PVC, béton à âme tôle, PRV sont de ce type. Ces raccordements impliquent presque toujours une surépaisseur par rapport au diamètre extérieur du tuyau ; les techniques de pose par fonçage ou forage ne sont alors pas toujours possibles.

Raccordement par soudure : ces techniques sont réservées aux polyéthylènes (électrosoudages par manchon ou « au miroir »), à

l'acier et, parfois, à la partie acier des bétons à âme tôle. En raison de la surépaisseur du manchon, le PE soudé de cette façon se prête mal également aux forages et fonçages.

Raccordement par collage : le PVC en petits diamètres peut également être assemblé par collage.

Les tuyaux se présentent le plus souvent en longueurs droites de 6 m, sauf pour les PE qui se présentent en tourets de plusieurs centaines de mètres selon le diamètre. Cette dernière présentation facilite leur utilisation en fonçage ou forage pour les diamètres de 100 à 400 mm.

2.1.4 Tuyaux en fonte

Depuis la fin du XIX^e siècle, la fonte a été sans doute un des premiers matériaux de canalisations et un des plus répandus dans le monde pour véhiculer l'eau de distribution publique. Différents types de **fonte grise** (figure 9a) se sont succédés avec des conduites coulées ou centrifugées, dont beaucoup sont encore en service (leur longévité peut dépasser 100 ans). Leur inconvénient principal réside dans leur fragilité vis-à-vis des mouvements de terrain, des coups de bélier et des surcharges occasionnées par les transports routiers dans les voies où elles sont posées. En effet, dans la fonte « grise », le carbone se présentait sous forme de lamelles qui rendaient le matériau cassant.

La **fonte ductile** à graphite sphéroïdal (figure 9b) constitue le matériau moderne actuel ; elle élimine totalement les défauts de la fonte grise. Les particules de graphite y apparaissent comme de petites sphères qui éliminent tout risque de propagation des ruptures. Le matériau n'est plus fragile, mais « ductile » et résistant. La cristallisation du graphite sous forme de sphères est due à l'introduction de magnésium dans une fonte de base de haute qualité. La principale norme européenne concernant les conduites en fonte ductile est la NF EN 545.

La norme NF EN 545 définit différents types de pressions admissibles :

— **PFA, pression de fonctionnement admissible**, est la pression interne en régime permanent. Cette pression varie en fonction du diamètre de la conduite et des pièces de raccordement utilisées, de 16 à 64 bar ;

— **PMA, pression maximale admissible**, est la pression supportable de façon sûre en service, y compris le coup de bélier (= 1,2 PFA) ;

— **PEA, pression d'épreuve admissible**, est la pression hydrostatique maximale supportable par un composant nouvellement mis en œuvre pendant un temps relativement court :

$$PEA = PMA + 5 \text{ bar en général}$$

$$PEA = 1,5 \text{ PFA si PFA} = 64 \text{ bar}$$

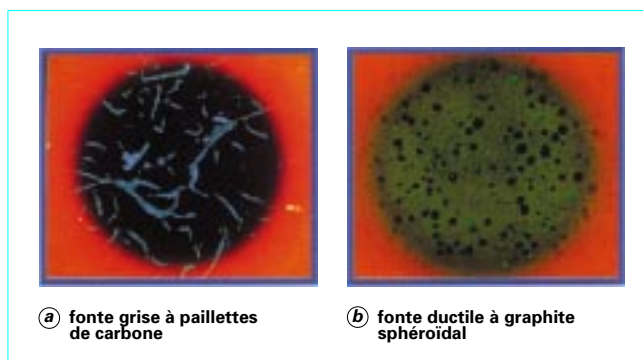


Figure 9 – Différents types de fonte (d'après document Pont-à-Mousson)

Il ne faut pas confondre ces pressions avec les pressions d'éclatement mesurées par les fabricants sérieux. En effet, les pressions d'éclatement sont en général entre 5 et 8 fois supérieures à la PFA.

Les conduites reçoivent un revêtement interne au mortier de ciment appliqué par simple turbinage, ou mieux par centrifugation. La centrifugation permet actuellement d'obtenir une épaisseur plus constante et une surface plus lisse. On diminue donc les pertes de charges ($k = 0,03$ dans la formule de Colebrook) et on limite les dépôts. Le revêtement au mortier de ciment n'agit pas que comme une simple barrière physique, il protège la fonte par mécanisme de passivation. Les divers types de gonflement du ciment par l'eau permettent également une autoréparation des éventuelles petites fissures dues au transport, etc. Dans certains cas d'eaux très agressives, on peut employer un mortier de ciment alumineux. Les raccords et pièces spéciales sont revêtus de peinture bitumineuse ou époxy.

Extérieurement, les conduites en fonte doivent être protégées par une fine couche de zinc projetée d'au moins 130 g/m^2 . Certains fournisseurs améliorent la fiabilité de leurs tuyaux en augmentant cette couche jusqu'à 200 g/m^2 . Le principe de protection est de type actif, par action galvanique du couple fer-zinc. Une protection passive, contre les chocs..., est ensuite obtenue grâce à un enrobage par peinture bitumineuse.

Pour les terrains corrosifs, on utilise couramment des manches extérieures en polyéthylène préenfilées sur les conduites (risques de blessures au transport ou à la manutention), ou enfilées *in situ* (moins de risques, mais opération un peu plus longue à la pose). On peut aussi faire appel à des revêtements organiques spéciaux en polyéthylène ou en polyuréthane appliqués en usine par extrusion, selon les diamètres ; les raccords et pièces sont alors revêtus d'époxy.

Dans certains cas de risque de gel, on peut obtenir des tuyaux isolés en usine par une mousse de polyuréthane injectée entre le tuyau et une gaine de polyéthylène.

Les longueurs de tuyaux sont assemblées par des joints non verrouillés, verrouillés ou à brides. Les joints verrouillés permettent une autobutée des canalisations, évitant des massifs en béton lourds, encombrants et longs à réaliser. Les **joints les plus couramment utilisés** sont (figure 10) :

- le joint express (verrouillé ou non) ;
- le joint standard (verrouillé ou non) ;
- les joints automatiques verrouillés ;
- le joint à brides (fixe ou orientable).

Les joints modernes sont verrouillés grâce à des bagues de joint en élastomère comportant des inserts métalliques. De même, le joint proprement dit, qui se place entre les brides, est actuellement en élastomère garni d'inserts métalliques pour éviter le fluage à la compression lors du serrage.

Selon les diamètres et les types de joints, une certaine déviation est admise à la pose variant de 1 à 5° .

Les diamètres courants vont de 60 à $1\,200 \text{ mm}$, la gamme de 80 à 600 mm étant la plus utilisée pour les réseaux d'eau potable. Cependant des diamètres allant jusqu'à $2\,000 \text{ mm}$ peuvent être fournis.

Les pièces spéciales comprennent les coudes, tés, cônes, manchons droits, bouts d'extrémité, plaques pleines, etc.

2.1.5 Tuyaux en acier

En France, les tubes en acier sont fabriqués à partir de bobines laminées à chaud ; la bobine est cintrée à froid et soudée bord à bord en continu. Les soudures sont en principe longitudinales jusqu'au diamètre 400 mm , et hélicoïdales au-delà ; elles peuvent

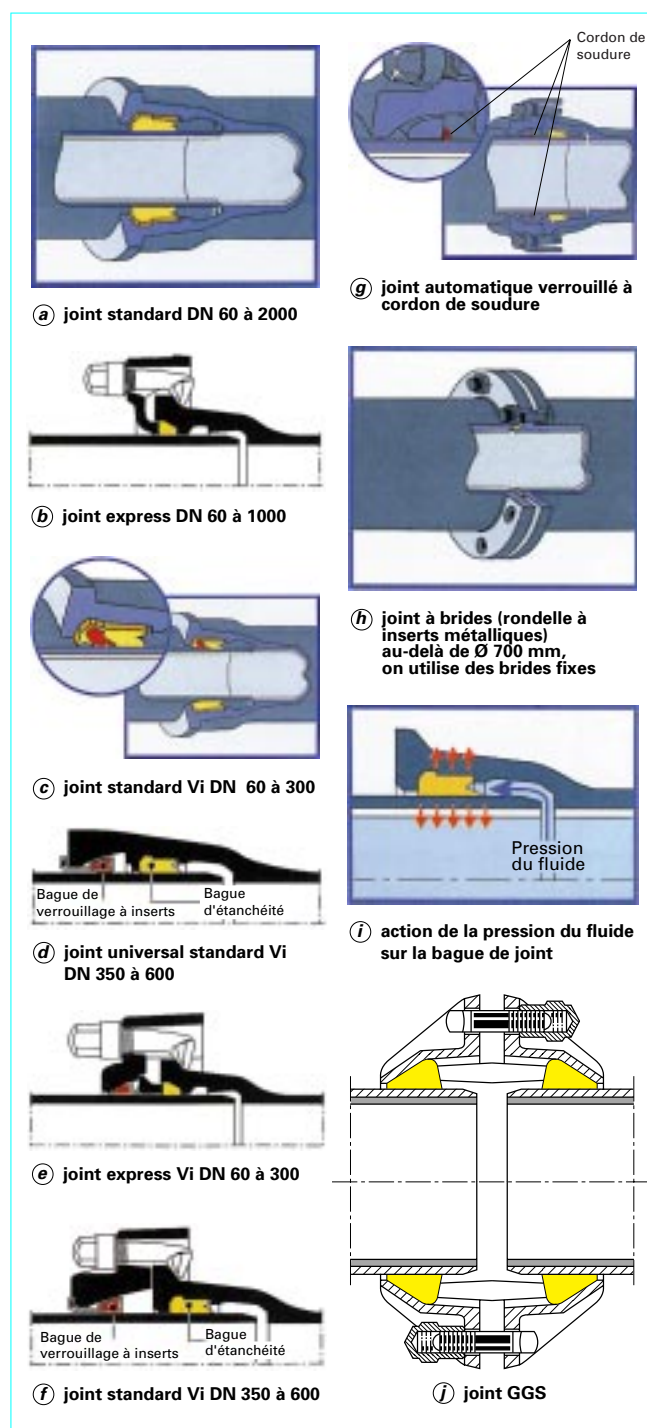


Figure 10 – Joints pour canalisations en fonte

(d'après document Pont-à-Mousson)

se faire à l'arc submergé sous flux solide, ou sans apport de métal par résistance à haute fréquence. Les tubes sont alors coupés à la longueur voulue, puis tulipés et chanfreinés, avant d'être grenaillés et revêtus intérieurement et extérieurement.

La résistance à la pression interne est fonction de l'épaisseur du tuyau et des caractéristiques de la nuance d'acier employée, selon la formule :

$$p = 20k \frac{eM}{(D - e)}$$

avec p (en bar) pression interne,
 $k \approx 90 \%$,
 M (en N/mm^2) limite d'élasticité de l'acier ($R_{p0,2}$) ; 235 à 482 N/mm^2 en général,
 D (en mm) diamètre extérieur,
 e (en mm) épaisseur de la paroi.

L'acier se prête à la fabrication de conduites de très grand diamètre (3 000 mm et plus). Il résiste bien aux efforts de flexion.

Les bons tuyaux en acier reçoivent également un revêtement intérieur en mortier de ciment centrifugé, conforme pour l'eau potable, aux normes NF A 49-701 et NF P 15-301. Les effets sont les mêmes que ceux évoqués pour la fonte. Dans certains cas particuliers, on peut remplacer ce revêtement par des mortiers synthétiques, en résines époxy... à condition que les matériaux soient de qualité alimentaire.

Extérieurement, les meilleurs tubes actuels (figure 11) reçoivent un revêtement tricouche (norme NF A 49-710) :

- une couche de résine époxy appliquée par poudrage électrostatique ;
- un adhésif copolymère appliqué par extrusion ;
- une troisième couche en polyéthylène également appliqué par extrusion.

Certains terrains imposent des revêtements particuliers en polypropylène, résine époxy ou bitumineux de type « C ».

Par ailleurs, certaines contraintes de pose ou de terrain conduisent à utiliser des tuyaux avec un revêtement externe de mortier de ciment armé de fibres plastiques, dit *revêtement antiroche*.

Les assemblages se font avec ou sans soudure.

Assemblage avec soudure (figure 12) :

- *joint à emboîtement* avec mastic de qualité alimentaire à l'intérieur, entre l'anneau de caoutchouc de la tulipe et l'extrémité mâle de l'autre tuyau, et soudure extérieure ;
- *soudure bout à bout* pour les diamètres supérieurs à 450 mm, ce qui nécessite de reconstituer le revêtement intérieur au droit de la soudure.

Assemblage sans soudure (figure 13) :

- *joint automatique à emboîtement* jusqu'au diamètre 300 mm ;
- *joints de type mécanique* à assemblage par brides, manchons d'accouplement, etc.

Nous avons vu que, dans certains terrains et/ou selon l'environnement, il faut protéger les conduites – particulièrement celles en acier carboné – contre les courants électriques. On utilise alors les techniques de **protection cathodique** (figure 14) :

- **anode réactive (ou sacrificielle)** : on constitue une pile dont la force électromotrice soit telle que l'acier y agisse comme cathode ; l'anode sera alors à base d'aluminium, de magnésium ou de zinc ;
- **soutirage de courant** : on relie la conduite au pôle négatif d'une source de courant continu ; le pôle positif est relié à une masse métallique enterrée sacrifiée. Dans le cas des *courants vagabonds*, générés par des rails par exemple, on peut drainer le courant et le soutirer si nécessaire.

Il existe depuis 1992 une norme A 05-610 concernant la « protection électrochimique contre la corrosion », précisant les protections passives (divers revêtements) et la protection active ou « protection cathodique ».

Dans les terrains agressifs, une protection cathodique s'impose (§ 2.4.1), elle ajoute ses effets à ceux des revêtements. Des techniques appropriées sont utilisées pour éviter la détérioration des

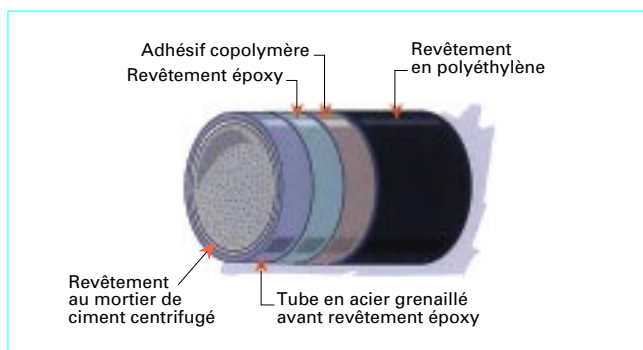


Figure 11 – Tuyau en acier : constitution (d'après document Europipe)

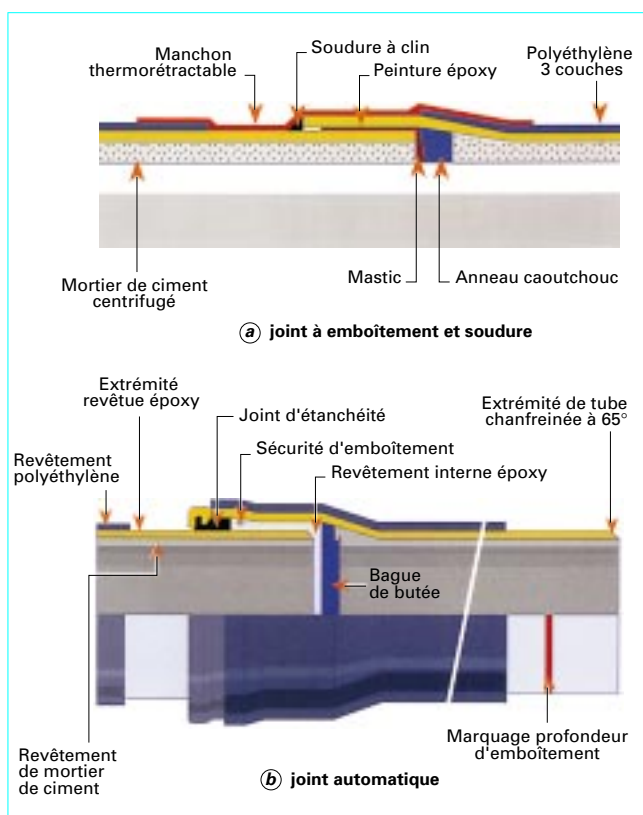


Figure 12 – Joints avec soudure pour canalisations en acier (d'après document Europipe)

revêtements lors des soudures qui, elles-mêmes, doivent recevoir une protection après coup.

Des pièces spéciales sont fabriquées par façonnage de tôlerie et soudure, avec la même diversité que pour les tuyaux de fonte.

2.1.6 Tuyaux en béton armé

Les tuyaux en béton armé centrifugé ou vibrés ne sont guère plus utilisés pour les réseaux d'eau potable. On en rencontre encore en service dans le cas de pressions assez faibles.

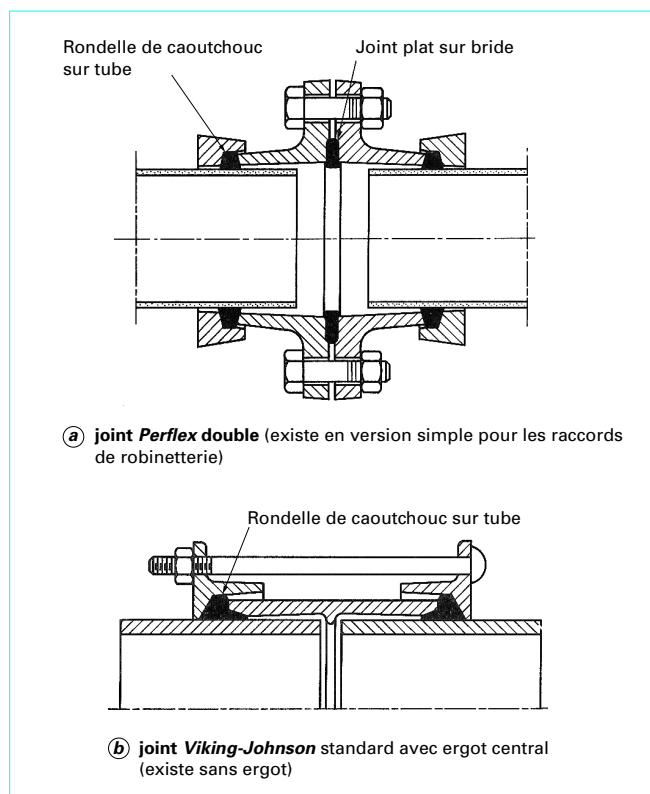


Figure 13 – Joints mécaniques pour canalisations en acier

Le tuyau à âme en tôle d'acier et double revêtement intérieur et extérieur en béton armé est de plus en plus utilisé notamment dans les gros diamètres en raison de son prix relatif, de sa passivité, de sa faible corrosivité, de son autoportance, de son aptitude aux techniques de pose sans tranchée, par fonçage ou micro-tunnelage, et de sa longévité. Dans les conditions extrêmes d'agressivité et/ou de corrosivité de l'eau ou du terrain, des ciments spéciaux peuvent être utilisés et on peut avoir recours à des revêtements internes et/ou externes spéciaux comme pour les autres matériaux de canalisations. On peut même envisager une protection cathodique sur l'âme en tôle. Les tuyaux en béton armé sont assemblés par les joints des figures 15 et 16.

Lors de la fabrication d'un tuyau à âme en tôle (figure 17), on distingue deux étapes.

Fabrication de l'âme en tôle et de l'armature : l'âme en tôle est fabriquée à partir de tôles d'acier cintrées et soudées longitudinalement ou hélicoïdalement. Elle se termine par des plats d'abouts permettant l'assemblage des tuyaux entre eux par joints soudés ou joints à garniture en élastomère. L'armature est fabriquée par enroulement hélicoïdal d'un fil d'acier à un pas constant.

Mise en œuvre du béton : elle se fait suivant deux procédés :

- par centrifugation pour le revêtement intérieur et par projection du revêtement extérieur, procédé donnant des qualités exceptionnelles de finition ;
- par moulage et vibration des bétons intérieurs et extérieurs en une seule opération, technique plus rapide et donc moins coûteuse.

Les diamètres varient de 250 à 4 000 mm. Jusqu'au diamètre 1 250 mm, la longueur des tuyaux est le plus souvent de 6 m. Elle

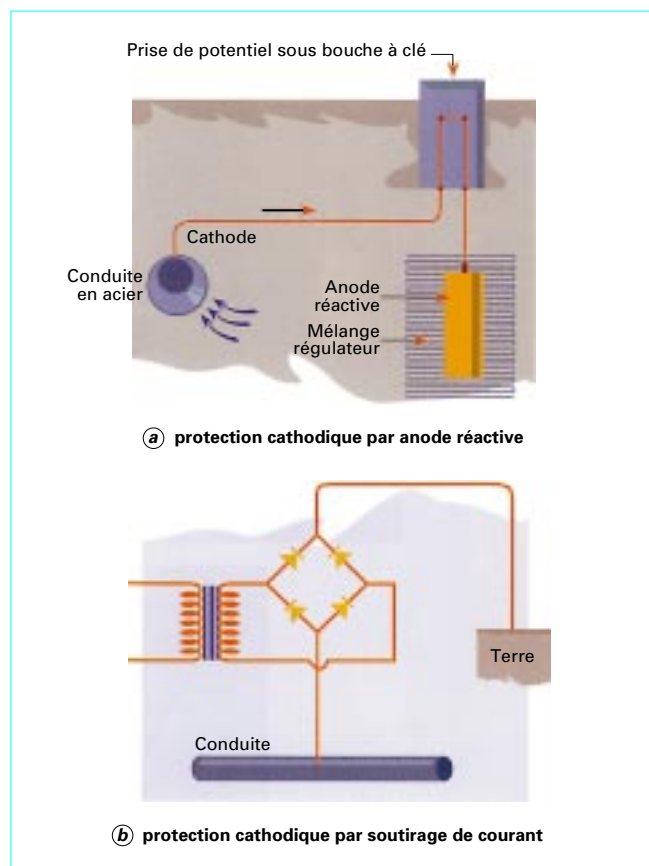


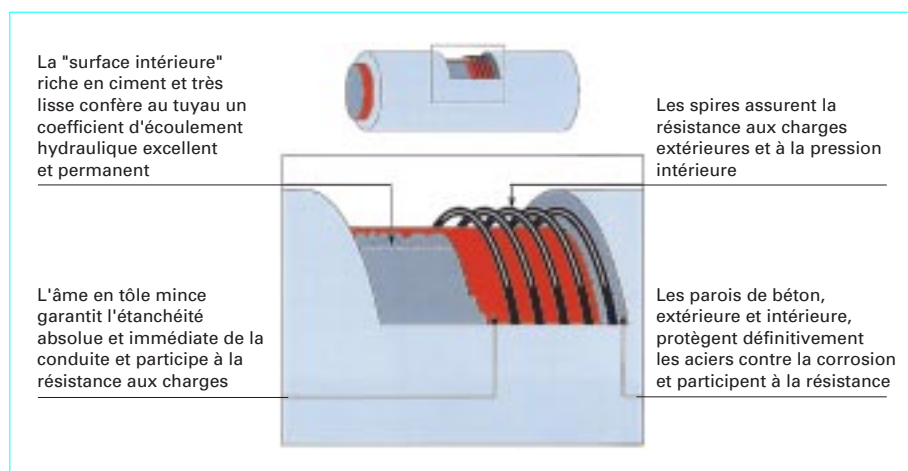
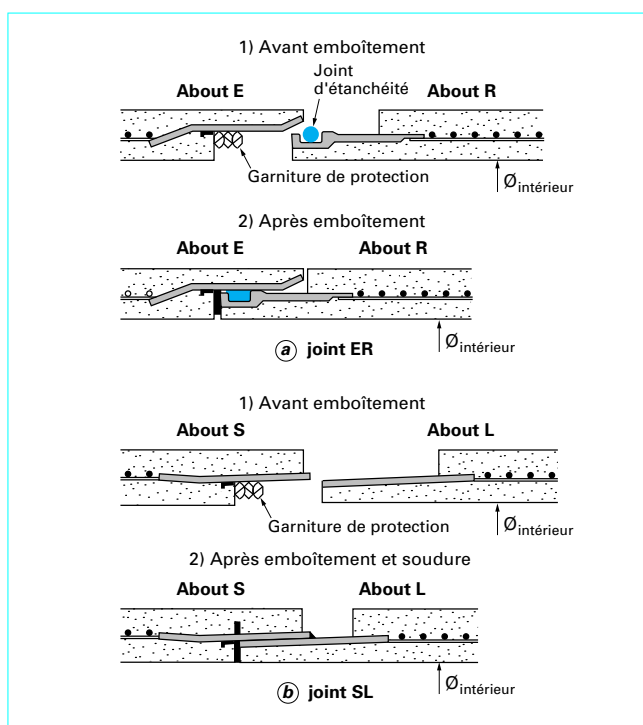
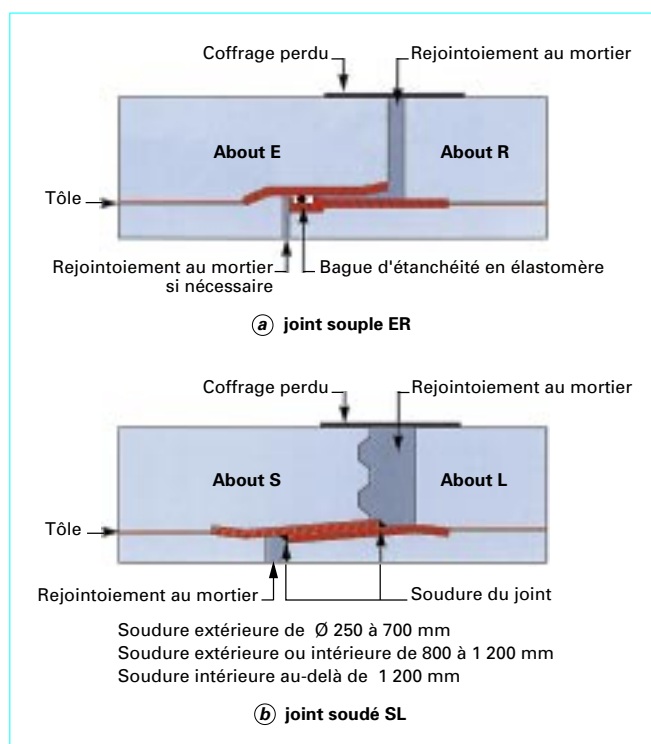
Figure 14 – Protection cathodique des conduites en acier

est de 5 m jusqu'au diamètre 1 800 mm et diminue en fonction du diamètre jusqu'à 2 m pour le 4 000 mm.

2.1.7 Tuyaux en amiante-ciment

Ces tuyaux ne sont plus fabriqués, comme tous les anciens produits en amiante-ciment, pour des raisons réglementaires. Rappelons que l'amiante dans l'air peut provoquer des maladies graves au niveau pulmonaire. Toutefois, aucune étude sérieuse n'a, à ce jour, mis en évidence une quelconque toxicité pour l'homme dans le cas d'ingestion de fibres d'amiante ; l'OMS précise que les fibres d'amiante dans l'eau « ne présentent pas de risque pour la santé humaine » ; l'USEPA (*United States Environment Protection Agency*) fixe toutefois une valeur de sécurité de 7×10^6 fibres/L pour des fibres de longueur supérieure à $10 \mu\text{m}$ qui n'obéit qu'au principe de précaution. Par ailleurs, les fibres éventuellement trouvées dans certaines eaux proviennent des terrains naturels de la zone de captage, les fibres pouvant être arrachées à la paroi des canalisations sont en nombre beaucoup plus faible.

Pour ces raisons, les réseaux en place contenant des tuyaux d'amiante-ciment n'ont pas à être remplacés autrement que lors des opérations normales concernant des tuyaux vieux et en mauvais état. On trouve des diamètres de 80 à 800 mm, à bout lisse, assemblés par des joints de type à manchon ; les pièces spéciales sont celles des tuyaux en fonte. Avec des eaux peu minéralisées, les conduites recevaient un enduit interne au brai de houille.



2.1.8 Tuyaux en matière plastique

Ce sont, à l'aube du XXI^e siècle, les tuyaux qui dominent le marché du petit et moyen diamètres en raison de leur faible rugosité, de leur inertie, des facilités de pose adaptées à chaque type et d'un coût global (produit + pose) généralement intéressant. On distingue :

- les poly(chlorure de vinyle) (PVC), rigides ;
- les polyéthylènes (PE), plus ou moins souples ;
- les tuyaux composites, rigides, assez peu utilisés ;

— les autres matériaux plastiques (ABS, polypropylènes, etc.), utilisés surtout dans les installations privées industrielles nécessitant des caractéristiques spéciales.

2.1.8.1 Poly(chlorure de vinyle)

Si les diamètres prévus vont de 20 à 800 mm, on utilise surtout le PVC entre 50 et 400 mm. Les petits diamètres sont souvent l'apanage du PE. Il existe plusieurs séries de pressions nominales : 6, 10, 16, et 25 bar. Les réseaux d'eau font le plus souvent appel aux séries 10 et 16 bar. Le PVC résiste bien à la corrosion et il présente



Figure 18 – Raccord à joint élastomère (d'après document Seperef)

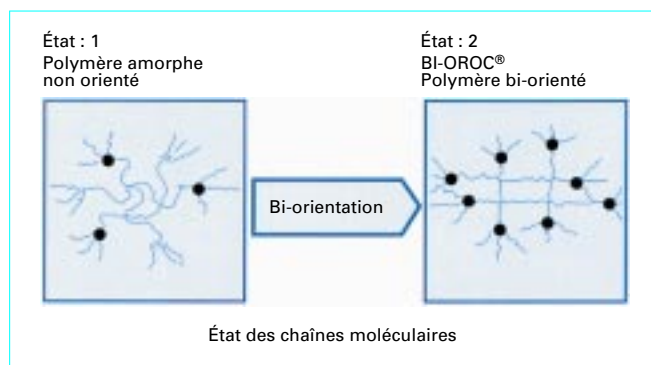


Figure 19 – Polymérisation du poly(chlorure de vinyle)

une forte inertie électrique. Sa tenue mécanique sous chaussées en ville et sa longévité dans le temps se sont avérées très satisfaisantes. Les tuyaux sont de type à bout lisse et emboîtement avec joints en élastomère (figure 18) ; leur longueur normale est de 6 m.

Le PVC traditionnel est de type non plastifié, et il est le résultat d'une polymérisation amorphe non orientée.

Les nouveaux PVC font appel à des polymérisations orientées, améliorant les qualités de résistance et de fiabilité. On utilise principalement l'orientation biaxiale qui produit des polymères dits bi-orientés (figure 19).

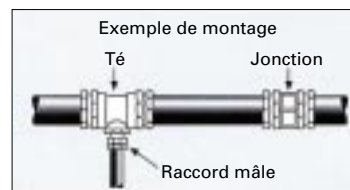
Il existe aussi des PVC-C, c'est-à-dire « surchlorés », qui tendent notamment à supplanter l'acier inoxydable dans les installations d'ozone (certaines études mettant en avant une possible porosité de l'acier inoxydable à l'ozone dans le temps).

Nota : certains fabricants intègrent dans l'âme des tubes de la « matière première secondaire » provenant de bouteilles en PVC ainsi recyclées.

2.1.8.2 Polyéthylène

Le polyéthylène est un polymère thermoplastique, non cassant, plus ou moins souple, résistant aux chocs, et fortement inerte chimiquement. Pour les tuyaux d'eau potable, on ne doit faire appel qu'à du polyéthylène pur (non recyclé), avec 2 % environ de noir de carbone et moins de 1 % d'adjuvant. Le stockage doit se faire au sec, à température inférieure à 60 °C et à l'abri des rayons ultraviolets. On trouve des tuyaux en PE 100 (haute densité, appelé PEHD), en PE 80 (moyenne densité, appelé PEMD) et en PE 32 (basse densité, appelé PEBD). On trouve également des PE 63 et PE 40, ainsi que du PEBDL (basse densité linéaire) alliant la flexibilité du PEBD aux performances du PEMD.

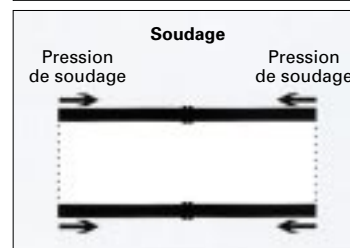
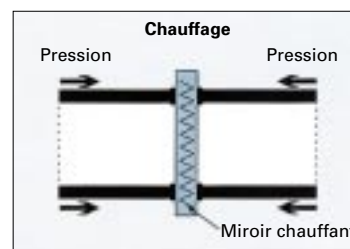
Les PE existent couramment dans les diamètres allant du Ø 20 mm au Ø 63 mm pour les branchements, en couronnes ou en longueurs droites, en PN 10 ou PN 16 (PN : pression nominale) ; les raccords se font par joints mécaniques ou par électrosou-



a) raccords mécaniques pour PE



b) Électrosoudage sur PE



c) soudage bout à bout (dit "au miroir") sur PE

Figure 20 – Raccordements des tuyaux en polyéthylène

dage (figure 20). De Ø 75 mm à Ø 500 mm, on trouve des PN 10, 12,5 et 16 conditionnés en tourets (figure 21) ou en longueurs droites pour les plus gros diamètres ; les raccords se font par électrosoudage ou par soudage bout à bout (appelé soudage « au miroir ») (figure 20). On peut même aller jusqu'au Ø 800 mm.

Les tuyaux en PE ont une bonne flexibilité puisqu'on les trouve en couronnes ou en tourets jusqu'au Ø 160 mm. Ils s'adaptent donc bien au terrain et, en raison d'une part, du faible nombre de

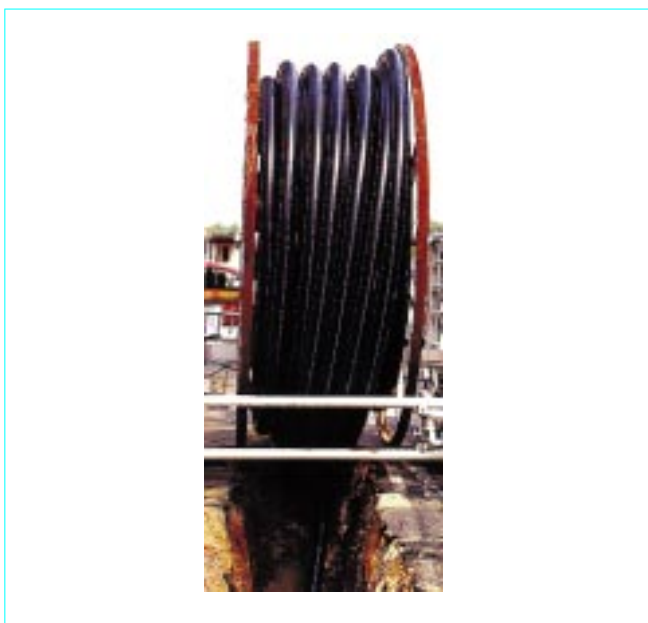


Figure 21 – Touret de polyéthylène Ø 110 mm

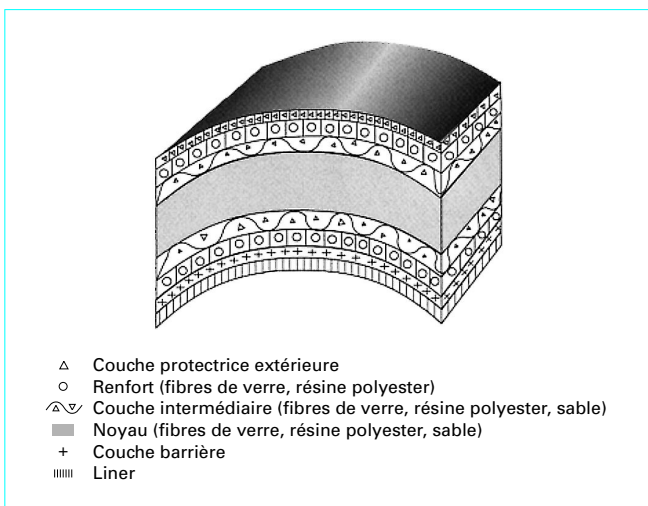


Figure 22 – Constitution d'un tuyau PRV (d'après document Hobas)

raccordements au kilomètre et, d'autre part, de raccordements sans surépaisseur, ils se prêtent particulièrement aux nouvelles contraintes de pose sans tranchée ouverte. Ceci améliore également l'étanchéité du réseau. La conduite étant autobutée, on supprime quasiment tout massif de butée. L'inertie chimique du tuyau évite les dissolutions ou abrasions de métaux même si l'eau n'est pas parfaitement équilibrée.

2.1.8.3 Tuyaux composites

On trouve encore dans les réseaux des tuyaux composés d'une âme de PVC et d'une frette en fil de verre imprégné de résine polyester, ajoutant aux qualités du PVC une très grande résistance mécanique.

Actuellement, on fabrique par centrifugation des tuyaux en PRV (polyester renforcé verre), composés de résine de polyester thermodurcissable, de fibre de verre et de sable. Ces tuyaux multicouches (figure 22) comportent également des couches protectrices extérieures et intérieures. L'assemblage se fait en principe par manchons. De faible masse, ces tuyaux ont un faible coefficient de dilatation ; ils présentent une bonne résistance au gel, aux températures élevées et aux ultraviolets. Leur prix ne les rend pas toujours compétitifs.

2.1.8.4 Autres matériaux plastiques

On trouve d'autres types de tuyaux de la famille des thermoplastiques parmi les canalisations reconnues « alimentaires », possédant des caractéristiques spécifiques qui les font plus utiliser dans les usines de production d'eau et pour des installations industrielles non enterrées que dans des réseaux d'eau potable enterrés classiques. Citons :

- les polypropylènes nervurés, résistant aux chocs et à des températures comprises entre -20 °C et $+90\text{ °C}$;
- les ABS (acrylonitrile butadiène styrène) gris, existant en PN 16, à joints collés, classés antichoc et résistant à une gamme de températures entre -40 et $+80\text{ °C}$.

2.2 Robinetterie et équipements divers

2.2.1 Robinets vannes

On distingue les robinets vannes à coin (à opercule) (figure 23) et les vannes papillon (figure 24). Les robinets vannes à opercule sont des appareils de sectionnement qui doivent être complètement ouverts ou fermés. Leur encombrement est considérable comparé à celui des vannes papillon.

De surcroît, à partir d'un certain diamètre, il convient d'installer des by-pass pour équilibrer les pressions qui s'exercent des deux côtés du coin quand on veut le manœuvrer à partir de la position fermée. Le corps du robinet vanne est en fonte, la vis et son écrou.

Les vannes papillon peuvent aussi bien servir pour le sectionnement que pour le réglage des débits. Ils sont d'un encombrement réduit, légers, le couple de manœuvre est faible.

À partir d'un certain diamètre (200 à 300 mm) les robinets vannes des deux types sont généralement motorisés.

2.2.2 Clapets de retenue

Ils sont destinés à empêcher la circulation en retour (figure 25). Leur emploi est général dans les stations de pompage où ils sont souvent disposés à la sortie même des pompes, entre celles-ci et les robinets de sectionnement. On en trouve également sur les canalisations de distribution.

2.2.3 Poteaux d'incendie

Leur diamètre est normalisé à 100 ou 125 mm. Ils doivent être alimentés par des conduites de même diamètre qui doivent assurer un débit minimal de 17 L/s sous 1 bar ; la disposition du réseau (réserve d'incendie) doit permettre aux pompiers de disposer de 120 m^3 (§ 3.1.1).

Quand ils ne sont pas en service, les poteaux d'incendie (figure 26) sont mis hors gel par vidange de leur corps, commandée par la fermeture de leur vanne. Ils peuvent, dans certains cas, prendre la forme d'une bouche d'incendie et/ou de lavage (figure 27).

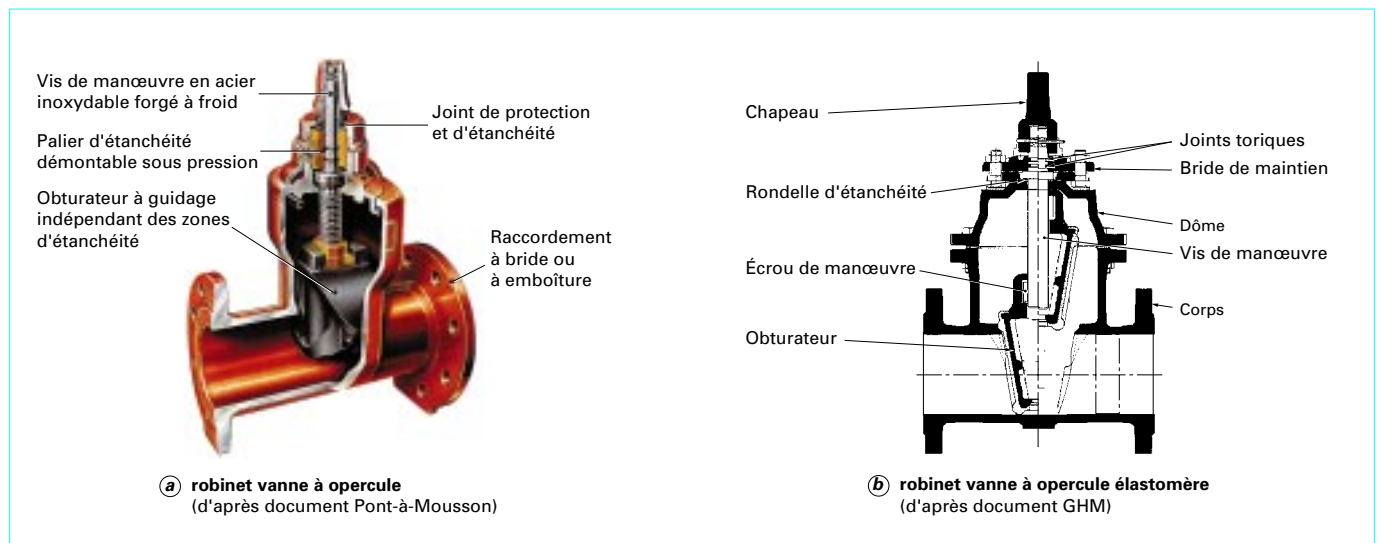


Figure 23 – Robinets vannes à opercule



Figure 24 – Robinets vannes papillon (d'après document Pont-à-Mousson)

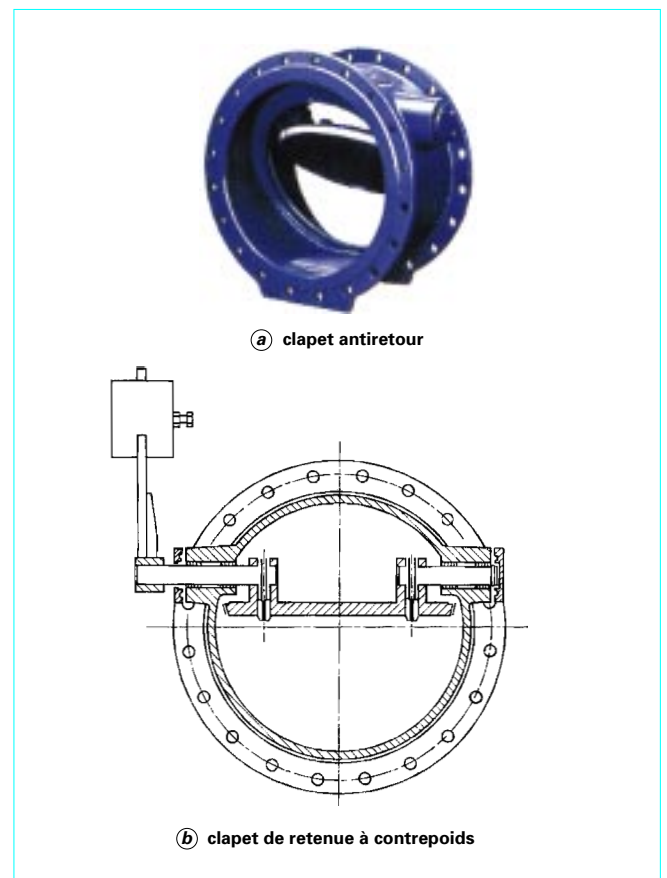


Figure 25 – Clapets de retenue (d'après document Pont-à-Mousson)



Leur diamètre est normalisé à 100 ou 125 mm. Ils doivent être alimentés par des conduites de même diamètre qui doivent assurer un débit minimal de 17 L/s sous 1 bar; la disposition du réseau (réserve d'incendie) doit permettre aux pompiers de disposer de 120 m³ (§ 3.1.1).

Quand ils ne sont pas en service, les poteaux d'incendie sont mis hors gel par vidange de leur corps, commandée par la fermeture de leur vanne. Ils peuvent, dans certains cas, prendre la forme d'une bouche d'incendie et de lavage.

Figure 26 – Poteau d'incendie (d'après document Pont-à-Mousson)

2.2.4 Régulateurs

Un réseau se porte bien lorsque les débits et les pressions varient dans des fourchettes raisonnables. Il en va de même pour les installations privées des particuliers et de l'industrie. On a donc imaginé et mis en place divers types de régulateurs, de stabilisateurs, de déchargeurs et de limiteurs. On peut, à partir d'une base commune du type de celle de la figure 28, obtenir ces différentes fonctions en adjoignant le ou les accessoires adéquats.

a) Réducteur-stabilisateur de pression aval, mainteneur-déchargeur de pression amont, stabilisateur amont et aval : ces appareils fonctionnent sur le principe de pilotes à ressort taré permettant les réglages par gammes de pression de 0,1 à 21 bar.

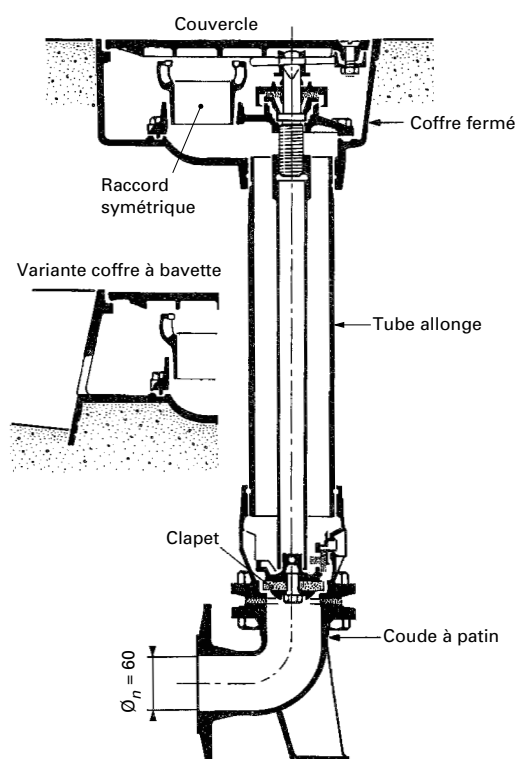
b) Limiteur de débit : le réglage s'effectue par un diaphragme en fonction de la vitesse d'écoulement.

c) Robinets de réservoir :

- contrôleur de niveau haut et bas du flotteur (tranche de 0,5 à 2 m de hauteur d'eau) ;
- contrôleur de niveau constant à flotteur (plage < 10 cm) ;
- contrôleur de niveau altimétrique (placé en pied de réservoir).



a) bouche d'incendie
(d'après document Pont à Mousson)



b) bouche d'incendie et de lavage

Figure 27 – Bouches d'incendie et/ou de lavage

d) Vanne de sécurité à fermeture déclenchée par survitesse : un pilote à pression différentielle déclenche la fermeture à progressivité réglable, et permet la remise en route automatique après déverrouillage.

e) Vanne à ouverture réglable commandée par impulsions électriques : des électrovannes de commande permettent de régler un débit ou une pression par ouverture ou fermeture pas à pas. En stations de pompage, cet équipement permet de démarrer ou d'arrêter les pompes vanne fermée.

Il existe également des **déchargeurs de pression-stabilisateurs de pression amont** pour réseaux d'incendie.

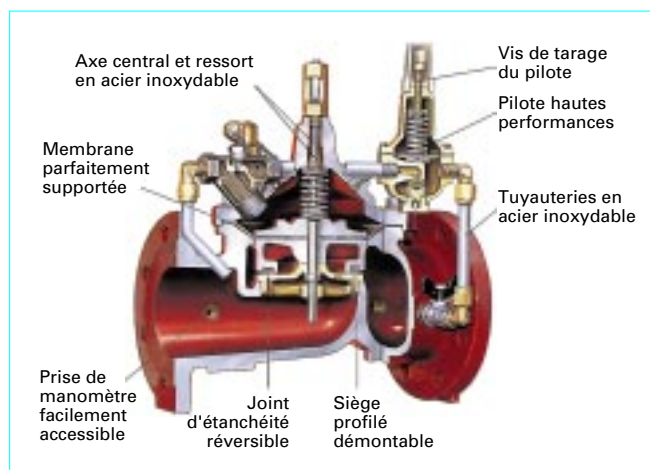


Figure 28 – Appareil de régulation modulaire
(d'après document Pont-à-Mousson)

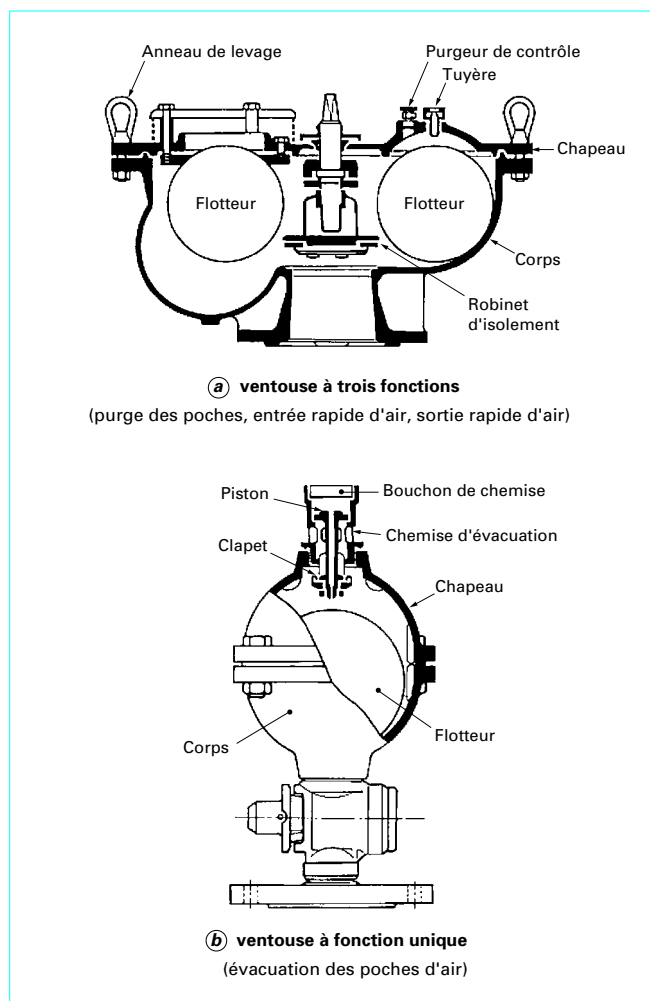


Figure 29 – Ventouses (d'après document Pont-à-Mousson)

2.2.5 Ventouses

Une accumulation d'air peut se faire aux points hauts d'une conduite. La poche d'air provoque des perturbations qu'il s'agit d'éviter : diminution de la section, arrêt complet des débits, diminution de la pression, coups de bélier.

L'évacuation de l'air se fait par l'intermédiaire d'une ventouse qui peut être manuelle ou automatique (figure 29).

Une ventouse manuelle est un simple robinet que l'on manœuvre périodiquement.

Les ventouses automatiques sont des pièces évacuant l'air dès qu'il se forme une poche notable.

Toutes ces ventouses sont disposées dans des regards visitables et leur bon fonctionnement doit être vérifié périodiquement.

Ces ventouses automatiques, en dehors de la suppression des poches d'air en fonctionnement normal, permettent également l'évacuation de l'air lors de la mise en eau de la canalisation et, réciproquement, l'admission de l'air lors de la vidange provoquée de la canalisation, ce qui permet d'éviter la mise en dépression de cette dernière.

2.3 Pose des conduites

2.3.1 Pose classique

Les conduites se posent généralement en terre, dans une fouille dont le fond a été réglé et nivelé conformément au profil en long définitif de la conduite. Ce fond est garni d'un lit de sable de 15 à 20 cm d'épaisseur au minimum, destiné à constituer un matelas élastique au-dessous du tuyau.

Ce dernier est descendu à sa place définitive par des moyens appropriés (chariots porte-tuyaux pour les gros diamètres), et assemblé avec les tuyaux voisins.

La fouille est ensuite remblayée en ayant soin, s'il s'agit de tuyaux en tôle d'acier ou de tuyaux en fonte, de prendre toutes dispositions utiles pour que la paroi du tuyau ne soit pas en contact direct avec de gros cailloux ou de gros fragments de roche dure.

À la traversée des points particuliers (cours d'eau, lignes de chemin de fer, routes, croupes surélevées, etc.), on se trouve parfois dans l'obligation d'employer des dispositions spéciales : ponceaux, ponts, aqueducs, arcades, souterrains, tunnels, etc.

Quand il s'agit de grands diamètres, le profil en long doit être tel qu'il ne puisse se former des poches d'air au moment du remplissage. Ces dernières sont, en effet, dangereuses par leur élasticité au moment des suppressions. Il faut donc faciliter la collecte de l'air en des points hauts naturels ou artificiellement créés, de façon à permettre son évacuation aisée par des ventouses automatiques ou non. En pays plat, pour des vitesses de l'ordre de 1 m/s, la pente d'une grosse conduite doit être de l'ordre de 1/1 000 quand la conduite est ascendante dans le sens de l'écoulement de l'eau, et de 1/500 dans le cas contraire.

Ces valeurs doivent être considérées comme des minimums, pour assurer une évacuation correcte de l'air contenu dans les conduites.

La purge de ce fluide sera d'ailleurs facilitée par une étude préalable et soignée du profil en long des conduites.

C'est ainsi que l'on doit s'efforcer de réaliser qu'une montée lente de la conduite soit suivie par une descente rapide, une ventouse, ou un purgeur automatique de dimensions convenables, étant placé au point haut séparant ces pentes de sens contraires. Les tronçons horizontaux de conduite doivent être rigoureusement évités.

Il va de soi que toutes les dispositions appropriées doivent être prises pour éviter la pénétration ou le dégagement de l'air dans la conduite, soit à la prise d'eau éventuellement, soit le long de son tracé, dans les parties à très faible pression.

L'air est un élément indésirable qui a été la cause de nombreux éclatements sur des conduites de petits et gros diamètres, particulièrement lorsqu'il s'agissait d'un matériau relativement fragile, comme l'ancienne fonte grise.

Quand il s'agit d'une conduite posée en terre, le terrain qui la recouvre et l'entoure ne tarde pas à prendre sa cohésion initiale et à produire un véritable blocage de la conduite, suffisant pour assurer une stabilisation définitive de cette dernière. Toutefois, dans le cas où le terrain ne présente pas de garanties de résistance suffisantes, ou lorsque la conduite doit être posée à l'air libre, on est parfois dans l'obligation de stabiliser cette dernière par des dispositions appropriées.

C'est ainsi que, dans ses parties inclinées, la conduite est parfois amarrée à des massifs de maçonnerie très solidement implantés dans le terrain. Les amarrages sont constitués par des pièces en acier forgé qui enserrant la conduite et sont scellés dans les massifs préalablement construits.

De même, dans les coudes, il s'exerce sous l'effet de la pression des efforts dont la résultante tend à produire le déboîtement des joints et, par conséquent, la dislocation de la conduite. C'est ainsi que, pour un coude d'angle au centre α et de diamètre D (m), soumis à une pression mesurée par une hauteur d'eau H (m), la valeur de la poussée Q (N) due à l'eau a pour expression :

$$Q = 9\,810 \, H \frac{\pi D^2}{2} \sin \frac{\alpha}{2}$$

(en négligeant les effets de la force centrifuge). Cette poussée est située dans le plan du coude, et dirigée extérieurement suivant son axe. Aussi, ces coudes doivent-ils être butés par des massifs de maçonnerie plus ou moins importants, dont les dimensions sont calculées en fonction des éléments à prendre en compte (pression à l'intérieur de la conduite, rayon de cette dernière et angle du coude).

Dans certains cas, s'il n'est pas possible de buter le coude, on amarré ce dernier, dans les conditions sus-indiquées, à un massif de maçonnerie (mur de galerie, par exemple) construit à l'intérieur du coude et épousant la forme de celui-ci. Les calculs auxquels donne lieu l'établissement des butées, massifs et amarrages divers deviennent moins simples si l'on tient compte de la poussée des terres. On en trouvera le principe dans l'article *Ouvrages de soutènement. Poussée et butée* de ce traité.

Il y a lieu de tenir compte, le cas échéant, des *coups de bélier* auxquels la conduite peut être soumise.

La protection contre le gel est obtenue par l'observation d'une profondeur de pose minimale :

- de 1 m au-dessus de la génératrice supérieure dans les régions tempérées ;
- de 1,25 à 1,50 m dans les régions à climat rigoureux.

Aux points où un charroi lourd est possible, des dispositions particulières de sauvegarde sont à prévoir.

2.3.2 Pose sans ouverture de tranchée

Initialement mise en œuvre pour des franchissements d'obstacles délicats (voie de chemin de fer, chaussée à forte circulation, cours d'eau, etc.), les techniques de pose sans ouverture de tranchée sont de plus en plus répandues, en milieu urbain notamment, de plus en plus précises et adaptées à des diamètres allant du \varnothing 20 mm en branchements au \varnothing 2 500 mm et plus. Parmi leurs avantages, il faut relever une moindre gêne pour les riverains des chantiers, une sécurité accrue pour le personnel et pour les autres réseaux ou équipements enterrés, parfois une réduction des coûts. L'usage différencie les techniques de fonçage pour les \varnothing 800 mm et plus, et les techniques de forages pour les diamètres inférieurs.

2.3.2.1 Fonçage

Les fonçages sont généralement rectilignes et le plus souvent horizontaux, mais quelquefois en légère courbe et en faible pente.

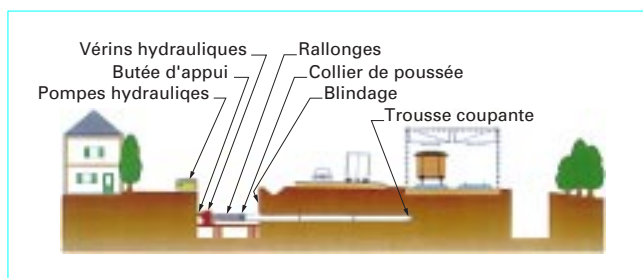


Figure 30 – Fonçage horizontal

La méthode consiste à pousser, à l'aide de vérins (de 300 t de poussée chacun), un fourreau perforant, en prenant appui sur un ancrage transversal (généralement celui du bâti porte-fourreau) (figure 30).

Simultanément, un outil désagrège le terrain devant et à l'intérieur du fourreau ; les déblais sont transportés vers l'arrière de ce dernier. L'évacuation des déblais, suivant les appareils et le diamètre, se fait par voie mécanique, hydraulique ou manuelle. Lorsque la conduite à mettre en place présente des caractéristiques mécaniques suffisantes, elle peut être utilisée directement en lieu et place du fourreau ; on dispose à son extrémité une tresse coupante. Pour des longueurs importantes, la résistance au frottement devient trop grande et l'on exécute le forage par sections, en utilisant des stations intermédiaires et une lubrification de la circonférence extérieure du tuyau foncé au moyen d'une suspension de bentonite. La station intermédiaire est constituée d'un anneau fixe et d'un anneau de poussée ; entre les deux sont disposés des vérins hydrauliques.

2.3.2.2 Forages

Il existe plusieurs techniques de pose par forage.

2.3.2.2.1 Forage horizontal par poussée

La technique utilisée est sensiblement identique à celle du fonçage (§ 2.3.2.1) ; elle est appliquée aux diamètres inférieurs à 800 mm pour lesquels on ne peut accéder au front de taille. On utilise une tarière avec tête équipée de lames ou de dents en carbure de tungstène, ou marteau fond de trou ; l'évacuation des terres se fait simultanément à l'avancement par vis hélicoïdale.

2.3.2.2.2 Forage par compactage

Ce procédé, maintenant très répandu, est mis en œuvre notamment pour la réalisation des branchements de petits diamètres. Il s'agit d'un forage par compactage du terrain, réalisé par l'intermédiaire d'un fonceur pneumatique qui crée le passage. La direction d'envoi de la fusée est réalisée au démarrage, à l'aide d'une lunette de visée placée dans la fouille de départ, et d'un jalon gradué placé dans la fouille d'arrivée. À l'issue du fonçage, un tube en polyéthylène est introduit soit directement dans le passage réalisé par la fusée, soit lorsque le terrain est bouillant, à l'intérieur d'un fourreau tracté à la suite de la tête du fonceur.

Si l'on veut conserver une bonne précision quant à la cote d'arrivée, il convient de limiter les tronçons à une longueur de 10 m, qui peut atteindre 40 m, en utilisant une sonde de positionnement qui permet de connaître le cheminement de la fusée.

2.3.2.2.3 Forage dirigé

Le développement des canalisations autobutées souples ou supportant des écarts angulaires aux joints, la diminution du nombre des raccords (pour les PE) – raccords sans surépaisseur – ou des techniques de fonte adaptées avec faible surépaisseur, aux joints

automatiques de maniement pratique, ont permis la généralisation de pose par forage dirigé.

La pose d'une canalisation par forage dirigé est réalisée en deux étapes. Dans un premier temps, une tête de forage munie de buses d'injection de bentonite, et actionnée par un train de tiges, réalise un premier tracé de faible diamètre (50 mm), par rotation et jets à haute pression de bentonite. C'est une sonde, associée à un récepteur d'ondes, placée sur la tête de forage qui permet de connaître sa position exacte et donc de diriger le forage. Lorsque la tête de forage atteint la fouille d'arrivée, elle est remplacée par une tête d'alésage dont le diamètre dépend de la conduite à installer, et qui réalise en retour le passage définitif, tout en tractant la conduite en polyéthylène ou en fonte adaptée au forage (figure 31).

Le contrôle en 3 D de la position de tête de forage est effectué depuis la surface par un géoradar tenu manuellement par un opérateur.

On peut également utiliser une tête en biseau qui tourne pour effectuer les corrections de tir.

2.4 Protection des conduites

Qu'elles soient posées en terre, ce qui est le cas général, ou en galeries, les conduites d'adduction gravitaire ou par refoulement, aussi bien que celles de distribution d'ailleurs, sont menacées de dégradation ou de destruction par des causes diverses naturelles ou artificielles.

Leur bonne conservation dépend, en premier lieu, de la qualité du matériau dont elles sont constituées et surtout de son adaptation aux caractéristiques physico-chimiques des terrains dans lesquels elles sont posées. Ceci est vrai pour les différentes natures de matériaux, mais principalement pour les conduites métalliques : fer, fonte, acier, etc., ainsi que pour celles, telles que les conduites en béton armé, dans la constitution desquelles il entre des matériaux ferreux.

Par exemple, les conduites en acier reçoivent un goudronnage intérieur et extérieur. La protection extérieure des conduites placées en terre est complétée actuellement par un revêtement formé d'un complexe de produits bitumineux et de soie de verre imprégnée.

Les conduites peuvent aussi être soumises fonctionnellement à des surpressions accidentelles auxquelles elles doivent résister soit intrinsèquement par leur résistance propre, soit par des moyens de protection appropriés. Ci-après sont données des indications générales sur :

- la protection cathodique des canalisations ;
- la protection des conduites de refoulement ou autres contre les surpressions.

Il est bien précisé que ces indications sont valables pour toutes les conduites, celles de distribution comprises.

2.4.1 Protection cathodique des canalisations

La corrosion extérieure des conduites métalliques enterrées est généralement la conséquence d'un processus électrochimique, le sol jouant le rôle d'un électrolyte, particulièrement quand il est humide (cf. article [M 150] *Corrosion en milieu aqueux des métaux et alliages* dans le traité Matériaux métalliques).

On peut distinguer l'autocorrosion et la corrosion électrolytique.

2.4.1.1 Autocorrosion

On lui rattache les corrosions spontanées telles que :

- la *cytolys* ou corrosion électrochimique localisée, limitée à la surface du métal par l'étendue du terrain agressif, et due au mauvais isolement de la conduite ;

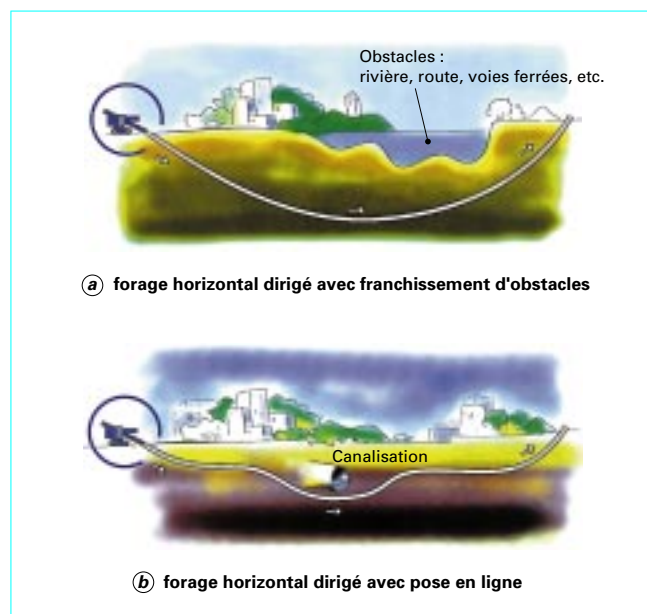


Figure 31 - Forage horizontal dirigé (d'après document Sade)

— la *géolyse* ou corrosion électrochimique étendue, due à la formation d'une pile géologique par la mise en contact du métal avec deux zones de terrains différentes.

2.4.1.2 Corrosion électrolytique

Ensemble des corrosions dues à des effets électriques extérieurs, désignés souvent sous le nom de *courants vagabonds*, particulièrement nombreux dans les régions industrielles (nombreuses terres) et à proximité de lignes de tramways et de chemins de fer électriques.

Les effets de ces corrosions peuvent être désastreux.

2.4.1.3 Protection

On doit protéger les canalisations menacées par l'un ou l'autre des deux procédés suivants, qui peuvent d'ailleurs être employés simultanément.

a) **Isolement du métal de l'électrolyte** par emploi d'un revêtement isolant efficace : convient particulièrement en terrain très sec et de très forte résistivité.

b) **Protection cathodique de la conduite** : elle consiste à rendre le métal constituant cette dernière *passif* ou autrement dit *cathodique* par rapport à une anode naturelle (rail électrifié, par exemple) ou artificielle (blocs de magnésium, déversoir). Cette méthode implique l'utilisation d'une source de courant auxiliaire, d'origine galvanique (anodes réactives de magnésium) ou d'origine industrielle (protection électrique).

Bien que le principe de la protection cathodique soit connu depuis longtemps déjà (fin du XIX^e siècle) et qu'elle était utilisée aux États-Unis à une assez grande échelle avant 1940, elle n'est vraiment entrée dans le domaine pratique, en France, que depuis 1953 à peine. Elle a permis d'obtenir d'heureux résultats dans la protection des réseaux constitués par des conduites en acier. Elle apporte, pour ce matériau, une sécurité supplémentaire.

La mise en œuvre de cette protection implique l'intervention de spécialistes.

2.4.2 Protection des conduites de refoulement contre les surpressions et les coups de bélier

Dans les installations de moyenne importance, l'appareil le plus simple et le plus sûr est le réservoir à air, muni ou non d'un diaphragme, placé dans les conditions de la figure 32.

Quand la conduite de longueur L et de section constante S est à caractéristique unique (caractères hydrauliques et mécaniques identiques sur toute sa longueur), le volume d'air W_0 nécessaire est donné par la formule simple :

$$W_0 = W \left(\frac{V_0^2}{2g} \frac{1}{Z_0} \right) F \left(\frac{Z}{Z_0} \right)$$

avec $W = SL$ volume de la conduite à protéger,
 $Z_0 = y_0 + y_a$ pression absolue au refoulement, exprimée en mètres d'eau,
 $F(Z/Z_0) = 1/f(Z/Z_0)$,
 $f(Z/Z_0) = (Z_0/Z) - \ln(Z_0/Z) - 1$
 $Z = Z_{max}$ pression absolue à ne pas dépasser, exprimée en mètres d'eau,
 où $Z = Z_{min}$ pression absolue minimale au-dessous de laquelle on ne veut pas descendre.

M. Sliosberg a donné les valeurs de $f(Z/Z_0)$.

Pour l'application de cette formule, A. Vibert pose :

$$W_0/W = \tau \quad \text{et} \quad \frac{V_0^2}{2g} \frac{1}{Z_0} = \zeta$$

il vient alors : $\tau = \zeta F(Z/Z_0)$.

Cette expression donne le volume d'air nécessaire par unité de volume de la conduite et se prête à une interprétation graphique très intéressante (figure 33).

Connaissant W_0 , on déduit W_{0max} et W_{0min} des relations :

$$W_{0max} = W_0 (Z_0/Z_{min}) \quad \text{et} \quad W_{0min} = W_0 (Z_0/Z_{max}).$$

L'abaque (figure 33) permet la détermination graphique de τ en partant des valeurs de ζ , Z_{min}/Z_0 ou Z_{max}/Z_0 .

Exemple : soit une conduite en fonte ayant les caractéristiques suivantes :

— longueur	$L = 1\,370$ m
— diamètre	$D = 0,10$ m
— aire de la section	$S = 0,00785$ m ²
— volume	$W = 10,75$ m ³
— débit	$Q = 0,00883$ m ³ /s
— vitesse de régime	$V_0 = 1,125$ m/s
— hauteur géométrique de refoulement	$y_0 = 100$ m

Le profil de la conduite est régulièrement ascendant.

Le coup de bélier maximal, en cas d'arrêt instantané de l'électropompe, peut théoriquement atteindre aV_0/g , soit environ 138 m, a étant la célérité des ébranlements infiniment petits dans la conduite (ici 1 200 m/s).

La pression effective maximale susceptible de s'établir dans la conduite à la sortie de la pompe, au moment du retour de l'onde de surpression, ressort théoriquement à :

$$100 + 138 = 238 \text{ m, soit près de 24 bar !}$$

Mais il ne faut pas oublier la dépression maximale possible qui serait de :

$$110 - 138 = -28 \text{ m}$$

soit environ -3 bar ! puisque le coup de bélier est un phénomène ondulatoire.

Cette conduite relève donc d'une protection. On impose une pression maximale effective à ne pas dépasser, égale à 12 bar par exemple, soit 120 m.

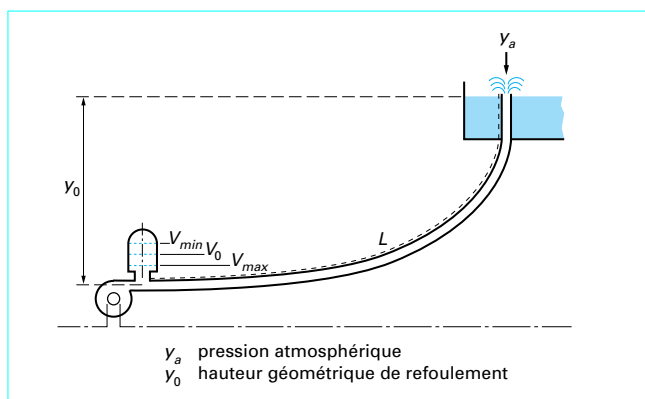


Figure 32 – Emplacement d'un réservoir antibélier

Le calcul du réservoir s'effectue comme suit :

$$\begin{aligned} Z_0 &= 100 + 10 = 110 \text{ m} \\ Z_{max} &= 120 + 10 = 130 \text{ m} \\ Z_{max}/Z_0 &= 130/110 = 1,18 \\ V_0^2/2g &= 1,125^2/19,60 = 0,0648 \\ \zeta &= 0,0648/110 = 0,000589 \end{aligned}$$

Il en résulte, d'après l'abaque de la figure 33 :

$$\tau = 0,043 \quad \text{et} \quad Z_{min}/Z_0 = 0,85$$

Par suite :

$$W_0 = W\tau = 10,75 \times 0,043 = 0,46 \text{ m}^3$$

et :

$$W_{0max} = 0,46/0,85 \approx 0,54 \text{ m}^3$$

Il existe des appareils mécaniques tels que : ventouses, clapets automatiques, etc., temporisés ou non ; ils doivent faire l'objet d'un entretien sérieux et de vérifications fréquentes pour donner une grande sécurité de fonctionnement.

2.5 Rénovation des conduites

La valeur totale des conduites d'une distribution d'eau représente près de 80 % des investissements totaux. La durée de vie de l'enveloppe proprement dite d'une conduite peut atteindre ou dépasser le siècle. Un réseau vieillit surtout par la détérioration des parois internes par corrosion ou incrustations (ces dernières pouvant être elles-mêmes la conséquence de phénomènes de corrosion). La rénovation d'une conduite, par ailleurs saine dans sa structure profonde, consiste à la nettoyer et à la revêtir intérieurement, le nettoyage étant en lui-même une rénovation partielle.

2.5.1 Nettoyage classique

Le nettoyage se fait généralement par un grattage mécanique, le grattoir étant soit tiré mécaniquement par câble, soit poussé hydrauliquement ; cette dernière méthode a l'avantage d'empêcher l'accumulation, au sein de la conduite, des déchets résultant du grattage.

Dans certains cas, relativement rares, on utilise une attaque par un acide passivé, avec circuit fermé de circulation, ou encore des nettoyages par jets hydrauliques à très haute pression.

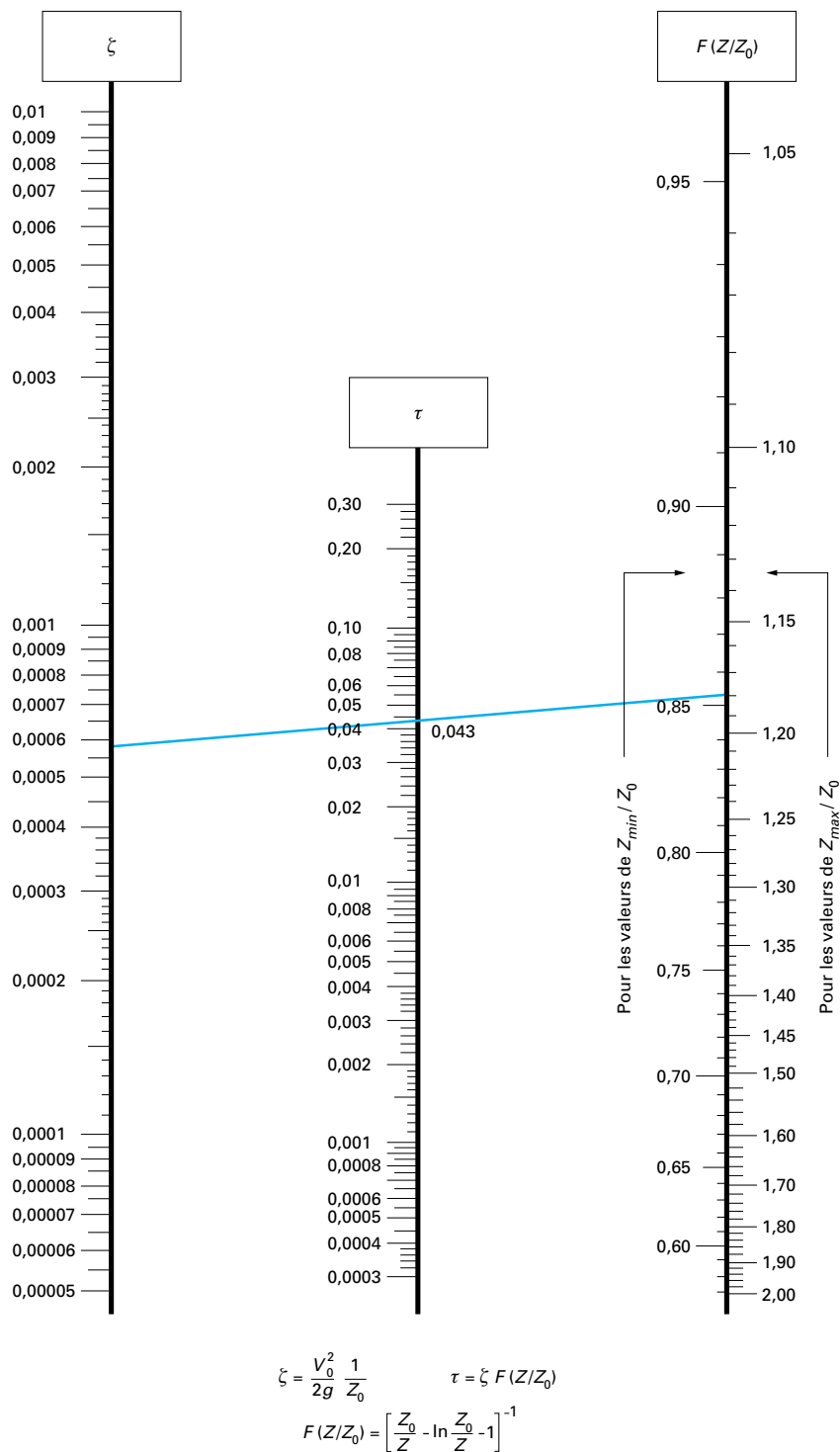


Figure 33 – Abaque de Vibert pour le calcul des cloches à air de protection contre les coups de béliet

Les revêtements posés après nettoyage, qui protègent les parois internes contre des attaques ou incrustations ultérieures et qui améliorent le coefficient de frottement, sont constitués :

- de bitume, projeté par des bras rotatifs ; on l'utilise avec des conduites de diamètres 75 à 250 mm ;
- de mortier de ciment projeté par un applicateur centrifuge ; on l'utilise pour des conduites de 75 à 3 600 mm ; après application, on procède à un lissage de la paroi au moyen d'une truelle conique ou, pour les grands diamètres, avec un appareil à truelles multiples.

2.5.2 Rénovations modernes

Il s'agit de techniques sans tranchée.

2.5.2.1 Chemisages

Le principe est l'introduction d'une gaine souple, ou d'une canalisation PE préformée, dans une conduite existante.

La **gaine souple imprégnée de résine** est introduite et tractée par un treuil depuis la surface. Puis, on gonfle cette gaine sous basse pression d'air pour la plaquer sur la canalisation existante. Enfin, on chauffe à 70 °C environ pour obtenir, sans espace annulaire, un tube rigide par polymérisation de la résine. Cette technique utilise des gaines de 60 à 150 m selon les diamètres, et les sections couramment traitées sont comprises entre 150 et 1 500 mm. Les reprises de branchements peuvent se faire de l'intérieur par découpe au robot (figure 34).

Le **tube en PEHD préformé** est enfilé et se plaque dans la conduite à rénover (figure 35). Le procédé consiste à réduire le diamètre du PEHD de 7 à 15 % par passage dans une filière conique à froid ($\varnothing < 250$ mm) ou à chaud à 80 °C. Puis, on introduit par tirage, avec effort de traction constant, le polyéthylène dans la canalisation existante pour maintenir cette réduction avec un allongement de 4 % environ. Enfin, on relâche la conduite PEHD qui reprend son diamètre initial en moins de 24 h en se plaquant sur la paroi de l'ancienne canalisation. Ce procédé est employé pour des diamètres de 125 à 800 mm et des tronçons pouvant aller jusqu'à 500 m.

2.5.2.2 Gainages

Une gaine, constituée d'une structure centrale en tissu polyester, d'un film intérieur en polyéthylène, et d'un film extérieur en polyester, est introduite dans la canalisation, pliée en U par un film en polyamide, et treuillée de l'extérieur. Après mise en pression, le film polyamide éclate et la gaine est en place (figure 36). La gaine n'est pas structurante vis-à-vis des charges extérieures.

2.5.2.3 Remplacements *in situ*

Les divers procédés consistent à introduire dans la conduite à remplacer (fonte) un engin appelé « éclateur » muni de vérins hydrauliques et tracté depuis la surface par une chaîne. Au fur et à mesure de l'avancement de l'éclateur, on engage la conduite de remplacement, en général du PEHD en tuyaux courts assemblés entre eux par double joint, ou du tube continu en grandes longueurs éventuellement présoudées (figure 37).

2.5.2.4 Remplacement des branchements en plomb

Le branchement est rendu accessible à ses deux extrémités, au droit du compteur du client et au niveau du raccordement sur la conduite principale. Un câble, muni d'une olive élargisseuse de calibrage et de cônes excentrés, est introduit dans la canalisation en plomb. Le câble est ensuite tiré par un treuil. Lors de la mise en tension du câble, les cônes se bloquent en plusieurs points répartis sur la paroi du tuyau en plomb, ce qui permet d'arracher le tuyau sans rupture (figure 38). Un tuyau PE, fixé à l'extrémité du tuyau en plomb, se substitue à celui-ci.

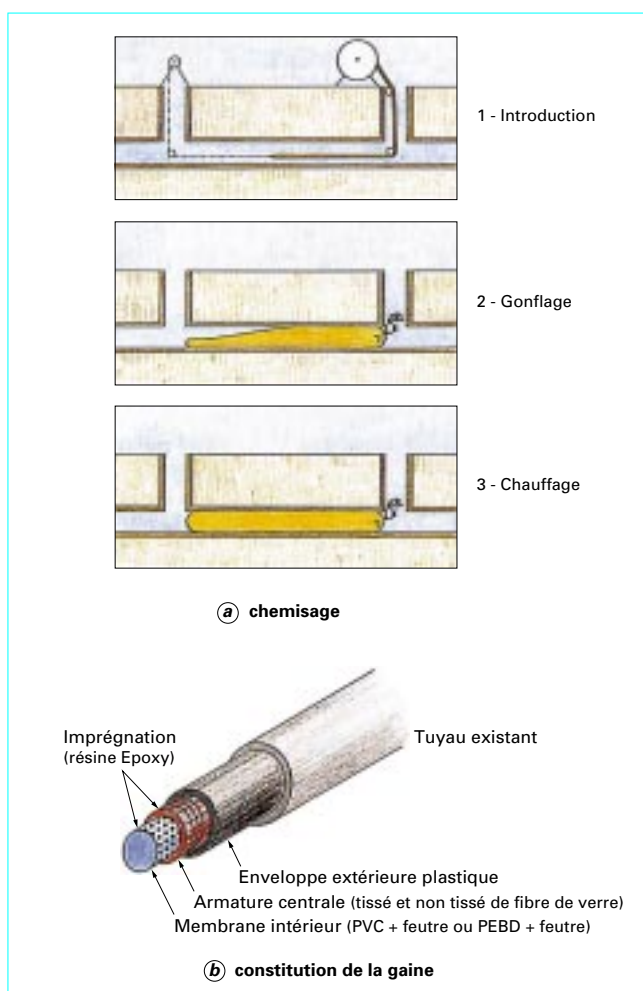


Figure 34 – Chemisage par gaine souple (d'après document Sade)



Figure 35 – Chemisage par tube préformé (d'après document Sade)



Figure 36 – Gainage (d'après document Sade)

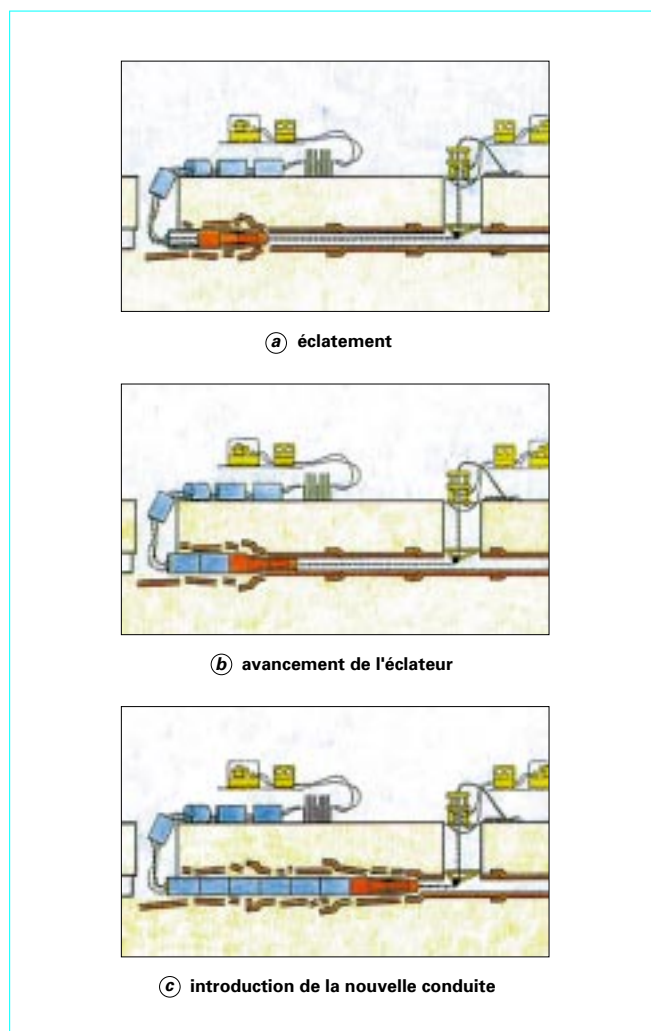


Figure 37 – Remplacement d'une conduite après éclatement

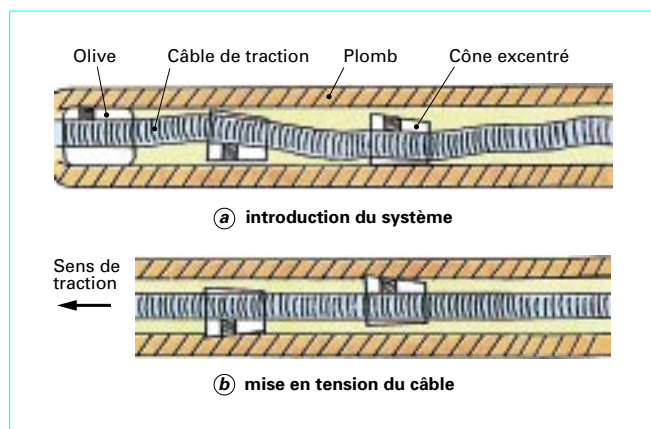


Figure 38 – Extraction de branchement en plomb
(d'après document Sade)

2.6 Protection contre les retours d'eau

De nombreux incidents de pollution interne d'un réseau ont été relatés dans la presse de tous les pays. Il s'agit, en général, d'un retour d'eau polluée, presque toujours provoqué par une différence de pression négative entre le réseau public et le réseau privé. Cela peut résulter d'un pompage intérieur sans protection (l'absence de bache de pompage est une cause fréquente) ou d'une baisse momentanée de pression dans le réseau public (la rupture d'une canalisation ou la dépression induite en retour par un coup de béliet sont les motifs les plus courants) (figure 39).

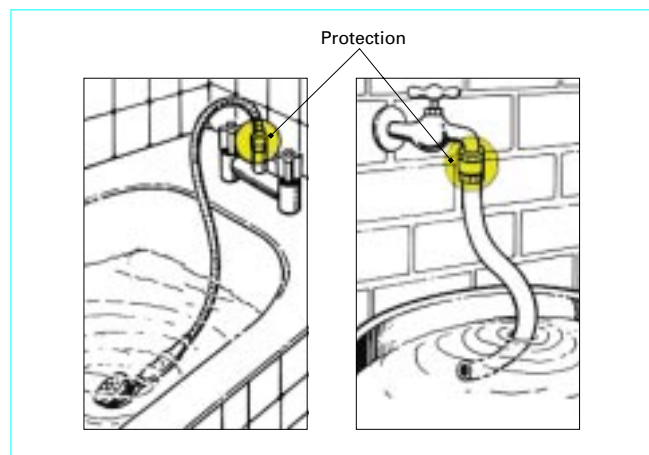


Figure 39 – Risques de siphonage et protection possible

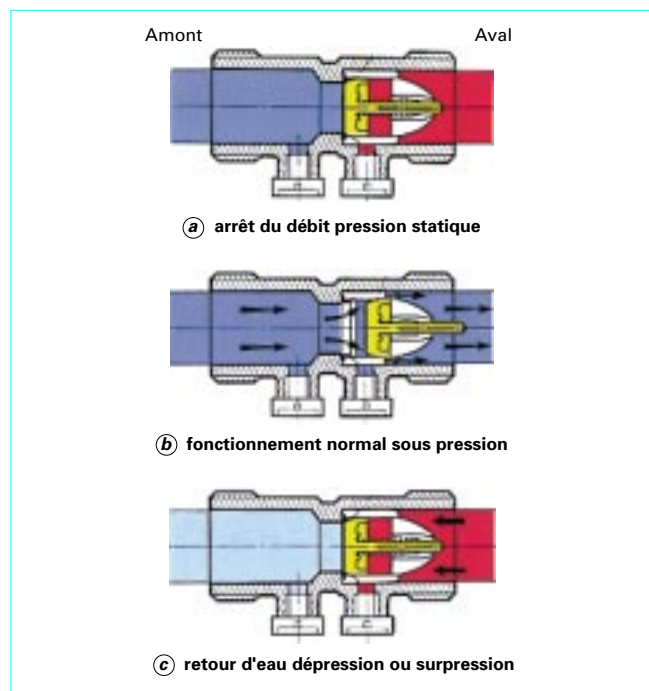


Figure 40 – Principe de la disconnection sur branchement particulier
(d'après document Socla)

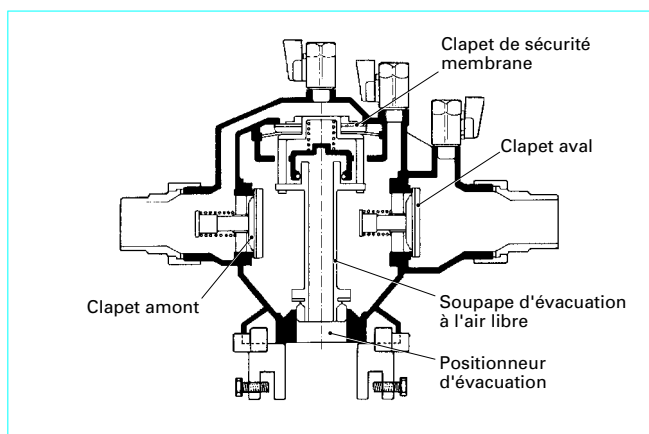


Figure 41 – Disconnecteur pour installation industrielle polluante
(d'après document Socla)

En France, la réglementation sanitaire impose à présent différents niveaux et différents types de protection contre les retours d'eau, appelés disconnecteurs (figures 40 et 41).

3. Réservoirs

3.1 Généralités

Le lecteur pourra se reporter aux articles *Stockage de l'eau. Ouvrages en béton* dans ce traité.

3.1.1 Utilité et types de réservoirs

On distingue trois types de réservoirs :

- enterrés ;
- semi-enterrés ;
- sur tour.

Ils peuvent être réalisés selon le cas, en maçonnerie, en béton ordinaire ou précontraint, ou en acier pour de petites capacités.

Les réservoirs constituent les organes régulateurs de pression et de débit entre le régime de production et le régime de consommation.

Ils permettent d'emmagasiner l'eau lorsque la consommation est inférieure à la production, et la restituent lorsque la consommation devient supérieure à la production.

En milieu rural ou pour des villes de petite importance, avec une installation correctement conçue, la capacité du ou des réservoirs oscille aux alentours du volume moyen journalier d'eau consommée. Mais avec l'augmentation du nombre de consommateurs, le rapport entre la capacité et le volume moyen journalier diminue notablement.

Ces réservoirs permettent une certaine souplesse pour faire face, sans gêne pour les utilisateurs, aux incidents suivants :

- panne électrique ;
- remplacement d'une pompe ;
- accident sur la conduite de refoulement.

Les réservoirs permettent, outre une régularité de fonctionnement des groupes de pompage, de profiter au maximum du tarif de nuit en énergie électrique.

Les réservoirs, à partir d'une certaine capacité, comportent deux compartiments pour les facilités du nettoyage (minimum une fois par an) et des réparations.

Certains réservoirs sont équipés de telle manière qu'une partie de leur capacité constitue une réserve d'incendie. Ce volume se renouvelle par un dispositif spécial, le plus souvent constitué par un siphon, qui se désamorce lorsque le niveau de la réserve est atteint. Cette réserve correspond à 120 m³ au moins, utilisables en 2 heures (circulaire n° 465 du 10/12/51 ministères de l'Intérieur et de l'Agriculture).

Dans le cas où une agglomération s'étend dans une direction donnée, un réservoir unique et de hauteur convenable peut devenir insuffisant pour assurer une pression correcte en tout point du réseau et à tout moment.

C'est alors que l'on a recours à un ou plusieurs réservoirs d'équilibre en liaison par le réseau avec le réservoir principal, mais à une cote de niveau légèrement inférieure. Le remplissage du réservoir d'équilibre se fait gravitairement au moment des faibles consommations, c'est-à-dire principalement la nuit.

La journée, la charge à partir du réservoir principal diminue dans le réseau par suite de la consommation, celle du réservoir d'équilibre devient alors prépondérante et c'est son action qui maintient une pression régulière.

3.1.2 Prescriptions sanitaires

3.1.2.1 Précautions générales. Stagnation

Les réseaux de distribution et les ouvrages de stockage doivent être conçus et exploités de manière à éviter une stagnation prolongée de l'eau d'alimentation. Les réseaux doivent être munis de dispositifs de soutirage ; ces derniers doivent être manœuvrés aussi souvent que nécessaire, et au moins deux fois par an pour les points du réseau où la circulation de l'eau n'est pas constante.

3.1.2.2 Prescriptions générales applicables aux réservoirs

Les réservoirs doivent être protégés contre toute pollution d'origine extérieure et contre les élévations importantes de température.

Ils doivent être faciles d'accès et leur installation doit permettre de vérifier en tout temps leur étanchéité.

Il doit être installé un dispositif permettant une prise d'échantillon d'eau à l'amont et à l'aval immédiats du réservoir.

L'ensemble des matériaux constituant les réservoirs ne doit ni se désagréger ni communiquer à l'eau des saveurs ou odeurs désagréables.

Après chaque intervention susceptible de contaminer l'eau contenue dans les réservoirs et, de toute façon au moins une fois par an, les réservoirs sont vidés, nettoyés et désinfectés.

Des dispositions sont prises pour assurer un approvisionnement en eau potable pendant la mise hors service.

3.1.2.3 Réservoirs à surface libre

En plus des prescriptions indiquées ci-avant, ces types de réservoirs doivent être fermés par un dispositif amovible à joints étanches. Les orifices de ventilation sont protégés contre l'entrée des insectes et des petits animaux par un dispositif approprié (treillage métallique inoxydable à mailles d'un millimètre au maximum).

L'orifice d'alimentation est situé en point haut du réservoir avec une garde d'air suffisante (au moins 5 cm au-dessus de l'orifice du trop-plein) à l'exception des réservoirs d'équilibre.

La section de la canalisation de trop-plein doit pouvoir absorber la fourniture d'eau à plein régime. Cette canalisation est siphonnée avec une garde d'eau suffisante.

La canalisation de vidange doit être située au point le plus bas du fond du réservoir.

Les orifices d'évacuation du trop-plein et de la vidange sont protégés contre l'entrée des insectes et des petits animaux.

De plus, les trop-pleins et les vidanges doivent être installés de telle sorte qu'il y ait une rupture de charge, avant déversement, par mise à l'air libre libre. Lorsque les trop-pleins et les vidanges se déversent dans une même canalisation avant le dispositif de rupture de charge, la section de cette canalisation doit être calculée de manière à permettre l'évacuation du débit maximal.

L'orifice de distribution de l'eau doit être placé à 10 cm au moins au-dessus du point le plus haut du fond du réservoir.

3.1.2.4 Bâches de reprise

Elles sont soumises aux mêmes dispositions que les réservoirs à surface libre.

3.2 Équipement hydraulique

Il est utile de prévoir de placer la plupart des équipements dans une chambre de manœuvre accolée au réservoir.

Les figures 42, 43 et 44 indiquent le principe des dispositions à prévoir dans le cas de réservoirs enterrés, de réservoirs avec réserve d'incendie (auxquels on peut adjoindre un dispositif de renouvellement automatique de la réserve), de réservoirs de refoulement-distribution avec réserve d'incendie, de réservoirs d'équilibre.

3.3 Dispositifs de régulation

3.3.1 Robinets à flotteurs

Ils sont disposés sur l'arrivée d'eau au réservoir.

Ils permettent, notamment dans le cas de petites installations, de supprimer le dispositif de télétransmission électrique d'arrêt de pompage lorsque le réservoir est plein. La fermeture assez lente du robinet à flotteur (figure 45) ralentit la vitesse dans la conduite de refoulement, ce qui permet, au moyen d'un relais à palette disposé à la station de pompage, de couper la marche de la pompe.

3.3.2 Robinets automatiques de remplissage

Un piston, assurant la fermeture du robinet, reçoit sur une face la pression de refoulement et sur l'autre la contre-pression statique du réservoir avec un tarage d'ajustement par ressort (figure 46a). Tant que le niveau de trop-plein n'est pas atteint, le robinet reste ouvert et le réservoir se remplit. Une fois le réservoir plein, le piston se plaque sur l'orifice et empêche le passage de l'eau refoulée. Le rôle de ce robinet est semblable à celui du robinet à flotteur, mais il peut être placé sur la conduite d'alimentation, au pied du réservoir (figure 46b).

3.3.3 Autres équipements

Il existe toute une panoplie moderne de détecteurs à ultrasons, de sondes capacitatives, de capteurs de pression hydrostatique permettant de piloter par impulsions les vannes et les robinets.

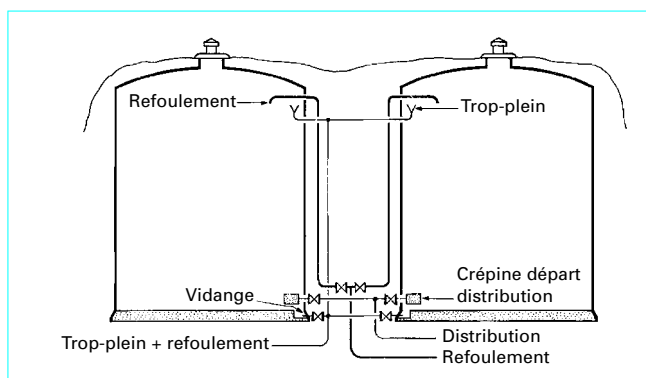


Figure 42 – Équipement hydraulique sans réserve d'incendie

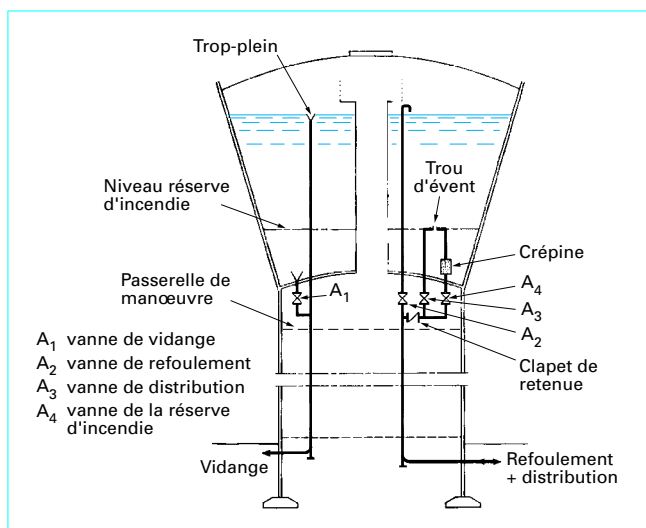


Figure 43 – Réservoir équipé en refoulement-distribution avec réserve d'incendie

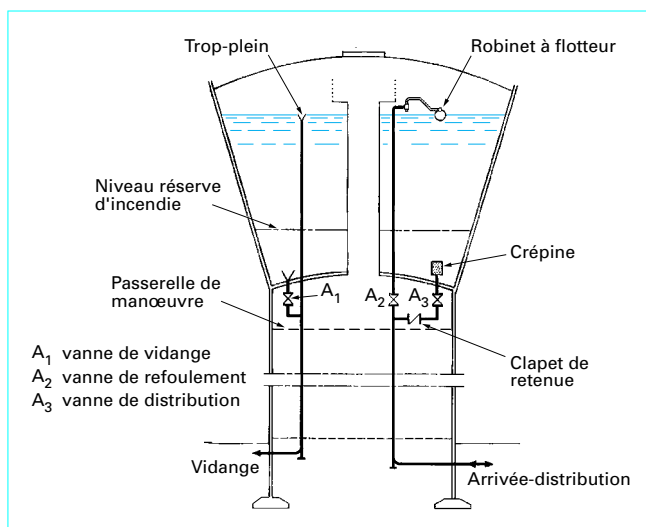


Figure 44 – Équipement d'un réservoir d'équilibre

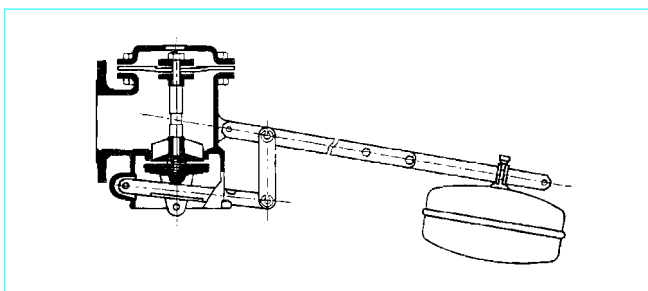


Figure 45 – Robinet à flotteur (d'après document Bayard)

3.4 Calcul de la capacité des réservoirs

3.4.1 Généralités

En dehors de sa fonction de réserve vis-à-vis de l'incendie ou de l'interruption momentanée de l'alimentation, les réservoirs ont une fonction économique vis-à-vis des investissements et des frais d'exploitation.

En amont des réservoirs, dans le cas fréquent où ils sont alimentés par pompage, il s'agit d'étaler sur les heures creuses le fonctionnement des machines élévatoires, par conséquent de stocker la quantité nécessaire au réseau amont pendant la consommation du jour annuel de pointe.

En aval, il s'agit d'assurer l'amortissement des variations, souvent considérables, entre le débit journalier moyen et les demandes de pointe.

La mise en place de réservoirs d'équilibre au sein du réseau de distribution permet également de diminuer la dimension des conduites principales d'alimentation du réseau. Dans ce dernier cas, s'il s'agit d'un réseau maillé, la méthode de Hardy Cross (§ 1.4.5.2) (ou ses perfectionnements) doit permettre d'optimiser la relation entre les investissements réservoirs et les conduites principales.

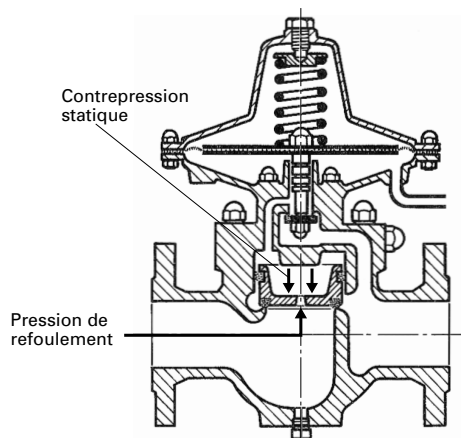
3.4.2 Méthode de calcul

Il est indispensable de connaître les variations du futur débit entrant et du futur débit sortant soit par estimation, soit, de préférence, par dépouillement de mesures effectuées au point approprié du réseau sur une longue période, notamment pendant la saison de plus haute consommation. Par étude graphique ou par calcul, on intègre la différence de ces deux débits et l'on détermine la capacité minimale théorique, de façon à ce que le volume utile du réservoir soit égal à la différence maximale entre le surplus et le déficit, au cours de la journée type choisie, du réservoir supposé vide au départ de l'opération.

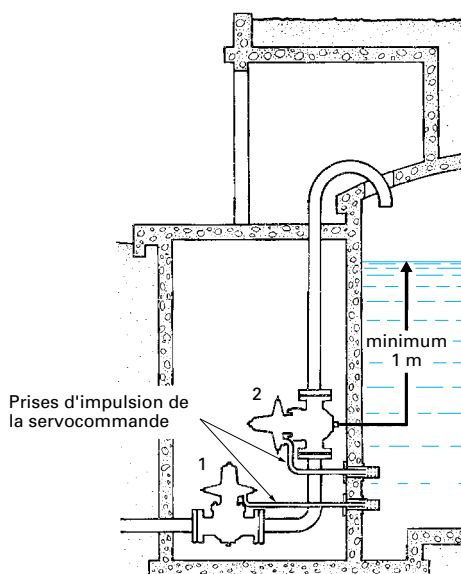
Ces éléments sont intégrés par les bureaux d'étude dans des logiciels de simulation qui leur sont propres.

3.4.3 Choix définitif de la capacité

Il faut d'abord déterminer la valeur théorique, de préférence à partir de mesures exactes, et la modifier en fonction d'une estimation des besoins futurs (10 à 15 ans) et de la planification de l'accroissement de la capacité d'adduction.



(a) robinet automatique de remplissage



1 position horizontale
2 position verticale
(b) schéma d'installation

Figure 46 – Robinet automatique de remplissage

(d'après document Ramus)

On prend ensuite une marge couvrant les erreurs de mesure et d'estimation de l'ordre de 15 à 20 %.

Il est bon de signaler une **règle pratique** souvent utilisée qui consiste à intégrer tous ces calculs en choisissant pour le réservoir une capacité représentant 150 % de la plus forte consommation journalière, majorée de la réserve d'incendie.

3.5 Choix de la cote d'implantation

Il y a deux solutions pour la localisation :

— le château d'eau ou réservoir haut dont l'altitude permet d'assurer gravitairement l'alimentation de tous les points d'eau, aux heures de pointe, du réseau de distribution aval ;

— le réservoir bas dont l'altitude est indépendante des cotes piézométriques aval ; il a comme contrepartie l'emploi obligatoire d'engins de relèvement (surpresseurs) entre le réservoir et le réseau de distribution.

Il y a également des systèmes mixtes où seulement une partie du réseau demande l'utilisation de surpresseurs.

Le choix entre les systèmes dépend de critères objectifs (coût d'exploitation, investissement), de critères de sécurité d'exploitation (on admet ou non l'interposition d'engins mécaniques entre le réservoir et l'usager), mais également de critères sociaux-esthétiques (urbanisme), les réservoirs bas pouvant être intégrés (dissimulés) dans un paysage urbain ou rural, à l'inverse des châteaux d'eau pour lesquels une recherche esthétique peut conduire à des résultats non unanimement admis et, souvent, à un renchérissement sensible du coût.

4. Compteurs d'eau

4.1 Généralités

Il faut distinguer les mesures des débits dans les écoulements à surface libre et celles des débits dans les conduites en charge.

Pour les premières, on se reportera à l'article *Débit des liquides à l'air libre* dans le traité Mesures et Contrôle. Dans la pratique courante, ce sont des déversoirs ou des dispositifs à étranglement (Venturi canal), où le niveau amont détermine la valeur du débit.

Pour les secondes, on distingue les dispositifs à étranglement (diaphragmes, tuyères, Venturi), pour lesquels nous renvoyons à l'article [R 2 220] *Débitmètres à pression différentielle* du traité Mesures et Contrôle, et les compteurs proprement dits qui, pratiquement, couvrent la grande masse des appareils de débits, enregistreurs ou non, utilisés par les distributeurs d'eau.

4.2 Compteurs

4.2.1 Différents types

La figure 47 donne les différents types de compteurs et les calibres usuellement couverts, variables selon les constructeurs, en fonction du média de comptage.

Une autre typologie correspond au totalisateur. Si les totalisateurs à aiguilles ne sont plus proposés par les grands fabricants, on trouve un choix de totalisateurs secs ou noyés (figure 48).

4.2.2 Classement des compteurs

Un compteur est caractérisé par sa courbe de réponse aux débits transients, comparée aux valeurs mesurées par un dispositif étalon. On définit ainsi un **canal de tolérance** et des erreurs maximales tolérées en fonction des débits nominaux, de transition, minimaux, et maximaux (figure 49).

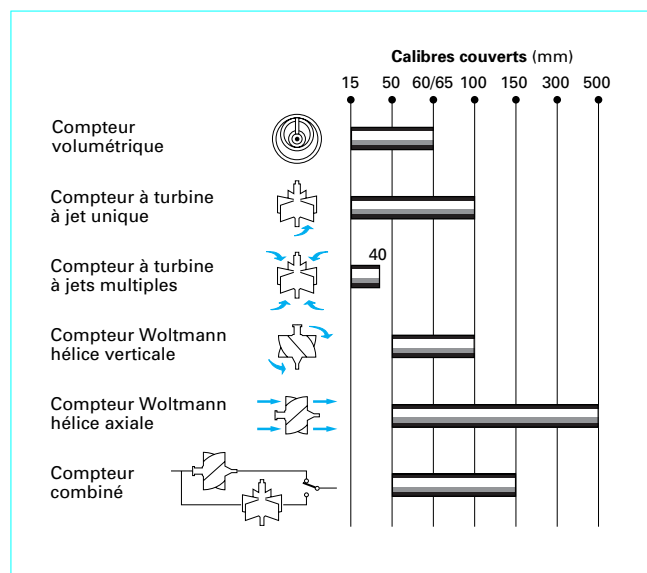


Figure 47 – Différentes technologies de compteurs

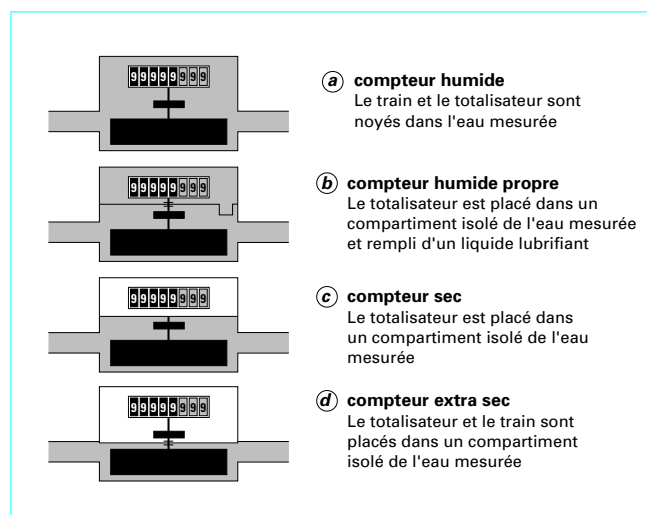


Figure 48 – Différents types de totalisateurs

Pour un compteur neuf, l'erreur maximale admise entre Q_{\min} et Q_t est de $\pm 5\%$; elle est de $\pm 2\%$ entre Q_t et Q_{\max} . On tolère que ces valeurs soient doublées pour un compteur en service.

Le tableau 6 résume le classement.

Pour toutes les classes uniformément, le débit maximal est fixé au double du débit nominal :

$$Q_{\max} = 2 Q_n$$

Les éléments de classement sont repris sous forme graphique dans la figure 50.

À de rares exceptions près, les services d'eau occidentaux font appel à des compteurs de classe C.

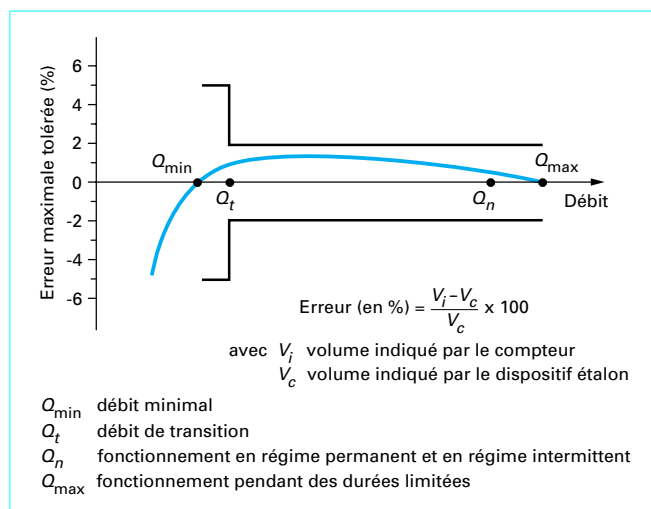


Figure 49 – Canal de tolérance pour un compteur d'eau froide (0 à 30 °C)

Tableau 6 – Classement des compteurs selon la CE			
Classe		$Q_n < 15 \text{ m}^3/\text{h}$	$Q_n > 15 \text{ m}^3/\text{h}$
A	Q_{min}	$0,04 Q_n$	$0,08 Q_n$
	Q_t	$0,10 Q_n$	$0,30 Q_n$
B	Q_{min}	$0,02 Q_n$	$0,03 Q_n$
	Q_t	$0,08 Q_n$	$0,20 Q_n$
C	Q_{min}	$0,01 Q_n$	$0,006 Q_n$
	Q_t	$0,015 Q_n$	$0,015 Q_n$

Q_n débit normal ou nominal.
 Q_t débit du transition.

4.2.3 Problème du décomptage

Il ne se pose pas pour les compteurs placés sur les branchements de fourniture d'eau aux usagers où il ne doit pas y avoir de retour d'eau. Par contre, au sein des réseaux maillés (entre des conduites de distribution), lors des études de ces derniers et surtout dans le cas de vente d'eau entre deux services différents, il est important que les *retours* soient décomptés.

Les compteurs volumétriques sont réversibles par construction, les compteurs à hélices ou de vitesse ont une précision moins bonne en sens inverse du sens normal. Le compteur à jet unique accuse la plus grande différence de précision entre les deux sens.

4.2.4 Compteurs de volume

Un récipient d'un volume connu se remplit et se vide alternativement ; le mouvement est transmis par un train mécanique réducteur ou par un dispositif magnétique vers un totalisateur généralement à huit tambours chiffrés (figure 51).

Les compteurs de volume sont les plus sensibles (un compteur de 15 mm a un débit de démarrage de 1 L/h environ) mais ils peu-

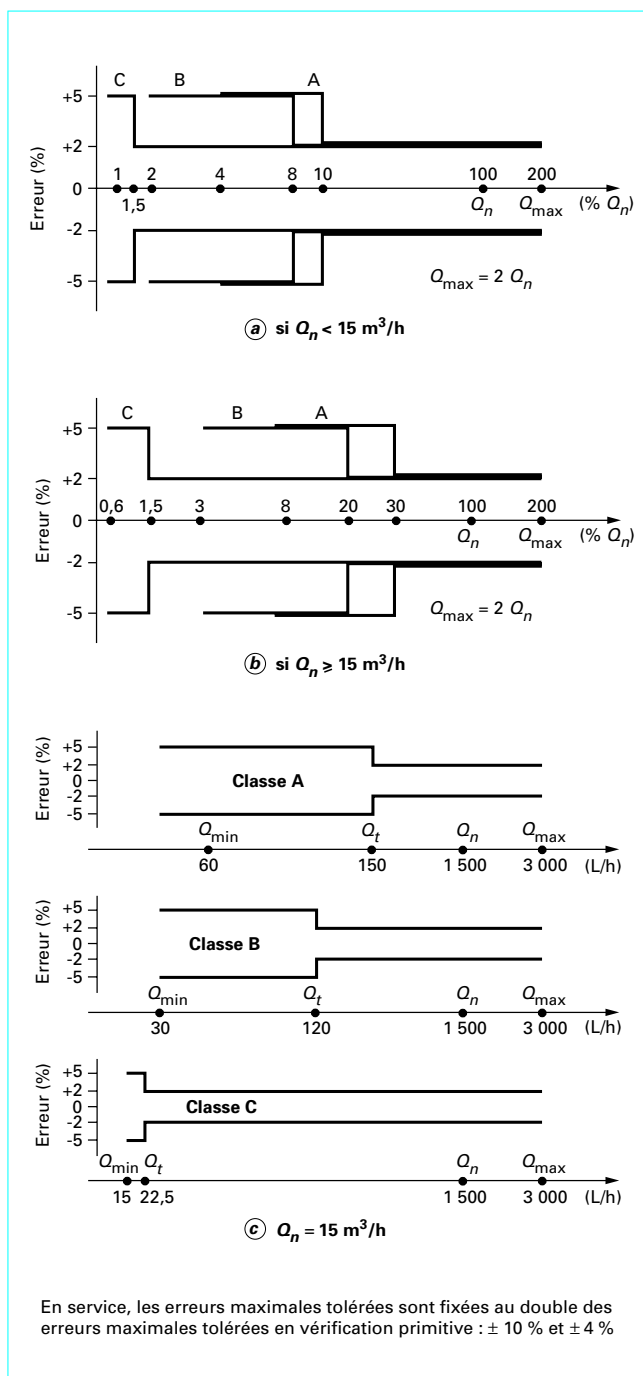


Figure 50 – Classes métrologiques pour compteurs d'eau froide

vent être détériorés par des coups de bélier ou des accumulations d'impuretés ; ils ne doivent être employés qu'avec de l'eau parfaitement claire.

Ils peuvent être disposés dans n'importe quelle position, mais il est souhaitable de les fixer à l'horizontale.

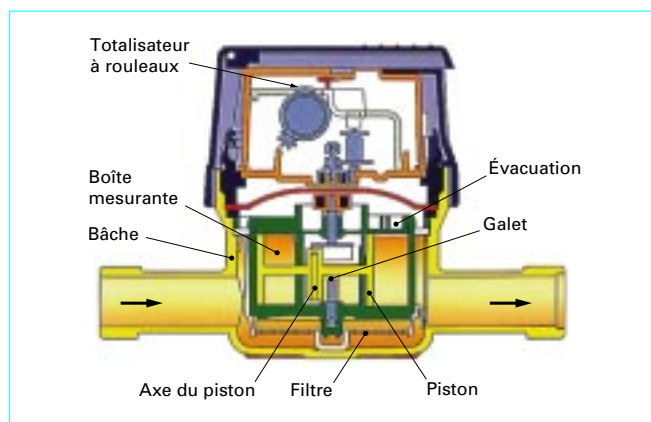


Figure 51 – Compteur volumétrique (d'après document Schlumberger)

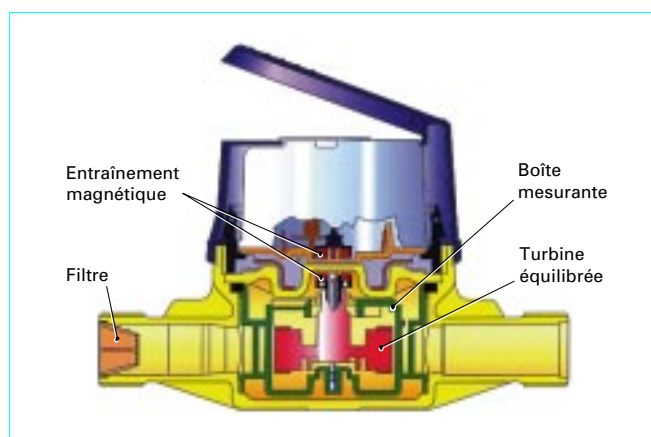


Figure 52 – Compteur de vitesse (d'après document Schlumberger)

4.2.5 Compteurs de vitesse

L'eau y traverse un ou plusieurs orifices de section précise dont le jet de sortie met en mouvement une turbine dont le nombre de tours est enregistré. Le comptage se fait par un train mécanique et un totalisateur (figure 52). Leur sensibilité est moins bonne que celle des compteurs volumétriques (un compteur de 15 mm a un débit de démarrage de 3 L/h environ) mais leur détérioration est moins fréquente. Ils sont insensibles aux coups de béliet et les impuretés les traversent plus aisément. Ils doivent obligatoirement être posés à l'horizontale. En effet, ils perdent au moins une classe de mesure s'ils ne sont pas horizontaux (un compteur de classe C devient de facto au mieux un compteur de classe B).

4.2.6 Compteurs à hélice (Woltmann)

Ils sont à hélice verticale ou à hélice axiale.

Dans les **compteurs à hélice verticale** se trouve un cylindre abritant une hélice (figure 53). L'eau arrive par la partie inférieure à travers un diviseur adapté au nombre de pales de l'hélice. Le mouvement ascendant de l'eau entraîne l'hélice à une vitesse correspondant au débit et le nombre de tours est transmis par train réducteur au comptage.

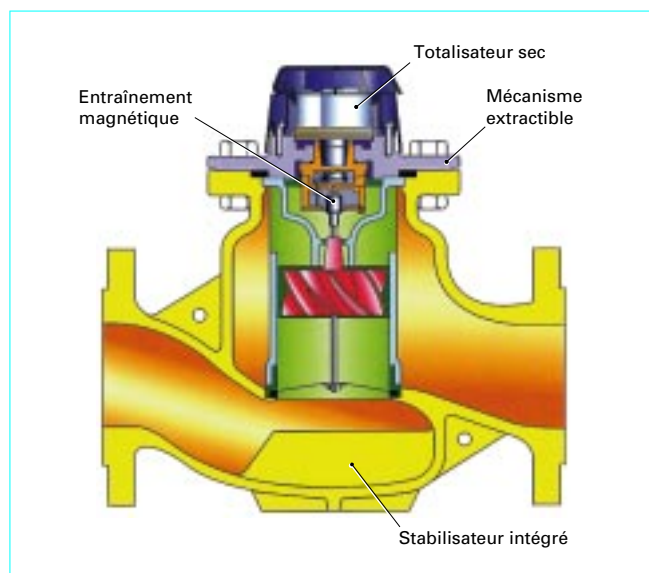


Figure 53 – Compteur Woltmann à hélice verticale (d'après document Schlumberger)

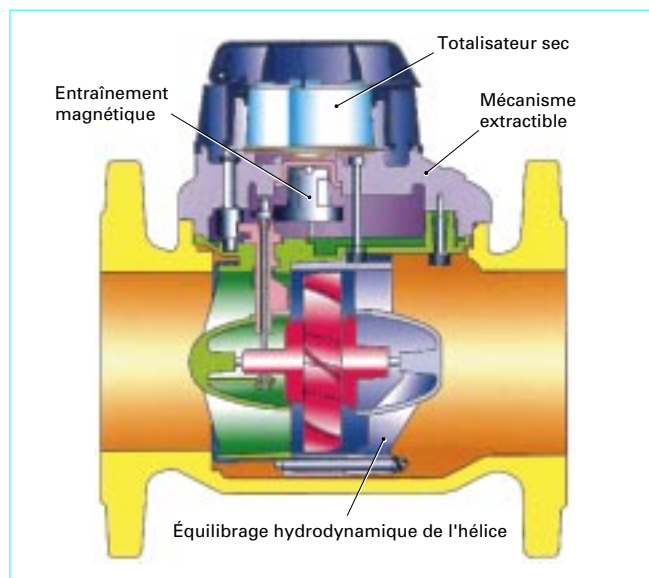


Figure 54 – Compteur Woltmann à hélice axiale (d'après document Schlumberger)

Ces compteurs sont très robustes ; insensibles aux remous, ils sont bien adaptés pour le comptage à la sortie des pompes ; ils engendrent une perte de charge sensiblement inférieure à celle des compteurs de volume.

Ces compteurs doivent être disposés horizontalement.

Les **compteurs à hélice axiale** comportent une hélice et un diviseur (figure 54) ; ils peuvent être de grande dimension (jusqu'à 800 mm). Ils sont, par contre, sensibles aux remous et doivent être précédés soit d'une certaine longueur droite horizontale, soit d'un stabilisateur d'écoulement.

Ils doivent, normalement, être disposés horizontalement, néanmoins sur demande ils peuvent être fournis pour mise en place inclinée ou même verticale.

4.2.7 Compteurs combinés

Suivant la dimension de la canalisation, ils comprennent :

a) pour des diamètres de 50 à 100 mm :

- un compteur principal à hélice verticale,
- un compteur secondaire de vitesse ou de volume,
- un commutateur ;

b) pour des diamètres supérieurs à 100 mm :

- un compteur principal à hélice axiale,
- un compteur secondaire de vitesse,
- un commutateur.

À faible débit, la valve de commutation (figure 55) est fermée ①, seul le compteur secondaire fonctionne.

Un accroissement de débit entraîne une augmentation de pression dans le circuit principal du compteur.

Quand la force résultant de cette pression devient supérieure à la force de résistance exercée par le ressort du commutateur, la valve s'ouvre ②.

La zone de commutation Z_c est définie comme suit :

$$Q_{\min} (\text{principal}) \leq Z_c \leq 1,2 Q_n (\text{secondaire})$$

4.2.8 Compteurs proportionnels

Ils sont constitués d'un système déprimogène (tuyère, Venturi) dérivant, proportionnellement au débit qui le traverse, un débit plus réduit en by-pass qui est soumis au comptage, généralement par un compteur de vitesse.

Pour les débits importants, ils constituent une solution élégante vis-à-vis de l'investissement ; leur bon fonctionnement est lié au bon état du by-pass qui doit être vérifié périodiquement.

4.2.9 Autres compteurs

Parmi les autres types de compteurs, il faut signaler ceux faisant appel à une **technique sans pièces en mouvement**, basée sur l'**oscillation fluide** (figure 56). L'eau pénètre dans la boîte mesurante et s'accélère sous forme de jet provoqué par une buselure étroite en A. Quand le jet entre dans la chambre de mesure, il se crée deux zones de basse pression de part et d'autre du jet au point B. Ceci attire le jet de chaque côté de la chambre. Le gros du jet va ressortir de la chambre, cependant qu'une certaine proportion va entrer dans la boucle de recyclage C. Ce débit retourne au début du cycle et influe sur le jet en l'obligeant à traverser la chambre. Le cycle se répète sans fin, tant qu'il y a un débit d'eau, et oscille à une vitesse proportionnelle au débit total. Deux électrodes mesurent la force électromotrice du champ électromagnétique permanent créé de part et d'autre du jet. Ces compteurs devraient présenter un certain nombre d'avantages par rapport aux compteurs traditionnels (figure 57) :

- précision élevée ;
- grande longévité ;
- peu sensibles aux particules ;
- non perturbés par d'éventuels passages d'air.

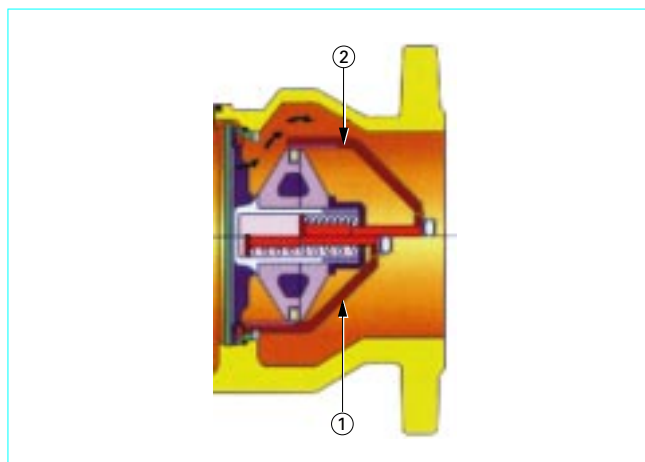


Figure 55 – Commutateur de compteur combiné
(d'après document Schlumberger)

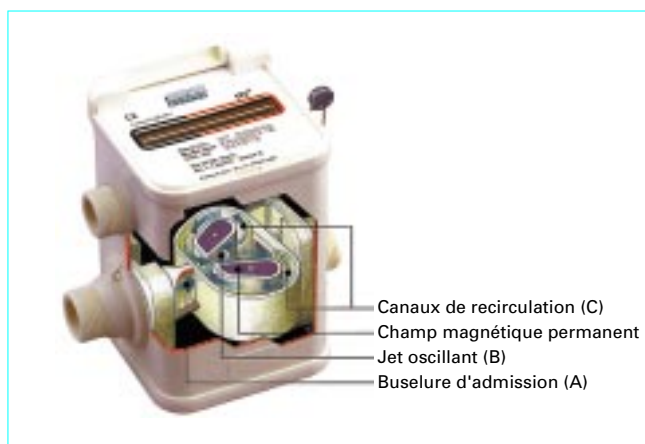


Figure 56 – Compteur à oscillations fluidiques
(d'après document Fusion meters)

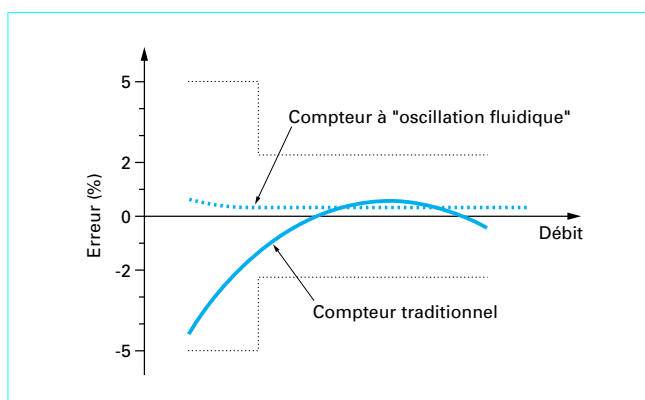


Figure 57 – Courbes de réponse comparées des compteurs traditionnels et à oscillations fluidiques

4.3 Relevé des compteurs

4.3.1 Généralités

Le relevé est une opération réalisée selon une fréquence généralement fixée par le règlement du service (une à deux fois par an en général, une fois par mois ou par trimestre pour les gros consommateurs). La fréquence du relevé peut différer de la facturation. Il est courant d'établir des factures intermédiaires sur la base de consommations estimées en fonction de l'historique des consommations du client. Une régularisation est opérée à l'occasion du relevé. Le client peut ainsi mieux planifier ses dépenses. La mensualisation est à présent très courante.

Le relevé traditionnel est « manuel ». Le releveur se rend chez le client et enregistre l'index figurant sur le compteur. Les anciens carnets de fiches de relevés remplies au stylo à bille ont laissé la place à des terminaux portables permettant un calcul instantané de la consommation et une comparaison avec les précédentes pour pouvoir signaler immédiatement au client toute anomalie éventuelle. Le releveur peut ainsi aider le client et lui fournir une démarche d'enquête en cas de consommation plus élevée que sa consommation moyenne.

Les relevés actuels se font de plus en plus par lecture automatique soit en mode local, avec interface sur le compteur et sur le terminal, soit en mode déporté, les transmissions pouvant être filaires ou hertziennes.

On le voit, il ne s'agit plus d'une simple opération de routine, mais d'une interface importante entre le client-consommateur d'eau et l'entité chargée de faire fonctionner le service au mieux. Il faut optimiser l'ensemble « relevé - facturation - recouvrement - fourniture d'information - demande d'information », tant du point de vue « justesse-précision-fiabilité », que du point de vue qualité du relationnel (contact direct sur le terrain ou dans les locaux du gestionnaire du service, et/ou, de plus en plus, contacts téléphoniques pendant des plages horaires élargies avec des chargés de clientèle qualifiés, sans surcoût pour le client, par la généralisation de centres spécialisés), que du point de vue de l'économie de l'ensemble.

4.3.2 Approche traditionnelle

L'optimisation conduirait vers une diminution du nombre de compteurs en service (comptage par immeuble, par groupe d'immeubles), la répartition entre les usagers étant renvoyée vers un gestionnaire extérieur. La lutte contre le gaspillage freine cette procédure, le consommateur négligent reportant sur le sous-ensemble dont il fait partie les accroissements de facturation dont il est à l'origine.

Un autre facteur d'économie de gestion peut être recherché dans la diminution du nombre de relevés annuels de chaque compteur. Mais là il faut trouver une limite acceptable vis-à-vis de la bonne information du client, et de l'aggravation des conflits provoqués par les consommations « excessives » avec difficulté d'arbitrage (compteurs défectueux ou surconsommation réelle). Une méthode de diminution des charges consiste à demander aux clients eux-mêmes de communiquer les valeurs du relevé effectué par eux, avec une vérification annuelle (ou plus fréquente dans les cas anormaux).

Un surcoût dans le relevé peut découler de l'impossibilité d'accès au lieu où est situé matériellement le compteur, ce qui conduit soit à une deuxième (n-ième) visite, soit à un retard de facturation. Ces cas, encore trop fréquents, demandent à être résolus à l'amiable, souvent par un déplacement (relativement onéreux) du compteur sur le branchement.

Enfin, l'itinéraire des releveurs, établi précédemment suivant des règles de bon sens et des estimations très approximatives, peut

maintenant être traité par les moyens de calcul offerts par les ordinateurs pour la détermination des trajets optimaux.

4.3.3 Relevé par terminal portable

Il existe à présent des sortes de micro-ordinateurs dédiés au relevé des compteurs, appelés « terminaux portables ».

Ces appareils ont remplacé les anciennes « listes-relevés » qui permettent aux releveurs d'effectuer leurs tournées et d'enregistrer les index des compteurs.

Chaque terminal est chargé d'un extrait du fichier des clients correspondant à la tournée à effectuer.

Après relevé du compteur et introduction de l'index, l'appareil compare la moyenne journalière qui en résulte avec celle qui lui avait été indiquée par l'ordinateur central. En fonction de l'historique de consommation, l'appareil signale les écarts anormaux et donne les informations permettant d'en trouver le motif avec le client. Les anomalies courantes sont introduites directement par le releveur dans l'appareil : absent, non-enregistrement du compteur, consommation anormale motivée, etc.

Une fois la tournée terminée, l'appareil est déchargé sur un ordinateur.

4.3.4 Relevé à distance

L'augmentation du coût salarial (direct et indirect), l'extension de l'habitat, l'augmentation du nombre d'absents lors du passage, du fait de l'accroissement des ménages dont les deux conjoints travaillent, conduisent à souhaiter des relevés automatiques à distance, qui facilitent d'ailleurs la mise en œuvre d'ordinateurs de gestion et de facturation. Le compteur à relevé automatique existe ; il coûte environ deux fois plus cher qu'un compteur classique du même type. Les moyens de transmission à distance peuvent être filaires ou hertziens.

■ Transmissions filaires

Elles utilisent :

- les lignes téléphoniques ;
- les réseaux de télédistribution (câblage) ;
- les lignes électriques.

L'ordinateur de gestion-facturation est relié au terminal qui retransmet la demande de données (pour le réseau approprié) à l'organe électronique du compteur.

Ce dernier transmet en retour l'adresse du compteur (numéro de téléphone par exemple) au mini-ordinateur. La durée de l'opération est de l'ordre de 10 s et ne perturbe pas la ligne téléphonique si cette dernière sert de réseau de liaison. Un tel système présuppose un accord entre le gérant du réseau et le distributeur d'eau.

Il est certain que le développement du câblage urbain facilitera le développement du système.

■ Transmissions hertziennes

Les systèmes de radiorelevé des compteurs (figure 58) reposent en général sur des liaisons bidirectionnelles ; la communication radio entre le module lié au compteur et le terminal portable peut être assurée par un protocole international et interprofessionnel, comme le « Standard RMS ». Le module se compose d'un circuit électronique qui capte les informations issues d'un émetteur d'impulsion, par exemple, et les stocke dans une mémoire ; à l'appel de son indicatif, le module émet l'index et divers paramètres de fonctionnement.

Le terminal portable, préalablement chargé de la tournée, collecte les informations et les décharge directement dans le système informatique centralisé. On obtient la chaîne de traitement de la figure 59.

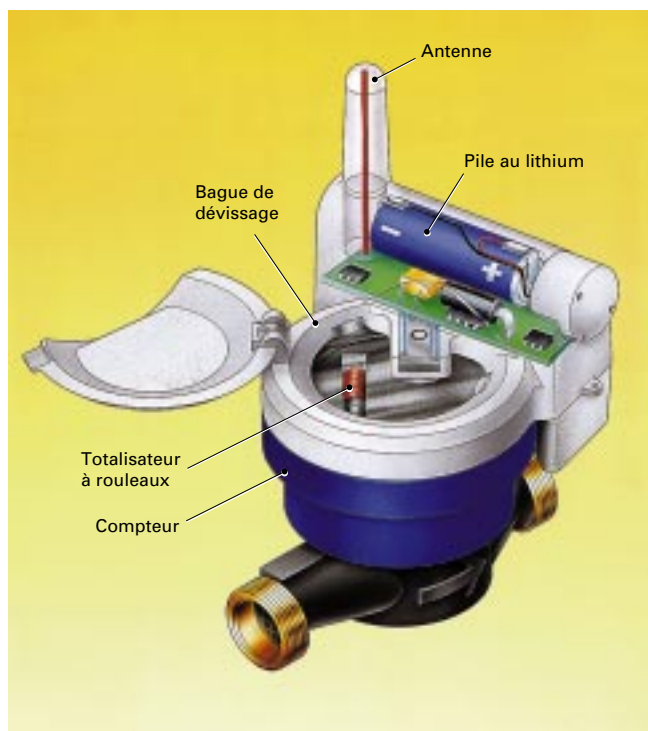


Figure 58 – Compteur équipé de son module à émetteur d'impulsions et liaison hertzienne (d'après document Sappel)

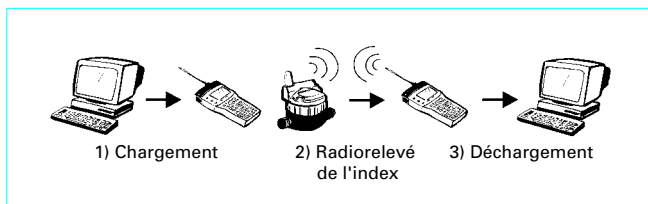


Figure 59 – Chaîne de traitement par radiorelevé

La rapidité de transmission et la finesse des données sont telles que l'on peut à présent effectuer les relevés depuis une voiture équipée d'une antenne appropriée en roulant doucement dans les rues et en passant à proximité des compteurs.

Avec la généralisation des satellites géostationnaires et l'extrême précision du GPS (*Global Positioning System*), on peut penser à du relevé par liaison satellite.

4.4 Étalonnage et entretien des compteurs

Les compteurs sont des instruments de mesure de précision, et l'on sait combien la métrologie est un facteur important dans les démarches d'assurance qualité. Les compteurs neufs font l'objet de vérifications draconiennes, mais si le zéro défaut est bien l'objectif, on sait qu'il ne peut être atteint à 100 %. De plus, dès que le compteur est posé, il n'est plus neuf et les risques d'anomalies

augmentent. À mesure qu'il vieillit, le compteur évolue. Les principales anomalies rencontrées sont : blocage du compteur, sous-comptage, problèmes de lecture et, parfois, saut d'un ou plusieurs crans d'un rouleau (qui passe par exemple de 200 à 400 ou 500 m³). Il faut donc étalonner et entretenir les compteurs.

4.4.1 Étalonnage

Il est prudent, pour le distributeur, d'étalonner et de vérifier les qualités des compteurs neufs ou tout au moins de procéder à un sondage rationnellement conduit pour chaque lot livré.

L'étalonnage, c'est-à-dire la vérification de la conformité des erreurs de mesure vis-à-vis des normes fixées pour les différentes classes, demande l'utilisation d'un banc d'essai qui, généralement, comporte un bac de mesure, les vannes de réglage des débits permettant de tester toute la plage de fonctionnement. Dans certains bancs, on peut procéder à des mesures de pertes de charge occasionnées par le compteur et ceci pour plusieurs débits.

4.4.2 Entretien

L'entretien des compteurs comprend :

- soit un programme de remplacement systématique à la fin d'une période déterminée (la fourchette habituelle est de l'ordre de 10 à 15 ans de fonctionnement) ;
- soit un programme de remplacement en fonction du volume totalisé, par exemple au moment où l'on arrive à la limite des possibilités d'enregistrement totalisé (on peut bien sûr se fixer une limite inférieure en fonction de l'expérience acquise).

Enfin, on remplace un compteur lorsque l'on constate ou soupçonne un dysfonctionnement.

L'entretien des compteurs enlevés consiste en un démontage-nettoyage ou en un remplacement du mécanisme. Cet entretien est suivi d'un réétalonnage pouvant conduire éventuellement à la mise en réforme.

D'une façon générale, la précision des compteurs se maintient bien pour les débits égaux ou supérieurs aux débits normaux et se détériore assez rapidement pour les débits minimaux. Un calcul d'optimisation lié étroitement à chaque cas d'espèce peut conduire à des programmes diversifiés de démontage-entretien en fonction des consommations et surtout des débits les plus fréquents de chaque usager.

5. Rendement d'un réseau

5.1 Définitions

Il n'y a pas de terminologie officielle. Nous nous appuierons donc sur un vocabulaire logique. Pour mesurer l'étanchéité d'un réseau, on compare le volume introduit dans le réseau à la sortie des usines de production (désinfection seule ou avec pompage, traitement plus ou moins complet) ou des livraisons en gros des services extérieurs, au volume utilisé de façon connue – et généralement mesuré – pendant la même période. La différence représente les pertes en distribution, et on utilise différents ratios généralement appelés et définis comme suit.

Rendement du réseau :

$$R = \frac{\sum \text{volumes utilisés}}{\sum \text{volumes mis en distribution}} \times 100 = \frac{V_u}{V_d} \times 100$$

Pourcentage de pertes :

$$P = \frac{V_d - V_u}{V_d} \times 100$$

L'indice de perte moyen introduit la notion de longueur du réseau L qui influe sur le nombre de fuites et de défauts de comptage :

$$I = \frac{V_d - V_u}{365 L}$$

On parle parfois d'indice de consommation :

$$J = \frac{V_u}{365 L}$$

5.2 Détermination du rendement

5.2.1 Comptage à l'amont

Plus les débits sont élevés et plus les ouvrages d'admission sont de grande dimension, plus les erreurs peuvent être importantes, en valeur absolue bien sûr, mais également en pourcentage.

Lorsque l'on quitte le domaine de la métrologie par comptage, c'est-à-dire au-delà des plus gros compteurs Woltmann, on entre dans le domaine de la débitmétrie élevée. On fait alors appel aux organes déprimogènes, aux débitmètres à ultrasons ou électromagnétiques.

Ces appareils ont à présent une grande précision (erreur inférieure à $\pm 5\%$) et une bonne fiabilité ; ils nécessitent toutefois plus de vérifications et de réétalonnages que les compteurs classiques.

5.2.1.1 Principe de la débitmétrie par ultrasons

La mesure des vitesses s'effectue par ultrasons. Elle est fondée sur le principe de la mesure par différence de temps de transit de l'onde ultrasonore émise par chacune des sondes d'une même corde.

Soient deux sondes A et B placées dans un écoulement selon la figure 60. Chacune d'elles étant alternativement émettrice et réceptrice, la comparaison des temps de propagation des ondes acoustiques d'amont en aval – et réciproquement – (t_{AB} et t_{BA}) permet de calculer la vitesse (V) d'après la formule suivante :

$$V = \frac{L^2}{2d} \left(\frac{\Delta t}{t_{AB} t_{BA}} \right)$$

avec	L	longueur du trajet acoustique,
	d	projection de L suivant la direction de l'écoulement,
	V	vitesse d'écoulement,
	Δt	$t_{AB} - t_{BA}$.

5.2.1.2 Principe de la débitmétrie électromagnétique

Le principe de fonctionnement découle de la loi de Faraday.

La tension induite dans un conducteur qui se déplace perpendiculairement à un champ magnétique est directement proportionnelle à la vitesse de déplacement du conducteur.

Dans le débitmètre (figure 61), deux bobines (B1 et B2), disposées perpendiculairement au tube de mesure et parcourues par un courant continu, produisent un champ magnétique B . Les deux électrodes E1 et E2, diamétralement opposées et perpendiculaires à la fois au tube de mesure et au champ magnétique, recueillent une tension « E » lorsqu'un liquide conducteur y circule à la vitesse moyenne V .

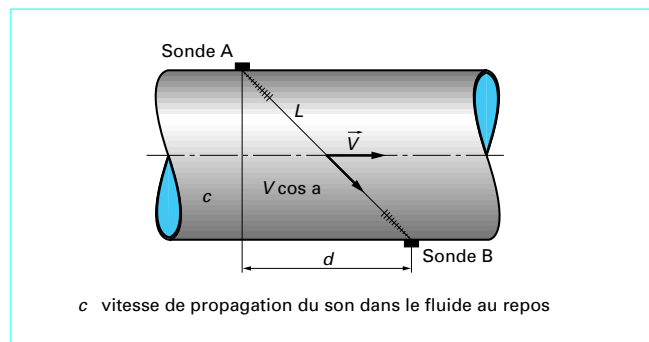


Figure 60 – Principe de la débitmétrie par ultrasons

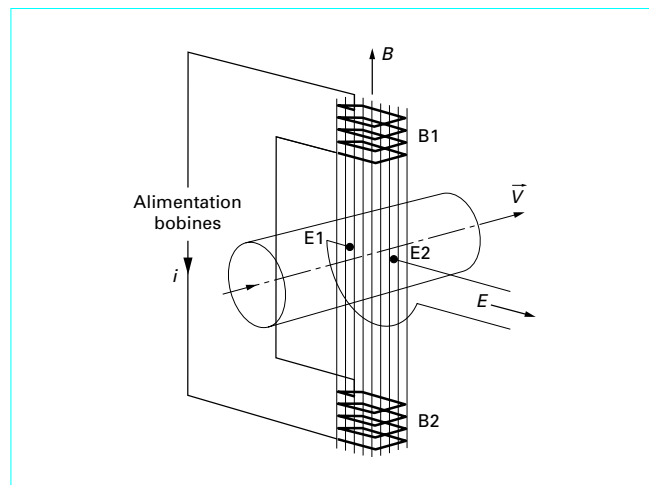


Figure 61 – Principe de la débitmétrie électromagnétique

La loi de Faraday donne :

$$E = kV$$

avec k une constante pour un appareil donné.

5.2.2 Comptage à l'aval

Les volumes livrés aux clients munis de compteurs sont les **volumes comptabilisés**, c'est-à-dire le total des volumes relevés au compteur, des volumes évalués lorsque le compteur est trouvé bloqué ou est déposé.

Mais les volumes comptabilisés doivent être corrigés des **défauts de comptage** : défaut de précision, erreur de lecture, oubli de relevés. L'importance de la correction à apporter dépend du type et de l'état des compteurs, etc., ainsi que de l'attention des releveurs (elle peut atteindre de 5 à 10 % si le parc est mal entretenu), 3 à 5 % de sous-évaluation moyenne n'ont rien de critique.

5.2.2.1 Volumes consommateurs avec comptage

Comme il ne peut être question de relever tous les compteurs le même jour, on procède de la façon ci-après.

Chaque compteur est relevé deux fois tout le long de la période de relevé avec un intervalle de S semaines : la consommation

totale relevée C est multipliée par $52/S$ pour être comparée au volume fourni en tête du réseau en 52 semaines.

5.2.2.2 Volumes consommateurs sans comptage

Les volumes livrés aux appareils et ouvrages non munis de compteurs sont appelés **volumes consommateurs sans comptage** ; ils alimentent essentiellement les appareils publics de fontainerie. L'évaluation de la consommation de ces appareils est souvent délicate et objet de controverses. C'est pourquoi il est recommandé d'équiper la fontainerie de compteurs lorsque c'est possible.

5.2.2.3 Volumes de service du réseau

Ce sont, par exemple, les volumes utilisés pour les lavages des réservoirs, les écoulements permanents, les purges de canalisations pour mauvaise qualité ou après réparation, les réalisations d'extensions ou d'ouvrages nouveaux, etc. Ce sont également des volumes difficiles à évaluer. Ils peuvent représenter une proportion non négligeable des volumes utilisés.

5.2.3 Volumes gaspillés

On classe parmi les volumes gaspillés ceux qui résultent de défauts d'exploitation et essentiellement les passages au trop-plein des réservoirs et les purges laissées ouvertes ou mal fermées. Parmi les volumes détournés, il faut mettre surtout les branchements clandestins ou les puisages sans autorisation sur les bouches de lavage ou d'incendie.

5.2.4 Fuites

C'est seulement lorsque l'on a évalué l'ensemble des utilisations (maîtrisées ou clandestines) qu'on peut, par différence avec les volumes mis en distribution, calculer les pertes dues à l'état du réseau, etc., c'est-à-dire les fuites.

Les fuites sont de différents types et peuvent affecter les différents éléments du réseau de distribution :

- **les réservoirs** : mauvaise étanchéité de la maçonnerie (mais en général ça se voit et ça se répare) ; mauvaise étanchéité des vidanges ;
- **la robinetterie** : essentiellement les presse-étoupes de vannes ou les raccordements des branchements ;
- **surtout les canalisations** : il s'agit soit des ruptures franches, les plus faciles à détecter car elles se manifestent extérieurement, soit des fentes, soit de la corrosion, soit, plus sournoises, des fuites aux joints. Ce sont celles-là, parce que nombreuses et difficiles à détecter, qui conduisent aux plus mauvais rendements de réseau.

Cette méthode de calcul global, qui se base sur la vie du réseau pendant une longue période, n'est finalement pas très précise en tant que telle ; elle n'éclaire cependant pas seulement sur l'état du réseau mais aussi sur la façon dont il est géré : imprécision des compteurs, déficiences du comptage, utilisations clandestines. Elle mesure les pertes du réseau et non les fuites proprement dites.

Par ailleurs, elle ne rend compte que de façon atténuée des résultats des campagnes de recherche de fuites en cours d'année. Elle permet cependant de comparer des réseaux présentant des similitudes de taille, de matériaux, de qualité d'eau et permet surtout de suivre l'évolution des fuites, d'une année à l'autre ou d'un semestre à l'autre pour un même réseau. Enfin, elle permet de comparer les secteurs d'un réseau qui peut être subdivisé.

5.2.5 Évaluation des pertes

5.2.5.1 Analyse des consommations

Le principe comporte de nombreuses variantes mais reste toujours le même : il consiste à mesurer et à analyser le débit appelé

par le réseau ou par une portion de réseau soit pendant une période allant de 24 heures à 7 jours, soit pendant une période plus courte et de faible consommation.

On considère que le débit minimal observé pendant cette période est le débit de fuite du secteur concerné.

On affine la recherche en excluant successivement du secteur observé des tronçons de ce secteur, pour observer la conséquence de cette exclusion sur le débit appelé par le secteur. Précédemment, ou simultanément, on aura ou fermé ou noté le débit des branchements à écoulements permanents ou des gros consommateurs.

On mesure ainsi le débit de fuite de tel secteur ou de tel tronçon et, en fonction des longueurs ou des consommations habituelles de ce secteur ou de ce tronçon, ou en fonction de ratios expérimentaux, on décide ou non de pousser plus loin la localisation de la (ou des) fuite(s). Ainsi, en dessous de $5 \text{ m}^3/(\text{j} \cdot \text{km})$ en ville et de $1 \text{ m}^3/(\text{j} \cdot \text{km})$ en rural, on estime généralement inutile de poursuivre la détection de la fuite. Les variantes dépendent des moyens mis en œuvre, mais on trouve toujours pour la mesure soit un compteur général avec tête émettrice reliée par exemple à un enregistreur d'impulsions, soit un débitmètre relié en général à un micro-ordinateur pour en analyser les résultats. Dans les petits services, le compteur général est au départ du réservoir principal. Dans les services plus importants, ou bien on utilise les compteurs généraux de secteurs lorsqu'il existe un îlotage permanent, ou bien on fait appel à du matériel de mesure mobile spécialisé.

Cette méthode a l'avantage d'être plus immédiate que la précédente. Associée à la localisation des fuites, elle permet de porter remède à des situations mauvaises. Mais c'est une méthode plus lourde par le matériel mis en œuvre et par la main-d'œuvre nécessaire.

C'est, d'autre part, une méthode d'application délicate qui demande du matériel adapté (en particulier, il faut des débitmètres précis aux petits débits puisqu'ils doivent mesurer des débits de fuite) ainsi que du personnel très expérimenté pour interpréter correctement les résultats.

Enfin, on a tendance à oublier que les débits de fuites mesurés quantifient non seulement celles du réseau, mais également les fuites intérieures des installations d'abonnés qui sont loin d'être négligeables.

5.2.5.2 Volumes perdus et paramètres de rendement

Les pertes nettes sont égales à la différence entre les volumes D_1 , fournis en tête et corrigés des erreurs de comptage, et l'ensemble du volume comptabilisé corrigé C_1 et du volume utilisé non compté V_1 :

$$\text{Pertes nettes} = D_1 - C_1 - V_1$$

Il en vient une appréciation plus précise du rendement du réseau :

— **rendement net** :

$$R_1 = \frac{C_1 + V_1}{D_1} \times 100$$

— **pourcentage de pertes nettes** :

$$P_1 = \frac{D_1 - C_1 - V_1}{D_1} \times 100$$

— **indice de pertes nettes** :

$$I_1 = \frac{D_1 - C_1 - V_1}{365L}$$

— **indice de consommation nette** :

$$J_1 = \frac{C_1 + V_1}{365L}$$

5.3 Paramètres agissant sur le rendement

Les plus fréquemment cités sont :

- l'âge moyen du réseau ;
- la nature des canalisations et de leurs joints ;
- les conditions d'exploitation (pression, coups de bélier) ;
- la nature des terrains ;
- la longueur du réseau ;
- le nombre de branchements.

L'amélioration du rendement s'obtient par un affinage des comptages amont et aval, par une recherche et une détermination précise des volumes utilisés non comptés et par une recherche systématique des fuites.

Les différents calculs de rentabilité effectués dans de nombreux services ont montré que les bénéfices induits couvrent largement les frais d'amélioration et qu'il faut continuer l'effort de maintien d'un haut rendement même lorsque ce dernier est finalement obtenu.

Une retombée appréciable réside dans l'excellente connaissance, mise à jour en permanence grâce à la continuité de cet effort, des différentes composantes du réseau et dans la possibilité offerte ainsi à l'exploitant d'intervenir à bon escient.

5.4 Recherche des fuites

5.4.1 Surveillance du réseau

Elle comprend :

- le constat visuel des anomalies (affleurements d'eau, affaissements de terrain, présence d'eau aux bouches à clé, débits importants dans les égouts) ;
- le contrôle des débits et pressions sur le réseau et aux stations de pompage.

5.4.2 Méthodes acoustiques traditionnelles

Elles consistent à déceler les bruits provoqués par la fuite à l'aide d'appareils mécaniques ou électroniques. Elles sont lentes et elles sont perturbées par les bruits ambiants.

L'écoute au sol est gênée par l'affaiblissement du bruit avec la profondeur (ou l'écart latéral par rapport à la conduite) ; l'écoute sur conduite est plus efficace sur les petits diamètres et sur les conduites métalliques.

Les appareils mécaniques dérivent du principe du stéthoscope. Les appareils électroniques comportent un capteur, un amplificateur réglable, un filtre de fréquences, un casque d'écoute et un microampèremètre. À présent, le capteur est devenu microphone puis accéléromètre ; l'amplification est à réglage de la bande d'écoute par filtres.

5.4.3 Méthodes nouvelles

■ Corrélation acoustique

On procède à une écoute à deux microphones ; un dispositif analyse les bruits captés en deux points éloignés de moins de 100 m de la même conduite (figure 62) ; la courbe de corrélation de ces bruits est relativement plate s'il n'y a pas de génération de bruit entre les deux points d'écoute. Dans le cas contraire, la courbe de corrélation présente un maximum très net. Connaissant la vitesse de propagation (qui est celle de la vitesse du son dans l'eau), on peut localiser la fuite.

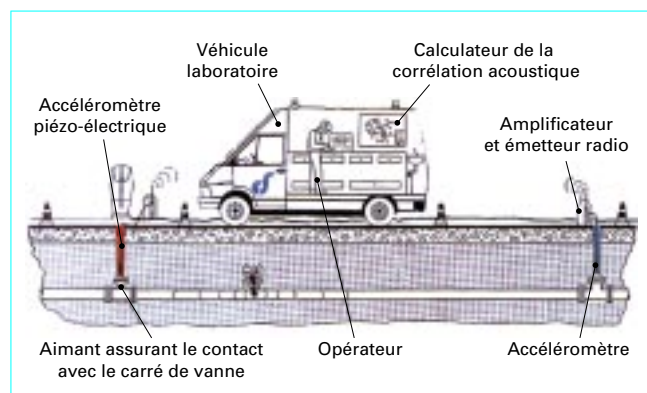


Figure 62 – Recherche de fuite par corrélation acoustique (d'après document Générale-des-eaux)

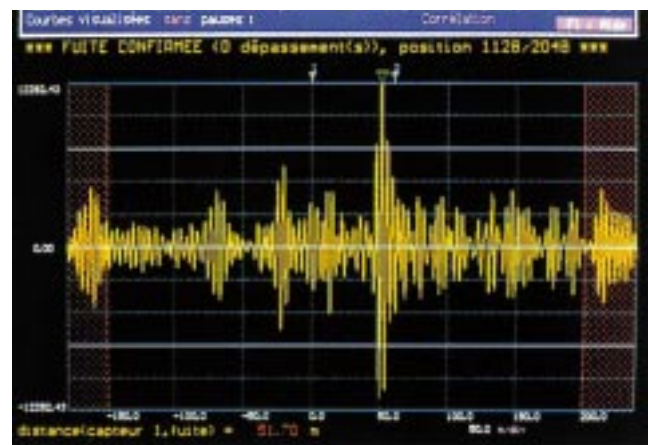


Figure 63 – Tracé de corrélateur (d'après document Degréane)

Les bruits dans les conduites sont soumis aux phénomènes suivants :

- les hautes fréquences s'atténuent plus vite que les basses ;
- les basses fréquences sont mieux véhiculées par l'eau que par les conduites ;
- les conduites en plastique amortissent beaucoup plus rapidement les vibrations que les conduites métalliques ;
- plus le diamètre est important, plus les bruits sont atténués.

C'est cette faculté de bonne localisation de la fuite (figure 63) qui rend cette méthode particulièrement intéressante, car elle tend à des économies de temps et de terrassement.

Son avantage principal réside dans la neutralisation des bruits de l'environnement ; elle permet par conséquent un travail de jour. Combinée avec les méthodes précédentes, qui déterminent une zone où peut se trouver la fuite, elle permet une localisation rapide et précise. Elle exige deux accès à la conduite séparés au plus de 100 m.

■ Injection de SF₆

Quand on a la certitude d'une fuite dans une zone déterminée et que sa localisation précise est difficile à obtenir, on peut faire appel à une injection d'hexafluorure de soufre (SF₆), produit inodore, insipide et sans danger. SF₆ s'échappe par la fuite, pénètre dans le sol et la verticale de la fuite se détermine au moyen d'une sonde

introduite dans de petits trous percés le long du tracé de la conduite.

Cette méthode est longue et coûteuse ; elle peut s'utiliser quand la corrélation acoustique est en défaut (conduites en matière plastique ou impossibilité d'avoir deux accès à la conduite séparés de moins de 100 m).

Une variante consiste à utiliser des traceurs radioactifs.

■ Thermographie infrarouge

On détecte les fuites par mesure du gradient de température provoqué par la remontée de l'eau par capillarité du sous-sol. Cette technique est bien adaptée aux canalisations passant à travers champs. On obtient ainsi une cartographie rapide des zones potentielles de fuites par survol en hélicoptère, puis traitement différé des images infrarouges sur ordinateur.

■ Oreilles acoustiques

Le principe est de détecter le bruit de l'eau qui s'échappe des canalisations sous pression. La sensibilité de « l'oreille » s'étend sur une gamme de fréquences très large, et la période d'écoute est de l'ordre de 3 heures, ce qui permet de détecter des fuites faisant très peu de bruit.

■ Géoradar

Issu de la recherche militaire pour la détection de mines, son principe repose sur la vitesse de propagation d'ondes électromagnétiques dans le sol, variable en fonction des matériaux rencontrés et de la profondeur de l'objet détecté. Une poche d'eau se traduit par un ralentissement des ondes. L'interprétation des données fournies par le géoradar permet la double détection des conduites et des fuites.

■ Radiomagnétotellurique

Cette technique vient de la géophysique et est basée sur la mesure de la résistivité apparente des terrains. Une zone de fuite est humide et s'exprime par une faible résistivité.

■ Bouchon de mousse dure en plastique envoyé dans le tuyau et véhiculé par l'eau

La pression varie au passage des joints, des appareils, des coudes, etc. Elle croît brutalement quand le bouchon atteint la fuite et donne une indication sur le débit de fuite.

6. Élévation mécanique de l'eau

On se reportera utilement à l'article *Pompes volumétriques* dans le traité Génie mécanique.

6.1 Pompes à mouvement alternatif

Le nombre de modèles est considérable. La pompe peut être : foulante, aspirante, ou aspirante et foulante. Dans les usines élévatoires, les pompes appartiennent généralement à ce dernier type.

Elles conviennent particulièrement pour les petits et moyens débits et une grande hauteur d'élévation (> 100 m).

L'intérêt de ces pompes est purement historique.

■ Rendement

Les pertes par frottement mécanique étant faibles à cause des faibles vitesses, le rendement global des pompes à piston est généralement élevé. On obtient couramment 0,85, sauf pour les pompes à gros débits et à faible hauteur de relèvement.

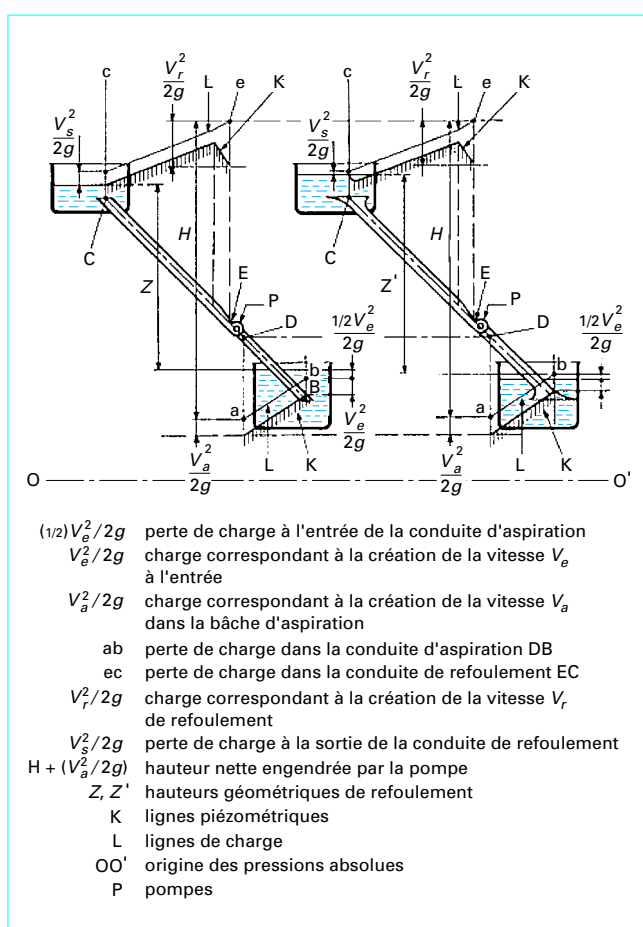


Figure 64 - Refoulement d'une pompe

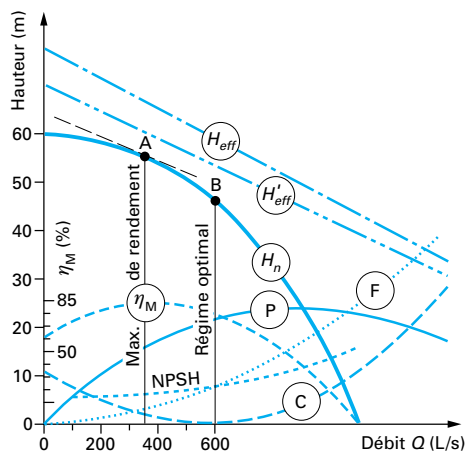
6.2 Pompes centrifuges

La figure 64 représente schématiquement l'installation d'une pompe. En ordonnée de chaque point de l'axe de la conduite a été portée la valeur de la pression absolue et de la charge en ce point, exprimée en mètres d'eau. On constate que la diminution des pertes $1/2 (V_e^2 / 2g)$ à l'entrée et $(V_s^2 / 2g)$ à la sortie permet, par l'adoption d'un convergent et d'un divergent en ces points particuliers, d'augmenter la hauteur géométrique qui passe de Z à Z' , la hauteur nette restant constante.

6.2.1 Caractéristiques hauteur-débit ou débit-pression

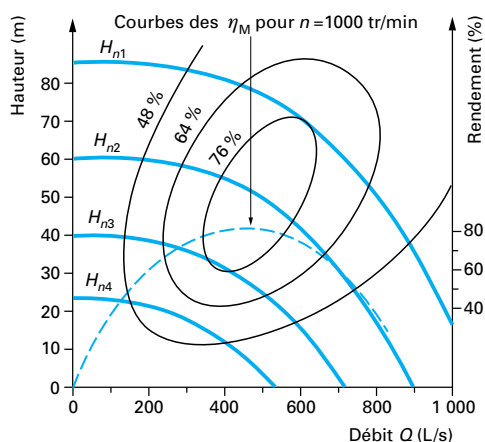
Des courbes caractéristiques indiquent, pour chaque vitesse (tr/min) de la pompe, la relation qui existe entre la hauteur de refoulement et le débit refoulé.

Dans une pompe bien conditionnée, elles ont une allure parabolique, l'axe de la parabole étant parallèle à la droite des hauteurs refoulées par la pompe, et la convexité de la parabole tournée vers le haut (figure 65).



(a) en fonction du débit :

- H_{eff} hauteurs théoriques effectivement engendrées (nombre d'aubes infini, d'épaisseur nulle)
- H'_{eff} hauteurs théoriques effectivement engendrées avec des aubes réelles, en nombre fini
- C pertes de charge dues aux chocs de l'eau à l'entrée et à la sortie des aubes
- F pertes de charge dues aux frottements de l'eau dans les aubes
- H_n hauteurs nettes engendrées : $H_n = H'_{eff} - (C + F)$
- η_M rendements manométriques en % : $\eta_M = H_n / H_{eff}$
- NPSH hauteurs nettes d'aspiration (net positive suction head)
- P puissance absorbée par la pompe



(b) dans le cas de la marche à vitesse variable :

- $H_{n1}, H_{n2}, H_{n3}, H_{n4}$ hauteurs nettes engendrées aux vitesses n_1, n_2, n_3, n_4 (en tr/min)
- Pour une même hauteur H_n on a : $Q_1/n_1 = Q_2/n_2 = \dots = Q_n/n_n$
- Pour un même débit Q on a : $H_{n1}/H_{n2} = (n_1/n_2)^2$
- Courbes 48 %, 64 %, 76 % : courbes d'équivalence de rendements ou colline des rendements.

Figure 65 – Caractéristiques des pompes centrifuges

Pour éviter toute difficulté de démarrage de la pompe sur une conduite de refoulement sous pression, il est d'ailleurs indispensable que l'arc de parabole représentant la caractéristique $Q-H$ (débit-hauteur) ait une allure *toujours tombante*, autrement dit que l'axe de symétrie de cette courbe soit situé en dehors du graphique, à gauche de l'axe des hauteurs, engendrées, parallèlement à ce dernier.

Cette condition implique que la hauteur à *débit nul* de la pompe (hauteur de barbotage) soit supérieure à celle correspondant à la pression à l'intérieur de la conduite sur laquelle elle refoule.

NPSH : ce sigle américain, introduit en France par les pétroliers (*Net Positive Suction Head*) peut se traduire par **hauteur nette d'aspiration**, c'est-à-dire hauteur d'aspiration, déduction faite de la tension de vapeur de l'eau. C'est une notion excessivement importante dont il doit être tenu le plus grand compte dans le choix d'une pompe, si l'on veut obtenir le meilleur rendement et surtout éviter le phénomène de *cavitation*.

6.2.2 Recommandations pratiques. Pompes en charge

Pour éviter les difficultés d'amorçage, on a toujours intérêt à mettre les pompes centrifuges en charge, c'est-à-dire qu'une pompe doit être conçue ou choisie dans des conditions telles qu'il existe toujours une différence disponible de 2 à 3 m entre la hauteur d'aspiration dont elle est capable et la hauteur manométrique réelle d'aspiration qui résulte des conditions d'établissement propres à cette dernière.

Quand cette disposition ne peut être appliquée, il faut faire en sorte que la hauteur du tuyau d'aspiration soit aussi faible que possible, ne serait-ce que pour éviter le phénomène de cavitation, qui est néfaste aux aubages des roues, principalement au voisinage de l'ouïe d'aspiration.

Dans ce cas, d'ailleurs, il y a lieu de prévoir un dispositif spécial pour l'amorçage : pompe à vide ou tubulure de remplissage de la colonne d'aspiration, et de placer au pied de cette dernière un clapet de retenue qui s'oppose au désamorçage de la pompe et au fonctionnement éventuel de cette dernière en turbine (*dévirage*), sous l'effet des eaux en provenance de la conduite de refoulement.

6.2.3 Rendement des pompes centrifuges modernes

Il peut atteindre et même dépasser 86 % dans les meilleures conditions. Pour des pompes placées dans des conditions d'emploi ordinaires, il doit être au moins de l'ordre de 75 %. Pour les pompes spéciales (pompes de forage, par exemple), il peut descendre au-dessous de ce chiffre.

6.3 Moteurs utilisés pour la commande des pompes

6.3.1 Moteurs à vent

Ils ne conviennent que pour les petites installations à cause de leur faible puissance et de l'irrégularité de celle-ci. Ils impliquent la présence de réservoirs relativement importants, ou d'une installation de secours thermique ou électrique.

6.3.2 Moteurs hydrauliques

■ **Roues** : elles conviennent pour les installations de moyenne puissance. Tous les types peuvent être utilisés suivant la nature de la chute. Elles donnent généralement des installations économiques.

■ **Turbines** : elles conviennent pour une gamme étendue de puissances, ont un meilleur rendement que les roues et nécessitent des installations moins encombrantes. Le type de turbine à utiliser dépend du débit et de la hauteur brute de la chute motrice.

6.3.3 Moteurs thermiques

■ **Moteurs à vapeur** : les machines à vapeur conviennent pour une gamme étendue de puissances, mais entraînent des installations onéreuses, encombrantes et exigent un entretien soigné. Les machines à piston ont pratiquement disparu. Il reste encore quelques turbines.

■ **Moteurs Diesel** : les moteurs Diesel sont principalement utilisés pour la commande des pompes de secours, à cause des grandes facilités de démarrage qu'ils offrent.

Ils conviennent pour toutes les puissances ; ils exigent généralement la présence d'un multiplicateur de vitesse pour la commande des pompes centrifuges à moyenne et haute pressions.

6.3.4 Moteurs électriques

On se reportera à la rubrique *Machines électriques* dans le traité Génie électrique.

Les moteurs électriques tendent pratiquement à remplacer tous les précédents, à cause de la simplicité de leur conduite. Ils conviennent pour toutes les puissances et ont un excellent rendement ; ils ne demandent qu'un minimum d'entretien.

Nota : il faut généralement un secours, qui peut être constitué par une machine à vapeur (chaudière à très haute pression, à mise en pression très rapide), ou mieux par un moteur Diesel à mise en service quasi instantanée.

En France, le type de moteur le plus utilisé dans les stations de relèvement est le **moteur asynchrone triphasé**, aussi bien pour les petites que pour les grandes puissances. Aux États-Unis, au contraire, l'utilisation du moteur synchrone paraît de règle, tout au moins dès que la puissance dépasse quelque 50 kW. Chaque type de moteur a ses avantages et ses inconvénients. En gros, on peut dire que le moteur asynchrone est plus *frustré* et d'un fonctionnement moins délicat que le moteur synchrone. C'est ce qui lui a valu la préférence, en France, pour la conduite des groupes centrifuges pour lesquels le synchronisme n'est pas nécessaire, et qui peuvent très bien se satisfaire de certaines variations de vitesse.

Toutefois, cette position peut être à reconsidérer, du moins pour les unités d'une certaine puissance, compte tenu de la tarification d'Électricité de France.

■ Moteurs à vitesse variable

Le moteur asynchrone à cage d'écureuil est certainement le plus simple et le meilleur marché. Il a pour inconvénient cependant d'exiger un courant de démarrage élevé, ce qui est de nature à limiter son utilisation sur certains réseaux.

Pour limiter cet appel de courant, on peut utiliser le moteur asynchrone à bagues avec démarrage sur résistances rotoriques. Son installation, en ce qui concerne l'équipement de démarrage, notamment, n'est pas aussi simple que pour le précédent, mais l'emploi de résistances rotoriques externes autorise une réduction maximale du courant au départ, ainsi qu'un certain contrôle de la vitesse.

Depuis quelques années, il se dessine une tendance favorable au moteur à vitesse variable qui permet, tout en réduisant le courant

de démarrage 1,5 à 2 fois le courant en pleine charge (au lieu de 4 à 6 fois avec le moteur à cage), un réglage continu de la vitesse dans toute la gamme et, par conséquent, l'adaptation de la vitesse de la pompe au débit à fournir. Les pertes d'énergie par fermeture des vannes sont très réduites, et les puissances absorbées plus faibles qu'avec les types précédents.

L'emploi de ce type de moteur est donc à étudier lorsque l'installation ne comporte qu'un groupe électropompe et doit faire face à d'amples et nombreuses variations de débit. Pour les installations importantes, on peut envisager le morcellement de la puissance installée, un moteur à vitesse variable pouvant être prévu pour faire face aux variations de second ordre.

Remarques : quel que soit le moteur utilisé, on doit s'attacher essentiellement à assurer la sécurité du refoulement, même si le rendement doit en souffrir quelque peu.

À ce titre, on doit préférer aux moteurs très poussés des engins plus lourds (faible puissance massique), généralement plus lents, mais donnant lieu à une moindre usure et à un entretien plus facile.

6.4 Usines de refoulement

Les règles générales de leur établissement sont les mêmes que celles valables pour les usines en général.

Les données qui leur sont particulières sont dominées par quatre principes essentiels qui tendent à assurer : la sécurité du fonctionnement, la protection des eaux refoulées, le bon rendement de l'installation, la facilité ultérieure de l'exploitation.

6.4.1 Sécurité de fonctionnement

On y pourvoit par un large dimensionnement des installations principales ou auxiliaires. Cette expression doit être prise dans son sens le plus étendu. Elle implique aussi bien des taux de contrainte relativement modérés pour les différentes parties des constructions et installations, qu'un excès de puissance pour les groupes motopompes et tous les auxiliaires qui en dépendent. Elle peut entraîner de même l'aménagement de bouclages appropriés, permettant d'assurer le service de l'usine, même en cas de rupture d'une conduite.

6.4.2 Protection des eaux refoulées

S'il s'agit d'eau potable, quelle qu'en soit la provenance (sources ou bassins filtrants), cette protection doit être totale. Elle consiste à éviter tout contact entre les eaux à relever et les corps ou matières étrangers capables de porter atteinte à sa potabilité.

On doit, en particulier, éviter toute introduction d'eau extérieure (eau de lavage des salles, de réfrigération des moteurs, de la nappe locale, etc.) dans le circuit d'aspiration et de refoulement. À cette fin, celui-ci doit être complètement étanche et les parties susceptibles d'être mises en dépression, même momentanée, doivent être particulièrement soignées et surveillées.

Les bâches et galeries d'aspiration bénéficient des mêmes soins. Elles doivent être hermétiquement closes et, si possible, remplacées par des conduites métalliques (fonte ou acier) absolument étanches.

6.4.3 Rendement de l'installation

Un haut rendement global de l'installation dépend de trois facteurs essentiels : rendement des moteurs proprement dits et de leurs auxiliaires, rendement des pompes, rendement des circuits hydrauliques.

En ce qui concerne le rendement des circuits hydrauliques, il demande une étude très poussée avec, si possible, refoulements *dirigés* (obliques) et augmentation progressive des diamètres par utilisation de conduites coniques, etc.

6.4.4 Facilité de l'exploitation ultérieure

Elle exige des groupes motopompes bien dégagés, d'accès facile, des couloirs suffisamment larges, des sous-sols encombrés au minimum, etc.

6.5 Conduites de refoulement

Pour leur conception, leur dimensionnement, leur construction, se référer à ce qui a été dit pour les conduites d'adduction et de distribution (§ 2).

6.5.1 Diamètre économique

Pour élever un débit connu à une hauteur manométrique donnée, il existe une infinité de solutions qui résultent de l'adaptation de la puissance de la pompe au diamètre et à la nature de la canalisation de refoulement, c'est-à-dire aux pertes de charge générées qui majorent la puissance d'élévation théorique nécessaire. Par contre, si l'on tient compte, d'une part, de l'investissement *conduite* qui croît avec le diamètre et, d'autre part, du *coût proportionnel* de l'énergie qui comprend une partie fixe (énergie théorique d'élévation) et une partie variable avec la perte de charge qui décroît avec le diamètre, on peut déterminer un **diamètre optimal au sens économique**.

Bresse a proposé l'approche ci-après. Il a supposé que le **prix de revient d'une canalisation** pouvait s'écrire :

$$P_1 = K_1 D L$$

avec D diamètre,
 L longueur.

Cela est approximativement vrai pour une variation relativement faible de D .

Il a posé que le prix de revient de la station élévatrice (investissement + dépenses d'exploitation actualisées) pouvait s'écrire :

$$P_2 = K_2 N$$

avec N puissance de la station.

Le **prix global** serait donc :

$$P = P_1 + P_2 = K_1 D L + K_2 N$$

Par un calcul simple de minimisation, il obtient la valeur optimale :

$$D = \left(\frac{8}{\pi} \right)^{1/3} \left(\frac{1000 \alpha K_2}{15 K_1 \eta} \right)^{1/6} Q^{1/2}$$

avec η rendement de la pompe,
 α coefficient de Chézy.

En négligeant le facteur sous puissance 1/6, on obtient :

$$D = 1,37 \sqrt{Q}$$

En tenant compte des valeurs courantes de son époque, apparaissant dans le terme sous puissance 1/6, Bresse a proposé :

$$D = 1,5 \sqrt{Q}$$

formule dont le mérite est de faire ressortir que le diamètre économique ne dépend ni de H ni de L .

Une autre conclusion simple s'applique à la vitesse optimale dans la conduite de refoulement :

$$V = 0,56 \text{ m/s}$$

Cette formule est très utile pour les études d'avant-projet sommaire. Le projet d'exécution (ou une étude de faisabilité) doit faire intervenir tous les paramètres en cause ainsi qu'une évaluation précise des investissements et des coûts d'exploitation, notamment de celui de l'énergie. Il faut également faire intervenir les facteurs de charge quotidiens ou saisonniers et les possibilités de modulation des tarifs de l'énergie (cf. article *Tarification de l'énergie électrique* dans le traité). Messieurs **Vibert** et **Koch** ont affiné l'approche de Bresse et proposé :

$$D = 1,547 (e/f)^{0,154} Q^{0,46} \text{ pour un pompage continu}$$

$$D = 1,35 (e/f)^{0,154} Q^{0,46} \text{ pour 10 h par jour}$$

avec e prix du kWh,
 f prix d'1 kg de fonte.

Maintenant que l'on dispose de moyens de calcul d'un accès et d'un emploi aisés, les formules affinées n'ont plus le même intérêt que naguère. La formule de Bresse garde sa signification pour une appréciation en ordre de grandeur ; pour une détermination précise, il est recommandé de faire le calcul approprié au cas d'espèce.

6.5.2 Service en route

On ne considère comme *service en route* que les distributions effectuées entre la partie amont de la conduite et le point où le branchement du réservoir se pique sur cette dernière.

Pour éviter des dépenses exagérées, le service en route peut être envisagé lorsque le diamètre de la conduite de refoulement ne dépasse par 250 à 300 mm, voire 400 mm, suivant les circonstances particulières.

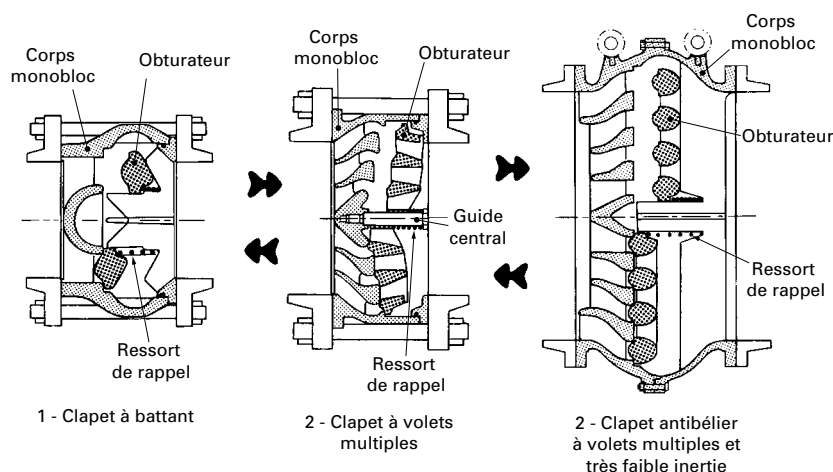
Lorsque l'on est amené à y recourir, il convient de prendre toutes dispositions utiles pour assurer la protection de la conduite, ainsi que celle des branchements piqués sur cette dernière, contre les surpressions éventuelles dues aux phénomènes oscillatoires.

Il convient, de même, de s'assurer de la stérilisation ou de la neutralisation des eaux prélevées avant le réservoir, lorsque ces opérations ne sont effectuées qu'après ce dernier.

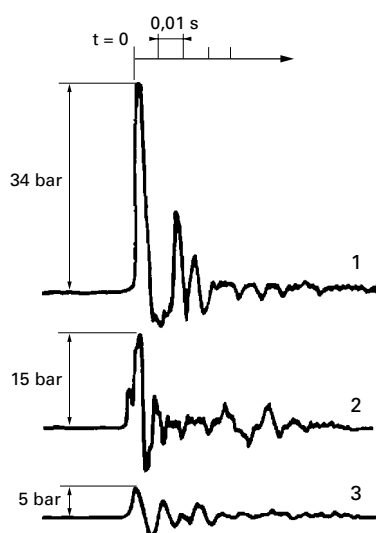
6.6 Évolution de la fonction et du matériel

6.6.1 Considérations générales

Les stations de pompage ont tendance à prendre une importance grandissante au fur et à mesure des années. En raison de l'abaissement continu du prix relatif de l'énergie et de la permanence assurée de sa fourniture, on peut noter une évolution vers une conception plus *dynamique* des schémas de captage, d'adduction et de distribution. Cette évolution est favorisée par les progrès de l'électronique, de l'automatisation, des capteurs d'état de fonctionnement et des microprocesseurs. Les systèmes de contrôle et de gestion centralisés, qui ont actuellement tendance à se développer, permettent, sans risque, de s'orienter vers une exploitation régulée automatiquement avec une recherche d'optimisation des coûts d'exploitation. Mais l'intérêt principal réside dans l'abaissement des coûts d'investissement.



(a) différents types de clapets



(b) enregistrements des réponses en pression

Figure 66 – Différents types de clapets à battant unique ou à volets multiples, avec les réponses en pression correspondantes
(d'après document Neyrtec)

6.6.2 Emploi des pompes à vitesse variable

Pour une station de pompage, les investissements relatifs au génie civil et aux équipements annexes (haute et basse tensions, tuyauterie, robinetterie, appareillage de mesure, etc.) sont sans commune mesure avec le coût des groupes élévatoires proprement dits. Le recours à la vitesse variable présente le premier et très gros avantage de réduire le nombre de groupes nécessaires sans pour cela compromettre la continuité de la pression fournie et le passage des pointes de consommation.

Les considérations de sécurité du service ne permettent pas d'aller jusqu'à la solution économiquement idéale qui serait le groupe unique. Dans les projets modernes, on constate une diminution très sensible du nombre de groupes, souvent en association avec la mise en place de surpresseurs (de puissance unitaire plus faible), souvent aussi à vitesse variable, disposés en certains points critiques du réseau.

6.6.3 Surpression

La surpression est employée lorsque la pression minimale dynamique d'un réseau dans une zone donnée est insuffisante pour obtenir une alimentation adéquate permanente aux points les plus critiques.

La surpression est une **station de pompage**, et on distingue différentes surpressions.

Surpressions hydropneumatiques : des réservoirs, remplis d'une quantité d'air formant matelas au-dessus d'une quantité d'eau surpressée fournie par les pompes, jouent un rôle de réservoirs tampon et assurent, par détente de l'air, l'alimentation à bonne pression pendant l'arrêt des pompes.

Surpressions directes ou de maintien de pression : une pompe « de maintien » permet de maintenir le réseau surpressé en pression et d'assurer les faibles débits des heures creuses ; une ou plu-

sieurs autres pompes assurent les débits supérieurs, toujours à la pression demandée.

Surpressions à vitesse variable : il s'agit d'obtenir des pompes une pression constante et un débit variable. On fait varier la vitesse de la pompe de base, les pompes annexes éventuelles pouvant être à vitesse fixe. La vitesse variable est obtenue soit par un moteur à vitesse fixe et un coupleur hydraulique électromagnétique entraînant la pompe à une vitesse variable, soit par moteur à vitesse variable.

6.6.4 Matériel

La tendance est à l'accroissement de la vitesse de rotation et de la hauteur de refoulement par étage, ce qui permet l'emploi plus fréquent de pompes monocellulaires plus robustes et d'entretien plus simple.

À l'aspiration, on place des inducteurs d'aspiration et, au refoulement, le diffuseur est remplacé par une volute dont le tracé hydrodynamique est plus satisfaisant.

La fonte nodulaire et le moulage de précision permettent une économie de fabrication et une meilleure résistance à l'érosion et à la cavitation.

Les constructeurs s'appliquent, lors de la conception des pièces constitutives, à favoriser la facilité de démontage sans dépose. Le bourrage traditionnel est remplacé par des garnitures mécaniques ne nécessitant pas l'intervention d'un personnel spécialisé.

La sûreté et la fiabilité très améliorées des groupes immergés incitent à leur utilisation pour des puissances de plus en plus importantes. Un calcul économique est cependant indispensable pour déterminer si leur rendement moins élevé est réellement compensé par les abattements, quelquefois considérables, obtenus dans les investissements globaux de la station. Il n'est pas sans importance de remarquer qu'ils permettent de réduire plus facilement un impact négatif sur l'environnement.

6.6.5 Tuyauterie et robinetterie

Sauf dans les très grandes stations de pompage où les conduites en béton sont d'un emploi fréquent, l'acier a supplanté la fonte mais sa protection contre la corrosion reste une préoccupation majeure ; c'est pourquoi apparaissent des réalisations en acier inoxydable, en plastique préfabriqué ou encore en polyester armé de fibres de verre.

Dans la robinetterie, les progrès visent l'étanchéité des fermetures où l'emploi des élastomères (figure **23b**) permet d'obtenir des résultats parfaits qui, par exemple pour les vannes à glissière, permettent l'abandon du dessin en *coin* de l'opercule et, dans le cas des clapets, conduisent à des réalisations sans axe de rotation, analogues à des valvules.

Il faut également mentionner les clapets à orifices multiples permettant de réduire les coups de bélier à la fermeture (figure **66**).