

# Chapitre 3

## Les réservoirs et les châteaux d'eau

### 1. Introduction :

Dans ce troisième chapitre, on va présenter des généralités sur les réservoirs et les châteaux d'eau, leurs classifications et les différentes méthodes de calcul et de dimensionnement.

### 2. Définition :

Un réservoir est une enveloppe contenant un liquide ; ce liquide est généralement de l'eau, soit potable (réservoir d'eau des distributions publiques), soit usée (eau d'égouts).

Ces réservoirs peuvent être soit posés sur le sol, soit légèrement enterrés, soit sur des pylônes de grandes hauteurs (châteaux d'eau)

Le réservoir est un ouvrage hydraulique de stockage d'eau, soit à la consommation publique ou à usage industriel.



Figure 1 : les réservoirs d'eau

### 3. Exigences technique à satisfaire dans la construction d'un réservoir :

Un bon réservoir doit satisfaire aux conditions suivantes :

- Résistance : le réservoir doit équilibrer en toutes ces parties les efforts auxquels il est soumis.
- Etanchéité : les parois de réservoir doivent être étanches pour éviter les fuites d'eau
- Durabilité : le réservoir doit durer dans le temps ; dans ce cas le béton doit conserver ces propriétés initiales.

### 4. Classification des réservoirs :

Les réservoirs peuvent être classés selon :

#### 4.1. La position du réservoir par rapport au sol :

- Réservoirs construits au niveau de sol ou peu enterré

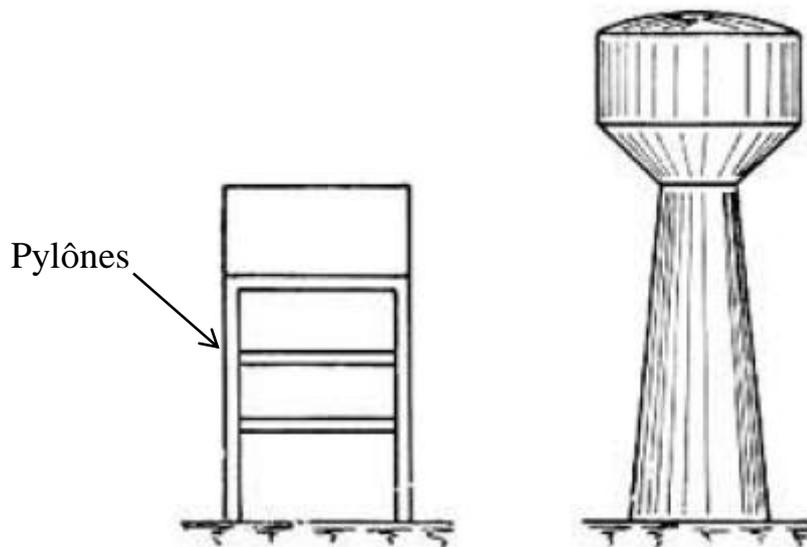


Au niveau de sol

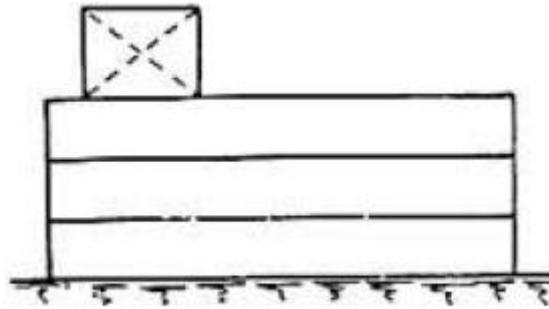


Semi-enterré

- Sur pylônes : les châteaux d'eau



- Sur bâtiment : pour alimenter par exemple un bâtiment



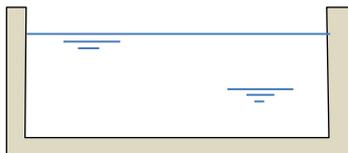
Réservoir sur un bâtiment

#### 4.2. La forme :

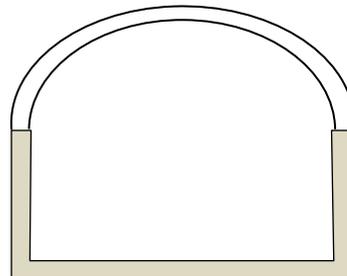
- Les réservoirs carrés ; rectangulaires ; circulaires ; de forme quelconque

#### 4.3. Le mode de fermeture :

- Les réservoirs non couverts (Bassins)
- Les réservoirs couverts



Bassin



Réservoir

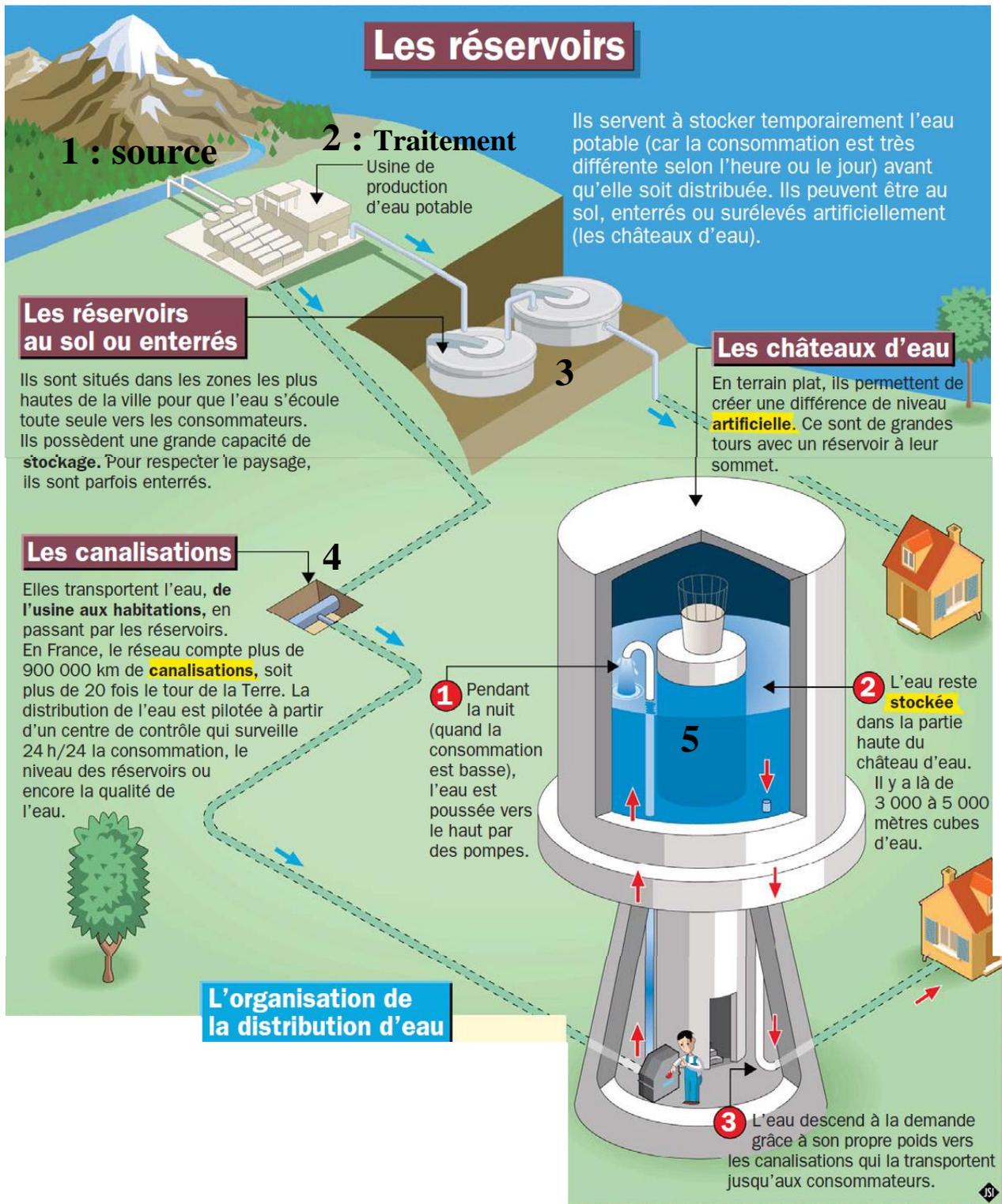
#### 4.4. Matériaux de construction :

- Métallique
- En béton armé
- En maçonnerie
- En béton précontraint

#### **Remarque :**

L'emplacement du réservoir doit être à un niveau supérieur à celui de l'agglomération (on a une alimentation gravitaire). Lorsque le terrain ne présente pas de points assez hauts, on construit un château d'eau.

#### **5. Organisation de la distribution de l'eau :**



## 6. Equipement de réservoirs :

- Conduite d'arrivée ou d'alimentation (d'adduction)
- Conduite de départ ou de distribution
- Conduite de vidange

- Conduite de trop plein (pour évacuer l'excès d'eau en cas de défaillance du système d'arrêt).

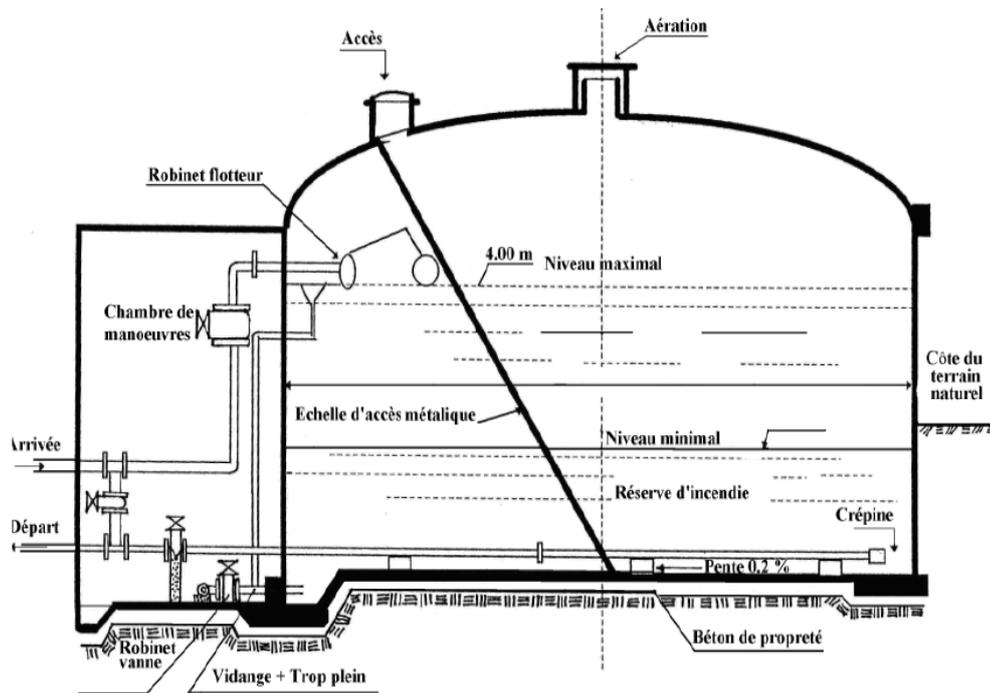
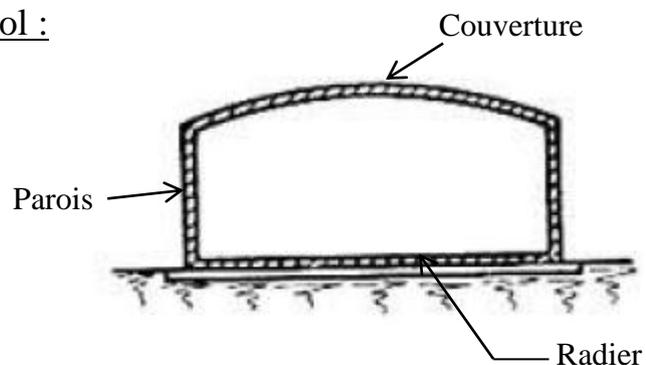


Figure 3 : Réservoir semi enterré cylindrique et ses équipements

## 7. La constitution générale des réservoirs :

### 7.1. Réservoirs circulaire posés sur le sol :

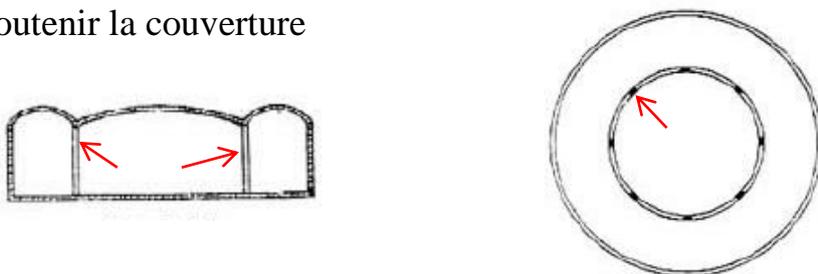
- Un radier plein
- Des parois en BA
- Une couverture



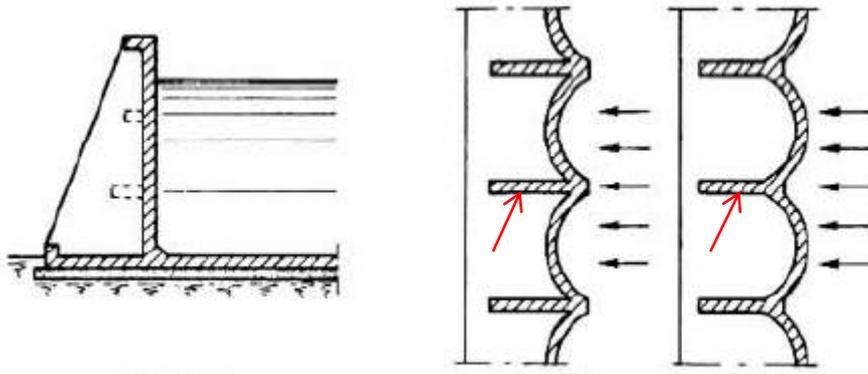
Le radier peut être nervuré



En cas d'un réservoir de grande dimension ( $D > 30$  m) ; on ajoute des poteaux pour soutenir la couverture



Pour renforcer les parois (cas de très grande réservoirs) ; on ajoute des contreforts



### 7.2. Réservoirs sur pylônes (châteaux d'eau) :

Le château d'eau comporte trois éléments :

- La cuve
- Les pylones
- Les fondations

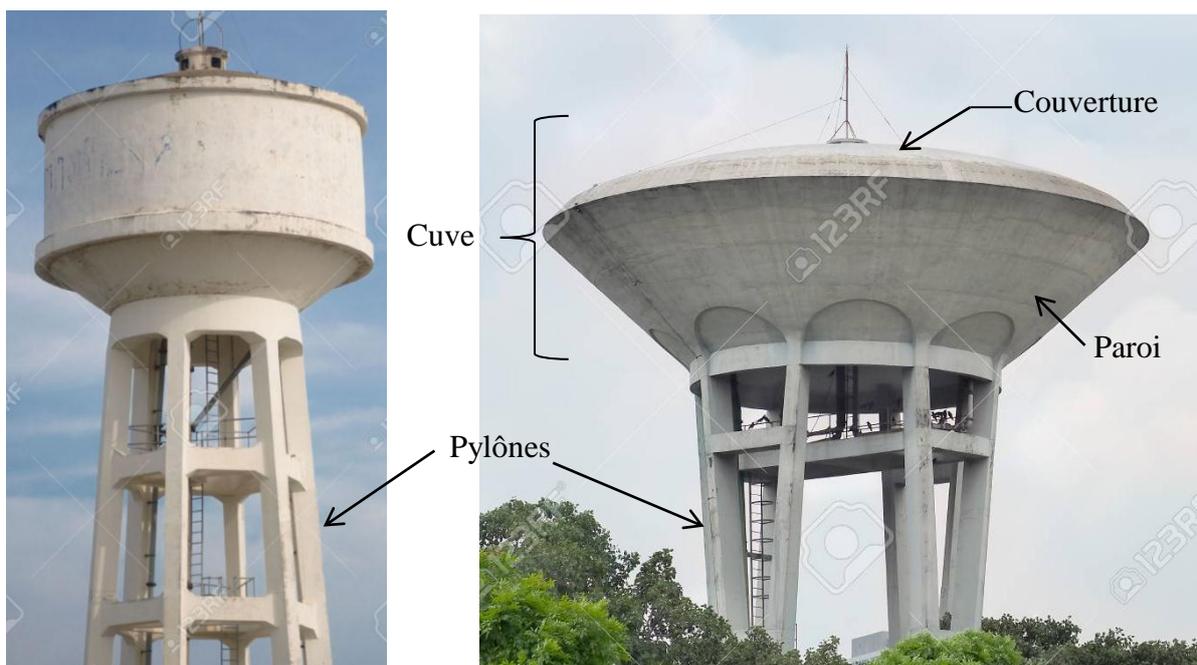


Figure 4 : les châteaux d'eau

**La cuve** : elle comporte : la couverture, les parois et le fond

**La couverture** peut être constituée par :

1. Un cône
2. Un cône et une coupole
3. Une dalle plate

#### 4. Une coupole sphérique ou parabolique



Figure 5 : La couverture

**Les parois :** les parois peuvent prendre plusieurs formes :

- Cylindrique
- Conique
- Tronconique
- Hyperbolique

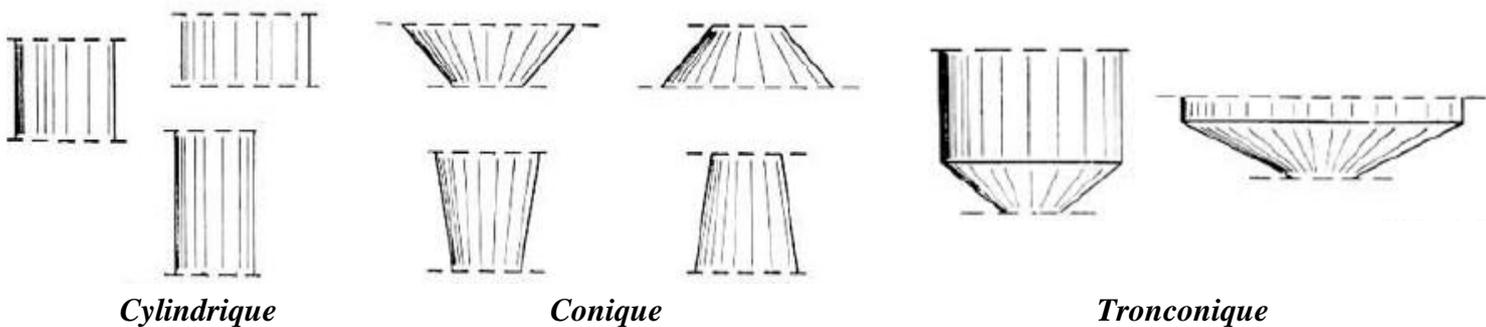
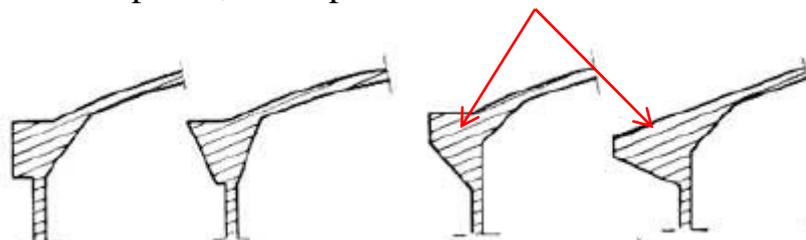


Figure 6 : Les parois

A la jonction couverture paroi ; on dispose une ceinture circulaire



**Le fond :** est constitué d'une dalle pleine en BA de forme plane ou coupole

**Les pylônes :** c'est le support de la cuve, et qui peut prendre deux formes ; *pylône sur poteaux* ou *pylône sur tour*

*Pylones sur poteaux :* leur nombre est de 4 à 8, ils peuvent être verticaux ou inclinés.

*Pylônes sur tour* : ils peuvent être constitués d'un simple voile mince d'épaisseur constante ou variable, ou un voile mince mené des nervures verticales



Figure 5 : châteaux d'eau (pylône sur tour)

## 8. Détermination de la capacité d'un réservoir :

Généralement, les réservoirs doivent avoir une capacité de stockage suffisante pour alimenter une agglomération de manière constante.

Le volume de stockage d'un réservoir peut être calculé par la formule suivante :

$$V_{max} = P_{max}(\%) \frac{Q_{maxj}}{100}$$

$P_{max}$  : Contenu de l'eau restant dans le réservoir calculé pour chaque heure (%)

$Q_{maxj}$  : Consommation maximale journalière ( $m^3$ )

$V_{max}$  : Volume max de stockage

Avec :

$$Q_{maxj} = K_{maxj} \cdot Q_{moyj}$$

$K_{maxj}$  : Coefficient d'irrégularité journalière max (dépend de la variation de la consommation dans le temps, les fuites, le gaspillage...)

$$1.1 < K_{maxj} < 1.3$$

$Q_{moyj}$  : Consommation moyenne journalière ( $m^3/j$ )

$$Q_{moyj} = \frac{\sum q \cdot N_i}{1000}$$

$q$  : la quantité d'eau journalière pour les différents besoins (domestique, écoles, sanitaire, administration, socio-culturelle...)

$N_i$  : Nombre d'habitation à l'horizon donné

Besoins	Dotation l/jour/habitant
Domestique	150 à 200
Ecoles	10 à 20
Sanitaires	5 à 10
Administration	10

Exemple :

Besoins	Dotation l/jour	Nombre de consommateur
Domestique	150	2000
Ecoles	20	300
Sanitaires	10	50

$$Q_{moyj} = \frac{2000 \cdot 150 + 300 \cdot 20 + 50 \cdot 10}{1000} = 306,5 \text{ m}^3/j$$

Donc :

$$Q_{maxj} = K_{maxj} \cdot Q_{moyj} \text{ : avec } (K_{maxj} = 1,3)$$

$$Q_{maxj} = 1,3 \cdot 306,5 = \mathbf{398,45 \text{ m}^3/j}$$

Pour calculer  $P_{max}$ , il faut calculer le volume cumulé d'alimentation (d'entrée) et le volume de consommation pour chaque heure.

$$P_{max} = \max(|\Delta V^+| - |\Delta V^-|)$$

heure	Volume d'alimentation	Volume consommé	$\Delta V$
1			
2			
3			
.			
.			

Si on prend par exemple  $P_{max} = 20\%$

$$V_{max} = 20 \frac{398,45}{100} = 80 \text{ m}^3 \quad \text{On adopte } 100 \text{ m}^3$$

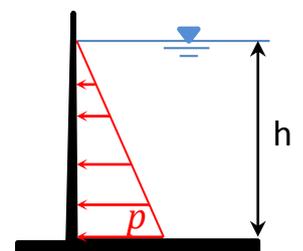
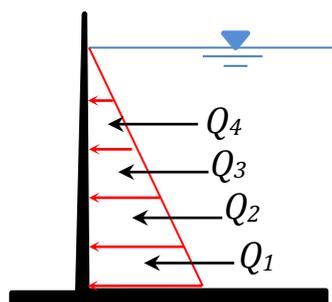
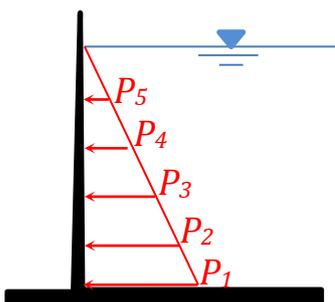
## 9. Méthode de calcul des réservoirs :

### Réservoir circulaire posé sur le sol :

La pression due à l'eau à la base de réservoir peut être calculée par :

$$p = \gamma_w \cdot h$$

On a le calcul classique qui consiste à diviser la paroi en tranches de 1 m de hauteur à partir de bas. Chaque tranche est soumise à une charge trapézoïdale calculée par :



$$Q_1 = \frac{P_1 + P_2}{2}$$

$$Q_2 = \frac{P_2 + P_3}{2}$$

$$Q_3 = \frac{P_3 + P_4}{2}$$

Donc chaque bande sera tendue avec un effort tangentiel de :

$$T = Q \frac{D}{2}$$

D : diamètre de réservoir

La section d'acier est :

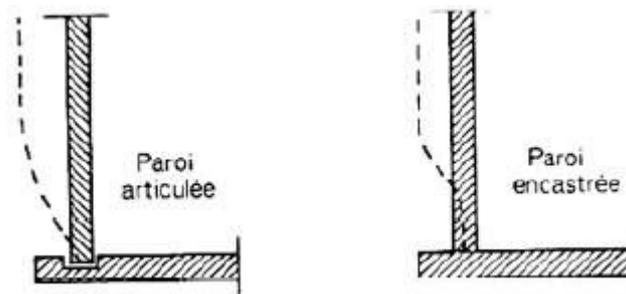
$$A = \frac{T}{\sigma_{st}}$$

$\sigma_{st}$ : Contrainte de traction de l'acier

Pour calculer l'épaisseur de la paroi  $e$ , il faut que :  $\sigma_{st} \geq \frac{T}{100 e + n A}$

Avec  $n = 15$

- Cette méthode néglige l'influence du radier et de la couverture qui empêchent la déformation des parois sous l'influence des efforts tangents.



Généralement le radier de réservoir est parfaitement encastree en bas ; la distribution des moments est schématisée sur la figure ci-dessous :

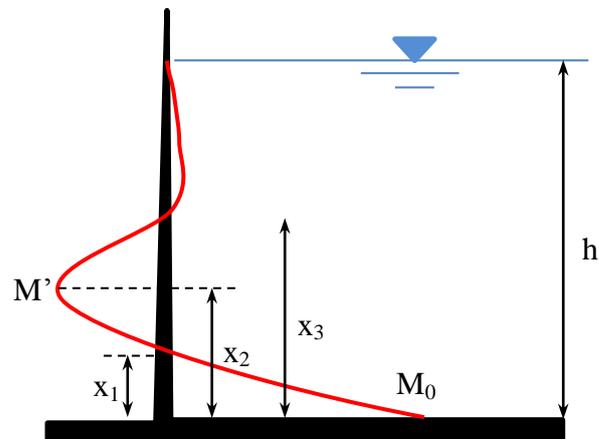


Diagramme des moments

#### A. Méthode de Lossier :

$$M_0 = 0,29 \sigma_b e^2$$

$$M' = 0,26 \sigma_b e^2$$

$$x_1 = 0,8 n \quad (\text{position de moment nul})$$

$$x_2 = 1,6 n \quad (\text{position de moment } M')$$

Le point à partir duquel l'influence de radier est pratiquement nulle est :

$$x_3 = 2,4 n$$

Avec :

$$n = \sqrt{\frac{e D}{3,464}}$$

$$\sigma_b = \frac{h B}{e} \quad (\text{contrainte de traction dans le béton})$$

D : diamètre de réservoir

e : l'épaisseur de la paroi

### B. Méthode de Lebel :

On calcule  $\frac{h^2}{e D}$

On calcule l'effort de traction pour chaque tranche :

$$T = \gamma \cdot \gamma_w \cdot h \cdot R$$

**Tableau 1: donne la valeur de  $\gamma$  en fonction de  $Z/h$  et  $h^2/eD$**

$z/h$ $h^2/eD$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,4	+ 0,474	+ 0,440	+ 0,395	+ 0,352	+ 0,308	+ 0,264	+ 0,215	+ 0,165	+ 0,111	+ 0,057
0,8	+ 0,423	+ 0,402	+ 0,381	+ 0,358	+ 0,330	+ 0,297	+ 0,249	+ 0,202	+ 0,145	+ 0,076
1,2	+ 0,350	+ 0,355	+ 0,361	+ 0,362	+ 0,358	+ 0,343	+ 0,309	+ 0,256	+ 0,186	+ 0,098
1,6	+ 0,271	+ 0,303	+ 0,341	+ 0,369	+ 0,385	+ 0,385	+ 0,362	+ 0,314	+ 0,233	+ 0,124
2,0	+ 0,205	+ 0,260	+ 0,321	+ 0,373	+ 0,411	+ 0,434	+ 0,419	+ 0,369	+ 0,280	+ 0,151
3,0	+ 0,074	+ 0,179	+ 0,281	+ 0,375	+ 0,449	+ 0,506	+ 0,519	+ 0,479	+ 0,375	+ 0,210
4,0	- 0,017	+ 0,137	+ 0,253	+ 0,367	+ 0,469	+ 0,545	+ 0,579	+ 0,553	+ 0,447	+ 0,250
5,0	- 0,008	+ 0,114	+ 0,235	+ 0,356	+ 0,469	+ 0,562	+ 0,617	+ 0,606	+ 0,503	+ 0,294
6,0	- 0,011	+ 0,103	+ 0,223	+ 0,343	+ 0,463	+ 0,566	+ 0,639	+ 0,643	+ 0,547	+ 0,327
8,0	- 0,015	+ 0,096	+ 0,208	+ 0,324	+ 0,443	+ 0,564	+ 0,661	+ 0,697	+ 0,621	+ 0,386
10,0	- 0,008	+ 0,095	+ 0,200	+ 0,311	+ 0,428	+ 0,552	+ 0,666	+ 0,730	+ 0,678	+ 0,433
12,0	- 0,002	+ 0,097	+ 0,197	+ 0,302	+ 0,417	+ 0,541	+ 0,664	+ 0,750	+ 0,720	+ 0,477
14,0	0,000	+ 0,098	+ 0,197	+ 0,299	+ 0,408	+ 0,531	+ 0,659	+ 0,761	+ 0,752	+ 0,513
16,0	+ 0,002	+ 0,100	+ 0,198	+ 0,299	+ 0,403	+ 0,521	+ 0,650	+ 0,764	+ 0,776	+ 0,543

Calculer la section pour chaque  $Z/h$  :

$$A = T / \sigma_{st}$$

Le moment vertical pour chaque  $Z/h$  :

$$M = \gamma' \cdot \gamma_w \cdot h^3$$

**Tableau 2: donne la valeur de  $\gamma'$  en fonction de  $Z/h$  et  $h^2/eD$**

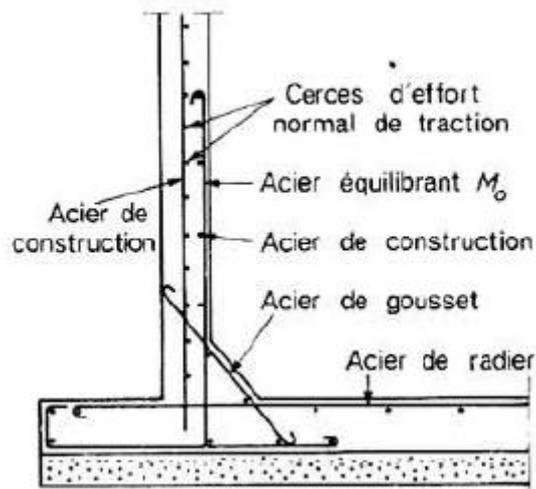
$h^2/eD \backslash z/h$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,4	+ 0,0005	+ 0,0014	+ 0,0021	+ 0,0007	- 0,0042	- 0,0150	- 0,0302	- 0,0529	- 0,0816	- 0,1205
0,8	+ 0,0011	+ 0,0037	+ 0,0063	+ 0,0080	+ 0,0070	+ 0,0023	- 0,0068	- 0,0224	- 0,0465	- 0,0795
1,2	+ 0,0012	+ 0,0042	+ 0,0077	+ 0,0103	+ 0,0112	+ 0,0090	+ 0,0022	- 0,0108	- 0,0311	- 0,0602
1,6	+ 0,0011	+ 0,0041	+ 0,0075	+ 0,0107	+ 0,0121	+ 0,0111	+ 0,0058	- 0,0051	- 0,0232	- 0,0505
2,0	+ 0,0010	+ 0,0035	+ 0,0068	+ 0,0099	+ 0,0120	+ 0,0115	+ 0,0075	- 0,0021	- 0,0185	- 0,0436
3,0	+ 0,0006	+ 0,0024	+ 0,0047	+ 0,0071	+ 0,0090	+ 0,0097	+ 0,0077	+ 0,0012	- 0,0119	- 0,0333
4,0	+ 0,0003	+ 0,0015	+ 0,0028	+ 0,0047	+ 0,0066	+ 0,0077	+ 0,0069	+ 0,0023	- 0,0080	- 0,0268
5,0	+ 0,0002	+ 0,0008	+ 0,0016	+ 0,0029	+ 0,0046	+ 0,0059	+ 0,0059	+ 0,0028	- 0,0058	- 0,0222
6,0	+ 0,0001	+ 0,0003	+ 0,0008	+ 0,0019	+ 0,0032	+ 0,0046	+ 0,0051	+ 0,0029	- 0,0041	- 0,0187
8,0	0,0000	+ 0,0001	+ 0,0002	+ 0,0008	+ 0,0016	+ 0,0028	+ 0,0038	+ 0,0029	- 0,0022	- 0,0146
10,0	0,0000	0,0000	+ 0,0001	+ 0,0004	+ 0,0007	- 0,0019	+ 0,0029	+ 0,0028	- 0,0012	- 0,0122
12,0	0,0000	- 0,0001	+ 0,0001	+ 0,0002	+ 0,0003	+ 0,0013	+ 0,0023	+ 0,0026	0,0005	- 0,0104
14,0	0,0000	- 0,0000	0,0000	0,0000	+ 0,0001	+ 0,0008	+ 0,0019	+ 0,0023	0,0001	- 0,0090
16,0	0,0000	- 0,0000	0,0001	- 0,0002	0,0001	+ 0,0004	+ 0,0013	+ 0,0019	+ 0,0001	0,0079

Vérifier la contrainte de traction de béton :

$$\sigma_{st} \geq \frac{T}{100 e + n A}$$

$z/h$	$z$	$\gamma$	$T$ (daN)
0,10	0,48	0,098	2 840
0,20	0,96	0,201	5 800
0,30	1,44	0,309	8 900
0,40	1,92	0,424	12 250
0,50	2,40	0,546	15 750
0,60	2,88	0,633	18 200
0,70	3,36	0,648	18 700
0,80	3,84	0,517	14 800
0,90	4,32	0,226	6 520

$z/h$	$\gamma'$	$M$ (mdaN)
1,0	- 0,0097	- 1 070
0,9	- 0,0003	- 33
0,8	+ 0,0024	+ 26,6
0,7	+ 0,0021	+ 232
0,6	+ 0,0009	+ 100
0,5	+ 0,0002	+ 22
0,4	+ 0,0001	+ 10
0,3	+ 0,00005	+ 5
0,2	+ 0,00002	+ 2
0	0	0



## Chapitre 4. Les coupoles

### Définition :

Une coupole est une voûte hémisphérique, ou elliptique ou polygonale. Les grandes coupoles hémisphériques sont apparues dans l'architecture Romaine.

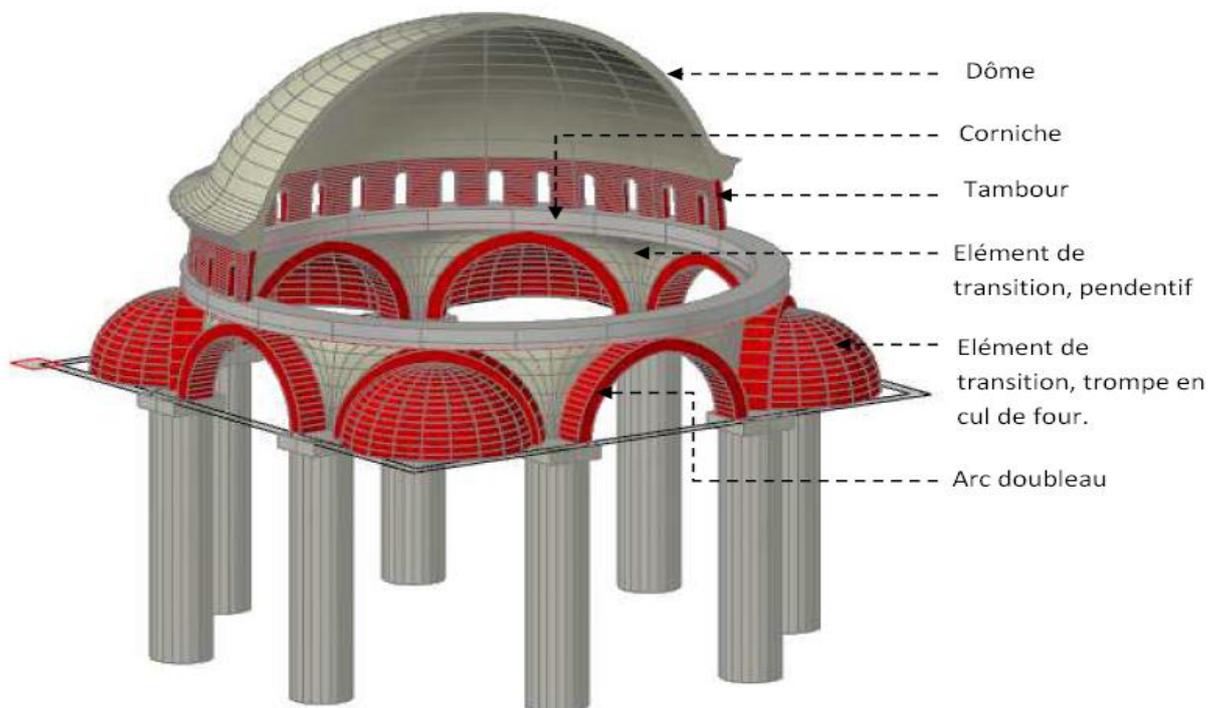


Figure 1. modèle 3D d'une coupole Islamique

## Les éléments principaux d'une coupole :

A. **Les arcs doubles** : qui relient d'une pile à l'autre

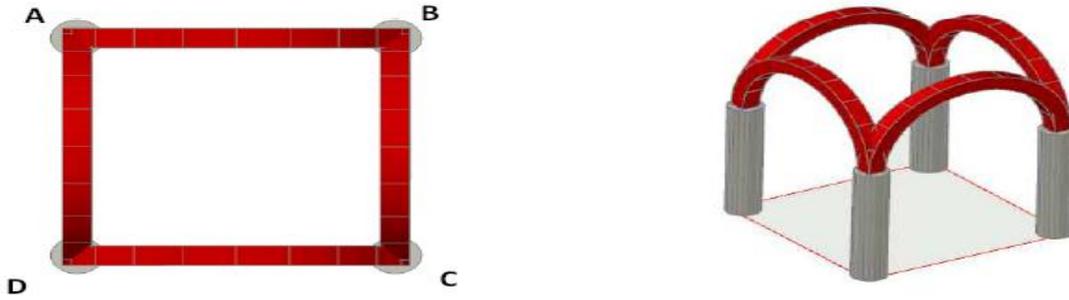


Figure 2. Arcs doubleaux d'une coupole

B. **Éléments de transition** :

- Pendentif : triangle qui se trouve entre les arcs :

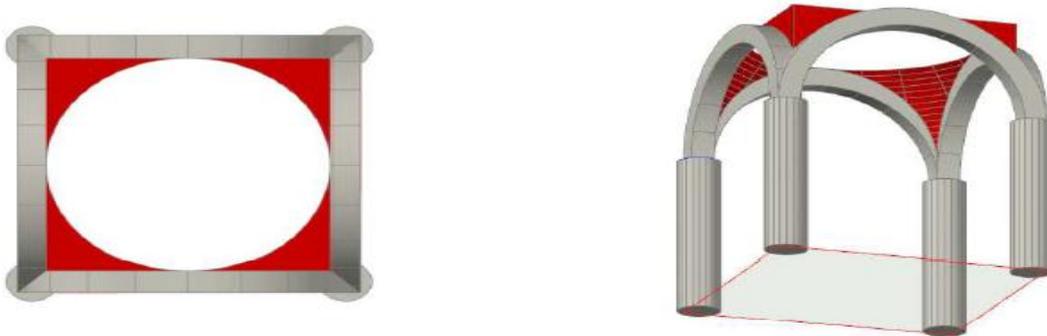


Figure 3. pendentifs

- Trompe (figure 1)

C. **Dômes** : les techniques utilisées pour le couvrement des coupoles :

- Coupole à nervures rayonnantes
- Coupole à nervures entrecroisées

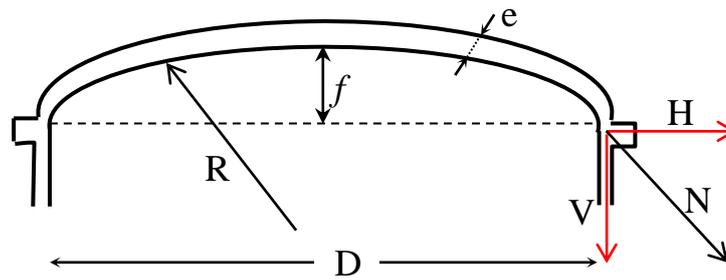


Figure 4. Coupole à nervures rayonnantes.



Figure 5. Coupole à nervures entrecroisées.

## Coupoles en béton armé :



$e$  : l'épaisseur de la coupole (couverture)

$R$  : rayon de la courbure

$f$  : la flèche

$D$  : diamètre

La surface d'une coupole est :

$$S = 2\pi R f$$

Avec :

$$R = \frac{D^2 + 4f}{8f}$$

Calcul des charges :

$$P = G + Q$$

$$G = e \cdot \gamma_{\text{béton}}$$

$$Q = \text{charge de la neige}$$

Poids de la coupole :

$$P_{\text{coupole}} = P \cdot S$$

Calcul des efforts :

$$H = \frac{P(r^4 - f^4)}{4 f r^2} \quad V = \frac{P f (r^2 - f^2)}{2 f r}$$

Avec :  $r$  est le rayon de la coupole

L'effort normal de compression  $N$  :

$$N = \sqrt{H^2 + V^2}$$

Le ferrailage :

$$A_s = \frac{\gamma_s}{f_e} \left[ \frac{N}{\Delta} - B_r \frac{f_{c28}}{0,9\gamma_b} \right]$$

$$\gamma_s = 1,15$$

$$\gamma_b = 1,5$$

$$\Delta = 1$$

$$B_r = (h - 0,02)(b - 0,02) \quad b * h = 1m * 1m$$



Exemple d'un ferrailage d'une coupole

**Exemple :**

$$D = 12m$$

$$\text{Neige} = 0,5 \text{ kN/m}^2$$

$$e = 7cm$$

$$\text{Rayon de courbure} = 16,96 \text{ m}$$

$$\text{flèche} = 1,1m$$

➤ calculer le poids de la coupole ?