

RESEAUX HYDRAULIQUE

I. Système de distribution des eaux

Ce chapitre est consacré à la distribution des eaux potables dans un réseau de conduites. Nous énoncerons les objectifs fondamentaux à atteindre pour satisfaire la demande en termes de **pression** et de **débit**. Les méthodes de calcul seront décrites à partir des principes de base.

I.1. Méthodes d'alimentation du réseau

Le réseau d'aqueduc est un ensemble de conduites interconnectées fonctionnement **sous pression**. Il faut donc un système d'alimentation de ce réseau qui permette de fournir le débit de consommation variable à une pression relativement constante. Il existe plusieurs façons de réaliser cette alimentation, dont voici les principales:

I.1.1. Distribution gravitaire

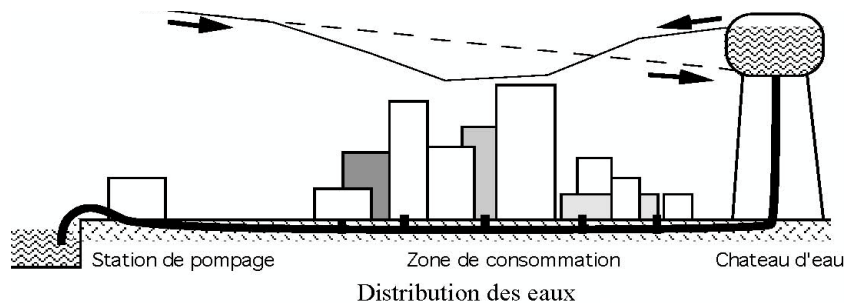
- ☞ Réseau branché sur un réservoir suffisamment élevé pour assurer **les débits et les pressions**.
- ☞ Méthode simple et la plus fiable si la conduite principale est bien protégée contre les bris accidentels.

I.1.2. Pompage combiné

- ☞ Pompage lors des périodes de basse consommation vers des réservoirs élevés.
- ☞ Méthode économique si le pompage est fait à rendement maximum.

I.1.3. Pompage direct

- ☞ Pompage direct dans le réseau.
- ☞ Méthode la moins avantageuse en raison des possibilités de panne de puissance, d'une variation et d'une distribution de la pression plus difficile et des coûts d'énergie surtout en pointe.



I.3. Pression à garantir

Une valeur de la pression située entre des extrêmes acceptables et ce pour l'ensemble du réseau constitue, à part bien sûr la capacité de fournir à la demande, le critère de base du dimensionnement correct pour atteindre l'efficacité du réseau.

I.4. Description du système de distribution

Un réseau de distribution peut avoir une forme ramifiée (fig. 5.3) ou une forme maillée (fig. 5.4) ce qui est plus courant. Les réseaux sont constitués des éléments suivants :

I.4.1. Aqueducs principaux

Ils servent à relier les stations de pompage aux réservoirs et constituent l'ossature principale du réseau. Ils forment des boucles d'environ 1000 m les conduites de distribution principales y sont connectées au moyen de vannes de coupures. Des vannes de cantonnement les découpent en tronçons et des soupapes de purge équipent les points hauts.

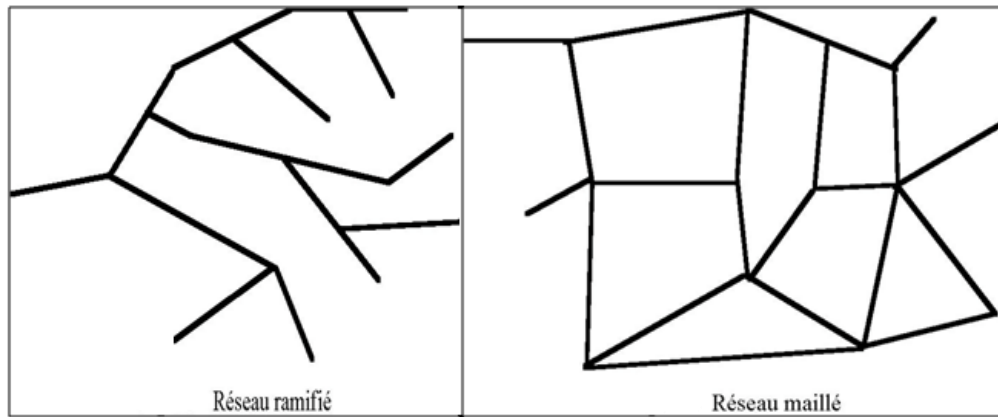
I.4.2. Aqueducs secondaires

Ils servent à relier les aqueducs principaux.

I.4.3. Conduites de distribution principales

Elles desservent les bornes-fontaines ou bouches d'incendie placées tous les 100 ou 150 m selon la densité du territoire.

Les conduites sont fabriquées en béton précontraint, en fonte ou en PVC et PEHD. Les diamètres sont calculés pour obtenir des vitesses de l'ordre de 0,6 à 1,2 m/s, 2 m/s au maximum en cas de feu. Ces diamètres sont en général de 15 cm en zone résidentielle, 20 cm en zone commerciale et 30 cm et plus dans les rues principales.



I. 5. Dimensionnement du réseau

Les points à considérer sont :

- La topographie des lieux pour les critères de pression
- La densité de la population et ses activités pour évaluer les besoins en eaux des différents secteurs résidentiels, commerciaux et industriels.

On résume en général toute information pertinente sur carte topographique, on évalue les consommations de chaque zone et les débits de feu de façon à déterminer la demande totale, la puissance de pompage requis, le volume et la position des réservoirs et les diamètres et longueurs des conduites.

Ensuite on procède au balancement hydraulique du réseau pour vérifier si, en fonction de plusieurs scénarios de consommation, normaux, extrêmes ou en période de basse consommation, la pression est bien répartie. Cette analyse permet d'apporter des correctifs si nécessaire. En outre, cette simulation du comportement du réseau permet d'étudier des possibilités de regroupement de service pour des municipalités voisines et des scénarios futurs de consommation pour mieux planifier l'expansion du réseau.

I.5.1. Conduites en série et en parallèle

Bien souvent, avant de faire l'analyse d'un réseau, il est nécessaire de le simplifier en regroupant en série ou en parallèle un certain nombre de conduites pour former des conduites équivalentes.

Pour les conduites en série:

- a) La perte de charge totale est égale à la somme des pertes de charge de chaque conduite :

$$h_T = h_1 + h_2 + \dots + h_j \quad (5.1)$$

b) Le débit est le même pour toutes les conduites :

$$Q_T = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_j \quad (5.2)$$

c) La perte de charge est liée au débit par une relation du type :

$$h = RQ^n \quad (5.3)$$

Où le coefficient R est la résistance de la conduite. Cette résistance ne dépend que des propriétés de la conduite c'est-à-dire la rugosité, le diamètre et la longueur.

Avec la formule de Darcy-Weisbach on a :

$$R = \frac{8fL}{\pi^2 g D^5} \quad \text{et } n = 2$$

Pour la de Hazen-Williams, on a :

$$R = \left(\frac{1}{C_{HW}^\beta} \right)^{1.85} \frac{L}{D^{4.87}} \quad \text{et } n = 1.85$$

β est coefficient d'unités ($\beta = 0.2785$ (SI))

Donc, en introduisant l'expression (5.3) dans (5.1) on obtient :

$$R_e Q_T^n = R_1 Q_1^n + R_2 Q_2^n + \dots + R_j Q_j^n$$

d'après (5.2) :

$$R_e Q_T^n = (R_1 + R_2 + \dots + R_j) Q_T^n$$

d'où:

$$R_e = R_1 + R_2 + \dots + R_j$$

Donc pour des conduites en série, la résistance équivalente s'exprime comme la somme des résistances de chaque conduite :

$$R_e = \sum_{i=1}^j R_i \quad (4.5)$$

Pour les conduites en parallèle :

a) Le débit total est égal à la somme des débits de chaque conduite:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_j \quad (5.5)$$

b) La perte de charge est la même pour toutes les conduites:

$$h_T = h_1 = h_2 = \dots = h_j \quad (5.6)$$

c) Le débit est lié au à la perte de charge par une relation du type:

$$Q = K h^m \quad (5.7)$$

où K est la conductance de la conduite. La conductance est liée à la résistance par la relation :

$$K = \frac{1}{R^m}$$

Avec $m = 1/n$.

Donc, en introduisant l'expression (5.7) dans (5.5) on obtient:

$$K_e h_T^m = K_1 h_1^m + K_2 h_2^m + \dots + K_j h_j^m$$

d'après (5.6):

$$K_e h_T^m = (K_1 + K_2 + \dots + K_j) h_T^m$$

d'où:

$$K_e = K_1 + K_2 + \dots + K_j$$

Donc pour des conduites en parallèle, la conductance équivalente s'exprime comme la somme des conductances de chaque conduite :

$$K_e = \sum_{i=1}^j K_i \quad (5.4)$$

I.5.2. Méthodes de balancement du réseau en régime permanent

Le principal problème qui se pose à l'ingénieur face à l'infrastructure de distribution des eaux consiste à connaître le comportement en pression de chaque élément du réseau lors de situations critiques (incendies), de période de forte demande ou encore en fonctionnement normal.

Le grand nombre de conduites et leur interconnexion qui caractérisent la structure d'un réseau maillé font qu'il n'est pas possible de calculer de façon simple et rapide, avec suffisamment de précision les pertes de charges et les débits dans toutes les conduites correspondant à une situation de consommation donnée. La raison en est relativement simple.

La distribution de débit dans le réseau est conditionnée par le principe de l'énergie minimum, ce qui a pour conséquence que la moindre modification du réseau entraîne une redistribution des débits. Comme on le voit, la solution du problème dépend simultanément de ce qui se passe dans chaque élément du réseau.

Une autre difficulté provient du fait que la relation qui décrit le lien entre le débit d'une conduite et la perte de charge qu'il entraîne est non linéaire ce qui ne simplifie pas non plus la tâche de l'ingénieur.

Principes de base :

Définitions préliminaires

- ☞ Un endroit où sont branchés ensemble plusieurs conduites, pompes, réservoirs ou autres équipements s'appelle un nœud.
- ☞ Un circuit fermé composé d'éléments constitutifs d'un réseau est appelé maille.

Un réseau est en équilibre lorsque la somme algébrique des débits Q (y compris le débit de consommation) aux nœuds est nulle et que, simultanément, la somme algébrique des pertes de charge h autour d'une maille s'annule. Ceci définit la loi des nœuds et la loi des mailles.

Loi des nœuds

$$\sum_{N=i,j,k,\dots} \varepsilon_N Q_N = 0 \quad (5.5)$$

Cette relation exprime le principe de conservation de la masse.

Loi des mailles

$$\sum_{M=i,j,k,\dots} \varepsilon_M h_M = 0 \quad (5.6)$$

Cette relation exprime le principe de conservation de l'énergie. Les variables ε_N et ε_M représentent respectivement le signe des débits Q_N des conduites i, j, k, etc qui sont connectées à un nœud et le signe des pertes de charge h_M des conduites i, j, k, etc qui sont constituent une maille selon la convention adoptée. Elles ne peuvent donc ne prendre que les valeurs -1 ou 1 .

Le débit est relié à la perte de charge par une relation de type :

$$h = RQ^n \quad (5.7)$$

ou inversement:

$$Q = \frac{1}{R^{\frac{1}{n}}} h^{\frac{1}{n}} = Kh^m \quad (5.8)$$

où R et n dépendant de la loi d'écoulement choisie (Darcy-Weisbach, Hazen-Williams...)

I.5.3 Méthodes de calcul

Le schéma général de la méthode de résolution de ce type de problème consiste à écrire au moyen de la loi des nœuds ou de la loi des mailles un nombre d'équations équivalent au nombre d'inconnues choisies.

On peut choisir de déterminer soit les débits Q dans les conduites, soit les pertes de charge h dans les conduites, soit les charges H aux nœuds. Dès que l'un de ces ensembles d'inconnues est déterminé, on peut facilement en déduire les deux autres grâce aux relations qui lient le débit à la perte de charge.

Le caractère non linéaire de ces relations est responsable de la non-linéarité du système à résoudre. Pour résoudre un système d'équations non linéaires, il faut le linéariser, ce qui conduit à une solution approximative. On procède alors par itérations pour améliorer la solution afin qu'elle se stabilise avec un certain degré de précision.

Plusieurs approches sont possibles et on peut les regrouper en trois grandes catégories :

- ☞ Méthodes de corrections successives ;
- ☞ Méthodes de corrections simultanées ;
- ☞ Méthodes directes.

1.5.3.1 Méthodes de corrections successives

a) Méthode de Hardy Cross par mailles

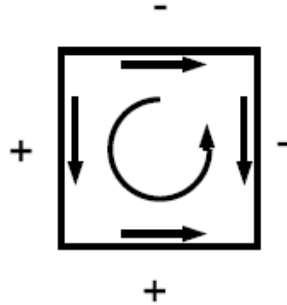
Cette méthode a un intérêt historique car elle a été développée avant l'invention des moyens de calcul électroniques. C'est une forme simplifiée de l'application d'une méthode de Newton-Raphson ce qui entraîne une dégradation de la convergence. Elle permet d'illustrer simplement les concepts, mais, à mon avis, elle ne devrait jamais être programmée sur ordinateur car les moyens de calcul actuels sont largement suffisants pour ne pas avoir à envisager cette simplification et gagner considérablement sur le plan de la convergence.

Cette méthode consiste à choisir les débits Q comme inconnues. On commence en choisissant un ensemble de débits initiaux Q_0 positifs qui satisfont la loi des nœuds puis on les corrige de façon à ce que les pertes de charge générées par ces débits tendent à satisfaire la loi des mailles et sans perturber la loi des nœuds (voir l'encadré des aspects théoriques plus loin).

- Pour chaque maille, correction des débits pour atteindre h_0 en introduisant $h_0 = RQ_0^n$

$$\Delta Q = \frac{- \sum_{M=i,j,k\dots} \varepsilon_M R_M Q_{0,M}^n}{\sum_{M=i,j,k\dots} n R_M Q_{0,M}^{n-1}} \quad (5.9)$$

Convention de signe, ε_M est positif lorsque le débit est dans le sens de parcours de la maille.



On applique la correction ΔQ de chaque maille aux débits des conduites constituant la maille en tenant compte du signe :

$$Q_M = Q_{0,M} + \varepsilon_M \Delta Q$$

Pour accélérer la convergence, on peut prendre comme Q_0 les valeurs déjà corrigées par des mailles précédentes.

Les corrections peuvent faire changer le signe du débit, deux possibilités s'offrent à nous :

- Modifier la valeur des ε_M de façon à refléter le changement
- Garder les débits négatifs et modifier la formule de correction pour les accepter :

$$\Delta Q = \frac{- \sum_{M=i,j,k\dots} \varepsilon_M R_M |Q_{0,M}^{n-1}| Q_{0,M}}{\sum_{M=i,j,k\dots} n R_M |Q_{0,M}^{n-1}|}$$

Sur le plan pratique la deuxième méthode est de loin préférable car la première méthode exige que la mise à jour des ε_M soit faite dans les mailles auxquelles appartient une conduite ce qui nous oblige à créer une table liant chaque conduite aux mailles auxquelles elle appartient.

Ceci n'est pas nécessaire pour la deuxième possibilité et c'est ce que nous allons adopter pour toutes les autres méthodes.

- On remplace Q_0 par Q et l'on continue d'appliquer le processus de correction jusqu'à ce que la loi des mailles soit respectée avec une précision suffisante sur toutes les mailles.

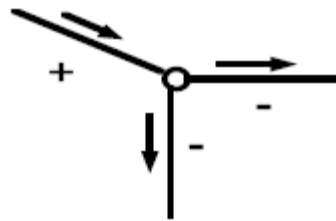
b) Méthode de Hardy Cross par nœuds

Cette méthode diffère de la précédente par son point de départ. On choisit plutôt les pertes de charge h comme inconnues. En voici les principales étapes :

- Choix des h_0 en respectant dans chaque maille. Ceci est direct si on choisit des charges H_0 à chaque nœud.
- Calcul des Q correspondant
- Correction des pertes de charge pour atteindre

$$\Delta h = \frac{- \sum_{N=i,j,k,\dots} \varepsilon_N Q_{0,N}}{\sum_{N=i,j,k,\dots} \left| \frac{Q_{0,N}}{n h_{0,N}} \right|} \quad (5.10)$$

- Convention de signe, ε_N est positif lorsque le débit arrive au nœud.



On applique, avec ε_N , la correction à chaque nœud successivement en tenant compte des corrections déjà apportées à certaines conduites.

$$h = h_0 + \varepsilon_N \Delta h$$

- On continue les corrections jusqu'à ce que la loi des nœuds soit respectée à chaque nœud avec une précision adéquate.

15.3.2 Méthodes de corrections simultanées

a) Méthode matricielle par mailles

C'est une méthode itérative matricielle qui permet de repartir sur l'ensemble du réseau les corrections ΔQ pour obtenir l'équilibre des pertes de charge (loi des mailles) à partir de débits initiaux Q_0 choisis en fonction de la loi des nœuds (voir Hardy Cross par mailles)

- On écrit le système d'équations non linéaires à partir de la loi des mailles auquel on applique la méthode de Newton-Raphson (voir encadré théorique) pour chaque maille:

$$\sum_{M=i,j,k\dots} \left(nR_M Q_{0,M}^{n-1} \Delta Q_M \right) = - \sum_{M=i,j,k\dots} \varepsilon_M R_M Q_{0,M}^n \quad (5.11)$$

M est l'indice des conduites participant à une maille.

On obtient donc autant d'équations qu'il y a de mailles et on a une inconnue par conduite.

Généralement le nombre de conduites est plus grand que le nombre de mailles. Il est donc nécessaire, pour résoudre le problème, de réduire le nombre d'inconnue.

Comme une conduite peut appartenir à au plus deux mailles, la réduction du nombre d'inconnues se fait en sachant qu'une conduite participant à deux mailles subit les corrections de chacune de ces mailles adjacentes :

$$\Delta Q_M = \Delta Q_A - \Delta Q_B \quad (5.11)$$

Cela revient à faire un changement de variables dans lequel chaque correction de débit appliquée à une conduite M est remplacée par la différence de corrections appliquées aux mailles A et B communes à la conduite M . Si une conduite n'appartient qu'à une maille, on lui attribue seulement la correction de cette maille. Le nombre d'inconnues devient donc égal au nombre de mailles et la résolution est alors possible.

Par exemple, pour une maille A adjacente aux mailles B et C , la relation (5.11) devient :

$$\left(\sum_{M=i,j,k\dots} nR_M Q_{0,M}^{n-1} \right) \Delta Q_A - nR_{AB} Q_{0,AB}^{n-1} - nR_{AC} Q_{0,AC}^{n-1} = - \sum_{M=i,j,k\dots} \varepsilon_M R_M Q_{0,M}^n$$

Où les indices AB et AC réfèrent aux conduites communes respectivement aux mailles A et B puis aux mailles A et C .

En pratique, le système est organisé sous forme matricielle, en tenant compte que les sens des débits ne seront pas mis à jour et que le débit gardera son signe, de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} \sum_A nR|Q_0|^{n-1} & -(nR|Q_0|^{n-1})_{AB} & \cdots & -(nR|Q_0|^{n-1})_{AM} \\ -(nR|Q_0|^{n-1})_{BA} & \sum_B nR|Q_0|^{n-1} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ -(nR|Q_0|^{n-1})_{MA} & \cdots & \cdots & \sum_M nR|Q_0|^{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_A \\ \Delta Q_B \\ \vdots \\ \Delta Q_M \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sum_A \varepsilon R|Q_0|^{n-1} Q_0 \\ \sum_B \varepsilon R|Q_0|^{n-1} Q_0 \\ \vdots \\ \sum_M \varepsilon R|Q_0|^{n-1} Q_0 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

- On résout ce système pour obtenir le vecteur des corrections de débits.
- On applique les corrections ΔQ de chaque maille aux débits des conduites constituant la maille en tenant compte du signe :

$$Q_M = Q_{0,M} + \varepsilon_A \Delta Q_A + \varepsilon_B \Delta Q_B$$

- On remplace Q_0 par Q et l'on continue d'appliquer le processus de correction jusqu'à ce que la loi des mailles soit respectée avec une précision suffisante sur toutes les mailles.

b) Méthode matricielle par nœuds

Cette méthode itérative permet de répartir sur l'ensemble du réseau les corrections Δh pour atteindre l'équilibre des débits à partir de pertes de charge initiales h_0 choisies en fonction de la loi des mailles. La procédure est semblable à la méthode matricielle par mailles et nous en donnons ici le résumé :

- Le système de N équations s'écrit

$$\sum_{N=i,j,k\dots} m K_N h_{0,N}^{m-1} \Delta h_N = - \sum_{N=i,j,k\dots} \varepsilon_N K_N h_{0,N}^m = \sum_{N=i,j,k\dots} \varepsilon_N Q_{0,N} \quad (5.14)$$

Où N représente les numéros de conduites branchées à un nœud, on a donc encore autant d'inconnues que de conduites et autant d'équations que de nœuds. Habituellement, il y a plus de conduites que de nœuds et il faut réduire le nombre d'inconnues.

On réduit le nombre d'inconnues sachant que la perte de charge sur une conduite est corrigée par chacune de ses extrémités A et B .

$$\Delta h_N = \Delta h_A - \Delta h_B \quad (5.15)$$

On obtient alors autant d'inconnues que de nœuds.

- Organisation matricielle

$$\begin{bmatrix} \sum_A mK |h_0|^{m-1} & (mK |h_0|^{m-1})_{AB} & \dots & (mK |h_0|^{m-1})_{AN} \\ (mK |h_0|^{m-1})_{BA} & \sum_B mK |h_0|^{m-1} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ (mK |h_0|^{m-1})_{NA} & \dots & \dots & \sum_N mK |h_0|^{m-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta h_A \\ \Delta h_B \\ \vdots \\ \Delta h_N \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \sum_A \varepsilon Q_0 \\ \sum_B \varepsilon Q_0 \\ \vdots \\ \sum_N \varepsilon Q_0 \end{Bmatrix} \quad (5.16)$$

On résout ce système pour obtenir le vecteur des corrections de pertes de charge.

- On applique les corrections Δh de chaque maille aux débits des conduites constituant la maille en tenant compte du signe :

$$h_N = h_{0,N} + \varepsilon_A \Delta h + \varepsilon_B \Delta h$$

- On continue les corrections jusqu'à ce que la loi des nœuds soit respectée à chaque nœud avec une précision adéquate.

II. Système d'assainissement urbaine (Collecte et évacuation des eaux usées et pluviales)

II.1. Définitions

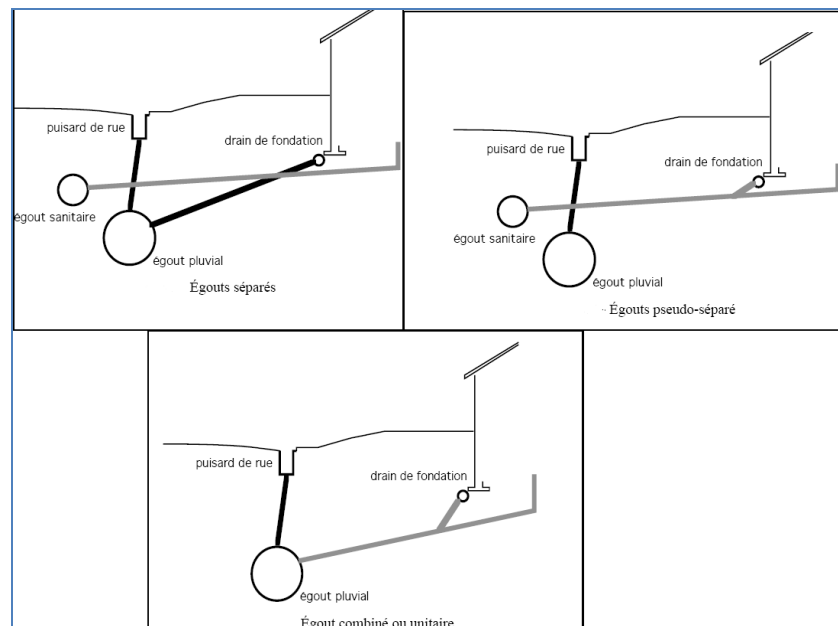
Les eaux à évacuer sont de trois types :

- Les eaux provenant des édifices, résidences, commerces, services, autrement appelées eaux usées domestiques.
- Les eaux industrielles qui nécessitent un traitement primaire avant le rejet à l'égout.
- Les eaux du ruissellement urbain.

Les systèmes d'évacuation sont composés principalement de conduites à écoulement à surface libre, de canaux et fossés, et accessoirement de poste de pompage pour refouler les eaux vers les collecteurs.

Habituellement, on considère trois catégories de systèmes d'évacuation, soit:

- L'égout combiné ou unitaire
- L'égout pseudo-séparatif
- L'égout séparatif composé d'un égout sanitaire et d'un égout pluvial



II.2. évaluation de débits à évacué

II.2.1. La méthode rationnelle

La technique de calcul des débits de ruissellement afin de calculer les diamètres ou les dimensions des conduites et canaux est basée sur la méthode rationnelle. Cette technique est utilisée depuis la fin du siècle dernier (1889).

Ce n'est pas à proprement parler une méthode de simulation car elle est basée sur une approximation pondérée par les temps de parcours du débit de pointe de l'hydrogramme. Cette approximation nous donne donc l'ordre de grandeurs des débits à véhiculer mais ne peut prévoir toutes les situations critiques.

La méthode rationnelle permet de calculer chaque débit de dimensionnement du réseau de drainage en commençant en tête du bassin:

$$Q = \frac{1}{360} C.I.A \quad (6.2)$$

où

Q = débit maximum de ruissellement en m³/s ;

A = aire du sous bassin en ha ;

C = coefficient de ruissellement ;

I = intensité de précipitation.

II.2.2. La méthode superficielle

La méthode rationnelle ne tient pas compte de la capacité de remplissage des réseaux. Caquot a établi la formule suivante :

$$Q_0 = k I^y C^z A^v$$

Q_0 = Débit de pointe en l/s

I = Pente évaluée en m/m (moyenne)

C = Coefficient de ruissellement pondéré

A = Superficie du bassin versant en Ha

y, z, v paramètres fonctions des caractérisation du bassin déterminés expérimentalement ; de la période de retour

k Coefficient fonction de la fréquence, obtenu expérimentalement

Période de retour « T »

formules superficielles

Dix ans

$$Q_0 = 1,430 I^{0,29} C^{1,20} A^{0,78}$$

Cinq ans

$$Q_0 = 1,192 I^{0,3} C^{1,21} A^{0,78}$$

Deux ans

$$Q_0 = 0,834 I^{0,31} C^{1,27} A^{0,77}$$

Un an

$$Q_0 = 0,632 I^{0,32} C^{1,23} A^{0,77}$$

Enfin cette expression est valable pour des bassins versant d'allongement moyen

II.3.1. Notions de base

Avant de procéder au dimensionnement du réseau sanitaire, il faut obtenir de l'information sur les débits maximum, moyen et minimum des secteurs à desservir.

Les normes prescrivent des vitesses d'écoulement comprises entre 0,6 et 4,5 m/s. Une pente minimale de 0,25% et un diamètre minimal de 200 mm.

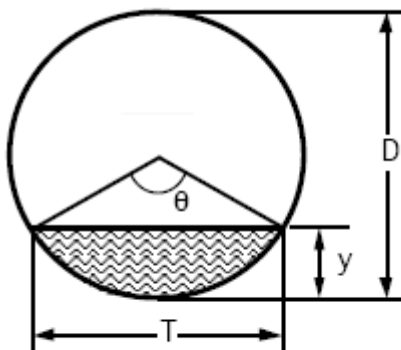
On devra aussi porter attention aux points suivants :

- Éviter les infiltrations et les fuites
- Réduire le plus possible les causes potentielles d'obstacles à l'écoulement
- Prévoir des accès pour l'entretien

II .3.2. Méthode de calcul des écoulements

L'écoulement étant à surface libre on emploie la formule de Manning, de plus on aura fréquemment à calculer des écoulements dans des conduites circulaires partiellement pleines (voir Figure ci-dessous)

Les relations suivantes seront donc fort utiles.



- Conduite circulaire partiellement pleine.

La relation entre la profondeur relative et l'angle au centre s'écrit :

$$\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = \left(1 - \frac{2y}{D}\right) \quad (6.21)$$

Le périmètre mouillé :

$$P = \frac{\theta D}{2} \quad (6.22)$$

L'aire de la section d'écoulement :

$$A = \frac{1}{8} (\theta - \sin(\theta)) D^2 \quad (6.23)$$

La largeur au miroir :

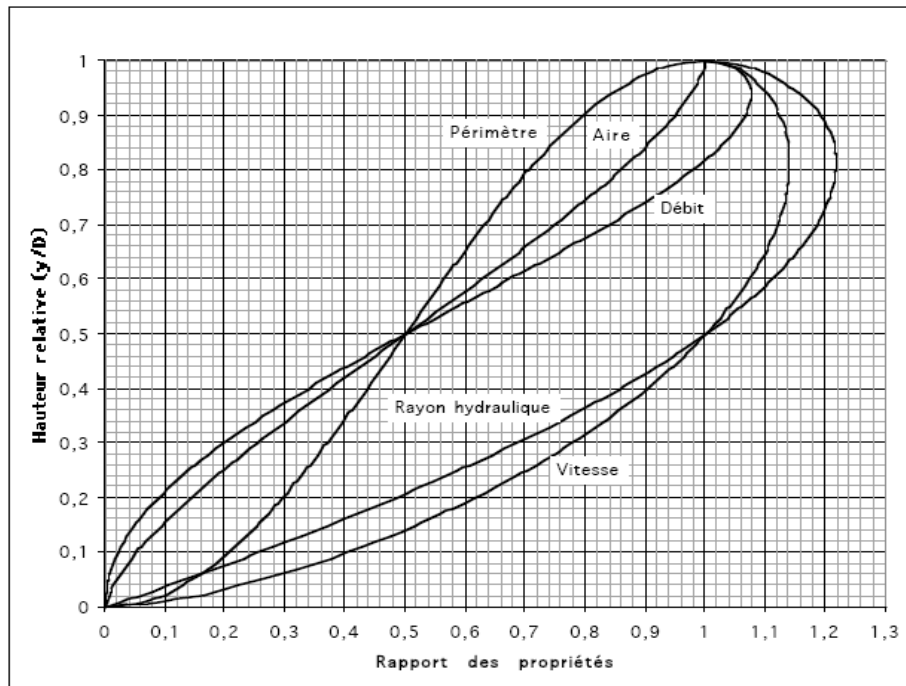
$$T = D \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (6.24)$$

Le rayon hydraulique :

$$R_h = \left(1 - \frac{\sin(\theta)}{\theta}\right) \frac{D}{4} \quad (6.25)$$

Avec θ en radians.

Ces relations permettent d'obtenir le graphique de la figure ci-dessous, Il permet d'obtenir les caractéristiques hydrauliques en fonction du rapport des hauteurs d'écoulement y/D , ce qui permet de simplifier les calculs en se référant à la conduite coulant pleine



Propriétés hydrauliques d'une section circulaire

❖ Dans ces conditions on a (formule de Chezy):

$$V = C\sqrt{R_H I}$$

$$Q = VS = CS\sqrt{R_H I}$$

- R_H rayon hydraulique
- S section mouillée
- V vitesse moyenne dans la section
- C coefficient de Chezy
- I pente (m/m)

Evaluation de C:

- $C = K_R R_H^{1/6}$ (Manning-Strickler)

- $C = \frac{87\sqrt{R_H}}{\gamma + \sqrt{R_H}}$ (Bazin)

II.3.3. Vitesse autonettoyante ou d'auto-curage

La vitesse minimale de 0,6 m/s, coulant en régime plein ($V_{10\%} = 0,6 \cdot V_p$), a été prescrite pour empêcher que les matières organiques se déposent dans les conduites ce qui risque de former des gaz nauséabonds, parfois toxiques et même pire, explosifs. Cette règle est considérée comme satisfaisante dans la pratique, cependant, si l'on désire plus de détails on peut utiliser une formule mettant en relation la vitesse, la taille des matières solides et leur densité.

III. L'Auscultation des réseaux Hydrauliques

Le choix des techniques de réhabilitation se fait sur la base d'une bonne connaissance de l'origine des dégradations. Afin d'établir un diagnostic de l'état physique de l'ouvrage, les observations et mesures d'auscultation sont réalisées à l'aide de techniques et avec des outils qui diffèrent selon qu'il s'agisse d'ouvrages visitables ou non.

Ces techniques d'auscultation de la structure, des interfaces et de l'environnement, peuvent être regroupées en quatre familles :

- 1- **visuelle,**
- 2- **géométrique,**
- 3- **géotechnique**
- 4- **mécanique (pour les réseaux visitables).**

A ces quatre familles, s'ajoutent d'autres tests qui nous renseignent sur l'étanchéité, les débits, la conformité des branchements... Dans tous les cas, les objectifs de l'auscultation doivent toujours être définis.

III.1. Auscultation visuelle

L'observation et le relevé de l'état intérieur des ouvrages sont réalisés directement par un personnel spécialisé, ou indirectement par enregistrement sur bande vidéo à l'aide d'une caméra. Ces inspections visuelles ou télévisées permettent de dresser l'état du fonctionnement et de la structure de l'ouvrage.

Les désordres et dégradations apparents doivent être :

- 1- Localisés (en distance par rapport à un point origine),
- 2- qualifiés (nature du défaut)
- 3- quantifiés (forme, orientation). Ces inspections visuelles et télévisées conditionnent la réalisation d'autres mesures d'auscultation

III.1.2. Inspection visuelle et inspection télévisée

Le curage préalable des canalisations conditionne l'efficacité de l'inspection. Compte tenu du défaut d'entretien de certains réseaux d'assainissement, il faudra souvent 2 ou 3 passages d'hydro-cureuse, parfois combinés avec un pompage, pour obtenir un état de propreté suffisant.

➤ Inspection visuelle des ouvrages visitables

L'inspection est réalisée par un technicien spécialisé du gestionnaire ou d'un bureau d'étude.

Les anomalies détectées sont repérées en coordonnées linéaires et en altitude par rapport au radier, et ce par longueur unitaire de 5 m maximum appelée section.

➤ Inspection télévisée (ITV) des ouvrages non visitables

L'inspection télévisée est un outil particulièrement adapté aux réseaux non visitables.

Dans le cadre de l'étude diagnostic, elle permet de vérifier l'état et le fonctionnement de l'ouvrage en service.

Les principaux défauts diagnostiqués par l'ITV (défauts structurels et/ou défauts fonctionnels d'étanchéité et d'hydraulicité) sont les suivants :

- Dépôts sur le radier (sable, résidus de béton),
- Variations de pentes matérialisées par la stagnation de l'eau ou variation du taux de remplissage
- Mises en charge partielles ou totales,
- Fissures transversales et longitudinales, casses,
- Absence de joints de butée,
- Trous de corrosion,
- Branchements pénétrants

IV. Les causes de dégradation des réseaux

L'environnement des canalisations génère un certain nombre de risques de dégradation. Ils peuvent être liés :

- ☞ Aux terrains (risques géotechniques et hydrogéologiques) ;
- ☞ À l'effluent transporté (risques hydrauliques) ;
- ☞ À l'ouvrage lui-même (risques structurels) ;
- ☞ Au milieu environnant (risques d'impacts).

IV.1. Risques géotechniques et hydrogéologiques

IV.1.1. Entraînement de fines

L'écoulement de l'eau dans un sable engendre des forces hydrodynamiques tendant à entraîner les éléments de sol dans le sens de l'écoulement.

IV.1.2. Tassement

- Tassement influant sur le profil en long de l'ouvrage

Ce type de tassement concerne les ouvrages réalisés dans des sols naturellement compressibles suivants :

- Alluvions constituées d'argiles molles, vases,
- Remblais récents mis en place sans compactage en particulier ceux qui renferment des matériaux évolutifs (matériaux organiques, plâtres...).

Par ailleurs, des tassements peuvent également se produire suite à de mauvaises conditions de mise en œuvre de l'ouvrage notamment :

- en cas d'absence de compactage de la zone d'enrobage ;

IV.1.3. Dissolution

Certains matériaux naturels, tels que le gypse, sont solubles dans l'eau. La dissolution conduit à la formation de cavités plus ou moins importants. Ceux-ci sont à l'origine de fissure, d'affaissement ou d'effondrement pour les conduites situées au-dessus ou dans des sols de ce type.

IV.1.4. Effondrement dû aux vides

L'existence d'un vide naturel ou artificiel souterrain peut entraîner des mouvements dans le sol sous-jacent et des efforts (cisaillement, flexion) sur la conduite qu'il renferme.

IV.1.5. Gonflement – retrait

Certaines argiles et marnes raides ont une tendance à changer de volume en fonction de leur teneur en eau. Pour une conduite qui traverse des terrains de cette nature, l'existence de cycles gonflement – retrait, causés par des fluctuations du niveau de la nappe phréatique ou par des cycles de sécheresses, peut se traduire par des soulèvements, des tassements et des efforts de compression à l'origine de déformation et de fissure de la structure.

IV.1.6. Glissement de terrain

Les glissements de terrains résultent de la rupture d'un massif lorsque la contrainte de cisaillement, au niveau de la surface de rupture, devient supérieure à la résistance au cisaillement du sol. Ils entraînent, le plus souvent la ruine des ouvrages.

IV.1.7. Sismicité

Ce risque reste très limité en zone métropolitaine. Il faut cependant le prendre en compte dans certaines régions exposées. L'importance des désordres tient aux facteurs suivants :

- Localisation géographique de l'ouvrage (zone de sismicité) ;
- Nature du terrain encaissant ;
- Vulnérabilité de la structure.

IV.2. Risques hydrauliques

IV.2.1. Action mécanique et physico-chimique de l'effluent

La vitesse de circulation de l'effluent et / ou la charge solide qu'il transporte provoque inévitablement une usure mécanique des matériaux constitutifs de l'ouvrage. Par ailleurs, la composition chimique de l'effluent peut exercer une action corrosive.

V.2.2. Action hydraulique

L'effluent exerce une charge hydraulique dynamique ou statique sur l'ouvrage. Lors de crues ou de taux de remplissage inhabituel, l'ouvrage peut également subir des charges hydrauliques pour lesquelles il n'a pas été conçu.

V.3. Risques structurels

V.3.1. Les charges statiques et dynamiques

Une canalisation est d'autant plus sensible aux charges dynamiques et statiques qu'elle est plus proche de la surface.

V.3.2. Maintenance

L'observation régulière et sérieuse des conduites est une condition impérative pour la prévention de sa dégradation et de ses dysfonctionnements. Sa négligence constitue un facteur de risque.

V.4. Risques d'impact du milieu

V.4.1. Modification des usages de surfaces

Une variation des charges réparties en surface peut entraîner un changement de comportement de la conduite par rapport aux conditions initiales de réalisation.

Les contraintes peuvent alors dépasser la résistance mécanique de l'ouvrage et entraîner des déformations telles qu'ovalisation, fissurations et même rupture.

V.4.2. Interaction avec le bâti

L'évolution des contraintes mécaniques sur la conduite par rapport aux conditions initiales de pose doit être considérée. La construction d'un ouvrage aérien ou souterrain à proximité d'une conduite peut engendrer la modification de l'état d'équilibre du complexe sol / structure. Une mauvaise réalisation des terrassements peut entraîner une décompression du sol avoisinant et un entraînement de fines s'il y a drainage du terrain

Exercice 1 :

Un tuyau en ciment de diamètre $d= 600$ mm transporte de l'eau sur une pente de $1/400$.
La profondeur d'eau est de 240 mm. Voir figure ci-contre.

- 1) Calculer le rapport du débit transporté ?

N.B : Prendre $n= 0,013$.

