

Stockage de l'eau : ouvrages en béton

Contraintes et dimensionnement

par **Bruno DUCROT**

*Ingénieur de l'École Centrale de Lyon
Ingénieur-Conseil*

Bernard FARGEOT

Ingénieur-Conseil

et **Gérard MATHIEU**

*Chargé de recherches au Cemagref
(Centre national du machinisme agricole du génie rural des Eaux et Forêts)*

1. Types d'ouvrages concernés.....	C 3 671 - 2
2. Classement des ouvrages	— 2
3. Contraintes à prendre en compte	— 3
3.1 Contraintes liées au contenu	— 3
3.2 Contraintes liées au contenant.....	— 5
3.3 Contraintes liées à l'exploitation.....	— 5
3.4 Contraintes liées à l'environnement	— 6
4. Actions. Sollicitations. Règles de calcul.....	— 7
4.1 Ouvrages en béton armé	— 7
4.2 Ouvrages en béton précontraint	— 7
5. Caractères des ouvrages courants.....	— 9
5.1 Châteaux d'eau. Réservoirs. Cuves. Bassins.....	— 9
5.2 Ouvrages de transport de l'eau	— 10
6. Dispositions constructives.....	— 10
6.1 Ouvrages en béton armé	— 10
6.2 Ouvrages en béton précontraint	— 12
6.3 Dispositions particulières à certaines parties d'ouvrages.....	— 13
6.4 Exemples de dispositions constructives.....	— 14
Pour en savoir plus.....	Doc. C 3 674

Les responsables du fonctionnement d'un ouvrage de traitement et de stockage d'un service public de distribution d'eau, ou d'un ouvrage d'épuration et d'assainissement d'eaux usées, qu'ils soient propriétaires ou gestionnaires, doivent définir très clairement :

a) les objectifs à atteindre, en particulier l'étanchéité des ouvrages et le choix de la classe (qui correspond au principe de réalisation) ;

b) les fonctions complémentaires :

- compatibilités avec les liquides contenus dans les ouvrages ;
- résistance, durabilité, longévité ;
- entretien des ouvrages ;
- aptitude à la mise en œuvre et à la réparation.

Les besoins essentiels afférents à l'utilisation d'installations contenant soit des eaux usées, soit des eaux destinées à la consommation humaine, replacées dans leur contexte le plus général, sont de **conserver**, tout en évitant une contamination des milieux protégés, respectivement l'environnement naturel et l'eau brute ou potable.

1. Types d'ouvrages concernés

■ Réservoirs d'eau

- Châteaux d'eau ;
- réservoir d'eau destiné à la consommation humaine ;
- réservoir d'eau à usage divers ;
- réserves de lutte contre l'incendie.

Les châteaux d'eau sont constitués par une ou plusieurs cuves surélevées par rapport au sol et supportées par des tours, murs, poteaux ou piliers. Certains ouvrages peuvent comporter des combinaisons de ces deux dispositions principales.

Les réservoirs sont constitués par une ou plusieurs cuves dont le fond, situé au niveau du sol ou en dessous, repose sur celui-ci directement ou par l'intermédiaire de tout mode de fondation.

■ Stations d'épuration

Ouvrages contenant de l'eau éventuellement chargée de matières dissoutes ou en suspension (la hauteur d'eau normalement contenue étant supérieure à 0,50 m) et faisant partie de stations d'épuration ou de traitement d'eau potable (cf. article *Traitement des eaux usées urbaines* dans ce traité).

■ Ouvrages annexes intégrés à la structure

Ces ouvrages (solidaires de la structure) sont constitués par une partie de l'ouvrage principal comportant notamment des locaux destinés à recevoir ou abriter l'équipement hydraulique et électrique, tels que des chambres de vannes, de partition ou de comptage, des bâtiments de stations de pompage et de traitement, des postes de transformation, ou des locaux ou magasins de service.

■ Ouvrages de prise et de vidange

Ce sont les conduites de vidange réalisées sur chantier ainsi que les tours de prise en béton armé et/ou précontraint.

■ Canaux. Aqueducs. Stations de pompage et de relèvement. Bâches et bassins tampons. Cheminées d'équilibre

Les canaux (autres que la navigation) sont réalisés en béton armé, béton précontraint ou en maçonnerie ayant à la fois un rôle mécanique et d'étanchéité.

Les simples revêtements ou protections de berges ayant pour but d'améliorer l'écoulement, constitués de plaques ou d'éléments préfabriqués, sont exclus du champ d'application du présent article, ainsi que certaines parties des organes constituant les évacuateurs de crues, qui ne sont pas soumis à l'action extérieure de nappes phréatiques, et qui ont pour seule fonction d'améliorer temporairement l'écoulement.

Les aqueducs sont constitués par une ou plusieurs travées surélevées par rapport au sol et supportées par des murs, culées, poteaux, piliers réalisés en béton armé, béton précontraint ou maçonnerie.

Les bâches qui transportent l'eau sont réalisées en béton armé ou en béton précontraint. Elles ont à la fois un rôle mécanique et d'étanchéité.

■ Bassins et déversoirs d'orage sur les réseaux d'assainissement

Il s'agit des bassins d'orage en béton armé et/ou précontraint, tels qu'ils sont définis dans la documentation technique FND AE n° 6 de mars 1988.

■ Bassins de pollution et de rétention en site urbain

Il y a lieu de distinguer en site urbain :

- les bassins de pollution permettant le stockage des premiers flots d'eau polluée pour épuration ;
- les bassins de rétention assurant le stockage de l'excédent d'eau ruisselée qui ne peut être rejetée en milieu naturel, sans engendrer d'inondation par débordement des réseaux.

■ Piscines

Le gros œuvre d'un bassin assure à la fois un rôle mécanique et d'étanchéité. Il peut recevoir un enduit hydraulique, un revêtement synthétique, ou une peinture.

■ Cuves à vin. Fosses à lisier

Cet article peut s'appliquer également aux fosses à lisier et aux cuves et batteries de cuves à vin en ce qui concerne la structure.

Les cuves et batteries de cuves à vin, les fosses à lisier, ont pour objet de contenir des liquides parfois très agressifs. Le calcul des structures doit être conduit suivant les méthodes et hypothèses proposées dans le fascicule 74 du CCTG, mais la nature des produits stockés peut engendrer des contraintes physico-chimiques plus défavorables que le domaine visé par ce fascicule.

Les cuves à vin doivent satisfaire, comme les châteaux d'eau et les réservoirs d'eau destinés à la consommation humaine, à des conditions « d'alimentarité ».

Les ouvrages qui ne sont pas concernés par cet article sont les suivants :

- cuvelages des bâtiments ;
- ouvrages contenant des hydrocarbures ou des produits chimiques ;
- canalisations d'assainissement réalisées par préfabrication en usines agréées par la marque NF.

2. Classement des ouvrages

Les ouvrages en béton de stockage et de transport de l'eau sont classés selon le principe de réalisation de leur étanchéité.

■ Classe A : ouvrages dont l'étanchéité est assurée par la structure seule

Il s'agit essentiellement de structures en béton armé et/ou précontraint, le béton pouvant faire l'objet, éventuellement, d'un traitement d'imperméabilisation de masse ou de surface.

Les fuites ne doivent pas dépasser, mises à part les variations de volume dues aux variations de température et à l'évaporation, une moyenne de 500 cm³/m²/jour.

Pour les bassins non enterrés, cette condition peut être considérée comme réalisée si l'on ne constate pas de fuite apparente et de défaut d'esthétique. Une simple tache n'est pas considérée comme une fuite, dans la mesure où elle disparaît rapidement dans les jours qui suivent la mise en eau (une tache qui subsiste empêche toute application de peinture ou d'un revêtement adhérent).

■ Classe B : ouvrages dont l'étanchéité est assurée par la structure complétée par un revêtement d'imperméabilisation

Pour ces ouvrages, il est admis un léger passage d'eau disparaissant éventuellement par évaporation.

Pour les bassins non enterrés, cette condition peut être considérée comme remplie si l'on ne constate pas de fuites apparentes.

Une simple tache n'est pas considérée comme une fuite.

Les compléments d'imperméabilisation peuvent être des enduits à base de mortiers hydrauliques hydrofugés épais ou minces, des enduits et peintures à base de liants mixtes, des revêtements à base de résines de synthèse non armées.

■ Classe C : ouvrages dont l'étanchéité est assurée par un revêtement d'étanchéité adhérent ou indépendant du support, la structure assurant uniquement une fonction mécanique, le revêtement assurant l'étanchéité

Le revêtement est suffisamment résistant pour former pontage (après s'être éventuellement décollé de la paroi en cas de légère fissuration).

Les revêtements sont à base de résines de synthèse armées ou sous forme de membranes à base de bitume ou de copolymères.

■ Classe D : ouvrages construits à l'aide d'éléments préfabriqués

Cette classe ne diffère des classes A, B ou C que par la conception et l'exécution des joints de construction qui nécessitent des dispositifs particuliers.

■ On veillera, à la conception et à la mise en œuvre, au choix et à la qualité des liaisons entre des éléments de structures (préfabriqués et/ou coulés en place), en béton armé et/ou précontraint, qui doivent assurer d'une manière fiable le monolithisme des ouvrages.

3. Contraintes à prendre en compte

La conception de l'étanchéité des ouvrages dépend des actions auxquelles ils sont soumis. Ces actions sont le fait (la conséquence) de l'eau contenue, du contenant, de l'exploitation et de l'environnement (charges climatiques notamment).

3.1 Contraintes liées au contenu

3.1.1 Alimentarité

Les matériaux et revêtements utilisés pour la construction des ouvrages de traitement ou de distribution d'eau destinée à la consommation humaine ne doivent pas être susceptibles d'altérer la qualité de l'eau contenue, tant par leur composition que par leur mise en œuvre et leur évolution éventuelle. Ces matériaux doivent être conformes à la législation en vigueur. On se référera notamment à l'arrêté du 29 mai 1997 relatif aux matériaux et objets utilisés dans les installations fixes de production, de traitement et de distribution d'eau destinée à la consommation humaine.

En ce qui concerne les substances entrant dans la composition des matériaux et des revêtements, on vérifie qu'elles répondent à la réglementation générale concernant les « matériaux au contact des aliments et denrées destinés à l'alimentation humaine » (Brochure 1227 publiée par la Direction des Journaux Officiels).

En ce qui concerne les matériaux organiques, des essais permettent d'apprécier les phénomènes de migration de substances chimiques. Ils sont actuellement réalisés par des laboratoires agréés par le ministère chargé de la Santé, selon un protocole expérimental approuvé par le Conseil supérieur d'hygiène publique de France.

Les essais et les spécifications correspondantes fixent, sous la forme de seuils de saveur et de seuils de concentration qui ne doivent en aucun cas être dépassés, les valeurs :

- des paramètres organoleptiques et physicochimiques ;
- des paramètres concernant les substances indésirables et des substances toxiques (au rang desquelles sont consignés les métaux lourds, les hydrocarbures aromatiques polycycliques et certains solvants) ;
- des paramètres microbiologiques ;
- des concentrations en pesticides et produits apparentés.

3.1.2 Compatibilité avec les eaux usées ou agressives

Les produits et matériaux destinés à une application à l'intérieur des ouvrages de stockage et de traitement d'eaux usées ou pluviales, et des ouvrages d'assainissement ne doivent pas entraîner une

altération de la qualité chimique ou biologique de l'effluent rejeté. Ils ne doivent pas être altérés ou attaqués par le contenu.

3.1.3 Rappel des caractéristiques des eaux

3.1.3.1 Eaux propres et eaux potables

■ Actions chimiques

Selon les caractères fondamentaux résultant de la nature de l'eau et du traitement chimique effectué, on trouvera, dans le tableau 1, les concentrations et les effets qui en découlent. On consultera également le fascicule de documentation P 18-011.

■ Actions physiques

On trouvera, dans le tableau 2, les grandeurs courantes et maximales des éléments physiques qui interviennent.

■ Actions biologiques

Un film biologique peut avoir tendance à se développer et à adhérer sur tout support au contact de l'eau. Cela peut entraîner :

- une consommation potentielle de substrat (substrat organique) ;
- la production de métabolites (action sur les saveurs et les caractéristiques organoleptiques) ;
- la dégradation ou la décoloration de certains matériaux synthétiques.

3.1.3.2 Eaux usées et pluviales

La nature et la composition de ces eaux sont extrêmement variées. On distingue :

- les eaux de ruissellement ;
- les eaux résiduaires urbaines ;
- les eaux résiduaires industrielles.

Fréquemment, un même réseau d'assainissement véhicule des eaux de ces trois catégories.

Les **eaux de ruissellement** proviennent des eaux de pluie ; leurs caractéristiques chimiques sont donc proches de l'atmosphère qu'elles traversent et des sols sur lesquels elles ruissellent. Leur principale caractéristique est généralement d'être chargées en matière minérale en suspension. Elles peuvent aussi être chargées d'huile (eaux de ruissellement sur chaussée routière). Elles posent peu de problèmes sauf s'il s'agit d'eaux douces (faible teneur en sels dissous) naturellement acides. Dans certains cas, par exemple au début du ruissellement après une période sèche (dans les régions agricoles), ces eaux peuvent s'apparenter à des eaux industrielles (nitrates, pesticides...).

Les **eaux résiduaires urbaines** (eaux usées ménagères) renferment des matières organiques susceptibles d'être oxydées (constituants de la matière vivante ou de ce qu'il en reste, plus des détergents et hydrocarbures), des matières minérales et les germes des matières fécales y compris des germes pathogènes, se présentant sous trois formes :

- matières en suspension vraie, décantables en deux heures ;
- matières en suspension vraie, non décantables en deux heures (état colloïdal) ;
- matières dissoutes.

Les composés minéraux que l'on rencontre dans les eaux usées sont d'une grande diversité.

Les **eaux résiduaires industrielles** sont toujours des cas spécifiques en fonction de leur origine. Leurs principales caractéristiques chimiques doivent être précisées pour chaque cas. Bien que les rejets industriels soient soumis à des règles strictes (pH compris entre 5,5 et 8,5, température < 30 °C, déversements de composés cycliques hydroxydés et de leurs dérivés halogénés interdits), chaque réalisation doit faire l'objet d'une attention particulière tant en ce qui concerne le génie civil que les équipements.

Tableau 1 – Actions chimiques de l'eau potable sur les ouvrages

Caractères fondamentaux résultant de la nature de l'eau et du traitement effectué	Concentration (1)	Observations
Produits oxydants		
Chlore (eau chlorée, eau de javel)	$C_M = 20$ g équivalent chlore par m^3 d'eau $C_c = 0,5$ à $1,5$ g équivalent chlore par m^3 d'eau	Oxydation des produits organiques. Sans action sur le béton mais action sur les aciers.
Ozone à l'état gazeux au-dessus du plan d'eau :		
— avant traitement de l'eau	$C_M = 20$ g de O_3 par m^3 d'air	Oxydation des produits organiques.
— après traitement de l'eau	$C_c = 4$ g de O_3 par m^3 d'air	
Ozone en solution	$C_c = 5$ g de O_3 par m^3 d'eau	Oxydation des métaux.
Bioxyde de chlore.....	$C_M = 5$ g par m^3 d'eau $C_c = 0,5$ g par m^3 d'eau	Oxydant très puissant.
pH et agressivité de l'eau		
Gaz carbonique.....	$C_M = 150$ g CO_2 par m^3 d'eau $C_c = 20$ g CO_2 par m^3 d'eau	Grande agressivité du CO_2 toujours présent dans l'air et dans l'eau.
pH de l'eau potable (décret n° 89.3 du 3 janvier 1989)	$6,5 < pH < 9$	
pH de l'eau en cours de traitement (variable selon nature des eaux à traiter).....	$5 < pH < 10$ (exceptionnellement pH 12)	Un pH extrême peut avoir une action sur certains revêtements organiques.
Ces valeurs sont modifiées par l'introduction dans l'eau, en cours de traitement, des produits suivants.		
Coagulant (sels de fer ou d'aluminium)	$C_M = 120$ g par m^3 d'eau	Action sur la chaux libre du béton.
Acidification (CO_2 , HCl , H_2SO_4).....	$C_M = 15$ g (CO_2) par m^3 d'eau	Dépassivation des armatures.
Neutralisation (soude, chaux, carbonate de calcium).....	$C_M = 20$ g (soude) par m^3 d'eau	Action sur les produits organiques et les résines (hydrolyse).
Minéralisation de l'eau		
Chlorures (décret n° 89.3 du 3 janvier 1989)....	$C_M < 250$ g par m^3 d'eau	Les chlorures de Mg et de Ca peuvent être agressifs à l'égard de certains bétons.
Sulfates	$C_M < 250$ g par m^3 d'eau	Les sulfates forment avec certains bétons des sels expansifs qui font éclater le béton.
Absence de minéralisation (eau pure).....		Attaque du béton par dissolution de la chaux libre.
Conductivité.....	$< 400 \mu S/cm$ à $20^\circ C$	Un dépassement peut entraîner dépassivation et corrosion.
(1) Les chiffres indiqués résultent de l'expérience et de la pratique courante. C_M = concentration maximale ; C_c = concentration courante.		

■ Actions chimiques (voir P 18-011)

Les conséquences de ces actions ainsi que les grandeurs courantes rencontrées sont indiquées dans le tableau 3. On notera, de plus, que :

— les acides dont le pH est compris entre 5 et 7 ont en général peu d'action sur le béton ; toutefois, une place à part doit être faite pour l'acide carbonique et l'acide sulfurique dont l'action est particulière ;

— l'eau contenant une forte proportion de gaz carbonique (agressivité vis-à-vis de $CaCO_3$) attaque le béton bien que son pH se situe au-dessus de 5 ;

— l'excès de CO_2 attaque la chaux libre du béton avec possibilité de formation de bicarbonate de calcium soluble. La dissolution de ce bicarbonate augmente la porosité de ce béton d'enrobage et dépasse les armatures. Pour les bétons armés et précontraints en présence d'humidité et d'oxygène, le CO_2 peut provoquer la dépassivation des armatures. Voir aussi le fascicule de documentation

P 18-011 sur la classification des environnements agressifs pour les bétons ;

— le chlore dans les bétons armés et précontraints est capable de détruire la protection alcaline des armatures et de provoquer leur corrosion. Les chlorures de base plus faible que la chaux, solubles, agressifs, que l'on peut rencontrer dans les eaux, sont les chlorures de magnésium et d'ammonium ;

— l'attaque du béton peut être soit directe par acidité de H_2SO_4 , soit également par formation d'ettringite, au-dessus des plans d'eau, s'il existe un support en béton ou métallique. Les sous-faces de coupes de digesteurs, les dalles de couverture des fosses de stockage des matières de vidange en béton seront protégées jusqu'à 1 m environ au-dessus des niveaux de liquides par un revêtement superficiel rapporté.

■ Actions physiques

On trouvera, dans le tableau 4, les grandeurs et les effets de ces actions.

Tableau 2 – Actions physiques de l'eau potable sur les ouvrages

Éléments caractéristiques	Grandeur (1)	Observations
Vitesse du courant	$V_M = 5 \text{ m/s}$	Vortex. Érosion. Coup de bélier.
Variation du niveau Ouvrages à niveau constant..... Ouvrages à niveau variable..... Variation de niveau dû au séisme ou vent ou variation de pression	Hauteur d'eau constante stockée en exploitation $2,5 < h_c < 12 \text{ m}$	Exceptionnellement $h > 12 \text{ m}$. Un ouvrage à niveau variable peut être soumis à des alternances de plein et de vide selon une périodicité $< 24 \text{ h}$.
Renouvellement	Continu	Évolution continue des sollicitations et des caractéristiques de l'eau.
Température Conditions atmosphériques. Gradient de température entre faces d'une paroi ou d'un bord à l'autre de l'ouvrage (selon normes CEE)..... Température de l'eau (décret n° 89.03 du 3 janvier 1989).....	$T_M < 25 \text{ °C}$ et T_m voisine de 0 °C (T exceptionnelle pour des eaux de forage : 50 °C)	Variations dimensionnelles. Variations dimensionnelles. Modification de la vitesse des réactions chimiques. Modification de la vitesse de diffusion des additifs. Modification éventuelle du comportement de certains revêtements.
Sous-pressions des eaux Nappe phréatique, inondation		

(1) Signification des indices : c = courante ; M = maximale ; m = minimale

Attention aux rejets à caractères industriels qui peuvent avoir des caractéristiques physicochimiques très différentes.

On notera également que la fermeture des ouvrages crée les conditions d'apparition de condensations qui, combinées à certains procédés d'épuration (dégazage créé par turbulence ou fermentation), accroissent les risques d'altération des bétons et de corrosion des aciers.

Pour lutter contre ce risque, il faut modifier l'atmosphère et notamment son hygrométrie et sa température par des moyens d'isolation thermique, de ventilation et de chauffage appropriés.

■ Actions biologiques

Leurs effets sont indiqués dans le tableau 5.

3.2 Contraintes liées au contenant

Nature des matériaux :

- béton armé et/ou précontraint ;
- revêtement d'imperméabilisation ;
- revêtement d'étanchéité (adhérent ou indépendant).

Géométrie :

- forme ;
- pente de radiers ;
- existence de compartiment ;
- ciel ouvert ou couverture.

Accessibilité :

- externe ;
- interne ;
- facilité de vidange (temps de disponibilité).

Équipements internes :

- statiques ;
- dynamiques ;
- protections particulières de ces équipements.

Type de nettoyage

- projection d'eau (basse ou haute pression) ;
- produits de nettoyage acides.

3.3 Contraintes liées à l'exploitation

■ Matériels installés

En condition d'exploitation normale, les matériels peuvent transmettre :

- des vibrations dans le support béton (rampes de dispersion d'air comprimé, traversées de paroi, fixation de turbines), ce qui engendre la fissuration du béton sous l'effet de ces contraintes mécaniques ;
- des mouvements d'eau dans les bassins (vortex, effets de pompage sous les turbines tournant rapidement, houle...).

■ Nettoyage des bassins

Les actions qui en résultent sont :

- un nettoyage des parements au jet sous pression ;
- l'emploi de réactifs chimiques ;
- un effet dynamique de la vidange et de la remise en eau ;
- la circulation des personnes lors des opérations de nettoyage et d'entretien.

Tableau 3 – Actions chimiques des eaux usées et pluviales sur les ouvrages

Caractères	Grandeur (1)	Observations
Agressivité et pH Eaux usées ménagères (brutes)..... Digesteurs anaérobies Eaux pluviales.....	6,0 < pH < 8 p _{Hc} = 7,5 5,5 < pH < 7,5 pluies acides pH < 5	Possibilités de : — réactions avec les bases ou sels basiques provenant de l'hydratation du ciment. — action dissolvante (formation de sel de calcium soluble) sur les bétons. — en cas de porosité élevée du béton et/ou d'enrobage insuffisant : oxydation des armatures.
Salinité Chlorures : à faible teneur, ils ne présentent pas, vis-à-vis du béton, d'action nocive marquée ; il n'en est pas de même en ce qui concerne les armatures, d'où la nécessité d'un bon enrobage (au moins 3 cm) et la réalisation d'un béton compact).	La salinité totale d'une eau d'égout varie globalement dans une fourchette de 600 à 1 000 mg/L Les concentrations dans les eaux usées ménagères n'atteignent généralement pas la limite d'agressivité C = 50 à 90 g de Cl par m ³ C = 10 à 15 g de Mg ⁺⁺ par m ³ C = 40 g de K ⁺ par m ³ C = 15 à 30 g de NH ₄ ⁺ par m ³ C = 50 g de Na ⁺ par m ³	C'est la chaux qui constitue l'élément réactif du béton avec formation de CaCl ₂ soluble, ce qui entraîne l'augmentation de la porosité et une action dissolvante.
Sulfates	C = 50 à 200 g de SO ₄ ⁼⁼ par m ³	Action des sulfates sur l'aluminat tricalcique hydraté avec formation d'ettringite (sel expansif appelé aussi sel de Candlot) entraînant la fissuration et la dégradation du béton.
Conductivité Elle traduit la concentration ionique du liquide (soit essentiellement la charge en sels minéraux dissous).	Pour des eaux usées ménagères, cette conductivité est d'environ 1 000 à 1 500 µs/cm	Corrosion et dépassement des armatures.
Sulfures Teneur en sulfures en ions S ⁼⁼ : — pour des eaux usées brutes — pour des effluents primaires — pour des effluents secondaires (boues activées) caractérisés par une odeur putride	C _m = 5 à 10 g par m ³ C _m = 25 à 75 g par m ³ C _m = 20 à 120 g par m ³	Formation de H ₂ S par suite de fermentation anaérobie des boues (canalisations, digesteurs, épaisseur couverte, stockage des matières de vidange principalement). Dégagement de H ₂ S. Oxydation de H ₂ S en présence d'humidité et de bactéries, aboutit à la formation d'acide sulfurique H ₂ SO ₄ entraînant une attaque des armatures.
Produits rapportés Détergents..... Matières organiques Huiles ou graisses Méthane	C _m = 20 à 30 g par m ³ Essentiellement d'origine végétale (produits de dégradation de la cellulose) comportant notamment acide humique et sucres C _m = 100 g par m ³	La présence de corps tensioactifs gêne la sédimentation de l'épuration physique des eaux usées en maintenant l'état colloïdal des particules liquides. Ces produits sont composés de polyphosphates et de sulfates (voir cas des sulfates) et peuvent, par ces derniers, provoquer une dégradation du béton. Action retardatrice dans la prise des bétons mais sans action dégradante des bétons imperméables en place après leur prise. Agressivité négligeable envers le béton si celui-ci est suffisamment compact. La digestion anaérobie provoque un dégagement de méthane qui est pratiquement sans influence sur le béton.

(1) C : concentration ; C_m : concentration minimale.

3.4 Contraintes liées à l'environnement

Terre. Air. Eau

- poussée, dessiccation, gonflement ;
- oxygénation, carbonatation ;
- fuites, agressivité.

Sollicitations chimiques :

- agressivité ;
- courants vagabonds ;
- salinité.

Sollicitations physiques :

- poussée des eaux ;

- nappe phréatique fixe ou variable ;
- érosion éolienne ;
- humidité, condensation ;
- pluie ;
- température, gradient thermique ;
- gel, dégel ;
- lumière, rayons ultraviolets ;
- feu ;
- alternance air-eau ;
- migration.

Sollicitations biologiques :

- agressivité bactérienne, plantations ;
- êtres vivants.

Tableau 4 – Actions physiques des eaux usées et pluviales sur les ouvrages

Éléments caractéristiques	Grandeur	Observations
Vitesse du courant	$V_M = 5 \text{ m/s}$ $V_m = 0,6 \text{ m/s}$ dans canalisations	Phénomène de Vortex. Érosion.
Variation de niveau Tout ouvrage peut être plein ou vide en l'espace de quelques heures (opération de vidange et de nettoyage). Un ouvrage à niveau variable peut être soumis à des alternances de plein et de vide sur une période de 24 h	Ouvrage à niveau constant Ouvrage à niveau variable par définition Ouvrage à flux alterné (filtres biologiques)	Hauteur d'eau stockée : de 2 à 12 m. Bassin tampon, stockage des matières de vidange, poste de relèvement... Légère variation du plan d'eau entre les deux cas de figures.
Renouvellement	Pratiquement continu	Évolution continue des sollicitations et des caractéristiques des effluents.
Masse volumique des effluents Masse volumique des eaux usées ménagères à prendre en compte dans le calcul des ouvrages	10,10 kN/m ³ dans les ouvrages de décantation et d'aération 10,50 kN/m ³ dans les ouvrages de relèvement-prétraitement et les épaisseurs en silos à boues 11,00 kN/m ³ dans les digesteurs	
Pression des gaz		CH ₄ (méthane) dans les digesteurs
Température des effluents	Température moyenne variant dans une fourchette de + 10 °C à + 18 °C Température minimale dans ouvrage statique de stockage : 0 °C Température maintenue pratiquement de + 30 à 35 °C dans les digesteurs anaérobies	Variations dimensionnelles Accélération des vitesses des réactions chimiques
Matières solides en suspension Décantables	Teneur moyenne : 400 g par m ³ dont 130 g par m ³ à caractère minéral	Érosion et altération sous l'effet des équipements de râclage de fond (dessableurs) ou d'aération (turbines tournant rapidement)
Condensations Ventilation naturelle ou artificielle	Humidité relative de 60 à 100 % des volumes surplombant les bassins	Condensations au contact de parois plus froides Combinaison des processus évoqués ci-avant (carbonatation par le CO ₂ agressif en milieu humide, corrosion bactérienne H ₂ S, H ₂ SO ₄ , formation de sulfates, gonflement, etc.)

Tableau 5 – Actions biologiques des eaux usées et pluviales sur les ouvrages

Existence d'un biofilm	Se développe et adhère sur tout support au contact des eaux	Consommation potentielle de substrat (matière organique). Production de métabolites (action sur les saveurs).
Fermentation Voir ci-avant chapitre H ₂ S (sollicitations chimiques)	Le développement d'une activité bactérienne pour assurer l'épuration des eaux polluées (oxydation des matières organiques biodégradables) peut engendrer un processus de fermentation avec dégagement de H ₂ S (septicité, temps de séjour trop élevé)	Les bactéries sulfato-réductrices anaérobies utilisent les sulfates comme source d'oxygène et les composants de la matière organique comme donneur d'hydrogène, en libérant de l'H ₂ S. Ce dernier, en atmosphère saturée, peut permettre la formation d'acide sulfurique.

4. Actions. Sollicitations. Règles de calcul

Les calculs de résistance et de fissurabilité des éléments en béton sont conduits suivant les règles en vigueur (BAEL, BPEL, NV, règles parasismiques, CCTG fascicule 74, etc.). Le présent texte a pour objet d'apporter des précisions complémentaires pour l'application de ces règles, et notamment en ce qui concerne le béton précontraint.

4.1 Ouvrages en béton armé

On se reportera, dans le présent traité, à l'article *Béton armé. Règles BAEL. Ouvrages particuliers*, qui traite des ouvrages destinés à contenir ou à retenir des liquides.

4.2 Ouvrages en béton précontraint

On trouvera, dans l'article spécialisé du présent traité, toutes les données concernant la tension à l'origine, les pertes de tension (instantanées, différées), les actions et sollicitations.

Il s'agit d'ouvrages dont le béton joue à la fois un rôle de structure mécanique et d'étanchéité.

4.2.1 Justifications des sections vis-à-vis des ELS

Le béton doit être étanche dans la masse, et les joints de reprise particulièrement soignés.

a) Dans le cas où le moment est nul, la contrainte résiduelle minimum du béton est ≥ 0 avec la précontrainte P_2 ; la contrainte maximale, calculée avec la précontrainte P_1 , est $\sigma_c \leq 0,60 f_{c28}$.

b) Dans le cas où le moment fléchissant n'est pas nul, que ce soit dans le sens horizontal ou dans le sens vertical, quel que soit le cas de charge de service étudié, des tractions limitées sont admises côté parement mouillé et côté parement opposé, dans les conditions précisées ci-après.

Les armatures sont calculées en flexion composée selon les règles habituelles du béton armé, sous les sollicitations :

$$N = N_p + N_{ex} \quad \text{et} \quad M$$

avec	N	effort de compression ou de traction,
	N_p	précontrainte,
	N_{ex}	autres forces,
	M	moment fléchissant.

(les compressions étant comptées positivement, les tractions négativement).

La précontrainte est prise avec sa valeur caractéristique P_2 .

Les contraintes de traction du béton calculées sur la section non fissurée, telle que définie dans les règles BPEL (article 5.2.1), sont limitées aux valeurs suivantes :

- sous l'effet des combinaisons rares : f_{t28} dans la section d'enrobage, $1,10 \theta f_{t28}$ ailleurs ;
- sous l'effet des combinaisons fréquentes : 0 dans la section d'enrobage côté paroi humide, et f_{t28} ailleurs.

La section d'enrobage est définie par les règles BPEL (article 5.3) ainsi que le coefficient θ .

La résultante générale des efforts N dans la section, due à l'ensemble des actions, précontrainte comprise avec sa valeur caractéristique minimale P_2 , **ne doit jamais être une traction**.

Les contraintes dans les aciers passifs tendus doivent être limitées aux valeurs fixées en béton armé :

- ouvrage à proximité de la mer, ou eau agressive :

$$\bar{\sigma}_s = \alpha \sqrt{\frac{\eta f_{t28}}{\phi}}$$

- ouvrage éloigné de la mer, ou contact permanent avec l'eau :

$$\bar{\sigma}_s = \sqrt{\frac{\eta f_{t28}}{\phi}} + 30 \eta$$

avec	f_{t28} (MPa)	résistance caractéristique du béton à la traction,
	ϕ (mm)	diamètre de la plus grosse des barres tendues prises en compte dans le calcul,
	η	coefficient de fissuration de l'armature,
	α	coefficient qui dépend de la fonction dévolue à la paroi en béton et de la nature du revêtement intérieur éventuel (en général, $\alpha = 240$).

Dans tous les cas, cette contrainte sera limitée à la plus petite des deux valeurs $0,5 f_e$ et $90 \sqrt{\eta f_{t28}}$.

La contrainte de compression du béton ne doit pas dépasser la valeur :

$$\bar{\sigma}_{bc} = 0,60 f_{c28}$$

Le ferrailage ainsi calculé doit satisfaire aux conditions de pourcentage minimal d'armatures passives fixé au paragraphe 6.2.4 et aux articles A 6.1,3 et A 6.1,3.2 du BPEL.

4.2.2 Justification des sections vis-à-vis des ELU

La précontrainte étant déterminée par la considération des états limites de service, la vérification aux états limites ultimes de résistance est effectuée par application des règles BPEL.

4.2.3 Effets de la température et du retrait

Il y a lieu de prendre en considération les sollicitations dues aux déformations imposées par les variations de température.

Il est à noter que le découpage à l'aide de joints permet de réduire de façon très sensible la valeur des contraintes (désolidarisation paroi-ceinture de coupole ou paroi-dalle de couverture par exemple).

Sont également à considérer les sollicitations dues au gradient thermique Δt qui apparaît dans la paroi lorsque la température du liquide T_i diffère de la température extérieure T_e (figure 1).

À défaut de méthode plus élaborée, ce gradient et les moments induits peuvent être calculés par les formules ci-après.

Gradient thermique :

$$\frac{\Delta t}{h_0} = (T_e - T_i) K_u \frac{1}{\lambda_b}$$

avec $\Delta t = (t_e - t_i)$,

K_u coefficient de transmission utile :

$$K_u = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i} + \frac{h_0}{\lambda_b} \right)}$$

λ_b coefficient de conduction du béton ($\lambda_b = 1,75 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$),

$\frac{1}{h_i}$ résistance surfacique interne de la paroi en contact avec l'eau ($1/h_i = 0,005 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$),

$\frac{1}{h_e}$ résistance surfacique externe de la paroi ($1/h_e = 0,06 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$),

h_0 (m) épaisseur de la paroi.

Le moment (par unité de hauteur et de largeur) créé par le gradient thermique est :

$$M \Delta t = \frac{\alpha \Delta t E I}{h_0} \quad (\text{en } ^\circ\text{C/m})$$

avec α $10^{-5}/^\circ\text{C}$ (coefficient de dilatation thermique du béton),

E module de déformation à prendre en compte,

I moment d'inertie (par unité de hauteur ou de largeur de la paroi),

h_0 épaisseur de la paroi.

Concernant le choix des valeurs entrant dans le produit EI , il y a lieu de distinguer les cas suivants.

■ **Compression simple ou flexion composée avec compression, la totalité de la section étant comprimée**

$E = E_v$ = module de déformation différée du béton

$$E_v = 3700 \sqrt[3]{f_{c28}} \quad (\text{MPa})$$

$$I = \frac{h_0^3}{12}$$

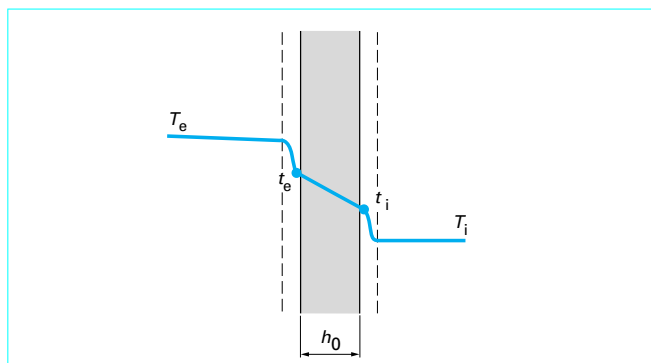


Figure 1 – Gradient thermique entre les 2 faces de la paroi

■ Flexion simple ou flexion composée (avec traction ou compression), une partie de la section étant comprimée

$E = E_v$ = module de déformation différée du béton

I = le maximum entre (id^3) et $\frac{h_0^3}{16}$ dans le cas d'une paroi étanche

par elle-même ou d'une étanchéité rigide, et $I = \frac{h_0^3}{24}$ dans le cas d'une étanchéité souple, i étant un coefficient dépendant du pourcentage d'acier $\frac{A}{bd}$ où A est la section d'aciers tendue sur la longueur de paroi b .

Il est loisible d'adopter :

— pour $\frac{A}{bd} < 0,01$: $i = 0,01 + 7 \frac{A}{bd}$

— pour $\frac{A}{bd} > 0,01$: $i = 0,04 + 4 \frac{A}{bd}$

■ Traction simple ou flexion composée avec traction, la totalité de la section étant tendue avec présence d'une nappe d'acier sur chaque face

$E = E_s$ = module d'élasticité de l'acier = 200 000 MPa

I_s moment d'inertie de la section constituée exclusivement par les deux nappes d'aciers.

En particulier, si les deux nappes d'aciers sont identiques, et d'une section A chacune, pour la longueur de paroi b :

$$I_s = \frac{2A}{b} \left(\frac{h'}{2} \right)^2 = \frac{Ah'^2}{2b}$$

avec h' distance entre les 2 nappes.

Il faut $E_s I_s \geq E_v \frac{h_0^3}{16}$ dans le cas d'une paroi étanche par elle-même ou d'une étanchéité rigide (classe A et B),

$E_s I_s \geq E_v \frac{h_0^3}{24}$ dans le cas d'une étanchéité souple (classe C).

■ Observations

Pour l'application de la méthode qui précède, il y a lieu de s'assurer que la situation reste inchangée (par exemple : section entièrement comprimée ou entièrement tendue) après superposition de la sollicitation $M\Delta t$.

Il est rappelé que le gradient thermique crée des moments dans chaque direction.

Les armatures correspondantes doivent être disposées du côté de la face la plus froide de la paroi.

Pour les vérifications à l'état ultime de résistance, le moment d'inertie I peut être pris égal à $0,03 h_0^3$.

Pour des cas plus complexes (par exemple : parois composites), on pourra utilement se reporter au DTU Règles Th en vigueur.

■ Différence de température entre deux génératrices opposées

Le moment (par unité de hauteur) créé par cette différence de température entre deux génératrices opposées a une valeur maximale égale à :

$$M_{\max} \approx \frac{2\alpha E I \Delta T}{R}$$

avec ΔT différence de température entre les génératrices opposées (en France maximum 30 °C),
 R rayon moyen du réservoir.

Ce moment est calculé pour un anneau isolé.

Le moment dû au gradient entre les deux faces de la paroi est beaucoup plus important que le moment dû à la différence de température entre deux génératrices opposées.

4.2.4 Effets dus au parti constructif

Les moments hyperstatiques créés par les liaisons de la jupe avec les autres éléments de la structure (fond en particulier) sont déterminés suivant les méthodes de la résistance des matériaux.

5. Caractères des ouvrages courants

5.1 Châteaux d'eau. Réservoirs. Cuves. Bassins

Les principaux critères pris en compte sont les suivants.

5.1.1 Position par rapport au sol

L'ouvrage peut être :

- au niveau du sol ou très peu enterré : le radier repose sur un béton maigre, dit de propreté, de 5 à 10 cm d'épaisseur ;
- sur poteaux ou légèrement surélevé ;
- sur pylônes ou voiles porteurs : « châteaux d'eau » ;
- sur bâtiment.

Selon la position de l'ouvrage par rapport au sol, les actions qui s'exercent sur l'ouvrage sont différentes et d'importance variable. On veillera à faire un bilan précis des actions à prendre en compte (poussées des terres, sous-pressions, poussées hydrostatiques, effets thermiques et sismiques, action du vent et des cyclones éventuels, etc.), sans oublier l'environnement géotechnique, géologique et hydrodynamique du sol. L'importance et la consistance des études seront adaptées à l'ouvrage projeté ainsi qu'à son environnement.

5.1.2 Forme de la cuve

Différentes formes d'ouvrages peuvent être réalisées :

- réservoir cubique ;
- réservoir parallélépipédique ;
- réservoir cylindrique ;
- forme quelconque.

Les formes de révolution sont en général plus économiques que les surfaces planes comportant des changements de direction.

À capacité et hauteur de charge identiques, un réservoir cylindrique a une quantité de ferrailage, par mètre cube mis en œuvre, inférieure à un réservoir parallélépipédique.

À la mise en œuvre, certaines configurations et changements de direction pour les parois entraînent des dispositions constructives difficiles à réaliser, mais aussi des pathologies induites dès la conception et la réalisation.

5.1.3 Mode de fermeture et couverture

Les ouvrages peuvent être :

- couverts : dalle, plancher-dalle, coupole... ;
- non couverts.

Les ouvrages peuvent être réalisés avec ou sans couverture.

La forme, le développement, les liaisons (articulations, appuis, encastrement), les charges appliquées de ces couvertures avec les parois des ouvrages peuvent entraîner des actions importantes dans le reste de la structure. On veillera à leur prise en compte.

5.1.4 Mode de construction

Il peut s'agir d'ouvrages :

- simples ;
- multiples ;
- superposés.

Le mode de construction a une importance aussi bien au niveau de la conception, calcul, mise en œuvre, que de la durabilité et des pathologies éventuelles. On distingue en général :

a) les ouvrages en béton armé :

- construction traditionnelle ;
- construction traditionnelle avec poteaux et dalles préfabriqués ;
- construction traditionnelle avec poteaux, dalles et jupes préfabriqués ;

b) les ouvrages en béton précontraint :

- par post-tension pour les voiles et parois ;
- par pré-tension pour les dalles, planchers et parois préfabriqués.

La précontrainte par post-tension peut être réalisée suivant les cerces, mais aussi dans le sens vertical pour les ouvrages de grande capacité ;

c) les ouvrages en béton armé et précontraint : il s'agit en général d'ouvrages réalisés suivant des techniques traditionnelles, utilisant des éléments préfabriqués en béton précontraint ou réalisés sur chantier.

5.2 Ouvrages de transport de l'eau

Les principaux critères pris en compte sont :

- a) La position par rapport au sol :
 - canaux en remblais, déblais et/ou remblais-déblais ;
 - aqueducs sur piles, poteaux, pylônes.
- b) La forme de la section transversale ;
 - rectangulaire ;
 - trapézoïdale ;
 - circulaire ;
 - autres.
- c) Le mode de construction :
 - traditionnel ;
 - par éléments préfabriqués.

6. Dispositions constructives

6.1 Ouvrages en béton armé

En aucun cas, les dispositions retenues ne peuvent être moins sévères que les dispositions minimales données par les règles BAEL.

De plus, pour les parois des réservoirs des classes A, B et C avec revêtement d'étanchéité adhérent, à l'exception des radiers reposant sur le sol (cf. § 6.1.3), les dispositions suivantes complètent ou modifient les prescriptions des règles BAEL.

6.1.1 Épaisseur minimale des parois

L'épaisseur des parois ne doit pas être inférieure à celle fixée par les règles spécifiques au procédé de coffrage utilisé (coffrage glissant par exemple). Elle tiendra compte également des enrobages, des diamètres d'acier et des conditions de mise en place du béton.

L'épaisseur minimale de la paroi est de 15 cm pour les ouvrages de la classe A.

Elle est de 12 cm pour les ouvrages des classes B et C.

Dans le cas de coffrages glissants, cette valeur est portée à 15 cm, et les trous laissés par les tiges de vérins doivent être injectés en utilisant les mortiers et procédés d'injection des conduits pour armatures de précontrainte.

Pour les ouvrages de la classe D, et notamment les cuves en éléments préfabriqués, sous certaines conditions l'épaisseur minimale peut être réduite (cf. § 6.3.4).

6.1.2 Armatures

6.1.2.1 Enrobage

L'enrobage minimal des armatures est choisi conformément aux règles BAEL et aux textes normatifs, en particulier le fascicule P 18-011.

La distance libre entre toute génératrice extérieure d'une armature quelconque et la paroi de coffrage la plus voisine doit être au moins égale aux valeurs indiquées dans le tableau 6.

Il est rappelé qu'aucune tolérance en moins n'est admise.

6.1.2.2 Dispositions et écartement

Les armatures sont régulièrement réparties en fonction des efforts à reprendre, en évitant des variations trop brutales de leur section.

Pour des parois de plus de 15 cm d'épaisseur, elles sont obligatoirement réparties en deux nappes.

Dans le cas d'ouvrages circulaires à axe vertical, la nappe intérieure ne comporte pas plus de la moitié de la section totale des armatures horizontales ; la section unitaire des armatures de répartition est au moins égale au quart de la section unitaire des barres d'armatures principales.

Le diamètre \varnothing des aciers est au plus égal à $h_0/10$ (h_0 épaisseur de la paroi) et au moins égal à 8 mm (figure 2).

Cependant, dans le cas d'utilisation de panneaux de treillis soudés, les fils de répartition peuvent être en \varnothing 6 mm sous réserve qu'ils soient placés en deuxième lit.

L'espacement est limité, pour les parois au contact du liquide, à la plus petite des deux valeurs 1,5 h_0 et 20 cm.

Tableau 6 – Enrobage des armatures

Valeur minimale de c	Exposition et nature de l'ouvrage
5 cm (1)	Ouvrages à la mer ou exposés aux embruns ou aux brouillards salins, ouvrages exposés à des atmosphères très agressives.
3 cm (2)	Parois coffrées ou non, soumises (ou sont susceptibles de l'être) à des actions agressives, ou à des intempéries, ou des condensations, ou encore, eu égard à la destination des ouvrages, au contact d'un liquide.
1 cm	Parois situées dans des locaux couverts et clos et qui ne seraient pas exposées aux condensations.

(1) Cet enrobage de 5 cm peut être réduit à 3 cm si, soit les armatures, soit le béton, sont protégés par un procédé dont l'efficacité a été démontrée.
 (2) La valeur de 3 cm peut être ramenée à 2 cm lorsque le béton présente une résistance caractéristique supérieure à 40 MPa. En effet, l'efficacité de la protection apportée par l'enrobage est fonction de la compacité du béton, laquelle croît avec sa résistance.

6.1.2.3 Recouvrement

La proportion des barres en recouvrement dans une même section n'est pas supérieure à :

- 1/3 dans les sections soumises à un effort de traction, avec $M/N < 0,5 h_0$ (M représente le moment fléchissant et N l'effort normal de traction) ;
- 1/2 dans les autres cas (avec traction $M/N \geq 0,5 h_0$ ou compression).

6.1.2.4 Pourcentage minimal d'armatures

Le pourcentage minimal d'armatures par rapport à la section totale de béton, correspondant à l'application de la condition de non-fragilité des règles BAEL, est respecté. En particulier, pour les sections soumises à la traction simple, la condition de non-fragilité s'exprime par la condition :

$$\frac{A}{b_0 d} \geq \frac{f_{tj}}{f_e}$$

Par ailleurs, le pourcentage mis en œuvre sur chaque face et pour chaque direction ne peut être inférieur à :

- 0,125 % pour les armatures à haute adhérence (FeE400 et FeE500) ;
- 0,20 % pour les armatures lisses (FeE240).

Dans la partie courante de la paroi, le rapport de la section totale des armatures de chaque direction à la section de la paroi est inférieur à 2 %.

6.1.2.5 Exigences particulières pour le bétonnage

■ Armatures longitudinales des poutres

Les paquets de barres et l'espacement des barres isolées et paquets de barres devront dans leurs dispositions et espacement

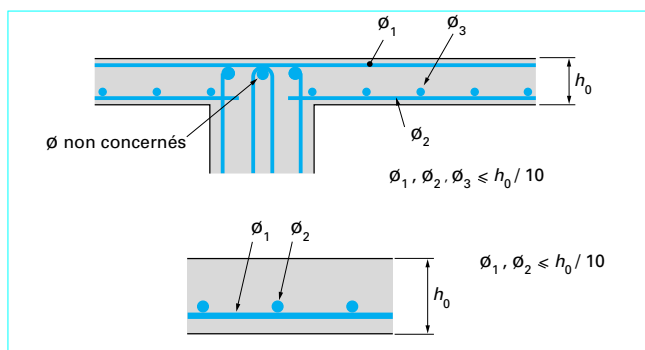


Figure 2 – Diamètre des armatures des plaques et coques

satisfaire aux conditions minimales définies dans les articles A.7.2,3, A.7.2,4 et A.7.2,5 des règles BAEL.

■ Armatures transversales des poutres

Le diamètre maximal des armatures ainsi que leur espacement doivent respecter les conditions définies respectivement dans les articles A.7.2,2 et A.7.2,6 des règles BAEL.

6.1.2.6 Limitation de l'ouverture des fissures

Les fissures qui se développent dans la membrure tendue d'une poutre sont généralement réparties par la présence des armatures principales de traction qui en limitent l'ouverture. Pour éviter que ces fissures ne se concentrent en se propageant dans l'âme d'une poutre qui serait dépourvue d'armatures, il convient de disposer des armatures de peau à raison de 3 cm² par mètre de longueur de paroi mesurée perpendiculairement à leur direction. Soit, par exemple, 1 HA 10 tous les 26 cm.

De plus, lorsque la membrure tendue d'une poutre est constituée de barres de diamètre supérieur à 20 mm (figure 3), l'écartement de celles-ci dans le sens horizontal ne doit pas excéder 4 fois leur diamètre :

$$\text{si } \varnothing > 20 \text{ mm : } e_1 \leq 4 \varnothing$$

Quand la fissuration est considérée comme très préjudiciable, la section des armatures de peau est portée à 5 cm² (soit par exemple 1 HA 12 tous les 23 cm), et l'espacement entre les armatures de diamètre supérieur à 20 mm est limité à 3 \varnothing .

La règle générale et son application lorsque la fissuration est considérée comme préjudiciable ou très préjudiciable sont définies dans les articles A.8.3 et A.4.5.3.1 des règles BAEL.

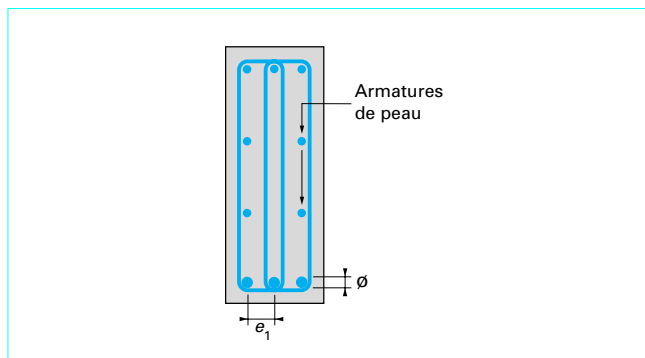


Figure 3 – Membrure tendue d'une poutre

6.1.3 Cas particulier des radiers reposant sur le sol

Pour les radiers, fonds de réservoirs, reposant directement sur le sol, les prescriptions des paragraphes 6.1.1 et 6.1.2 s'appliquent avec les aménagements suivants :

- l'épaisseur minimale est de 10 cm ;
- les recouvrements peuvent être assurés en totalité dans la même section, pour les armatures dimensionnées par la condition de pourcentage minimal ;
- pour les radiers monolithes et solidaires des parois verticales, le pourcentage minimal d'armature est fixé à 0,25 % pour les armatures à haute adhérence et à 0,4 % pour les armatures lisses ; ce pourcentage est à répartir en deux nappes pour les radiers d'épaisseur supérieure à 15 cm ;
- pour les radiers désolidarisés des parois présentant un comportement assimilable à celui des dallages, les armatures sont dimensionnées pour équilibrer les sollicitations dues au retrait.

Les radiers, fonds de réservoirs, reposant sur des pieux, sont traités comme les parois courantes.

Pour les radiers désolidarisés des parois, à défaut de justifications particulières, la section d'armature par unité de largeur peut être prise égale à :

$$A = 0,75 \mu g L / f_e$$

avec	g	pooids du radier par unité de surface,
	L	longueur entre joints,
	μ	coefficient de frottement pris égal à 1,5 dans le cas général et à 0,2 en présence d'un film de polyéthylène sur lit de sable,
	f_e	limite élastique de l'acier utilisé.

6.2 Ouvrages en béton précontraint

En aucun cas, les dispositions retenues ne peuvent être moins sévères que les dispositions minimales données dans les règles BAEL et BPEL.

6.2.1 Épaisseur minimale des parois

En plus des prescriptions du paragraphe 6.1.1, l'épaisseur de la paroi permet le respect des conditions relatives à la position des câbles donnée au paragraphe suivant.

En effet, dans le cas des pièces minces (dalles, hourdis inférieurs des aqueducs, parois des réservoirs, etc.), la condition suivante devra être satisfaite (figure 4) :

$$L \geq \begin{cases} 4\varnothing \\ F_0 \\ 0,6 h_0 f_{cj} \end{cases}$$

avec	L	distance entre les câbles de précontrainte,
	F_0	force maximale sous ancrage,
	\varnothing	diamètre du conduit,
	h_0	épaisseur de la paroi,
	f_{cj}	résistance caractéristique du béton à la compression à j jours.

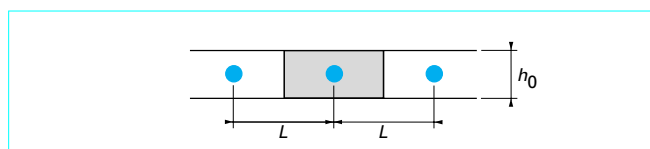


Figure 4 – Épaisseur minimale des parois

6.2.2 Position des câbles et sections d'enrobage

La définition des classes de vérification fait intervenir la notion de section d'enrobage. Les enrobages sont ceux fixés par les règles BPEL (article A.10.2,23).

■ Sections d'enrobage

Elles sont les suivantes (figure 5) :

$$d \geq \begin{cases} 3/4 a \\ \varnothing \\ c \end{cases}$$

avec	$3/4 a$	dimension horizontale du rectangle circonscrit au conduit ou paquet de conduit,
	\varnothing	diamètre du conduit,
	c	= 3 cm ouvrages à l'abri des intempéries, = 4 cm ouvrages courants, ≥ 5 cm ouvrages exposés à une atmosphère agressive.

Cela conduit à prévoir un enrobage au moins égal au diamètre de la gaine, limitée à 80 mm et à 4 cm ; cette dernière valeur est portée à 5 cm dans le cas d'ouvrages exposés à une atmosphère agressive.

Dans le cas des réservoirs circulaires avec précontrainte interne, l'axe théorique des câbles horizontaux se trouve en général dans le tiers extérieur de la paroi. En cas d'impossibilité du fait des impératifs de l'enrobage, une certaine tolérance est admise, à condition que la gaine du câble reste en totalité dans la moitié extérieure de la paroi.

L'axe théorique des câbles verticaux éventuels doit se trouver au voisinage de l'axe de la paroi.

■ Justifications des contraintes normales dans une section

● Sollicitation avec composante de flexion (figure 5a) : la section d'enrobage est la surface de béton délimitée par le contour encadrant l'ensemble des armatures de précontrainte.

● Sollicitation sans composante de flexion (figure 5b) : la section d'enrobage se confond avec la section totale.

6.2.3 Disposition des ancrages

Les ancrages de précontrainte horizontale sont disposés en général selon des nervures verticales intérieures ou extérieures (figure 6).

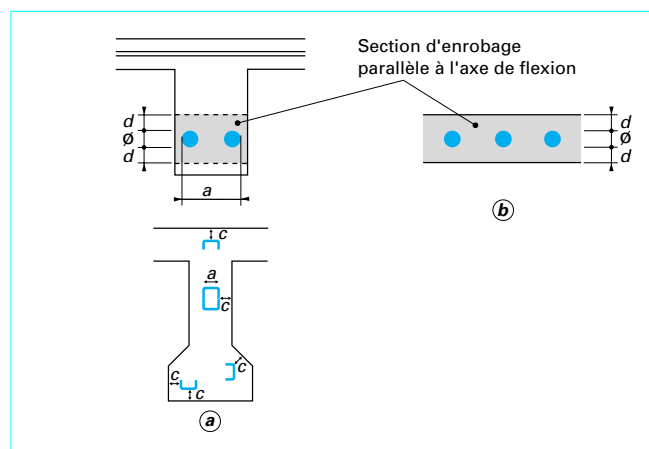


Figure 5 – Sections d'enrobage

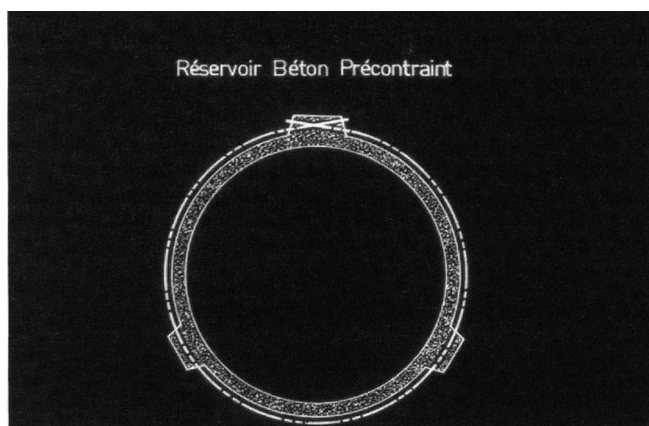


Figure 6 – Renforcement de réservoir

Dans le cas des réservoirs cylindriques, il est recommandé de prévoir au moins quatre nervures équidistantes, et de décaler les ancrages successifs. Dans le cas où ces dispositions ne sont pas adoptées, il y a lieu de vérifier les risques d'ovalisation.

Dans le cas d'ancrages intérieurs à la cuve, il faut apporter un soin particulier à la protection de ceux-ci.

6.2.4 Pourcentage minimal d'armatures passives

Le pourcentage minimal d'armatures de peau, fixé par les règles BPEL, est à respecter quelle que soit l'épaisseur de la paroi.

Cela revient à disposer, par mètre de longueur de parement (sur chaque face), une section d'au moins 3 cm^2 , sans pouvoir être inférieure à 0,10 % de la section de béton.

L'attention est attirée sur les moments d'axe horizontal, dus au caractère discontinu des câbles, qui peuvent conduire à renforcer certaines nappes.

6.2.5 Cas des ouvrages avec précontrainte horizontale et armatures verticales passives

C'est le cas où il n'y a pas de précontrainte verticale dans les parois ou de précontrainte radiale des parois inclinées.

Dans ce cas, des armatures verticales, dimensionnées par un calcul en béton armé, sont à disposer pour équilibrer les sollicitations. De plus, ces armatures satisfont les critères suivants :

- écartement maximal de 20 cm ;
- volume relatif au moins égal à 0,25 % ;
- section unitaire au moins égale au quart de la section unitaire des cerces qui seraient obtenues par le calcul en béton armé, si l'ouvrage n'était pas prévu en béton précontraint ;
- la contrainte admissible des aciers.

Les sollicitations sont essentiellement les moments fléchissants résultant d'une part des liaisons paroi-ceinture, et d'autre part des effets du gradient de température.

6.2.6 Enrobage des armatures passives

L'enrobage des armatures passives est choisi conformément aux règles BAEL. Le paragraphe 6.1.2.1 précise l'enrobage minimal des armatures.

6.3 Dispositions particulières à certaines parties d'ouvrages

6.3.1 Fondations superficielles et profondes

Les fondations superficielles et profondes sont conçues et calculées conformément aux dispositions du fascicule 62 du CCTG, titre V « Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil », modifiées ou complétées par les règles des paragraphes IV 71 et IV 72 du fascicule 74 du CCTG. On se reportera également aux articles *Fondations superficielles* et *Fondations profondes* du présent traité.

6.3.2 Support des réservoirs surélevés

On consultera le paragraphe IV 73 du fascicule 74 du CCTG.

Ces ouvrages (tours ou poteaux) sont calculés par application des règles BAEL en considérant les cas de charge les plus défavorables des combinaisons d'actions appropriées.

Il faut tenir compte de l'excentrement des charges verticales dû à la rotation de la fondation, rotation engendrée par les tassements différentiels qu'entraînent les contraintes maximale et minimale sur la fondation sous l'action du vent (l'hétérogénéité des terrains peut en outre accroître ces tassements différentiels).

Dans les ouvrages très élancés, il faut également tenir compte de l'excentrement des charges verticales dû à la déformation du support.

Pour les tours en béton armé, la contrainte de compression du béton en service est définie par la plus faible des valeurs suivantes :

$$\overline{\sigma}_{bc} = \frac{h_0 + 0,55}{3} f_{c28}$$

$$\overline{\sigma}_{bc} = 130 \frac{h_0}{D} (f_{c28})^{1/3}$$

avec h_0 (m) épaisseur de la paroi,
 D (m) diamètre de la tour au niveau où l'on effectue la vérification.

Il faut vérifier la résistance de la paroi aux sollicitations résultant du phénomène d'ovalisation.

■ Dans le cadre des Règles NV, le moment fléchissant d'ovalisation s'écrit

$$M = Kq \delta D_m^2$$

avec D_m diamètre moyen de la tour,
 δ coefficient de dimension fonction du diamètre extérieur et du niveau de l'anneau étudié (cf. Règles NV),
 q pression du vent, fonction du niveau et du site,
 K coefficient numérique, qui a les valeurs suivantes.

		$\gamma_0 = 1$	$\gamma_0 = 1,3$
fibres tendues }	extérieur	0,053	0,064
	intérieur	0,061	0,071

γ_0 étant un coefficient de correction fonction de l'élancement de la construction (cf. Règles NV).

L'épaisseur minimale des tours est de 12 cm dans le cas de coffrage ordinaire et de 15 cm dans le cas de coffrage glissant.

Ferrailage

Le rapport du volume des armatures au volume du béton dans les zones hors recouvrements et éloignées des ouvertures doit satisfaire les conditions suivantes :

Armatures	Sens vertical	Sens horizontal
— volume relatif minimal (%)	0,25	0,25
— volume relatif maximal (%)	2,00	1,5

Au droit des ouvertures, il est possible de multiplier par 1,5 le volume relatif maximal.

Acier doux : \varnothing minimal : 8 mm ;
Acier HA : \varnothing minimal : 6 mm.

L'entre-axes maximal des aciers est :

— dans le sens vertical : 25 cm ;
— dans le sens horizontal : 25 cm ou la plus faible des deux valeurs : 25 cm et 1,5 fois l'épaisseur minimale de paroi nécessaire pour satisfaire la condition de contrainte de compression du béton, dans le cas de coffrage glissant.

Au niveau des ouvertures, la transmission des efforts doit s'effectuer correctement par un renforcement des armatures et éventuellement une poutraison (BAEL annexe E-5.6, ouverture dans les voiles porteurs).

En ce qui concerne les poteaux, les Règles BAEL précisent qu'ils doivent être calculés en ELU en tenant compte du calcul de stabilité de forme.

6.3.3 Coupôles et ceintures

Élancement

On adopte, en général, pour la flèche des coupôles une valeur supérieure à :

- $D/10$ pour les coupôles de couverture ;
- $D/8$ pour les coupôles, fonds de réservoir,

où D représente l'ouverture de la coupôle.

L'adoption de flèches plus faibles est à justifier en tenant compte des déplacements des appuis et des effets du second ordre.

Épaisseur

L'épaisseur des coupôles est au moins de :

- 8 cm pour les coupôles de couverture ;
- 15 cm pour les coupôles, fonds de réservoir.

Les coupôles d'épaisseur inférieure à 15 cm comprennent des goussets de raccordement avec la ceinture.

Contrainte de compression du béton

Sous combinaisons ELS, la contrainte de compression du béton est limitée à la plus petite des deux valeurs suivantes :

$$\sigma_{bc} = \frac{h_0 + 0,55}{3} f_{c28}$$

$$\sigma_{bc} = 100 \frac{h_0}{R} (f_{c28})^{1/3} \text{ (en MPa)}$$

avec h_0 (m) épaisseur de la coupôle,
 R rayon de courbure de la coupôle,
 f_{c28} résistance caractéristique à 28 jours du béton à la compression.

Dispositions des armatures

Le rapport du volume des armatures au volume du béton satisfait, pour chaque direction, les valeurs suivantes :

- 0,20 % pour les coupôles de couverture ;
- 0,30 % pour les coupôles, fonds de réservoir.

L'écartement maximal des aciers est de 20 cm ; leur diamètre est inférieur ou égal au dixième de l'épaisseur de la coupôle. Dans les coupôles d'épaisseur supérieure ou égale à 15 cm, les armatures sont disposées en deux lits.

Ceintures

Le dessin d'une liaison ceinture, parois et coupôles est tel que les efforts passent sensiblement par le centre de gravité de la ceinture.

Les contraintes admissibles de traction des armatures et du béton prennent pour les ceintures les mêmes valeurs que pour les parois de réservoirs.

6.3.4 Cuves en éléments préfabriqués

Que les cuves soient monolithiques (petits ouvrages) ou constituées d'éléments préfabriqués assemblés sur chantier, leur conception, leur réalisation et leur assemblage satisfont toutes les prescriptions énoncées dans les paragraphes précédents, ainsi que celles relatives au traitement des points singuliers.

L'objectif est de retrouver un monolithisme équivalent à celui des ouvrages coulés en place.

Les points singuliers tels que : passage de canalisations, joint d'étanchéité, chaînage d'assemblage, etc., devront faire l'objet d'une étude et d'un traitement sur chantier particulièrement soignés.

Il est admis de réduire l'épaisseur minimale de la paroi (cf. § 6.1.1) de 12 cm à 10 ou 8 cm, sous réserve de mettre en œuvre des bétons respectivement de classe B30 et B35.

Il est admis qu'un réservoir réalisé à partir d'éléments préfabriqués, assemblés par précontrainte, soit considéré monolithique, si :

- la contrainte résiduelle sous l'effet du seul effort normal le plus défavorable est supérieure à 0,5 MPa ;
- de plus, dans le cas d'un moment fléchissant concomitant, les sections demeurent totalement comprimées sous l'effet combiné du moment et de l'effort normal.

6.4 Exemples de dispositions constructives

6.4.1 Goussets et pentes

6.4.1.1 Goussets

Lorsque la stabilité de la paroi est principalement assurée par encastrement sur le radier ou sur l'autre paroi, il est conseillé et souvent nécessaire d'exécuter des goussets (figure 7a). Cette disposition permet aussi d'éviter les angles vifs aux divers raccordements.

La réalisation de goussets est obligatoire lorsque le radier et les parois ont une épaisseur inférieure à 20 cm.

Les goussets en pied de parois seront exécutés en même temps que les radiers et leurs dimensions ne seront pas inférieures à 15 cm.

Les dispositions proposées dans la figure 7b sont admises. Elles permettent de porter l'épaisseur de la couronne de radier à 20 cm ou plus.

6.4.1.2 Pentes

Pour les radiers, il est recommandé de ne pas adopter une pente inférieure à 1 %.

Pour les ouvrages de petite capacité (ou diamètre), elle sera dirigée vers une cuvette ou le point d'évacuation, alors que pour les ouvrages plus importants, la pente sera dirigée vers une cuvette centrale afin d'obtenir une hauteur constante de la paroi.

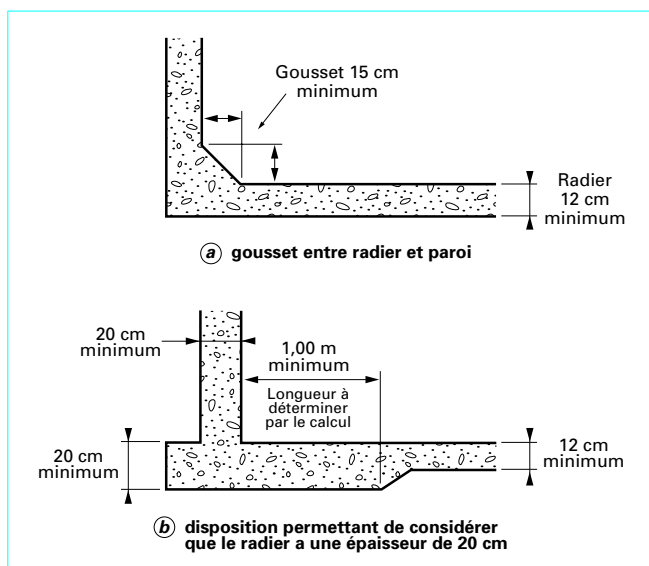


Figure 7 – Encastrement sur radier ou paroi

Les plafonds peuvent être cintrés ou plans. Ils doivent comporter une contre-pente afin d'assurer l'évacuation complète de l'air ainsi que des condensations. Une ventilation mécanique peut compléter une évacuation naturelle.

6.4.2 Quelques dispositions constructives des ferrillages

6.4.2.1 Rappel de quelques principes

L'emploi de toute armature susceptible d'entraîner des poussées au vide est à proscrire.

Les armatures doivent être correctement mises en place et rendues solidaires à l'aide d'éléments d'assemblage et de montage appropriés (fils recuits, épingles, cales, etc.).

Les armatures doivent être maintenues rigoureusement en place pendant les phases de montage et le bétonnage.

On doit veiller particulièrement au respect des enrobages en ayant recours à des cales d'épaisseur identique aussi bien pour le maintien des armatures et nappes horizontales que celles disposées en parois verticales, inclinées ou coupole.

Les longueurs d'ancrage et de recouvrement des armatures doivent être respectées.

Les défauts de mise en place et/ou le non-respect des dispositions constructives et des sections d'armatures peuvent avoir des conséquences importantes sur la résistance des pièces en béton armé ou précontraint.

6.4.2.2 Schémas de ferrillage

Ceinture supérieure et coupole (figure 8).

Coupole et recouvrement d'armatures (figure 9).

Colonne cylindrique et coupole inférieure (figure 10).

Ceinture inférieure et fondation (figure 11).

Paroi encastree sur radier (figure 12).

Parois encastrees. Parois d'angle (figure 13).

Parois verticales (figure 14).

Appui sur mur en béton, béton armé ou maçonnerie (figure 15).

Tracé type de câblage de précontrainte de paroi : section rectangulaire (figure 16).

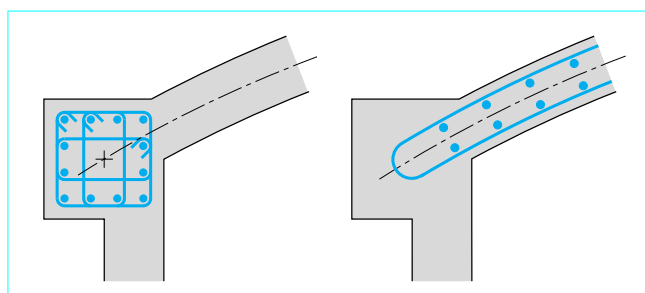


Figure 8 – Ferrillage de ceinture supérieure et coupole

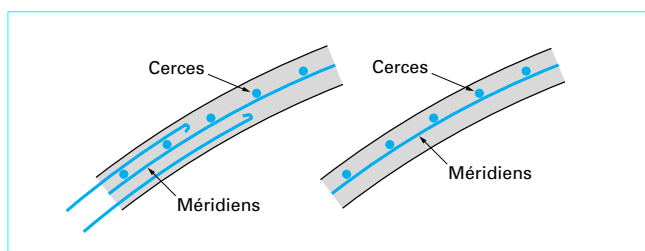


Figure 9 – Ferrillage de coupole et recouvrement d'armatures

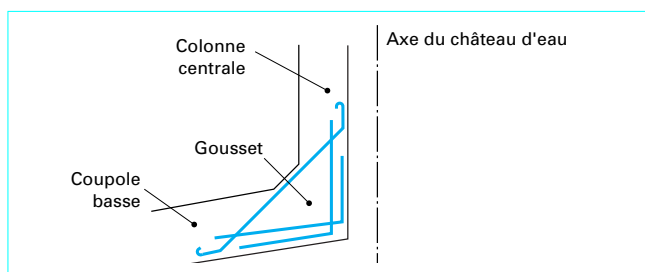


Figure 10 – Ferrillage entre colonne centrale et coupole inférieure

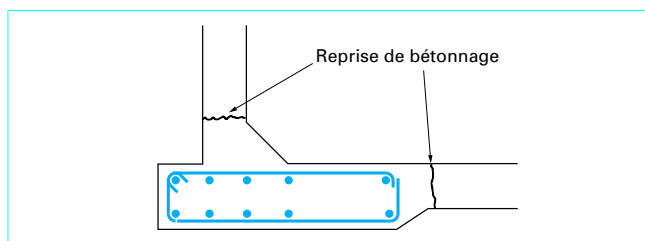


Figure 11 – Ferrillage de ceinture inférieure et fondation

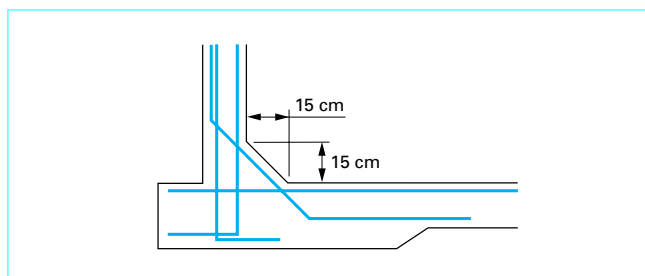


Figure 12 – Ferrillage de paroi encastree sur radier

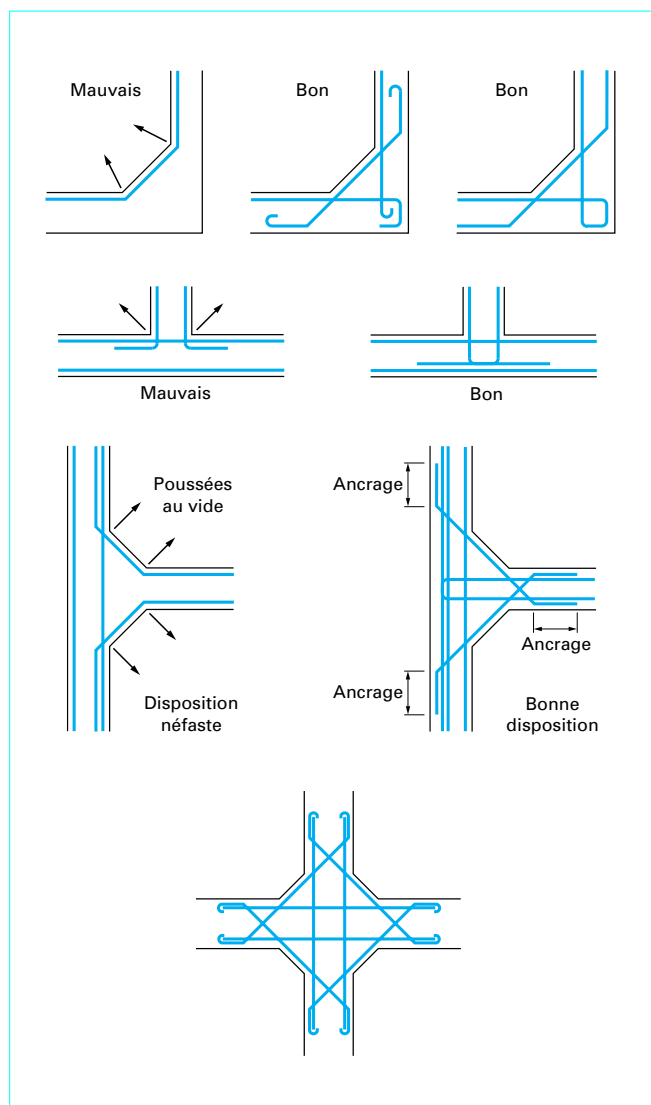


Figure 13 – Ferrailage de parois encastrées et de parois d'angle

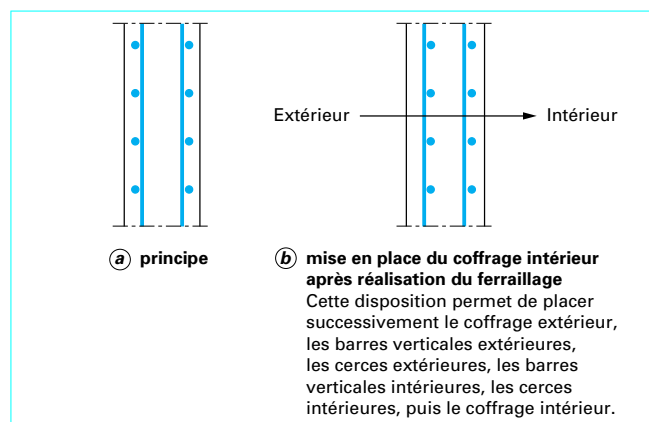


Figure 14 – Ferrailage de parois verticales

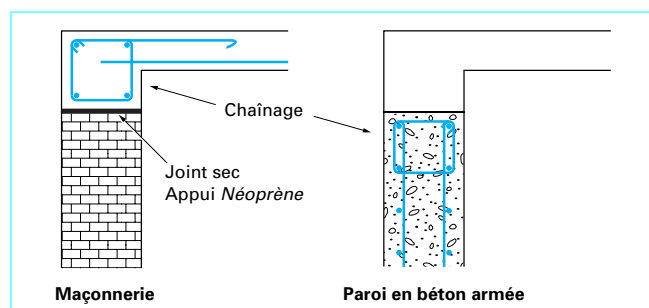


Figure 15 – Appui sur mur en béton, béton armé ou maçonnerie

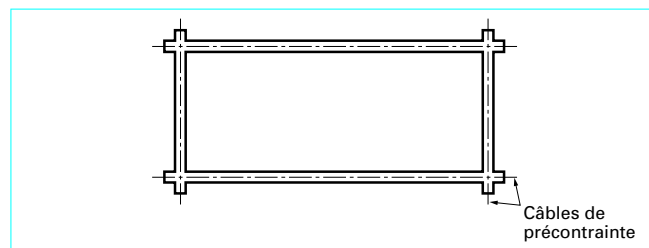


Figure 16 – Réservoir rectangulaire. Schéma de câblage horizontal