



CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

PARIS

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir

Le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : CONSTRUCTION - AMENAGEMENT

OPTION : GENIE CIVIL

Par

CHARPENTIER-TITY Haïmadou

LES PATHOLOGIES DES CHATEAUX D'EAU EN BETON ARME

Soutenu le 14/06/2012 Heure : 14h00

JURY

MEMBRES : Monsieur le Professeur F. GUILLEMARD, Président
Monsieur G. BAJEUX, Professeur associé - Monsieur M. CAZENAVE, Professeur associé
Monsieur M.VILLEFORT, Professeur associé - Monsieur X. CESPEDES, Professeur associé
Monsieur W. LARBI, Maître de Conférences - Monsieur J. PAIS, Professeur associé
Madame M-L. GARSON, Ingénieur Concrete – Monsieur R. CAMPAUD, Ingénieur Concrete

REMERCIEMENTS

Je remercie la société Concrete Pathologies Ile de France dans laquelle j'ai exercé, et au travers de laquelle j'ai pu travailler mon mémoire de fin d'études.

Je remercie plus particulièrement Marc Brouxel en sa qualité de Directeur Technique Matériaux, qui par ses nombreuses formations et le partage de ses connaissances techniques m'a grandement inspiré dans la rédaction de ce document.

Je tiens également à remercier :

- Samuel Naar Docteur Chargé d'affaires Matériaux au sein de l'agence de Nantes pour son aide, sa disponibilité et ses précieux conseils,
- Nicolas Sanchez, Ingénieur Chargé d'affaires Matériaux pour ces nombreuses années de collaboration, et pour son partage de connaissance,
- Loïc Bori, Ingénieur Chargé d'affaires Structures pour ses nombreux conseils, sa disponibilité et son soutien technique.

Je remercie aussi l'ensemble des salariés des agences d'Ile de France et de Nantes pour leur collaboration, leur aide, et les discussions que nous avons pu partager.

Je remercie également Gabriel BAJEUX, mon tuteur du Conservatoire National des Arts et Métiers pour l'aide et le suivi de ce mémoire, ainsi que toute l'équipe pédagogique de la filière Génie Civil.

Je tiens en dernier lieu à remercier ma mère Nicole CHARPENTIER-TITY, pour sa confiance, ainsi que mon frère Adama CHARPENTIER-TITY.

SOMMAIRE

I - RESUME	5
II - INTRODUCTION.....	6
II.1 - PARCOURS DE L'EAU	7
II.1.1 - Phase 1 : captage	7
II.1.2 - Phase 2 : traitement.....	7
II.1.3 - Phase 3 : stockage.....	8
II.1.4 - Phase 4 : distribution.....	9
II.2 - HISTORIQUE.....	10
III - CONSTRUCTION D'UN CHATEAU D'EAU.....	13
III.1 - DIFFERENTS TYPES DE CHATEAUX D'EAU - NOMENCLATURE	13
III.2 - LA STRUCTURE D'UN CHATEAU D'EAU EN BETON ARME.....	23
III.2.1 - Les fondations	24
III.2.2 - Le fût.....	25
III.2.3 - Plancher bas et planchers intermédiaires	26
III.2.4 - La cuve.....	27
III.2.5 - La coupole de couverture	29
III.3 - LES EQUIPEMENTS.....	30
III.3.1 - Les équipements de sécurité.....	30
III.3.2 - Les équipements hydrauliques	35
III.3.3 - Autres équipements	37
IV - PATHOLOGIES D'UN CHATEAU D'EAU EN BETON ARME.....	37
IV.1 - STRUCTURE (DESORDRES DE STRUCTURES ET PATHOLOGIES DES MATERIAUX)	37
IV.1.1 - Pathologies du béton.....	37
IV.1.2 - Aciers apparents, corrosion.....	40
IV.1.3 - Défauts du parement	42
IV.1.4 - Déformations	43
IV.1.5 - Différences de teinte	44
IV.1.6 - Fissuration structurelle	45
IV.1.7 - Suintements et efflorescences	50
IV.1.8 - Eclat du béton.....	52
IV.1.9 - Ségrégation du béton.....	53
IV.2 - ETANCHEITE EXTERIEURE DE LA COUPOLE	53
IV.2.1 - Cloquage	53
IV.2.2 - Décollement.....	53
IV.2.3 - Vieillessement – Usure	55
IV.3 - REVETEMENT INTERIEUR DE LA CUVE.....	56
IV.3.1 - Cloquage	56

IV.3.2 - Fissuration de l'étanchéité.....	57
IV.3.3 - Décollement.....	58
IV.3.4 - Revêtement non conforme	59
IV.4 - SERRURERIES ET DISPOSITIFS DE SECURITE	60
IV.4.1 - Corrosion des serrureries	60
IV.4.2 - Dispositifs de sécurité et équipements non conformes	61
V - METHODES D'INVESTIGATIONS SUR UN CHATEAU D'EAU BETON ARME	62
V.1 - INVESTIGATIONS NON-DESTRUCTIVES SUR LE RESERVOIR	62
V.1.1 - Inspection détaillée.....	62
V.1.2 - Diagnostic	63
V.2 - INVESTIGATIONS SEMI-DESTRUCTIVES OU DESTRUCTRICES SUR LE RESERVOIR.....	71
V.2.1 - Prélèvements de béton pour analyse en laboratoire.....	71
V.2.2 - Mesures du potentiel de corrosion des armatures.....	71
V.2.3 - Mesures de la profondeur de carbonatation du béton	72
V.2.4 - Essais de cohésion superficielle du support et/ou d'adhérence d'un revêtement	73
VI - ANALYSES EN LABORATOIRE DES ECHANTILLONS BETON DU CHATEAU D'EAU.....	75
VI.1 - LES ESSAIS MECANQUES : RESISTANCE EN COMPRESSION SIMPLE.....	75
VI.2 - LES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES.....	75
VI.2.1 - Mesure de la densité et de la porosité du béton	75
VI.2.2 - Mesure des teneurs en chlorures libres	76
VI.2.3 - Mesures de pH	76
VI.2.4 - Mesure des teneurs en sulfates solubles	77
VII - PRECONISATIONS DE REPARATION D'UN CHATEAU D'EAU BETON ARME.....	78
VII.1 - REPARATIONS COURANTES	78
VII.1.1 - Traitement des armatures corrodées et reconstitution de l'enrobage	78
VII.1.2 - Traitement des fissures	78
VII.1.3 - Régénération des bétons carbonatés et/ou chlorés	79
VII.1.4 - Traitement de l'étanchéité de la coupole.....	80
VII.1.5 - Imperméabilisation de l'intrados de coupole de couverture	80
VII.1.6 - Traitement de l'étanchéité de la cuve.....	81
VII.1.7 - Imperméabilisation des parements extérieurs (ravalement)	83
VII.1.8 - Mise en conformité des accès et remplacement de serrureries diverses	83
VIII - REPARATION PAR AJOUT DE PRECONTRAINTES ADDITIONNELLE (MODELISATION ET NOTE DE CALCUL) : CAS PARTICULIER DU RESERVOIR SUR TOUR DE FERRIERES-EN-BRIE	85
VIII.1 - INTRODUCTION.....	85
VIII.2 - PRESENTATION DE L'OUVRAGE.....	85
VIII.3 - PRINCIPAUX DESORDRES RELEVES.....	87
VIII.3.1 - Solutions de renforcement de la structure.....	87
IX - RECHERCHE DES APTITUDES STRUCTURELLES DU VOILE DE CUVE.....	89
IX.1 - CARACTERISTIQUES GENERALES DES CALCULS	89
IX.2 - VERIFICATION DU DIMENSIONNEMENT DE LA CUVE	90

IX.2.1 - Calcul du ferrailage minimal	91
IX.2.2 - Calcul du gradient thermique	95
IX.2.3 - Vérification du ferrailage horizontal au gradient thermique	97
IX.3 - CALCUL DU RENFORCEMENT PAR PRECONTRAINT - MODELISATION DE LA STRUCTURE.....	99
IX.3.1 - Chargement sous poids propre, eau et effets de température	99
IX.3.2 - Chargement sous poids propre, l'eau, les effets de température et la précontrainte	100
X - CONCLUSION	103
XI - REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	104

Liste des figures

Figure 1 - Parcours de l'eau	7
Figure 2 - Réservoir sur tour à cuve conique	23
Figure 3 - Vue en plan du ferrailage d'une semelle de fondation circulaire	25
Figure 4 - Implantation des différents équipements du réservoir	30
Figure 5 - Schéma de la fontainerie d'un réservoir sur tour.....	36
Figure 6 - Exemple d'implantation des zones de diagnostic sur un réservoir béton	64
Figure 7 - Exemple d'enregistrement pachométrique par balayage	65
Figure 8 - Exemple d'enregistrement pachométrique par cartographie	65
Figure 9 - Exemple d'enregistrement radar sur le voile de cuve	68
Figure 10 - Géométrie de la cuve	90
Figure 11 - Répartition des tranches sur la paroi de la cuve	91
Figure 12 - Eléments de calcul du voile de cuve de tranche unitaire	92
Figure 13 - Tranche de voile de cuve.....	95
Figure 14 - Coupe sur voile de cuve avec disposition des 2 nappes d'armatures	97
Figure 15 - Visualisation des efforts normaux sur la jupe	99
Figure 16 - Visualisation des efforts normaux engendrés par la précontrainte sur la jupe	101
Figure 17 - Visualisation des contraintes engendrés par la précontrainte dans la jupe	102

Liste des photos

Photo 1- Vestige d'un château d'eau à Rome réalisé en l'an 226.....	10
Photo 2 - Vestige d'un aqueduc romain construit il y a plus de 2000 ans	11
Photo 3 - Réservoir métallique sur fût maçonné du début du XXe siècle.....	13
Photo 4 - Réservoir construit en 1907	14
Photo 5 - Réservoir construit en 1934	15
Photo 6 - 1936 – 700 m ³ Photo 7- 1979 - 1000 m ³	16
Photo 8 - 1950 – 60 m ³ Photo 9 - 1930 – 500 m ³	17
Photo 10 - 1977 – 200 m ³ Photo 11 - 200 m ³	18
Photo 12 - 1985 – 1600 m ³ Photo 13 - 1983 – 2000 m ³	19
Photo 14 - 1976 – 1000 m ³	20
Photo 15 - Réservoir sphéroïdale.....	21
Photo 16 - Réservoir à fond sphéroïdale.....	22
Photo 17 - Coffrage grimpant du fût Photo 18 - Coffrage grimpant du fût	26
Photo 19 - Mis en place de l'échafaudage Photo 20 - Coffrage de la cuve.....	28

Photo 21 - Réalisation de la cuve	28
Photo 22 - Coffrage au sol de la cuve	
Photo 23 - Levée de la cuve par câbles.....	29
Photo 24 - Aciers apparents et corrodés sur fût	
Photo 25 - Aciers apparents	41
Photo 26 - Aciers apparents et corrodés sur cuve	41
Photo 27 - Aciers corrodés en sous-face de cuve	
Photo 28 - Aciers corrodés en sous-face de	42
Photo 29 - Fissuration de la dalle du plancher bas du fût, due à des remontées d'eau du sol	44
Photo 30 - Fissures et efflorescences sur la cuve.....	47
Photo 31 - Fissure horizontale sous la ceinture haute.....	48
Photo 32 - Fissure horizontale en partie basse du voile.....	48
Photo 33 - Fissures verticales et horizontales	49
Photo 34 - Fissure verticale sur fût.....	49
Photo 35 - Fissuration de l'enduit sur coupole.....	50
Photo 36 - Suintements et efflorescences sur la cuve.....	51
Photo 37 - Efflorescences en sous-face de cuve.....	51
Photo 38 - Eclat et fissuration sur la ceinture basse	52
Photo 39 - Décollement de la feuille d'étanchéité.....	55
Photo 40 - Décollement partiel de la feuille d'étanchéité	56
Photo 41 - Cloquage d'une étanchéité polyuréthane.....	57
Photo 42 - Fissuration d'une étanchéité de type enduit hydraulique	58
Photo 43 - Décollement d'une étanchéité de type membrane bitumineuse	59
Photo 44 - Corrosion de l'échelle intérieure.....	60
Photo 45 - Corrosion de la crépine de distribution	60
Photo 46 - Absence de garde-corps sur la toiture.....	61
Photo 47 - Mesure d'enrobage d'armature au droit du fût	68
Photo 48 - Prise de mesures ultrasoniques	70
Photo 49 - Prise de mesures sclérométriques.....	70
Photo 50 - Mesure de carbonatation sur un échantillon	73
Photo 51 - Mesure d'essai dynamométrique	74
Photo 52 - Château d'eau de Ferrières-en-Brie	85
Photo 53 - Château d'eau de Ferrières-en-Brie	86

Liste des tableaux

Tableau I – Résultats des enregistrements pachométriques	66
Tableau II - Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des ultrasons	69
Tableau III - Dimensionnement des armatures de la jupe	94
Tableau IV - Vérification de l'effort normal résistant (in-situ)	94
Tableau V - Comparaison entre les sections d'armatures sollicitantes et résistantes	98
Tableau VI - Calcul du chargement de la précontrainte (Pp)	100

I - RESUME

La construction de réservoirs en béton armé a été extrêmement répandue en France au milieu du XX^e siècle. Aujourd'hui la majorité de ces ouvrages est encore en service et subissent des désordres liés à leur exploitation et à leur usure. Ces désordres sont essentiellement structurels, et liés à l'étanchéité. Les facteurs principaux dégradant de la cuve et de son fût proviennent de l'agressivité de l'eau, des techniques de nettoyage et de désinfection des cuves, pour l'intérieur, et de l'exposition en altitude, l'ensoleillement différentiel, les cycles gel/dégel, les intempéries (neige et vent) pour l'extérieur.

En outre, tirer des conclusions sur le comportement d'un ouvrage nécessite de maîtriser les données structurelles, environnementales, etc...

Les missions d'inspection et de diagnostic s'inscrivent clairement dans une démarche permettant de faire un état des lieux de l'ouvrage. Pour répondre de manière optimale aux différentes problématiques, il est nécessaire de faire un choix d'investigations et une analyse judicieuse des désordres.

Ces missions constituent une aide décisionnelle pour le maître d'ouvrage.

Les travaux de réparation et de confortement tiennent compte de l'ensemble des préconisations élaborées à l'issue du diagnostic.

Ces travaux permettent de restaurer la structure, et de la conforter pour un usage prolongé et durable.

SUMMARY

The construction of concrete water towers was extremely popular in France in the middle of the twentieth century. Today the majority of these constructions is still in use and related disorders undergoing their operation and wear. These disorders are mainly structural and related to the waterproofness. The main factors degrading the tank and the tower was taken from the water aggressiveness, techniques of cleaning and disinfection of tanks, for the interior, and exposure to altitude, sunshine differential, the freeze / thaw cycles, weather (snow and wind) to the outside. In addition, conclusions about the behavior of a structure need to control the structural, environmental, etc... The tasks of inspection and diagnosis are clearly in a process to make an inventory of the work. To respond optimally to the various problems, it is necessary to make a choice of investigations and sound analysis of the disorders. These missions are a decision support for the client. The repair and reinforcement take into account all the recommendations made at the close of the diagnosis. This work can restore the structure, and comfort for extended use and durability.

II - INTRODUCTION

Le terme « Château d'eau » provient du constat que ceux-ci ressemblent souvent aux donjons des châteaux. Egalement appelé « réservoir surélevé » par les exploitants d'eau potable, ou « réservoir sur tour » par les constructeurs, dans d'autres langues, il garde la traduction de cette dernière dénomination : en anglais, le réservoir sur tour devient « water tower », et en espagnol, il est communément appelé « torre de agua ».

Un château d'eau est un réservoir dont le fond s'élève au-dessus du niveau du sol. Une telle construction est essentiellement composée de deux parties :

- ✓ le réservoir proprement dit ou cuve,
- ✓ le support, communément appelé fût.

L'aspect extérieur d'un château d'eau est déterminé en premier lieu par les caractéristiques techniques, plus précisément par la capacité et l'élévation de la cuve. Ensuite, ce seront la disponibilité des matériaux de construction et l'évolution du génie civil qui joueront un rôle.

Dès le début du XX^e siècle, le réservoir sur tour a pu s'associer à l'invention du béton armé. Quelques ouvrages datant de cette période sont encore sur pied, mais la majorité des châteaux d'eau en béton armé ont été conçus à partir des années cinquante (70% de la totalité des ouvrages en béton actuels sur le territoire français). Le recours du béton dans la construction des réservoirs sur tour a eu de nombreux avantages, tel que le coût, la facilité de mise en œuvre et la création de nouvelles formes. Une solution avantageuse, pour répondre à la reconstruction d'après-guerre, et pour palier à la demande croissante due au développement démographique et économique.

Néanmoins, des pathologies liées à l'âge, aggravées par les conditions de service des cuves, dont les parois minces subissent à la fois des variations mécaniques, thermiques et hygrométriques dues au marnage du plan d'eau, et aux conditions atmosphériques se révèlent sur de nombreux réservoirs en béton.

Le principal problème de ces structures est lié aux fuites d'eau, qui sont dues soit à la présence de fissures (d'origines diverses : thermiques, mécaniques...) ou de défauts des corrosions des armatures, notamment si le milieu contient des agents polluants (chlorures notamment).

II.1 - Parcours de l'eau

Le château d'eau est un maillon de la chaîne de distribution d'eau potable. Pour comprendre le rôle du château d'eau, il est essentiel de connaître le parcours de l'eau :

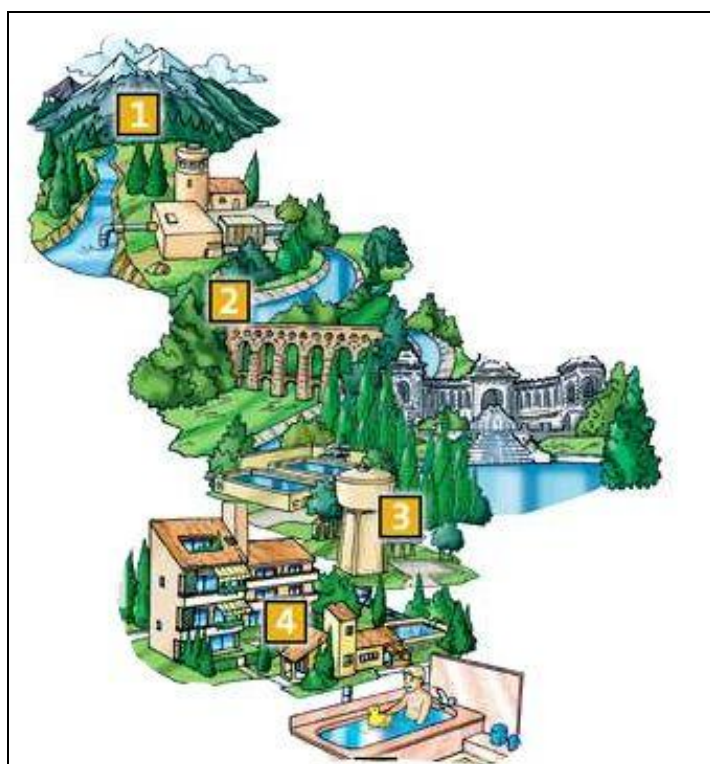


Figure 1 - Parcours de l'eau

II.1.1 - Phase 1 : captage

L'eau qui sert à la consommation est d'origine superficielle (rivières, lacs, fleuves, mers...) ou souterraine (nappes phréatiques). Elle est pompée par forage ou prélevée directement en surface.

II.1.2 - Phase 2 : traitement

Une fois prélevée, l'eau subit plusieurs types de traitements afin de la rendre propre à la consommation.

Dégrillage et tamisage : l'eau est d'abord filtrée à travers une simple grille, afin d'arrêter les plus gros déchets présents dans l'eau (feuilles, insectes...). Elle passe ensuite dans des tamis à mailles fines retenant les déchets les plus petits (moins de 1 mm).

Floculation et décantation : un coagulant est ajouté à l'eau pour rassembler en flocons les déchets encore présents dans l'eau (poussière, particules de terre, œufs de poissons, etc...). Ces flocons, plus lourds que l'eau, se déposent au fond du bassin de décantation et 90% des matières en suspension sont ainsi éliminées.

Filtration sur sable : la filtration sur sable élimine les matières encore visibles à l'œil nu.

Ozonation : l'eau est désinfectée grâce à l'ozone qui a une action bactéricide et virucide. Ce gaz, mélangé à l'eau, agit aussi sur les matières organiques en les cassant en morceaux. Il améliore également la couleur et la saveur de l'eau.

Filtration sur charbon actif : les filtres à charbon actif retiennent les micropolluants comme les pesticides et consomment une partie de la matière organique « cassée » par l'ozone.

Chloration : ajout de chlore à la sortie de l'usine de production et sur différents points du réseau de distribution afin d'éviter le développement de bactéries et maintenir la qualité de l'eau tout au long de son parcours dans les canalisations.

II.1.3 - Phase 3 : stockage

Une fois rendue potable, l'eau est transportée à travers un réseau de conduites fermées en fonte ou en acier vers des réservoirs situés généralement en hauteur : les bassins enterrés au sommet des collines ou les châteaux d'eau.

L'entreposage de l'eau dans le réservoir sur tour joue un rôle de tampon entre le débit demandé par les abonnés et le débit fourni par la station de pompage.

En effet, les besoins en eau d'une population ne sont pas permanents, ils varient en fonction de l'heure et des saisons. Les pompes, elles, ont un débit continu trop abondant la nuit et insuffisant aux heures de pointe. Les cuves permettent donc de stocker l'eau pendant les creux pour satisfaire plus tard la surconsommation.

L'entreposage de l'eau permet également de faire face aux demandes exceptionnelles en cas d'incendie.

II.1.4 - Phase 4 : distribution

Les réservoirs d'eau sur tour fonctionnent selon le principe des vases communicants pour assurer une pression régulière et suffisante au sein du réseau en fonction du rythme de consommation.

L'eau est acheminée du point d'eau au réservoir. Si l'altitude du point d'eau est inférieure à l'altitude du réservoir, des pompes sont utilisées pour relever l'eau jusqu'à ce dernier.

L'eau est ensuite envoyée dans un réseau gravitaire qui va assurer son acheminement vers l'ensemble des habitations.

L'eau est distribuée au consommateur via un système complexe de conduites dotées de vannes et d'appareils de régulation. Le niveau des réservoirs, le débit, la pression et la qualité de l'eau sont contrôlés en permanence, en de nombreux points du réseau.

La pression de l'eau qui est fournie au robinet des abonnés est proportionnelle au dénivelé qui existe entre le niveau d'eau dans le château d'eau et l'habitation : 10 mètres de dénivelé équivalent à 1 bar, 20 mètres à 2 bars, etc... (un robinet correct a une pression de sortie aux environs de 2 à 3 bars). Les plus grands châteaux d'eau peuvent contenir plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes d'eau.

II.2 - Historique

Les premiers réservoirs sur tour remontent à l'époque de la civilisation romaine. En l'an 100 après Jésus-Christ, Rome compte 19 aqueducs, 250 châteaux d'eau et 1352 fontaines qui apportent l'eau courante à la ville.



Photo 1- Vestige d'un château d'eau à Rome réalisé en l'an 226

Le château d'eau est le symbole de civilisations avancées sur le plan technique, mais aussi sur celui de l'organisation. Ainsi, toutes les grandes civilisations s'y sont frottées. Elles ont accordé beaucoup d'importance au ravitaillement des agglomérations humaines en eau saine et abondante. Les romains, dont nous sommes les héritiers sur ce point, maîtrisaient parfaitement l'adduction d'eau, grâce à des aqueducs qui alimentaient les fontaines, les thermes et les installations privées de leur ville.

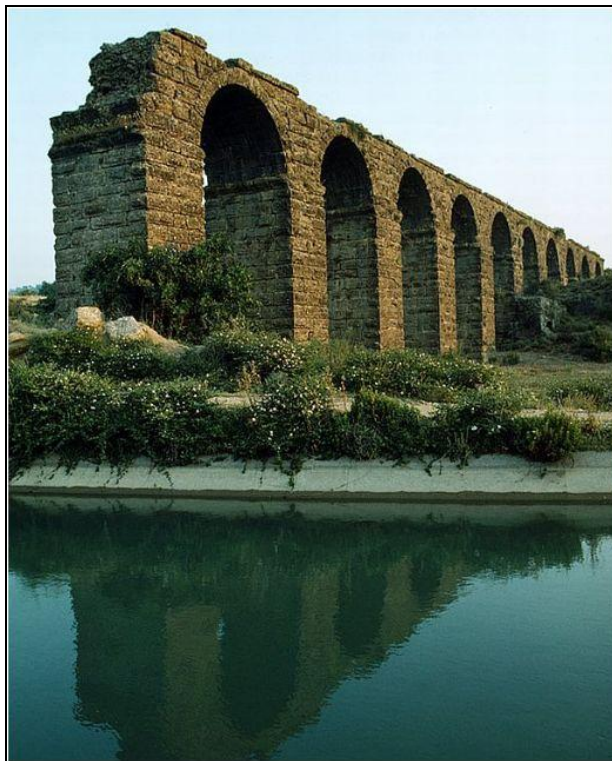


Photo 2 - Vestige d'un aqueduc romain construit il y a plus de 2000 ans

Cependant, après une longue éclipse dans la civilisation européenne, remplacé par un système plus rudimentaire, « le porteur d'eau », le château d'eau réapparaît au XIXe siècle en raison de l'essor des chemins de fer et des trains à vapeur, grands consommateurs d'eau. Ce besoin inépuisable en eau des locomotives va permettre aux châteaux d'eau d'être disséminés dans les gares, et même sur de petites haltes en campagne. S'ensuivra de nombreuses constructions pour les usines, afin de fournir une pression suffisante aux machines, les refroidir et lutter contre les incendies. Des réservoirs seront édifiés également pour des camps militaires afin d'en assurer l'autonomie, pour les établissements de santé afin d'y préserver l'hygiène, pour des propriétés privées et des châteaux afin d'alimenter les fontaines et jets d'eaux, etc...

En France, en 1930, 23 % des communes sont équipées d'un réseau de distribution d'eau à domicile. En 1945, seulement 30 % des communes rurales sont équipées. Selon Le Figaro, « c'est à la fin des années 1980 que la quasi-totalité des Français bénéficie de l'eau courante à domicile ».

L'arrivée de l'eau courante dans la totalité des communes françaises a été réalisée grâce à une intense activité de construction de châteaux d'eau durant les années 1950, 1960 et 1970 : une

période correspondant à l'aménagement du territoire rural, symbolisant à l'époque l'accès ostensible au progrès.

III - CONSTRUCTION D'UN CHATEAU D'EAU

III.1 - Différents types de châteaux d'eau - Nomenclature

Depuis le début de construction des réservoirs d'eau sur tour, différents types de structures se sont imposés au fil des temps. Suivant les matériaux et les connaissances techniques de l'époque, les châteaux d'eau ont eu une forme différente. Un classement des différents réservoirs sur tour modernes peut être donné :

Cuve cylindrique métallique

Ce type de réservoir a été utilisé au début du 20^e siècle par les compagnies ferroviaires, afin de ravitailler en eau les chaudières des locomotives à vapeur. D'une capacité inférieure à 100 m³, la cuve métallique repose sur un fût constitué de maçonnerie brique ou de poutres en béton et de maçonneries entre celles-ci.

De tels types simples de réservoirs sur socle se retrouvent encore actuellement, surtout dans l'agriculture et l'horticulture.

Années de construction de ce type de réservoir : 1899 à 1954.

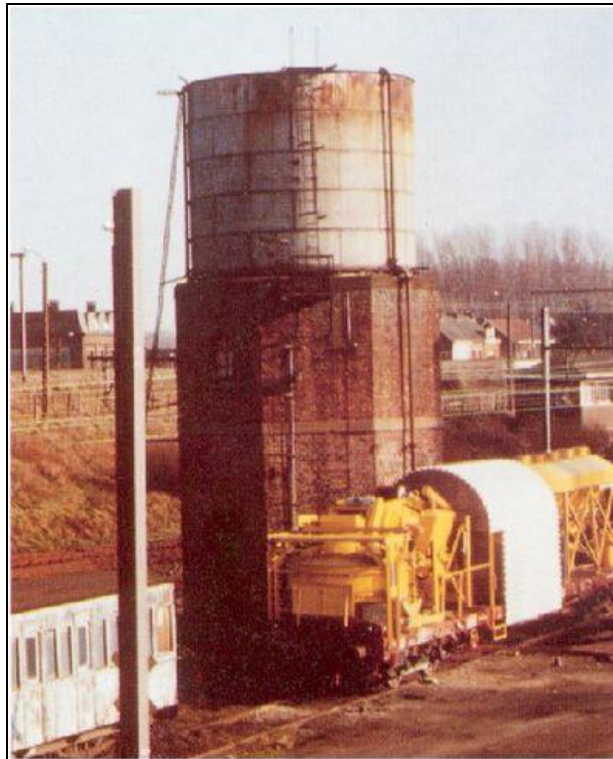


Photo 3 - Réservoir métallique sur fût maçonné du début du XXe siècle

Réservoir de type Hennebique

Les premiers réservoirs en béton armé sont de type Hennebique, du nom de leur concepteur François Hennebique, ingénieur Français, l'un des premiers à utiliser le béton armé dans la construction. Ils sont constitués de six ou huit appuis en béton armé disposés de façon cylindrique ou pyramidale, et reliés entre eux par des poutres circulaires. La cuve en béton en encorbellement est portée par des poutres en béton disposées en croix ou reposant radialement sur les poutres verticales.

De par leur coût peu élevé, ces châteaux d'eau sont essentiellement associés à la distribution d'eau industrielle.

La capacité de cuve de ce type de réservoir reste encore réduite, et est comprise entre 50 et 150 m³.

Années de construction de ce type de réservoir : 1900 à 1940.

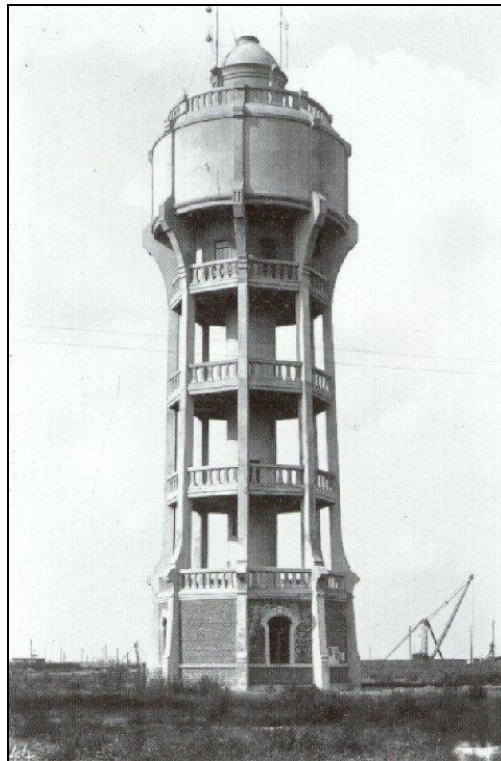


Photo 4 - Réservoir construit en 1907

Réservoir de type Monnoyer

C'est un réservoir avec un fût polygonal tronconique sur semelle, constitué d'un assemblage de parpaings moulés à cet effet, qui s'emboîtent les uns dans les autres, créant à chaque jonction une sorte de demi-colonne creuse dans laquelle est coulé le béton armé.

Début de construction de ce type de réservoir : 1930.



Photo 5 - Réservoir construit en 1934

Réservoir de type colonne

Le diamètre du fût et de la cuve est identique et constant sur toute la hauteur.

Des variantes existent : elles présentent des contreforts sur toute ou partie de la hauteur du réservoir, et une distinction peut se faire entre la cuve et le fût par la présence d'un léger encorbellement sur la base de la cuve.

Ce type de réservoir est construit avec une cuve en béton armé et un fût en maçonnerie ou en béton armé.

Années de construction :

- ✚ 1892 à 1909 pour les réservoirs de faible hauteur,
- ✚ 1906 à 1984 pour les réservoirs de grande hauteur.



Photo 6 - 1936 – 700 m³



Photo 7- 1979 - 1000 m³

Cuve à faible encorbellement ou champignon

Elle se caractérise par une cuve droite en béton reposant sur un fût en béton ou en maçonnerie. La base de la cuve connectant cette dernière au fût, est légèrement inclinée.

Année de construction : 1900 à 1960.

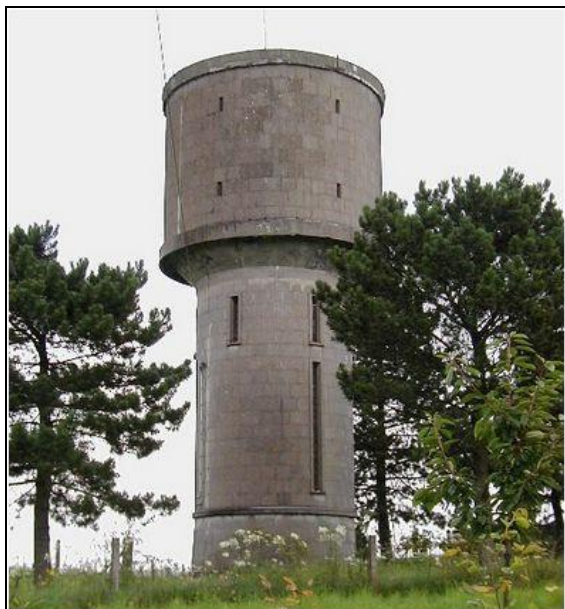


Photo 8 - 1950 – 60 m³



Photo 9 - 1930 – 500 m³

Cuve conique avec fût droit ou fût conique

Ce type de réservoir se caractérise par une forme conique inversée de la cuve. Cette dernière repose sur un fût conique ou droit. La capacité de ces réservoirs ne dépasse pas les 500 m³.

Année de construction : 1964 à nos jours.



Photo 10 - 1977 – 200 m³



Photo 11 - 200 m³

Cuve à fort encorbellement

Elle se caractérise par une cuve avec un voile fortement incliné ou droit, et un fût étroit et haut sur lequel est implantée la cuve. Le diamètre du fût peut être variable sur la hauteur.

De tels châteaux d'eau sont conçus pour emmagasiner des volumes d'eau compris entre 1500 et 3000 m³, et sont construits suivant un procédé différent. Le fût est réalisé en premier, et après la cuve est assemblée sur le sol et hissée ou élevée au moyen de vérins tel un élément préfabriqué (voir Paragraphe III.2.5 – Construction de la cuve).

Année de construction : 1960 à nos jours



Photo 12 - 1985 – 1600 m³



Photo 13 - 1983 – 2000 m³

Réservoirs sphériques

Dans ces réservoirs métalliques, la cuve est sphérique. Pour les réservoirs de capacité ne dépassant pas 500 m³, le support est généralement composé d'un fût cylindrique légèrement conique de faible diamètre par rapport à celui de la cuve. Pour les réservoirs sphériques de grande capacité, leur support comprend une série de colonnes tubulaires qui permettent de masquer les tuyauteries et les échelles d'accès.

Année de construction : 1960 à 1980.



Photo 14 - 1976 – 1000 m³

Réservoirs sphéroïdaux

La cuve métallique de ces réservoirs présente une forme de bulbe qui est plus avantageuse du point de vue de la résistance. Ces réservoirs peuvent atteindre des capacités de 2000 à 3000 m³. Le support est constitué comme les précédents d'un fût central.

Année de construction : 1980 à nos jours.



Photo 15 - Réservoir sphéroïdale

Réservoirs à fond sphéroïdale

La cuve métallique de ce type de réservoir est composée de deux calottes sphériques raccordées par un élément en forme de cylindre. Ce type de réservoir est utilisé pour des grandes capacités de 1 000 à 10 000 m³.

Année de construction : 1980 à nos jours

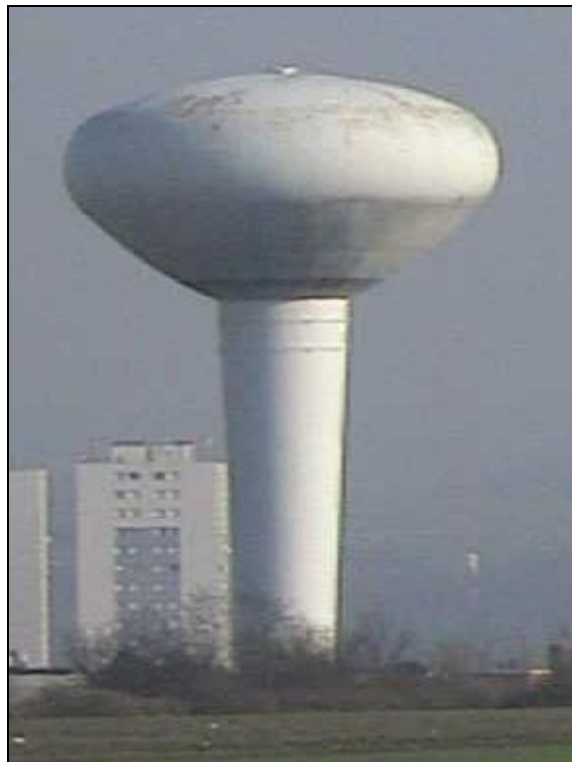


Photo 16 - Réservoir à fond sphéroïdale

III.2 - La structure d'un château d'eau en béton armé

Le béton armé est le matériau de prédilection pour la construction des châteaux d'eau modernes, comme il le fut déjà dès le début du 20^e siècle.

L'art du coffrage, l'excellente connaissance théorique et pratique du matériau, dans sa composition et dans sa mise en œuvre, sa résistance et sa faible sensibilité à la corrosion, moyennant le respect de quelques règles, permettent de donner une grande variété de formes aux réservoirs.

Ci-dessous, un schéma de principe structurel d'un réservoir sur tour moderne à cuve conique :

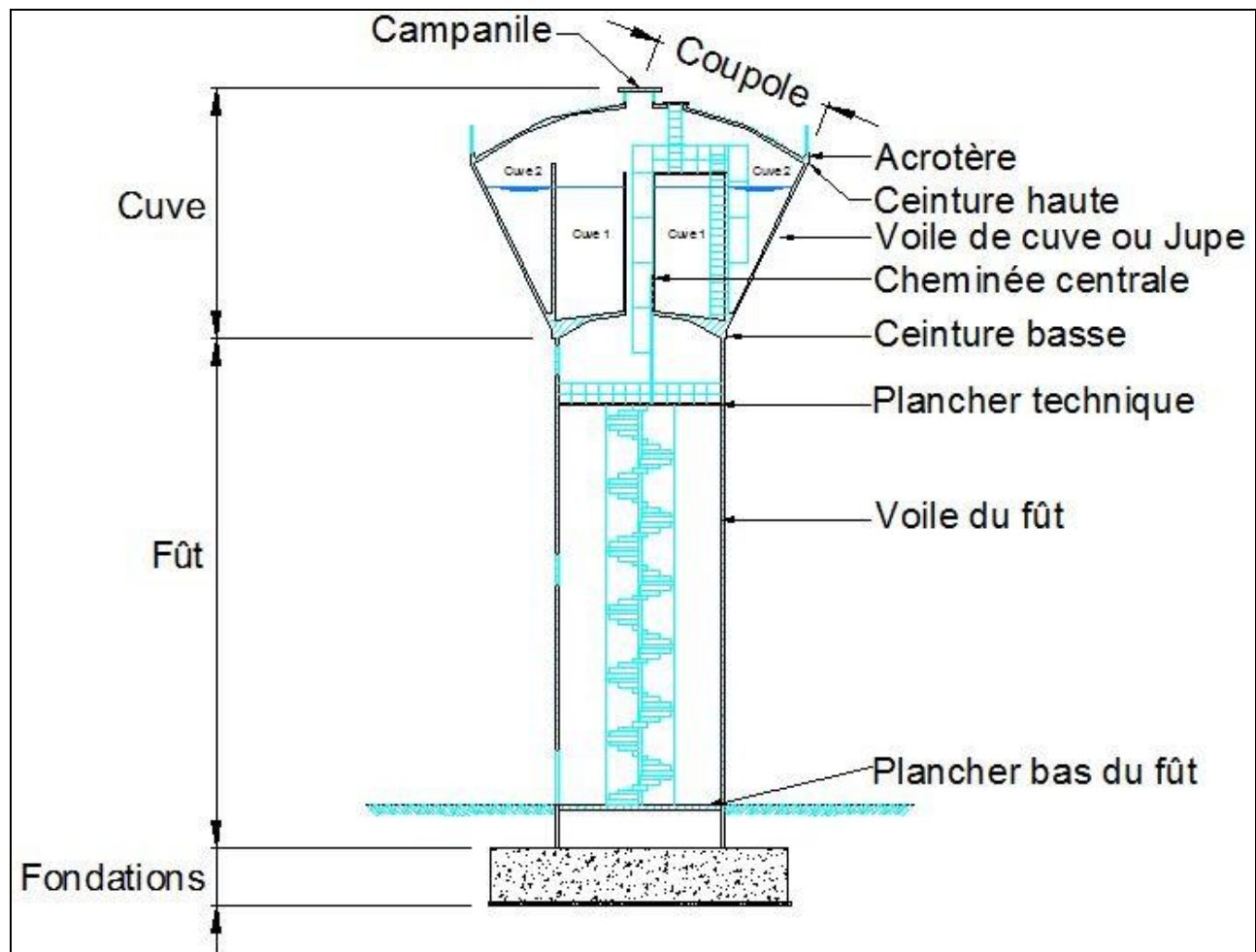


Figure 2 - Réservoir sur tour à cuve conique

III.2.1 - Les fondations

La fondation des châteaux d'eau est toujours importante car elle reçoit une charge de plusieurs milliers de tonnes que constitue le fût avec la cuve.

Elle dépend évidemment en premier lieu de la qualité du sol. En bon terrain, une fondation directe sur semelle suffit (semelle annulaire sous piliers et semelle ou petit radier sous fût).

Un terrain de portance plus médiocre réclame un radier général : dalle circulaire épaisse qui répartit uniformément sur le sol, à la pression admissible, la charge qu'elle reçoit des éléments du support.

Les couches de sol sous radier peuvent être améliorées par remplacement ou battage de colonnes de gravier.

Enfin, des pieux en béton armé, battus ou forés, sont réalisés quand le terrain possède des caractéristiques mécaniques faibles sur une grande profondeur. Cette solution est d'ailleurs souvent plus économique et meilleure vis-à-vis des tassements, qu'un radier général de grande étendue.

La fondation en terrain réputé minier demande, par sécurité, un radier général, éventuellement sur pieux, calculé selon certaines hypothèses d'affaissement de sol.

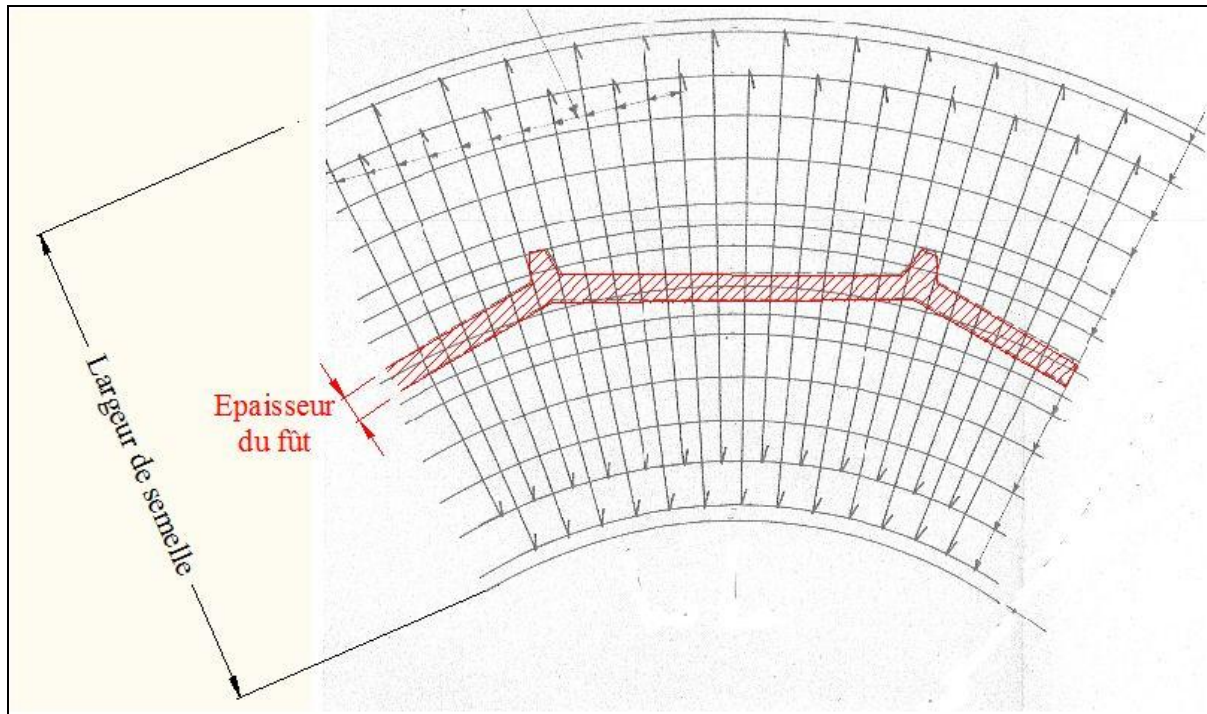


Figure 3 - Vue en plan du ferraillage d'une semelle de fondation circulaire

III.2.2 - Le fût

Les fûts cylindriques des ouvrages en béton à cuve conique ou droite reprennent seuls la charge verticale et les efforts du vent, et sont donc sollicités à la fois en compression et en flexion. Leur relative flexibilité impose la vérification à la résonance, phénomène oscillatoire produit par les rafales de vent.

Classiquement, le château d'eau en béton est construit à l'aide d'un échafaudage.

En raison de la hauteur de l'ouvrage, de l'étendue de la cuve et des charges élevées qui lui sont transmises en cours de travaux, cette construction provisoire doit être robuste et occupe dans l'espace un volume important. Son montage et son immobilisation représentent une fraction substantielle des charges du chantier. D'autre part, le coffrage dans ses méthodes traditionnelles, appliquées à des formes complexes, dans des conditions de travail difficiles, représente le coût prépondérant dans le gros-œuvre de l'ouvrage.

Les efforts des entreprises spécialisées ont donc porté sur la suppression de tout ou partie de l'échafaudage et la rationalisation du coffrage.

Le coffrage grimpant permet la réalisation, par tranches verticales successives, du fût du château d'eau. Il comporte les passerelles de travail nécessaires et prend appui sur la structure même (voir photos 17 et 18).



Photo 17 - Coffrage grimpant du fût



Photo 18 - Coffrage grimpant du fût

Il en est de même du coffrage glissant, à cette différence que ce dernier monte de façon continue, jour et nuit, de la base au sommet du fût. Quelques jours suffisent pour atteindre une hauteur de plusieurs dizaines de mètres.

Ces méthodes s'appliquent le plus facilement à des éléments prismatiques ou de section peu variable. La seconde permet une économie de temps considérable. Leur avantage est cependant réduit du fait qu'elles n'évitent pas, dans la plupart des cas, la construction d'un échafaudage pour la construction de la cuve.

III.2.3 - Plancher bas et planchers intermédiaires

Les différents planchers, du plancher bas aux planchers intermédiaires sont réalisés au fur à mesure de l'avancement du fût.

Dans le cas de la mise en place d'un escalier hélicoïdale en béton, ou métallique, celui-ci est également monté en avancement avec la construction du fût.

III.2.4 - La cuve

Les cuves des châteaux d'eau sont presque entièrement composées de parois relativement minces (épaisseur minimale de 15 cm pour les ouvrages de Classe A, et épaisseur minimale de 12 cm pour les ouvrages de Classe B et C – voir définition des Classes au paragraphe III.3.1 « Les Equipements de sécurité »), à symétrie de révolution. Ces coques sont calculées par la théorie membranaire, dans laquelle tous les efforts internes induits par la pression de l'eau et par leur poids propre sont exclusivement des efforts de traction ou de compression dans le sens des "méridiens" et des "parallèles". La base de la cuve est le siège d'efforts horizontaux considérables, qui doivent être repris par des ceintures travaillant, selon le cas en traction ou en compression.

Les parois et les ceintures tendues des cuves en béton reçoivent un ferrailage important, qui assure seule leur résistance, le béton étant inapte à reprendre la traction. Les tensions dans le béton doivent y être limitées, pour éviter sa fissuration. Les sections sont donc assez importantes. Ce qui a conduit à utiliser pour ces éléments, dans les ouvrages importants, la précontrainte, mise en compression préalable du béton par câbles ou fils, qui conduit à une réduction considérable des quantités d'armatures et est très favorable pour l'étanchéité.

La paroi latérale des cuves cylindriques à fond plat est encastree à la base et donc soumise à la fois à un effort annulaire de traction et à flexion. Le fond est, de son côté, fléchi entre ses supports, colonnes et fût, auxquels il transmet intégralement le poids de l'eau.

III.2.4.1 - Cuve coffrée en tête du fût

Ordinairement, la cuve béton d'un réservoir se construit avec un échafaudage de grande hauteur mis en place en périphérie du fût. Ce dispositif provisoire permet ainsi d'accueillir le coffrage de la cuve, sur lequel seront mises en place les armatures de construction, et dans lequel le béton sera mis en œuvre. Pour l'aspect fini et lisse, un enduit de type mortier hydraulique a été mis en place sur de nombreux réservoirs anciens.



Photo 19 - Mis en place de l'échafaudage

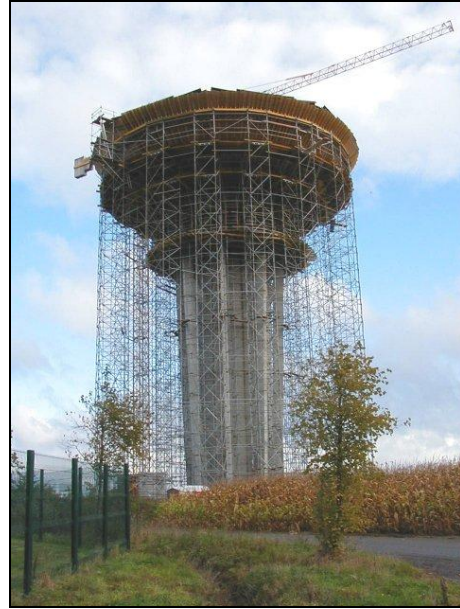


Photo 20 - Coffrage de la cuve



Photo 21 - Réalisation de la cuve

Cette technique de construction de la cuve a l'inconvénient d'immobiliser un important dispositif de coffrage.

III.2.4.2 - Cuve coffrée au sol

Des constructeurs ont pu éliminer cet inconvénient en concevant la cuve au sol, autour du fût déjà réalisé, et en levant celle-ci à l'aide de vérins et de câbles placés en tête du fût. Une fois la cuve mise en place, elle est fixée au fût par des éléments précontraints.

Ce procédé permet ainsi un gain de temps manifeste, et réduit la quantité de matériel nécessaire à la réalisation de la cuve. Cette technique est bien adaptée à l'exécution de réservoirs de grande hauteur, et à cuve de fort encorbellement.



Photo 22 - Coffrage au sol de la cuve



Photo 23 - Levée de la cuve par câbles

III.2.5 - La coupole de couverture

La coupole est l'élément voûte en forme de demi-sphère qui repose sur la cuve et qui la rend clos. Cet élément beaucoup plus léger que la cuve, est en béton armé pour les réservoirs modernes. Elle est fabriquée au sol, et levée à l'aide d'une grue pour être mis en place sur la cuve. Elle peut également être coffrée et coulée en place.

Sur les châteaux d'eau plus anciens, les coupoles peuvent être constituées de maçonnerie enduite d'un mortier présent en intrados et en extrados.

III.3 - Les équipements

III.3.1 - Les équipements de sécurité

Les réservoirs surélevés ont une hauteur souvent supérieure à la dizaine de mètres. L'accèsion à la cuve et aux différents organes de fonctionnement nécessaires à la distribution d'eau potable exige des équipements qui soient fonctionnels et sécuritaires.

Dans le cas du réservoir sur tour, les différents équipements de sécurité se répartissent sur toute la hauteur du réservoir (voir Figure 4).

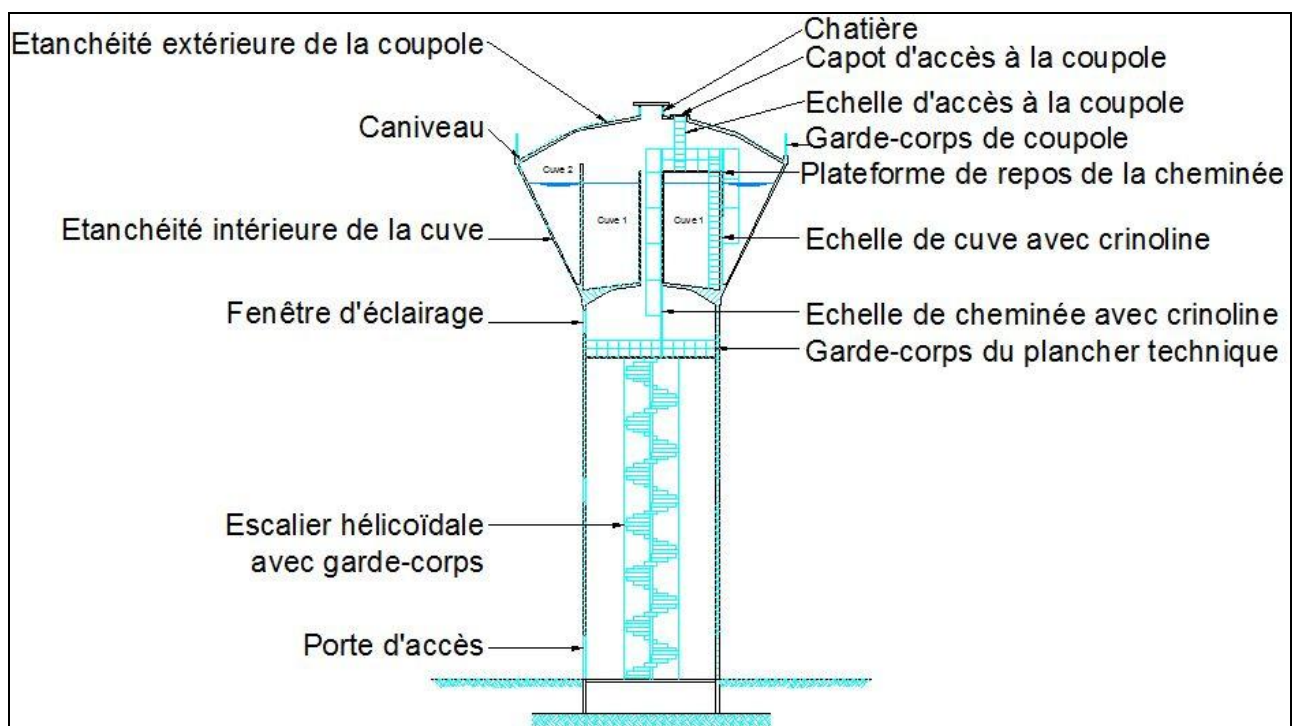


Figure 4 – Implantation des différents équipements du réservoir

Description des différents équipements :

- ❖ Porte d'accès : cette ouverture permet l'accès au réservoir. Elle est en général métallique, et outre l'accès, elle empêche toute intrusion étrangère animale ou humaine à l'intérieur du château d'eau.
- ❖ Escalier hélicoïdale : c'est l'élément qui permet d'accéder du plancher bas à la sous face de cuve. Il est constitué d'un poteau central rond, sur lequel sont encastrées les marches. L'escalier peut être en béton ou métallique. Les garde-corps qui sont le

dispositif pour empêcher la chute lors de la montée de l'escalier, doivent avoir une hauteur minimale de 1 m (Norme NF E 85-015).

- ❖ A la place de cet escalier, on peut trouver d'autres moyens d'accès tel que des escaliers droits ou des échelles avec crinoline donnant sur des paliers intermédiaires espacés régulièrement sur la hauteur du fût.
- ❖ Dans le cas d'échelles avec crinoline, il est sécuritaire d'avoir la présence d'un portillon, à chaque palier d'arrivée.
- ❖ Fenêtre d'éclairage : ce dispositif permet l'éclairage naturel de l'intérieur du fût. Il est généralement constitué de pavé ou de carreaux de verre.
- ❖ Echelle de cheminée, échelle de cuve et échelle d'accès à la coupole : ces éléments sont des moyens d'accès à différentes parties de la cuve, en inox ou en résine, selon les normes en vigueur, et équipés d'un rail de sécurité ou d'une crinoline pour éviter les chutes. Ces échelles peuvent être aussi munies d'une canne d'accès permettant l'accès en toute sécurité à leur palier d'arrivée respectif (Norme NF E 85-010).
- ❖ Capot d'obturation en tête de cheminée : ce dispositif concerne la sécurisation de la cheminée de cuve par la présence d'une plate-forme en caillebotis en tête de cheminée équipée de petites rambardes latérales sur la cheminée afin de prévenir d'une chute dans la cuve. Cette plate-forme comporte une trappe rabattable permettant une utilisation sécurisée de l'échelle de cheminée.
- ❖ Campanile d'accès à la coupole : cet équipement permet l'accès de la cuve à la coupole via une trappe. Elle est également pourvu de chatières, qui permettent la ventilation dans la cuve, et évitent la condensation en sous-face de coupole. Ces orifices d'aération sont pourvus de grillages et de moustiquaires. S'ils ne sont pas sur le campanile, ils peuvent être placés directement sur la coupole.
- ❖ Garde-corps de la coupole : ce dispositif sécuritaire est placé sur le campanile, si la pente de la coupole est trop accentuée pour pouvoir y circuler. Sinon, il peut être sur l'acrotère de rive de la toiture, afin d'éviter tout risque de chute. Il est métallique, et mesure 1 m de haut minimum (Norme NF E 85-015).

- ❖ Étanchéité intérieure de la cuve : les ouvrages sont classés selon le principe de réalisation de leur étanchéité. Ce classement est établi dans le Fascicule 74 (Cahier des clauses techniques générales de construction des réservoirs en béton) :
- ✓ CLASSE A : ouvrages dont l'étanchéité est assurée par la structure seule,
 - ✓ CLASSE B : ouvrages dont l'étanchéité est assurée par la structure, complétée par un revêtement d'imperméabilisation,
 - ✓ 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,
 - ✓ CLASSE D : ouvrages construits à l'aide d'éléments préfabriqués.

Pour toutes ces étanchéités, il est indispensable qu'elles disposent de l'Attestation de Conformité Sanitaire (ACS), délivrée par les laboratoires agréés par le Ministère de la Santé. La France a mis en place le système des ACS permettant de tester l'innocuité des matériaux au contact des eaux destinées à la consommation humaine. L'obtention d'une ACS pour les produits d'étanchéité repose sur les critères d'évaluation suivants (tiré de « L'Arrêté du 29 mai 1997 ») :

- ✓ l'intérêt potentiel technologique du matériau ou du constituant,
- ✓ la constitution du matériau fini et les caractéristiques toxicologiques des constituants utilisés pour sa fabrication et des substances susceptibles de migrer,
- ✓ les effets éventuels du matériau sur la qualité organoleptique, physique, chimique et biologique de l'eau placée à son contact.

L'étanchéité adoptée dans la cuve s'assure des caractéristiques suivantes :

- ✓ assurer l'étanchéité de la cuve,
- ✓ garantir l'absence de trouble des qualités organoleptiques de l'eau (limpidité, odeur, saveur), et garantir l'absence de tout risque de contamination, ce qui renvoie à l'alimentarité de l'ensemble des constituants,

- ✓ posséder les caractéristiques mécaniques nécessaires pour faire face aux effets des charges et des efforts résultant, d'une part des variations du niveau de l'eau à l'intérieur de la cuve et d'autre part des mouvements dus aux phénomènes de dilatation qui s'exercent sur les structures de l'ouvrage par suite des écarts de températures intérieure ou extérieure,
- ✓ résister aux chocs et aux actions mécaniques (présence d'agents équipés de bottes en caoutchouc, d'échelles, de brosses et de lances à eau sous pression, lors du nettoyage),
- ✓ résister aux actions de l'eau chlorée et solution stérilisante qui se produisent lors des opérations de nettoyage et de désinfection,
- ✓ aucune tendance au cloquage, conservation des caractéristiques chimiques et mécaniques après vieillissement.

Les différents types de revêtement

A l'intérieur des cuves de château d'eau, plusieurs types de revêtement ont été adoptés pour assurer l'imperméabilité des parois :

- ⇒ étanchéité de type enduit hydraulique (classe B) : il fonctionne en obtenant une perte de charge suffisante pour s'opposer au passage de l'eau, à la pression considérée, grâce notamment :
 - ✓ à la présence d'adjuvant (hydrofuge de masse ou résine de synthèse),
 - ✓ à la granulométrie des granulats,
 - ✓ au dosage en ciment,
 - ✓ à la compacité de l'enduit réalisé.
- ⇒ étanchéité à base résine époxy (classe C) :
 - ✓ le revêtement est réalisé in situ, à l'aide de résines époxydiques armées d'un tissu de fibres de verre. Il est mince (2 à 3 mm), et parfaitement étanche,

- ✓ Le revêtement peut être adhérent (cas du support sain) ou semi-indépendant (cas du support dégradé ou de fissurations importantes). Dans ce cas le revêtement est fixé mécaniquement au voile en béton, à l'aide de « clous »,
 - ⇒ étanchéité à base polyuréthane (classe B) : le revêtement est réalisé in situ, à l'aide de polyuréthane, il est mince (1 à 2 mm), parfaitement étanche et adhérent,
 - ⇒ étanchéité de type membrane bitumineuse : le revêtement est appliqué in situ, il est soit mince (2 à 3 mm) soit plus épais (5 à 8 mm) et protégé par une feuille d'aluminium. Il est entièrement adhérent,
 - ⇒ étanchéité à base de membrane de hauts polymères (Classe C) : les membranes sont constituées de feuilles préfabriquées souples, réalisées avec des résines de hauts polymères de synthèse (P.V.C...). Elles sont livrées sous forme de lés et sont assemblées sur chantier par soudure, de façon à obtenir une enveloppe étanche.
- ❖ Etanchéité extérieure de la coupole : elle est constituée d'un revêtement bicouche bitumineux ou d'un revêtement à base de liant hydraulique. Elle a pour but d'isoler la structure de la coupole des agents agressifs extérieurs, et ainsi éviter toute infiltration de ces éléments agressifs à l'intérieur de la cuve.

Sur les réservoirs sur tour construits après les années cinquante, deux principaux types de revêtement ont été adoptés pour assurer à la coupole une étanchéité :

- ✓ Un revêtement d'imperméabilisation de type écran extérieur adhérent à son support, pouvant assurer l'étanchéité, mais ne résistant pas à une fissuration du support béton. Il s'agit 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 synthèses non armées.
- ✓ Un revêtement d'imperméabilisation de type membrane bitumineuse avec feuille aluminium. Les membranes sont mises en œuvre en adhérence totale avec le support béton. Cette adhérence totale répond mieux aux sollicitations mécaniques induites par le support béton de la coupole.

Ce dernier type de revêtement est constitué de 2 composants :

- ✓ le primaire ou Enduit d'Imprégnation à Froid qui est un produit liquide bitumineux utilisé comme primaire d'accrochage, sur le support poreux (béton),
- ✓ sur ce support primarisé, est ensuite mise en œuvre la membrane d'étanchéité bitumineuse par réchauffage au chalumeau à gaz. Le primaire et la membrane contiennent tous deux du bitume qui en fusionnant (sous l'effet de la chaleur) va permettre l'adhésion du revêtement au support.

III.3.2 - Les équipements hydrauliques

Les canalisations intérieures du château d'eau sont en acier inox, à brides boulonnées. Leur diamètre est souvent réduit par rapport à celui des conduites extérieures enterrées qui aboutissent à l'ouvrage. L'économie et le plus faible poids des pièces à manipuler compensent les pertes de charges accrues sur quelques dizaines de mètres de canalisations. Elles sont revêtues d'époxy, ou métallisées et peintes ensuite, ou encore plastifiées à chaud. Tous les équipements hydrauliques utilisés à l'intérieur de la cuve détiennent l'Attestation de Conformité Sanitaire délivrées par les laboratoires agréés par le Ministère de la Santé.

- ❖ La conduite d'amenée d'eau : elle traverse la cuve jusqu'au-dessus du niveau de trop-plein et l'alimente par jet à l'air libre ; parfois, pour éviter que la perte d'acide carbonique libre provoquée par cette aération rende l'eau incrustante, la conduite d'amenée est prolongée jusqu'au fond de la cuve. Une vanne commandée soit par flotteur, soit électriquement ou hydrauliquement, obture la canalisation quand le niveau de trop-plein est atteint,
- ❖ La conduite de distribution d'eau : elle puise l'eau dans une cunette au fond de la cuve, à travers une crépine. Son diamètre est souvent plus important que celui de la conduite d'amenée, compte tenu des débits de pointe qu'elle doit véhiculer.

Canalisations d'alimentation et de distribution comportent une vanne d'isolement après leur pénétration dans la cuve. Elles sont équipées d'un compteur ou d'un débitmètre électromagnétique, qui enregistrent le diagramme de leur débit ; un comptage spécial, dimensionné pour les faibles débits, installé en *by-pass* du compteur principal de la conduite de

distribution fournit, en lecture de nuit, des indications sur les pertes du réseau. Une liaison entre les deux canalisations permet, par un jeu de vannes, la distribution, cuve hors service, et le nettoyage du plan d'eau par débordement dans la goulotte de trop-plein.

- ❖ La canalisation de trop-plein : elle évacue à l'égout, au fossé ou au cours d'eau le plus proche, le débit de débordement en cas de défection de la vanne automatique de fermeture de la conduite d'alimentation. La conduite de vidange la rejoint sous la cuve.

Toutes les conduites sous cuve, hormis celle de trop-plein, sont calorifugées, pour les tenir à l'abri du gel.

Un détecteur-enregistreur du niveau d'eau dans la cuve, relié au réseau téléphonique, indique à distance, sur simple appel, le degré de remplissage du château d'eau.

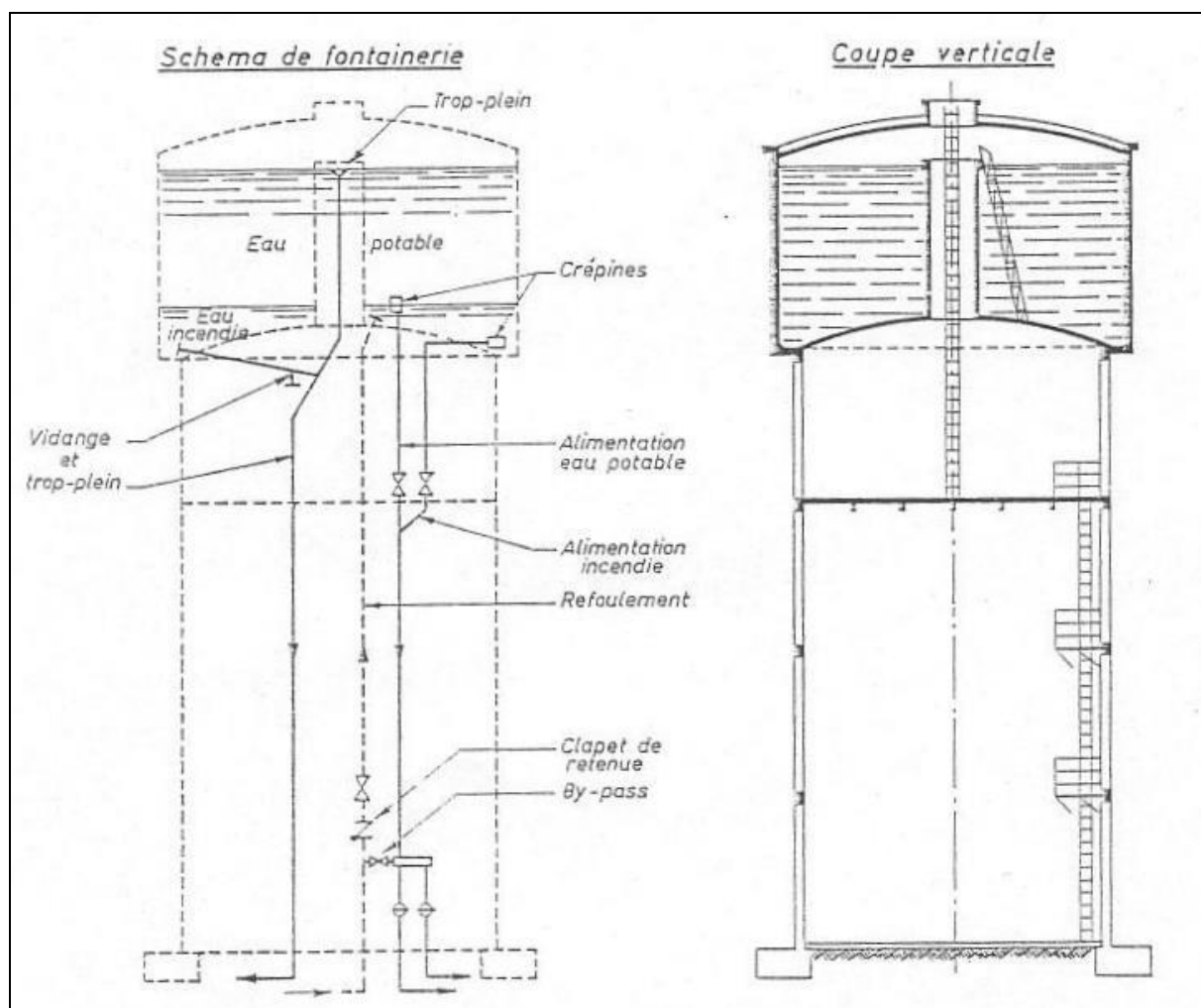


Figure 5 – Schéma de la fontainerie d'un réservoir sur tour
(Source : site internet <http://chateau.deau.free.fr>)

III.3.3 - Autres équipements

Grâce au point haut qu'ils représentent, de nombreux réservoirs sur tour sont utilisés comme emplacement d'antenne relais des différents opérateurs de téléphonie mobile. Ces antennes sont placées sur le campanile de la coupole, fixées sur les bords périmétriques de la cuve, ou au sol à proximité du château d'eau.

IV - PATHOLOGIES D'UN CHATEAU D'EAU EN BETON ARME

IV.1 - Structure (désordres de structures et pathologies des matériaux)

IV.1.1 - Pathologies du béton

IV.1.1.1 - Définition et causes probables (carbonatation, teneurs en chlorures, porosité)

1. Carbonatation : ce phénomène de vieillissement naturel et inéluctable des matériaux à base de liant minéral, est présent dans le béton des réservoirs, et conduit à la formation de carbonates de calcium par réaction entre les composés du ciment (principalement la portlandite), et le dioxyde de carbone atmosphérique (CO_2), présent dans l'air à un taux de 0,03% en volume. Ce taux est plus important en milieu urbain qu'en milieu rural. Cette réaction entraîne la consommation de bases alcalines présentes dans la solution interstitielle des bétons aboutissant à une diminution du pH qui passe d'une valeur de 13 à une valeur inférieure à 9, et une diminution de la porosité.

Cette réaction a également pour conséquence la destruction du film protecteur des armatures, et amorce ainsi le processus de corrosion des aciers.

2. Pollution en chlorures : au même titre que la carbonatation, les ions chlorures libres (Cl^-) ont un rôle important dans le processus de dépassivation et de corrosion des armatures. Ce sont ces chlorures libres qui migrent et qui sont responsables de la dépassivation des armatures, par opposition aux chlorures totaux (= chlorures libres + chlorures piégés). Ces chlorures proviennent en grande partie du chlore utilisé dans les cuves comme désinfectant très puissant, pour détruire tous les types de germes, de virus et de bactéries potentiellement présents dans l'eau. Ils peuvent pénétrer dans le

béton en raison d'une défection ou d'une absence d'étanchéité. Si l'ouvrage se situe dans un environnement salin, les sels de chlorures peuvent également pénétrer dans le béton via les parements extérieurs.

3. Porosité accessible à l'eau : la porosité du béton est l'ensemble des interstices du béton exprimé comme le rapport du volume des vides du béton sur le volume total considéré. La porosité est l'une des caractéristiques essentielles du béton durci. Les différents facteurs (dosage en ciment et rapport Eau/Ciment) conditionnent la porosité finale du béton. La porosité est le chemin d'accès privilégié des agents extérieurs vers le cœur du béton. Il n'est pas une cause de désordre, mais son rapport plus ou moins important peut favoriser la circulation d'agents agressifs pour le béton et l'acier.

IV.1.1.2 - Localisation et indice de gravité

1. Carbonatation : le phénomène est perceptible sur toutes les parties d'ouvrages en contact avec l'air. Hormis les parements intérieurs de la cuve qui sont immergés en majeure partie du temps, tous les parements intérieurs et extérieurs du réservoir sont exposés.

Les réservoirs situés en milieu urbain sont plus touchés en raison du taux de CO₂ qui y est présent, et les parements extérieurs sont plus sensibles au phénomène.

Indice de gravité : la principale conséquence de la carbonatation est la destruction de la pellicule d'oxyde passive présent sur l'acier et l'amorce d'un phénomène de corrosion des armatures du béton en milieu aéré et humide, lorsque le front de carbonatation est au moins égal à l'enrobage des armatures.

2. Teneurs en chlorures : la présence de chlorures se localise essentiellement dans la structure immergée de la cuve, lorsque les ions Cl⁻ proviennent des produits de désinfection de l'eau.

En milieu salin, les chlorures amenés par les airs, se retrouvent sur tous les parements extérieurs du réservoir sur tour.

Indice de gravité : au sein d'un béton, les ions chlorures libres ont deux effets dans les mécanismes de corrosion :

- ✓ diminution de la résistivité de l'enrobage de béton, ce qui facilite le transport des ions d'un site à l'autre,
- ✓ amorçage plus rapide de la corrosion par dépassement de la couche d'oxydes protectrice de l'acier. Plus la concentration en ions chlorures libres au niveau des armatures est élevée, plus la vitesse de corrosion est importante.

En termes de concentration en ions chlorures libres, il existe un seuil au-delà duquel la corrosion s'accélère. Lorsque ce seuil, égal à 0,4 % d'ions chlorures libres en poids par rapport au ciment (soit 0,06 % en poids par rapport à un béton « standard » dosé à 350 kg de ciment par m³), est atteint, la couche de passivation des aciers disparaît, et la corrosion peut se propager.

La quantité d'ions nécessaire à l'amorçage de la corrosion est d'autant plus importante que le pH (concentration en OH⁻) du béton est élevé. Le seuil critique de dépassement des armatures, prenant en compte à la fois la teneur en Cl⁻ et le pH, correspond alors à un rapport Cl⁻/OH⁻ de 0,6 pour le béton. En conclusion, cela signifie que dans un béton carbonaté (pH faible : environ 9), même une très faible concentration en chlorures peut initier la corrosion.

3. Porosité : le béton est un matériau intrinsèquement poreux. Quelque soit les parties d'un réservoir en béton, il y a toujours un indice de porosité.

Indice de gravité : la porosité accessible à l'eau caractérise la porosité ouverte du béton. Les valeurs de porosité communément admises pour un béton standard sont de l'ordre de 11 à 13 % (selon la norme NF EN 206-1).

IV.1.2 - Aciers apparents, corrosion

IV.1.2.1 - Définition et causes probables

La corrosion des armatures se produit lorsque le film passif protecteur entourant les aciers n'est plus stable. En raison de sa basicité ($\text{pH} = 13$), le béton sain est un milieu naturellement protecteur pour les armatures autour desquels se forme un film passif qui réduit la vitesse de corrosion à une vitesse négligeable. Dans certaines conditions, cet équilibre peut être rompu en entraînant une dépassivation de l'acier et l'amorçage d'un phénomène de corrosion.

Ses causes principales :

- ✓ faible enrobage des armatures,
- ✓ carbonatation du béton,
- ✓ pollution de chlorures depuis le milieu environnant,
- ✓ humidité du béton.

Le facteur aggravant le phénomène est la perméabilité du béton : la forte porosité du béton, plus que sa fissuration, favorise la circulation des agents agressifs, et amplifie l'action de corrosion des armatures.

La formation de produit de corrosion entraîne l'expansion des armatures qui engendre le relâchement de contraintes dans la section, et l'éclatement du béton. La forme, l'étendue des désordres, leur intensité dépend à la fois de la position des armatures (enrobage et espacement), de la qualité du béton d'enrobage, et de son homogénéité, de la nature de l'agent agressif.

IV.1.2.2 - Localisation et indice de gravité

Cette pathologie se localise principalement aux endroits où la rencontre des différents facteurs de corrosion est propice :

- ❖ extérieur du fût et de la cuve : en raison de l'exposition aux intempéries, aux agents agressifs, à la carbonatation et au faible enrobage des armatures,



Photo 24 - Aciers apparents et corrodés sur fût



Photo 25 - Aciers apparents

- ❖ extérieur de la cuve : dues aux infiltrations provenant du réservoir, à l'exposition aux intempéries, aux agents agressifs, à la carbonatation et au faible enrobage des armatures,



Photo 26 - Aciers apparents et corrodés sur cuve

- ❖ sous-face de coupole : due à la condensation issue de l'eau et du chlore, et au faible enrobage



Photo 27 - Aciers corrodés en sous-face de cuve



Photo 28 - Aciers corrodés en sous-face de cuve

Indice de gravité : la corrosion entraîne une réduction de la section résistante des armatures, pouvant provoquer des défaillances mécaniques et structurelles au sein de l'ouvrage.

IV.1.3 - Défauts du parement

IV.1.3.1 - Définition et causes probables

Le défaut de parement est une imperfection esthétique de la surface d'un béton qui se manifeste par :

- 1- Des ondulations ou autres variations localisées du profil. Son origine provient d'une mauvaise réalisation, une mauvaise conception du coffrage ou un décoffrage prématuré. Ce défaut n'est pas une pathologie du béton à proprement parler, mais dans certains cas, sa présence peut provoquer des problèmes d'adhérence des revêtements d'imperméabilisation et d'étanchéité.
- 2- Le spectre visible des armatures : on distingue par « transparence » la présence d'armatures trop proches de la surface. Ce phénomène se traduit par le dessin visible des armatures sous la peau du béton. Ce défaut est dû à un manque de calage des armatures et une mauvaise vibration du béton lors du coulage.

IV.1.3.2 - Localisation et indice de gravité

- 1- Ces défauts sont visibles sur les parties intérieures du fût, de la sous-face de cuve et de la sous-face de coupole, car ce sont des éléments qui sont souvent laissés visuellement brut de décoffrage.

Indice de gravité : ces défauts favorisent l'éclatement du béton qui, mettant à nu les armatures, peut amorcer un phénomène de corrosion.

- 2- Le spectre des armatures est généralement visible en sous-face de coupole.

Indice de gravité : la visibilité des armatures par transparence traduit un manque d'enrobage. Ce facteur lié à la carbonatation ou la pénétration de chlorures favorisent l'amorce à la corrosion des aciers.

IV.1.4 - Déformations

IV.1.4.1 - Définition et causes probables

Il s'agit des déformations anormales du béton par rapport à sa forme d'origine, dépassant les estimations de la note de calcul. Elles sont visibles sous forme de flèche dans le cas d'une déformation verticale, ou sous forme de tassements, gonflements, fissures, cassures engendré par le sol dans le cas d'une déformation horizontale. Ces déformations sont causées par une surcharge non prise en compte lors du dimensionnement ou par une rigidité insuffisante de l'élément de structure.

IV.1.4.2 - Localisation et indice de gravité

Ce type de désordre n'est pas très fréquent, mais peut se rencontrer au niveau du voile de la cuve lors d'une déformation verticale, et sur le plancher bas du fût pour une déformation horizontale.



Photo 29 - Fissuration de la dalle du plancher bas du fût, due à des remontées d'eau du sol

Indice de gravité : dans le premier cas, la déformation entraîne une limitation de l'exploitation de l'ouvrage, qui peut se traduire par une diminution de la hauteur du liquide.

Dans le cas où la dalle se déforme, il n'y a pas de mise hors service de l'ouvrage, mais cela peut occasionner un défaut d'esthétique, ou de fonctionnalité des équipements, telle une mauvaise fermeture de la porte d'accès.

IV.1.5 - Différences de teinte

IV.1.5.1 - Définition et causes probables

Il s'agit d'un défaut de couleur propre au béton. On peut distinguer : la reprise de bétonnage, les zones contrastées de forme géométrique, les ragréages, les traces de rouilles dues à la non élimination des chutes de fer de ligature en fond de coffrage ou l'utilisation de cales métalliques.

IV.1.5.2 - Localisation et indice de gravité

Les reprises de bétonnage se trouvent essentiellement sur le parement du fût. Les ragréages, et les traces de rouilles sont plus souvent visibles en sous-face de coupole.

Indice de gravité : ces désordres n'impactent en rien la fonctionnalité de l'ouvrage, mais agissent uniquement sur l'esthétique. Les ragréages sont admissibles, mais ils peuvent cacher de graves anomalies.

IV.1.6 - Fissuration structurelle

IV.1.6.1 - Définition et causes probables

La fissuration du béton armé est inhérente à son fonctionnement. Les fissures auxquelles sont sujets les réservoirs d'eau sont de plusieurs types : de retrait, thermiques, structurels ou mécaniques.

- 1- Les fissures générales : elles sont une des conséquences du vieillissement du béton, l'ouvrage étant toujours soumis à la reprise des efforts pour lesquels il a été conçu.

Le désordre est constatable par des soulèvements "croûte" et la présence de faïençages importants. Ce faïençage se présente sous la forme d'un dessin géométrique à mailles régulières, qui s'inscrivent généralement dans un carré n'excédant pas 20 cm de côté. Ce réseau n'intéresse que la laitance superficielle du béton ou la couche de l'enduit.

- 2- Les fissures particulières

Ce sont des fissures de deux types :

- a) Les fissures horizontales sur cuve : elles s'observent au voisinage des ceintures de paroi de la cuve.

La fissure sous la ceinture haute est le résultat des allongements et/ou retrait rayonnants de la coupole du réservoir qui n'est pas isolée et se déforme sous les actions thermiques.

La fissure au-dessus de la ceinture basse (encastrement entre la paroi du réservoir et son socle) est le fruit du ravinement des suintements et diminution des sections d'acier d'encastrement.

Une troisième fissure est observable vers le tiers inférieur de la paroi de la cuve, là où la poussée de l'eau entraîne la plus grande déformation du voile.

- b) Les fissures verticales sur cuve : on les retrouve à peu près réparties régulièrement sur la paroi du réservoir. Une des causes est encore l'affaiblissement des sections d'acier (les cerces horizontales). Ces cerces sont par ailleurs sollicitées par les cycles de vidange-

remplissage. Elles reprennent principalement les efforts de la poussée de l'eau. Ces tractions répétées accentuent le vieillissement de l'ouvrage.

c) Les fissures verticales sur fût : ce sont des fissures liés au type de matériel utilisé pour l'exécution du fût. Elles sont souvent situées à l'ancien emplacement des barres de guidage du matériel de coffrage, éléments qui participaient à la verticalité et à la connexion des banches. Elles se créent aux points faibles de la structure, car elles ne sont pas aptes à participer à la reprise structurelle de flexion subit du fût.

d) Les fissures sur la coupole : elles sont situées en intrados ou en extrados de coupole. Elles peuvent être causées par le retrait du béton, ou du mortier qui correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes hydrauliques (évaporation ou absorption de l'eau de gâchage avant et au cours de la prise), du fait du refroidissement postérieur à l'élévation de température qui accompagne l'hydratation du ciment ou de variations climatiques en phase d'utilisation.

La fissuration de l'enduit sur la coupole peut également être due à la différence de rigidité ou du comportement thermique du support en béton, associé aux sollicitations extérieures (température, gel, etc...).

IV.1.6.2 - Localisation et indice de gravité

1- Les fissures générales : lorsque la valeur dimensionnelle de ces fissures dépasse l'allongement acceptable du béton, il y a rupture de l'étanchéité. L'eau stockée ne peut que s'échapper au travers du béton fissuré. Ainsi le cycle de dégradation va s'accélérer. Ces fissures sont perceptibles sur le parement extérieur de la cuve.



Photo 30 - Fissures et efflorescences sur la cuve

Indice de gravité : le matériau se comporte comme une éponge et se sature d'humidité. Cette eau va geler en période hivernale provoquant l'éclatement du béton ou de l'enduit par excès de traction. La protection des aciers n'est donc plus assurée. Ce phénomène peut prendre beaucoup d'ampleur, et à plus long terme, nécessiter la mise hors service de la cuve

2- Les fissures particulières

- a) Les fissures horizontales sur cuve : elles se répartissent sur la hauteur de la cuve, sous la ceinture haute (à la jonction coupole / cuve), au dessus de la ceinture basse, et dans le tiers inférieur de la paroi de la cuve. Elles peuvent être visibles à la fois intérieurement et extérieurement.

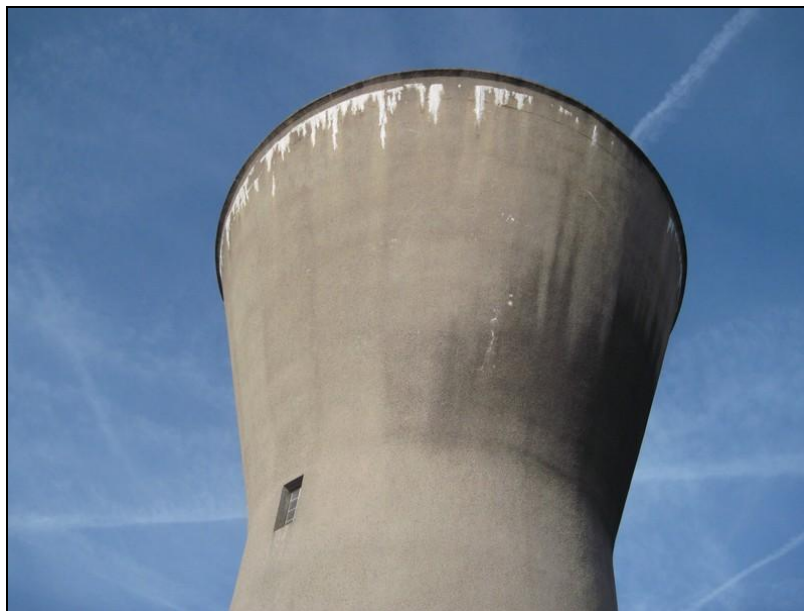


Photo 31 - Fissure horizontale sous la ceinture haute

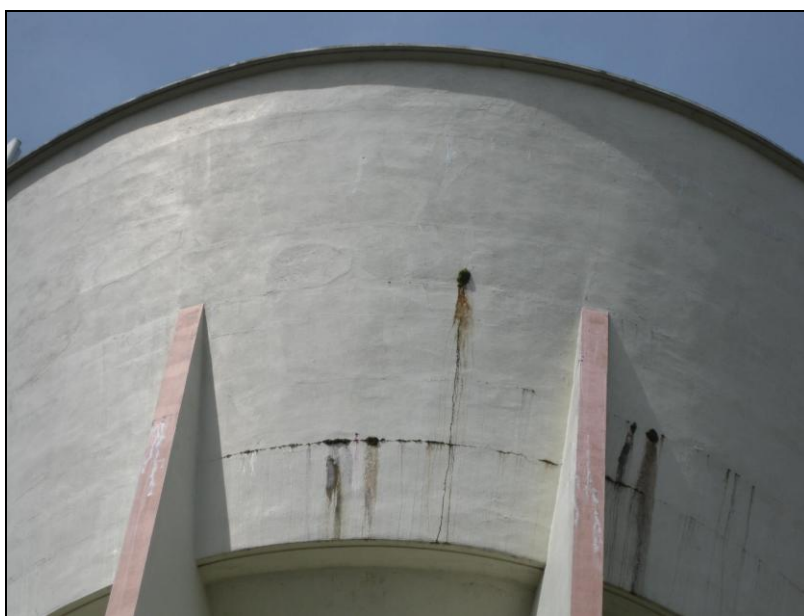


Photo 32 - Fissure horizontale en partie basse du voile

Indice de gravité : la fissure située sous la ceinture haute n'impacte pas la fonctionnalité de l'ouvrage, mais agit sur l'esthétique.

Les fissures au dessus de la ceinture basse et au tiers inférieur de la paroi traduisant un défaut structurel ou une carence de l'étanchéité doivent être pris en charge rapidement sous peine de mise hors service de la cuve.



Photo 33 - Fissures verticales et horizontales

- b) Les fissures verticales sur cuve : elles se répartissent régulièrement sur la paroi du réservoir (voir Photo 33).

Indice de gravité : elles révèlent une déficience de la paroi de la cuve, et selon leur répartition plus ou moins dense, la cuve nécessitera un renfort.

- c) Les fissures verticales sur fût : elles se retrouvent le long du périmètre du fût, espacées régulièrement, et sur toute la hauteur du fût.

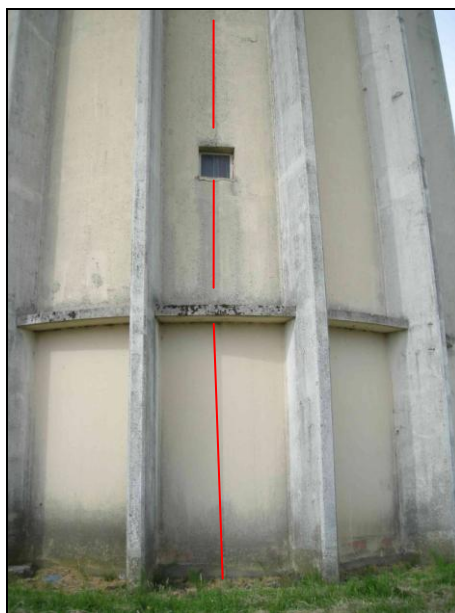


Photo 34 - Fissure verticale sur fût

Indice de gravité : le désordre n'est que visuel, et ne touche pas au bon fonctionnement du fût.

- d) Les fissures sur la coupole : elles se localisent sur la coupole brute de décoffrage ou revêtue d'un enduit type mortier, en intrados et en extrados.



Photo 35 -Fissuration de l'enduit sur coupole

Indice de gravité : cette fissuration peut conduire à limiter l'adhérence entre l'enduit rapporté en surface et le support béton. Elle peut également favoriser l'entrée des agents agressifs présents dans le milieu environnant.

IV.1.7 - Suintements et efflorescences

IV.1.7.1 - Définitions et causes probables

Les suintements se caractérisent par des écoulements lents, goutte à goutte, perceptibles par l'humidité du parement du réservoir. Elles s'accompagnent souvent d'efflorescences se manifestant par des dépôts blanchâtres irréguliers à la surface du béton ou de l'enduit. Elles sont constituées de calcite (carbonate de calcium) qui n'apparaît et ne se cristallise qu'en présence d'eau. Ces désordres sont la conséquence de fissures et de circulation d'eau à travers la paroi.



Photo 36 - Suintements et efflorescences sur la cuve

IV.1.7.2 - Localisation et indice de gravité

Ces désordres se retrouvent au droit des fissures présentes sur la cuve, décrites précédemment. Les efflorescences sont visibles aussi en sous face de cuve.



Photo 37 - Efflorescences en sous-face de cuve

Indice de gravité : comme pour les fissures, ces efflorescences et ces suintements traduisent un défaut structurel ou une carence de l'étanchéité et doivent être prise en charge rapidement sous peine de mise hors service de la cuve.

IV.1.8 - Eclat du béton

IV.1.8.1 - Définition et causes probables

L'éclat de béton correspond à la destruction en surface du béton, et se manifeste sous forme de fragments ou d'éclats. Il est la résultante de l'expansion du produit de corrosion de l'armature au sein du béton, consécutif à plusieurs facteurs tel qu'un défaut de porosité du béton et/ou une insuffisance d'enrobage, et/ou une carbonatation du béton. Il peut également résulter d'une compression excessive provoquée par les effets du gel. En effet, l'eau présente intérieurement dans les pores du béton, se cristallise en période hivernale, et augmente son volume ainsi que celui du béton. En se formant dans les capillaires, le gel peut générer de telles contraintes dans le béton, qu'une fissuration peut se développer.

L'éclat s'accompagne souvent d'une microfissuration ou d'une fissuration.

IV.1.8.2 - Localisation et indice de gravité

L'éclat se manifeste essentiellement sur les parements extérieurs, en raison de leur exposition aux intempéries et autres agents agressifs, mais on le retrouve plus souvent sur la cuve, car celle-ci est doublement exposée intérieurement et extérieurement.



Photo 38 - Eclat et fissuration sur la ceinture basse

Indice de gravité: l'éclat de béton est associé à d'autres désordres, tel que la corrosion d'armature, et il est révélateur d'une détérioration de la structure du réservoir.

IV.1.9 - Ségrégation du béton

IV.1.9.1 - Définition et causes probables

C'est un phénomène de séparation des différents constituants d'un béton frais conduisant à une perte d'homogénéité du mélange. La ségrégation voit en particulier des éléments les plus lourds (granulats) « tomber » au fond du mélange et les plus légers (fine, ciment...) rester en surface. Il peut être provoqué par un malaxage insuffisant, une formulation mal adaptée à un pompage ou par une vibration excessive.

IV.1.9.2 - Localisation et indice de gravité

Cette ségrégation se voit habituellement en sous-face de coupole, lorsque celle-ci n'est pas recouverte par un enduit de type mortier.

Indice de gravité : la ségrégation peut conduire à un affaiblissement local de la résistance de la coupole, et une diminution de l'étanchéité.

IV.2 - Etanchéité extérieure de la coupole

IV.2.1 - Cloquage

IV.2.1.1 - Définition et causes probables

Ce type de désordre est relevé sur les étanchéités de type bitumineux. Il s'agit d'un décollement circonscrit de la membrane, dû à la pression de liquide ou de gaz et qui résulte d'une application sur support humide ou saturé, d'une incompatibilité de l'état de propreté ou d'une insuffisance de préparation du support ou de l'action de sous-pression. Elle se manifeste par un bombement et un manque d'adhérence de l'étanchéité sur le support.

IV.2.1.2 - Localisation et indice de gravité

Ce désordre peut être ponctuel ou généralisé sur l'étanchéité de la toiture.

Indice de gravité : ce décollement est source d'altération du support du fait de la saturation permanente à l'arrière du film, et peut induire des infiltrations d'impureté dans l'eau de cuve.

IV.2.2 - Décollement

IV.2.2.1 - Définition et causes probables

Le décollement est une perte progressive d'adhérence de l'étanchéité au support, due à sa mauvaise qualité, à l'action des eaux bloquées par le revêtement, à la « respiration » thermique de la coupole (déformations saisonnières cycliques) ou à l'action du gel.

Il est présent sur les deux types d'étanchéité et se révèle sous plusieurs formes :

1- Cas de l'enduit :

- ✓ zones sonnant le creux, décollement sous forme de plaques, les enduits n'étant généralement pas armés. Lorsqu'ils le sont, souvent par des grillages fins, ceux-ci sont complètement oxydés,
- ✓ fissuration ou faïençage de microfissures de l'enduit dont la rigidité ou le comportement thermique sont différents de ceux du support en béton,
- ✓ attaques chimiques internes du support générant des gonflements décollant l'enduit.

2- Cas de la membrane bitumineuse :

- ✓ décollement et déchirure partielle de la feuille d'étanchéité,
- ✓ attaques chimiques internes du support générant des gonflements décollant la membrane,
- ✓ émiettement partiel de la membrane bitumineuse, décollement de la feuille d'aluminium.

IV.2.2.2 - Localisation et indice de gravité

Ce désordre peut être ponctuel ou généralisé sur l'étanchéité de la toiture.



Photo 39 - Décollement de la feuille d'étanchéité

Indice de gravité : l'étanchéité n'assure plus son rôle de protection, et les parties décollées laissent pénétrer les agents agressifs d'où le risque d'extension du désordre.

IV.2.3 - Vieillessement – Usure

IV.2.3.1 - Définition et causes probables

Sous l'effet de sollicitations répétées et prolongées (vent, neige, pluie, gel, chaleur...), l'étanchéité, qu'elle soit de type bitumineuse ou de type enduit, est amenée à se dégrader dans le temps. Cette usure se manifeste par les désordres précédemment cités.

IV.2.3.2 - Localisation et indice de gravité

Ce désordre peut être ponctuel ou généralisé sur l'étanchéité de la toiture. L'étendue d'usure peut dépendre de la plus ou moins grande exposition aux intempéries, des différentes orientations de la coupole.



Photo 40 - Décollement partiel de la feuille d'étanchéité

Indice de gravité : l'étanchéité n'assure plus son rôle de protection.

IV.3 - Revêtement intérieur de la cuve

IV.3.1 - Cloquage

IV.3.1.1 - Définition et causes probables

L'apparition de cloques sur le revêtement d'étanchéité est causée par le phénomène de pression osmotique. Cette pression se développe lorsque deux liquides de concentrations différentes se trouvent de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. L'eau interstitielle, chargée en sels minéraux, cherche à s'équilibrer avec l'eau pure du réservoir.

Les revêtements d'étanchéité des réservoirs d'eau jouent le rôle de membrane.

Si la membrane est trop fine, ou si son adhérence est insuffisante, des cloques se forment à la surface du revêtement. Ces cloques sont systématiquement remplies par de l'eau. Ces phénomènes s'observent sur les ouvrages dont les parois contiennent de l'eau, à cause de réservoirs présentant des défauts d'étanchéité en toiture ou en façade.

Le phénomène a tendance à s'accroître avec le temps (nouvelles venues d'eau par l'intermédiaire des cloques crevées).

Ces cloques se retrouvent sur tous les revêtements étanches.

IV.3.1.2 - Localisation et indice de gravité

Les cloques peuvent être ponctuelles ou généralisées, en fonction de la qualité de l'étanchéité, et se répartissent sur toute la hauteur d'eau de la cuve.



Photo 41 - Cloquage d'une étanchéité polyuréthane

Indice de gravité : les cloques sont une zone de circulation d'eau, et ce désordre amorce les infiltrations extérieures.

IV.3.2 - Fissuration de l'étanchéité

IV.3.2.1 - Définition et causes probables

Elle se produit quand l'étanchéité est sollicitée au-delà de sa résistance mécanique. Elle peut avoir comme cause la pression du liquide qui est trop importante par rapport aux actions normales que peut reprendre le revêtement (phénomène s'accroissant avec le vieillissement), ou le revêtement étanche n'est pas assez souple pour faire face aux mouvements dus aux phénomènes de dilatation qui s'exercent sur les parois béton de la cuve.

Cette fissuration peut se manifester ponctuellement, ou sous forme de faïençage, accompagnée d'efflorescences blanches. Elle touche tous les types de revêtement et est beaucoup plus marquée sur les étanchéités de type enduit hydraulique.

IV.3.2.2 - Localisation et indice de gravité

Elles se manifestent tout d'abord au droit des zones où le béton de la cuve a déjà fissuré, et au droit des zones sensibles réparties sur toute la cuve.



Photo 42 - Fissuration d'une étanchéité de type enduit hydraulique

Indice de gravité : ces fissures sont des zones privilégiées de circulation d'eau, le point de passage des infiltrations.

IV.3.3 - Décollement

IV.3.3.1 - Définition et causes probables

Le décollement de l'étanchéité a les mêmes causes que celles de l'étanchéité extérieure de la coupole : une perte progressive d'adhérence de l'étanchéité au support, due à sa mauvaise qualité, à l'action des eaux bloquées par le revêtement, à la « respiration » thermique. Il est également la conséquence du vieillissement de l'étanchéité.

Présent sur tous les types d'étanchéité, il se manifeste sous différentes formes :

- ✓ zones sonnant le creux, pour les étanchéités de type enduit hydraulique,
- ✓ décollement ou déchirure partielle des membranes,
- ✓ attaques chimiques internes du support générant des gonflements décollant la membrane,

- ✓ émiettement partiel et désagrégation de la membrane, pour tous les types d'étanchéité.

IV.3.3.2 - Localisation et indice de gravité

Ponctuels ou généralisés, ces décollements peuvent se retrouver sur toute la surface de cuve immergée.



Photo 43 - Décollement d'une étanchéité de type membrane bitumineuse

Indice de gravité : en plus d'être un défaut fonctionnel, le produit issu de la désagrégation peut encombrer la canalisation de distribution.

IV.3.4 - Revêtement non conforme

Un revêtement est considéré comme non conforme quand il n'assure pas de toutes les caractéristiques pour lesquelles il est employé, qu'il ne répond pas aux prescriptions décrites dans le Fascicule 74 de Construction des réservoirs, et qu'il ne possède pas l'Attestation de Conformité Sanitaire délivré par la Direction générale de la Santé.

Parmi les revêtements présents dans les réservoirs en béton, l'étanchéité de type membrane bitumineuse est considéré comme non conforme, car ses caractéristiques n'ont pas été validées par la Direction générale de la Santé. Sa composition en brai (composé à base de mélanges d'hydrocarbures) est jugée cancérigène.

IV.3.4.1 - Localisation et indice de gravité

Le revêtement de type membrane bitumineuse est présent comme étanchéité dans les réservoirs anciens.

Indice de gravité : ce revêtement ne rend pas l'eau impropre à la consommation, mais s'il est présent dans une cuve, il doit être déposé et remplacé afin de répondre à la réglementation en vigueur.

IV.4 - Serrureries et dispositifs de sécurité

IV.4.1 - Corrosion des serrureries

Les équipements métalliques (échelle d'accès à la cuve, canalisation de trop plein, de distribution, de refoulement, et de prise de vidange) en immersion à l'intérieur de la cuve sont amenés à se corroder fortement, en raison des agents agressifs présents dans l'eau (ions Cl⁻), et à cause du contact avec l'air en période de vidange de la cuve (périodicité : une fois par an).

Dans les autres parties du réservoir, la corrosion des serrureries (canalisations, échelles, garde-corps...) reste présente en raison de la présence des agents agressifs (humidité ambiante + air), mais le désordre est en général moins important que celui constaté sur les équipements situés à l'intérieur de la cuve.



Photo 45 - Corrosion de la crépine de distribution



Photo 44 - Corrosion de l'échelle intérieure

IV.4.2 - Dispositifs de sécurité et équipements non conformes

Les normes de sécurité actuelles imposent des dimensions minimales à certaines serrureries, notamment les garde-corps et une présence d'installations sécuritaires sur les équipements d'accès du réservoir. Pour les dispositifs de sécurité non conformes, on trouve :

- ✓ hauteur de garde-corps inférieure à 1 m (Norme NF E 85-015),
- ✓ absence de crinoline ou de rail de sécurité sur les échelles (Norme NF E 85-010),
- ✓ absence de garde-corps sur la toiture,
- ✓ absence de canne d'accès de rétablissement,
- ✓ absence de calorifuge sur les canalisations d'amenée d'eau et de distribution,
- ✓ absence de palier de repos entre la cheminée et le campanile,
- ✓ présence de tuyaux en amiante ciment,
- ✓ évacuation des eaux pluviales par une canalisation se déversant dans le trop-plein de la cuve.



Photo 46 - Absence de garde-corps sur la toiture

V - METHODES D'INVESTIGATIONS SUR UN CHATEAU D'EAU BETON ARME

V.1 - Investigations non-destructives sur le réservoir

V.1.1 - Inspection détaillée

L'inspection détaillée est au préambule des phases de diagnostic et de travaux. Elle constitue un bilan de santé du réservoir, et donne lieu à un compte-rendu détaillé qui porte sur l'état de la structure génie civil, des équipements de fonctionnalité et de sécurité du château d'eau.

L'inspection du réservoir consiste notamment à :

- ❖ examiner visuellement et de manière rapprochée toutes les parties d'ouvrage : les parements du fût, le plancher bas, les différents planchers intermédiaires, les parements de la cuve intérieurs et extérieurs (préalablement vidangé et mis en chômage), et les faces intrados et extrados de la coupole. Il faut également compléter l'examen par des mesures simples, tel que le sondage au marteau, afin de vérifier qu'il n'y ait pas de zones sonnant le creux, signe de décollement de l'étanchéité ou révélant un autre type de désordre (décollement du revêtement, présence d'aciers corrodés...),
- ❖ utiliser les bons moyens d'accessibilité aux différentes zones, avec les équipements de sécurité adéquates. L'utilisation d'une nacelle ou l'intervention de cordistes spécialisés est notamment requise pour l'inspection extérieure de la cuve,
- ❖ reporter systématiquement sur des plans à l'échelle les constatations des désordres (longueur, ouverture de fissures, superficie d'éclats, etc...). Si les plans ne sont pas fournis par le maître d'ouvrage, il faut prendre sur site, toutes les cotes nécessaires à l'établissement des plans de l'ouvrage, à l'aide d'un distancemètre laser, un inclinomètre, un décamètre.
- ❖ prendre des clichés photographiques susceptibles d'aider à la compréhension des désordres,
- ❖ interpréter les désordres et donner un avis sur l'état de l'ouvrage et son évolution probable,

- ❖ établir la liste des suites à donner à cette inspection (diagnostic, investigations complémentaires éventuelles, liste des travaux à réaliser en réparation, ...).

V.1.2 - Diagnostic

Le diagnostic du château d'eau est la phase qui fait suite à l'inspection détaillée.

Il permet d'évaluer dans quelles mesures l'ouvrage remplit ses fonctions structurelles et de service, c'est-à-dire vérifier qu'il satisfait aux conditions de sécurité et d'utilisation qui sont définies par la réglementation et par les besoins de l'exploitant.

Le vieillissement d'un réservoir est marqué par l'apparition de désordres spécifiques. Dans le cadre du diagnostic, une analyse approfondie des désordres en vue de leur traitement (réparations, confortement) est réalisée.

Dans l'optique d'une réparation ou d'un confortement, le diagnostic a pour but de bien définir les travaux à réaliser. Le traitement des désordres demeurera en effet pérenne puisque ciblé sur leurs origines et leurs conséquences. Cette optimisation des travaux de pérennisation, tant du point de vue qualitatif que quantitatif, est naturellement source d'importantes économies pour le maître d'ouvrage.

Les zones de diagnostic sont choisies au vu des désordres qui ont été observés sur l'ouvrage lors de l'inspection détaillée. Pour avoir une bonne représentativité d'échantillonnage sur le réservoir, les zones sont partagées en zone saine et zone dégradée sur l'ensemble de l'ouvrage et peuvent être réparties comme suit :

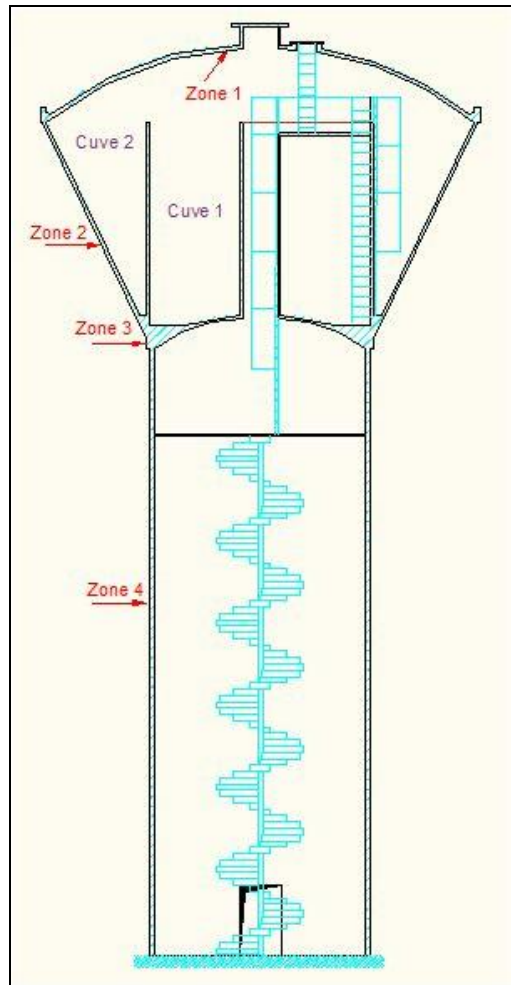


Figure 6 - Exemple d'implantation des zones de diagnostic sur un réservoir béton

V.1.2.1 - Mesures pachométriques

Les armatures du béton armé peuvent être repérées à l'aide d'un pachomètre. La méthode est basée sur la mesure des perturbations créées par la présence d'un objet métallique placé dans un champ électromagnétique (courant alternatif sinusoïdal ou courant pulsé). Lorsque l'appareil (pachomètre) est situé à l'aplomb d'une armature, il analyse le signal reçu et calcule, l'enrobage et donne une estimation du diamètre de l'acier.

Ces mesures permettent également de visualiser la répartition du ferrailage.

Deux modes d'utilisation sont possibles avec ce type d'appareillage :

- ✓ un traitement par balayage linéaire qui permet de récolter plusieurs informations (localisation des armatures, épaisseur d'enrobage, espacement moyen des armatures, estimation du diamètre des armatures horizontales et verticales). Deux balayages doivent être effectués afin de repérer à la fois les armatures

horizontales et verticales. Les armatures repérées avec le pachomètres seront celles perpendiculaires au profil de balayage (le balayage horizontal permet de repérer ainsi les armatures verticales et le balayage vertical les armatures horizontales).

Les données récoltées se présentes sous la forme suivante :

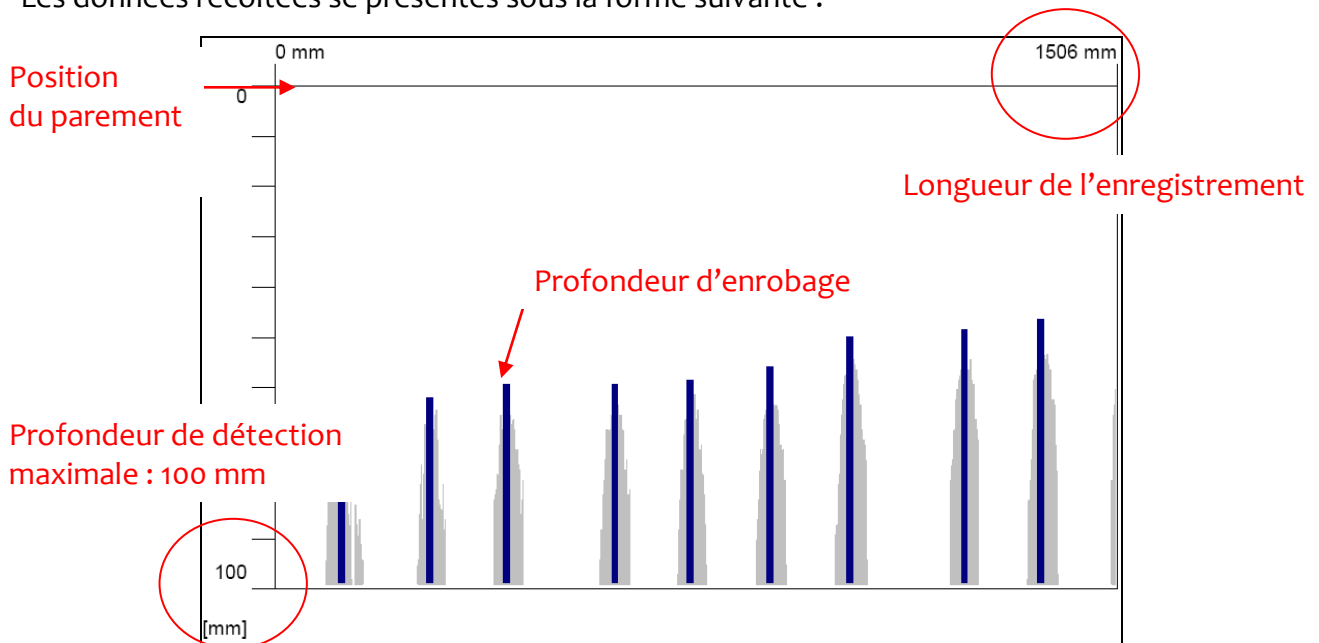


Figure 7 - Exemple d'enregistrement pachométrique par balayage

- ✓ un traitement par réalisation d'image qui permet de réaliser une cartographie du ferrailage sur une zone carrée de 60 cm de côté et qui donne l'image suivante :

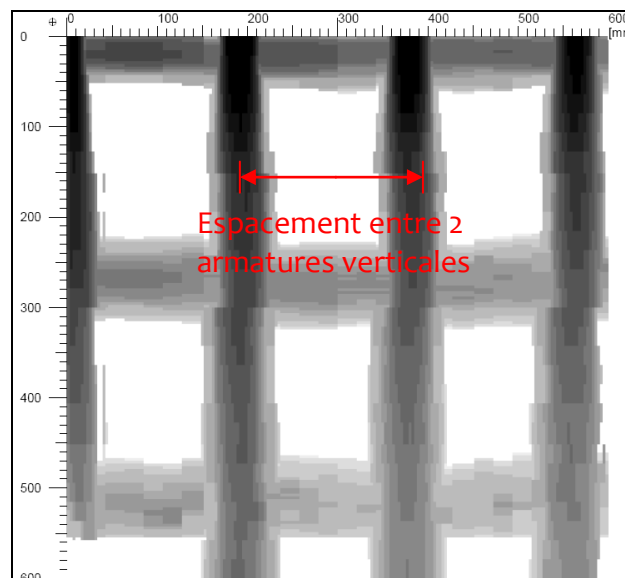


Figure 8 - Exemple d'enregistrement pachométrique par cartographie

Indépendamment des problèmes liés aux besoins de calibrage des appareils, les pachomètres sont sensibles à plusieurs paramètres :

- ✓ effets des armatures voisines : la présence d'armatures voisines peut augmenter le signal reçu et avoir pour effet de sous-estimer l'épaisseur d'enrobage ;
- ✓ effets de bords dus à la géométrie de l'élément de structure ausculté ;
- ✓ effets de la composition du béton et l'influence de la température ambiante.

La détection des armatures et la mesure de l'enrobage avec les pachomètres ont une incertitude d'environ 5 mm sur la localisation des barres, de 2 mm sur la mesure de l'enrobage et de 5 mm sur la mesure du diamètre. De plus, les pachomètres les plus utilisés sont peu efficaces au-delà d'une dizaine de centimètres.

❖ Les résultats sont reportés sous forme de tableau comme ci-après :

Tableau I – Résultats des enregistrements pachométriques

Fichier enregistré	Longueur totale (cm)	Nombre d'aciers	Espacement moyen (cm)	Enrobage (mm)			
				Min	Max	Moy	ET
FS002281	150	15	10	5	19	11	4
FS002282	150	14	11	9	24	14	4
FQ002283	60	5	12	11	14	12	1
FQ002284	60	6	10	16	20	18	1
FQ002285	60	6	10	15	21	17	2
FQ002286	60	6	10	19	28	23	3

Ces informations d'enrobage, couplées aux analyses faites en laboratoire sur les prélèvements, nous permettent de déterminer si les armatures sont éventuellement touchées par la corrosion.

V.1.2.2 - Mesures radars

Le radar est une méthode de reconnaissance non destructive. Les reconnaissances s'effectuent à l'aide d'un radar géophysique (StructureScan Mini de GSSI) muni d'une antenne 1,6 MHz (profondeur d'investigation d'environ 40 cm).

Principe du radar : la technique radar (méthode électromagnétique hautes fréquences) repose sur le phénomène de propagation des ondes électromagnétiques dans des matériaux.

Des impulsions électromagnétiques sont émises par une antenne d'émission qui envoie dans la structure à ausculter des impulsions d'énergie de très brève durée (quelques nanosecondes nS). Lorsque les ondes émises rencontrent un contact entre deux matériaux électromagnétiquement différent, une partie de l'énergie de l'impulsion est réfléchie vers la surface, tandis qu'une autre partie continue à se propager dans le matériau tout en s'atténuant. Les échos successifs sont alors enregistrés dans un signal temporel par l'antenne de réception. Les deux antennes, d'émission et de réception, sont situées dans le même boîtier. La juxtaposition des signaux temporels enregistrés lors du déplacement de l'antenne radar (émettrice et réceptrice) permet d'obtenir une coupe temps, présentée avec une échelle en niveaux de gris corrélée aux amplitudes des signaux, et donnant des informations géométriques sur la structure auscultée. Les fortes amplitudes correspondent à des interfaces, les signaux faibles à un matériau homogène.

Le choix des fréquences de travail détermine en partie la résolution (distance minimale entre deux anomalies susceptibles d'être décelées) et la profondeur d'investigation.

L'image obtenue ou radargramme constitue la section continue de la structure sur laquelle l'abscisse correspond aux distances le long du parcours et l'ordonnée au temps aller-retour employé par les ondes pour atteindre les objectifs et revenir. Cette antenne est déplacée à vitesse constante le long de la surface à ausculter.

Les mesures radar permettent d'obtenir les temps aller-retour entre l'antenne et les divers échos produits par la structure. La transformation des temps de propagation en distance s'effectue en utilisant la constante diélectrique du matériau traversé. Cette constante peut être connue ; plus généralement, la valeur de cette constante est obtenue en étalonnant le temps de parcours sur une distance connue avec certitude.

Il est important de rappeler qu'il existe une imprécision des mesures radar, et par conséquent de l'interprétation des résultats, liée à :

- l'hétérogénéité du matériau analysé,
- la densité d'armatures : classiquement, un maillage resserré agit comme une plaque métallique au-delà duquel le signal électromagnétique ne peut se propager,
- l'humidité du milieu : atténuation de l'onde électromagnétique,

– la précision sur la profondeur : 5% dans un milieu favorable avec calage et 10% dans un milieu moyen avec calage.

Objectifs des mesures : ces mesures nous permettent d'une part de connaître l'espacement et l'enrobage des armatures, et d'autre part d'évaluer l'épaisseur du matériau ausculté.

Cette technique est notamment utilisée sur le voile de cuve, afin d'en approximer l'épaisseur, sans le percer, et ainsi éviter une probable source de désordre.



Photo 47 - Mesure d'enrobage d'armature au droit du fût

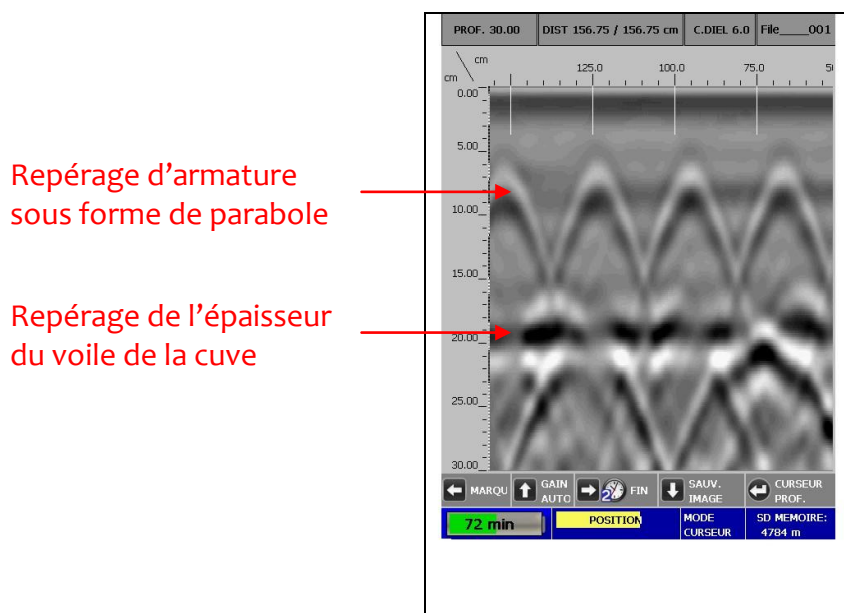


Figure 9 - Exemple d'enregistrement radar sur le voile de cuve

V.1.2.3 - Essais ultrasoniques

Afin d'apprécier l'homogénéité des caractéristiques mécaniques du béton, et son état d'altération, des mesures de vitesse d'impulsion ultrasoniques sont réalisées en différents points de la structure du réservoir.

L'auscultation ultrasonique est basée sur la mesure du temps de parcours d'une onde dans le béton. La vitesse calculée est liée au module d'élasticité et à la résistance en compression du matériau.

Ainsi, des profils de mesures sont réalisés en éloignant le récepteur d'un pas de 5 cm. L'émetteur est positionné en bout de ligne, et reste fixe. Dans un second temps, la position de l'émetteur et du récepteur est inversé afin de vérifier l'homogénéité du béton dans le sens inverse. Pour chaque position, le temps de propagation de l'onde est mesuré.

Dans le cas d'un matériau homogène, la relation entre la distance et le temps de parcours est une droite dont la pente correspond à l'inverse de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonique dans le matériau.

On remarquera que plus l'émetteur et le récepteur sont éloignés plus la profondeur d'investigation augmente.

Globalement, plus la vitesse de propagation est élevée et les incertitudes faibles, plus le matériau est de bonne qualité, à savoir homogène.

Tableau II - Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des ultrasons

Qualité	Vitesse de propagation (m/s)
Excellente	Supérieur à 4000
Bonne	3200 – 4000
Douteuse	2500 – 3200
Mauvaise	1700 – 2500
Très mauvaise	Inférieure à 1700

Nota : ces valeurs sont cependant à nuancer en fonction de chaque élément de structure (état de surface, bullage, etc.). (Données issues d'expérience réalisées en laboratoire)



Photo 48 - Prise de mesures ultrasoniques

V.1.2.4 - Essais sclérométriques

L'essai au scléromètre est destiné à mesurer la dureté superficielle du béton pour évaluer l'homogénéité surfacique de sa qualité sur un ouvrage.

Il consiste à projeter une masse donnée contre un parement par l'intermédiaire d'un ressort. La réaction résultant du choc donne l'indice sclérométrique qui est corrélé en fonction de l'inclinaison de la surface.

Cet essai est peu coûteux, simple et rapide mais ne peut être utilisé que de manière qualitative sur des bétons anciens, de nombreux paramètres influençant le résultat (carbonatation par exemple). La corrélation empirique entre l'essai sclérométrique et la résistance à la compression du béton n'est alors en effet pas significative.



Photo 49 - Prise de mesures sclérométriques

V.2 - Investigations semi-destructives ou destructrices sur le réservoir

V.2.1 - Prélèvements de béton pour analyse en laboratoire

Les prélèvements sont effectués dans des zones représentatives par carottage ou à la disqueuse. Il est ensuite possible de déterminer les caractéristiques chimiques, physiques, mécaniques et minéralogiques du béton par des analyses complémentaires en laboratoire.

- ❖ Les prélèvements sont effectués principalement à l'aide d'une carotteuse portable de terrain. Il s'agit d'une tronçonneuse transformée, munie d'un système débrayable qui permet de fixer un tube en acier sur laquelle est fixé sur l'une des extrémités, une tête diamantée. Les prélèvements sont effectués généralement en diamètre 80 mm avec une longueur minimal de 16 cm pour les essais de résistance en compression. Le diamètre du prélèvement doit être au minimum égal à 2,5 fois la taille du plus gros granulat, et l'élancement de la carotte doit être supérieur de 2 fois au diamètre du prélèvement afin de réaliser les essais normalisés. Les analyses chimiques et minéralogiques (teneurs en chlorures libres, teneurs en sulfates libres, porosité, densité) sont effectués en diamètre 50 mm avec une profondeur allant au-delà de l'enrobage de l'armature. La taille du prélèvement n'étant pas normalisé, le diamètre correspond à la taille minimale du matériel utilisé.
- ❖ Les prélèvements à la disqueuse sont réalisés lorsque les conditions d'investigations (espacement moyen des armatures par exemple) ne permettent pas, ou lorsque les profondeurs d'investigations ne nécessitent pas l'utilisation d'une carotteuse. Ces prélèvements sont uniquement utilisés pour les analyses chimiques (teneurs en chlorures libres, teneurs en sulfates libres, porosité, densité).

V.2.2 - Mesures du potentiel de corrosion des armatures

Ce diagnostic a pour objectif de connaître l'état de passivation des armatures et leur probabilité de corrosion. Il permet ensuite de préconiser un traitement des aciers adaptés à leur état. La mesure du potentiel de corrosion des armatures est réalisée selon les dernières directives et conclusions du rapport final COST 509 (European Coopération in the Field of Scientific and Technical Research)

La technique employée pour déterminer le degré de corrosion des armatures est la mesure des variations engendrées par les modifications du potentiel électrique dans les zones corrodées. Ces mesures sont réalisées à l'aide d'une électrode « cuivre / sulfate de cuivre » que l'on passe sur la surface du béton. La connexion électrique entre l'appareil et la surface du béton est assurée, d'un côté de manière directe sur une armature, et de l'autre côté par une électrode. L'électrode est positionnée sur le parement au droit des armatures préalablement repérées à l'aide du détecteur d'armature (pachomètre).

Les variations de potentiel mesurées sont ensuite utilisées pour évaluer la probabilité de corrosion des armatures : une première estimation de l'état de corrosion peut être faite à partir de l'observation des gradients de potentiel ; au sein d'une même zone, des différences de potentiel de l'ordre de 150 à 200 mV laissent supposer une corrosion des armatures présentant les potentiels les plus bas.

Pour s'assurer de la fiabilité des résultats, il est indispensable d'étalonner les mesures sur site en repérant le potentiel d'une armature corrodée et une autre saine.

V.2.3 - Mesures de la profondeur de carbonatation du béton

La réaction de carbonatation des composés hydratés du ciment par le dioxyde de carbone de l'air entraîne une baisse du pH de la pâte de ciment (une acidification) à une valeur telle que le film passif (ou pellicule d'oxydes passifs) protégeant l'acier dans le béton n'est plus stable. Avec cette baisse du pH, le film passif se détruit et la corrosion peut alors se développer en milieu aéré et humide.

La carbonatation du béton devient donc dangereuse à partir du moment où elle atteint la profondeur des armatures ; il est donc impératif de la comparer aux mesures d'enrobage des armatures de façon à connaître leur état de dépassivation, c'est-à-dire dépourvues du film passif les protégeant de la corrosion.

La carbonatation du béton puis la corrosion des armatures progressent d'autant plus vite que le béton est poreux ; il est cependant intéressant de noter que l'humidité, facteur primordial dans la survenue de la corrosion, freine la progression de la carbonatation.

Afin de suivre l'évolution de la carbonatation à l'intérieur du béton, on utilise un indicateur coloré (une solution alcoolique de phénolphtaléine). Cet indicateur coloré change de couleur à

pH 9 : la partie carbonatée du béton reste incolore, alors que la partie non carbonatée prend une coloration violet-rose. Les mesures de carbonatation peuvent être réalisées directement sur site ou sont mesurés directement en laboratoire sur les échantillons.



Photo 50 - Mesure de carbonatation sur un échantillon

Il est souvent constaté sur les parements extérieurs revêtus d'un enduit hydraulique, une carbonatation de celui-ci sur toute son épaisseur.

Il est à noter, que même si les profondeurs de carbonatation peuvent être faibles, cela suffit à dépassiver les aciers, s'ils sont faiblement enrobés. Il est donc très important de comparer ces profondeurs de carbonatation avec l'enrobage des armatures.

Le faible taux de carbonatation peut s'expliquer par le fait que bon nombre de réservoirs se situent en milieu rural, zones où la concentration en CO₂ est moins importante qu'en milieu urbain.

V.2.4 - Essais de cohésion superficielle du support et/ou d'adhérence d'un revêtement

Ces essais sont pratiqués à l'intérieur de la cuve à l'aide d'un dynamomètre d'arrachement de 16 kN. Ce dernier permet de mesurer une résistance à la traction directe par le biais de pastilles métalliques carrées (de 5 cm de côté) collées sur le matériau à tester.



Photo 51 - Mesure d'essai dynamométrique

Deux types d'essais sont réalisables par le biais de cet appareillage :

- ✓ des essais d'adhérence du revêtement d'étanchéité sur le support : ces essais permettent de qualifier l'adhérence de l'étanchéité sur le support béton en plusieurs points,
- ✓ des essais de cohésion superficielle du support : ces essais permettent de qualifier l'état du support béton pour une pose future de revêtement d'étanchéité

Préalablement à l'essai, l'emprunte de la pastille est découpée à la disqueuse sur l'épaisseur d'étanchéité ou sur une profondeur de 1 à 2 mm dans le support, selon le type d'essai réalisé.

Selon la norme NF P 18-852, différents types de rupture peuvent être observés lors de ces essais.

Les essais peuvent être considérés comme satisfaisants lorsque la contrainte d'arrachement est supérieure à 1 MPa. Cette contrainte correspond à une force d'arrachement de 2,5 kN sur une pastille mesurant 5 x 5 cm de côté.

Des essais d'adhérence peuvent être également effectués sur le revêtement de la coupole ou sur l'enduit du fût dans le cas où il serait nécessaire de connaître leur adhésion au support, afin de déterminer le type de moyens à employer pour leur décapage.

VI - ANALYSES EN LABORATOIRE DES ECHANTILLONS BETON DU CHATEAU D'EAU

VI.1 - Les essais mécaniques : résistance en compression simple

Ces essais sont réalisés sur les prélèvements (diamètre 80 mm) réalisés in situ afin de déterminer la qualité du béton du point de vue de sa résistance en compression. Les prélèvements des essais sont généralement issus de la partie fût du réservoir. Les essais sont réalisés en laboratoire par l'intermédiaire d'une presse de force appropriée, conformément aux normes NF P18-411 et NF P18-412. Les extrémités des carottes sont rectifiées par sciage à la scie diamantée puis surfacer au soufre. L'écrasement est effectué avec une vitesse de mise en charge définie. La résistance en compression est définie suivant la relation :

$$R_c = (10 P) / S$$

R_c : Résistance (en MPa)
 P : Charge de rupture (en kN)
 S : Section de l'éprouvette (en cm²)

Les valeurs moyennes d'un bon béton sont comprises entre 25 et 35 MPa.

VI.2 - Les analyses physico-chimiques

VI.2.1 - Mesure de la densité et de la porosité du béton

Cet essai est effectué selon les recommandations de l'AFPC-AFREM (Association Française Pour la Construction et l'Association Française de Recherches et d'Essais sur les Matériaux) :

- ❖ une pesée de l'échantillon dans l'état,
- ❖ une pesée de l'échantillon après séchage à 105°C pendant 24 heures,
- ❖ une imbibition de l'échantillon à l'eau sous vide,
- ❖ une pesée hydrostatique de l'échantillon.

Dans un milieu poreux granulaire, la porosité totale est définie comme le rapport entre le volume total des vides et le volume total du matériau. C'est un nombre sans unité ou en pourcentage.

Il convient de différencier la porosité totale de la porosité efficace (ou effective) qui est le rapport entre le volume total des vides communicants et le volume total du matériau. Cette porosité peut-être très inférieure à la porosité totale lorsque les pores du matériau ne sont pas en communication ou que la taille des pores est telle que les fluides ne peuvent pas y circuler. Un béton peut être considéré de bonne qualité avec une masse volumique de l'ordre de 2 300 kg.m⁻³ et une porosité accessible à l'eau de l'ordre à 13% selon la norme NF EN 206-1.

VI.2.2 - Mesure des teneurs en chlorures libres

Les échantillons de béton prélevés sont analysés en laboratoire selon le mode opératoire suivant :

- ✓ concassage de l'échantillon de béton,
- ✓ après homogénéisation, broyage du béton concassé,
- ✓ mise en solution à l'eau déionisée,
- ✓ dosage par chromatographie ionique.

Les mesures de teneurs en chlorures libres sont effectuées à différentes profondeurs sur les carottes de béton et les résultats obtenus sont comparées avec les épaisseurs d'enrobage des armatures.

Dans les réservoirs d'eau, il est constaté que les teneurs en chlorure peuvent être légèrement élevés à l'extérieur de la cuve au droit du bas du voile et de la ceinture basse. Ce phénomène pourrait s'expliquer par le fait que c'est à cette hauteur de la cuve que la pression d'eau est plus importante, et qu'en cas de défaillance de l'étanchéité, les chlorures pourraient s'infiltrer vers l'extérieur plus facilement. Les bétons de ces zones peuvent être pollués par des chlorures provenant soit des opérations de nettoyage soit directement du traitement de l'eau.

VI.2.3 - Mesures de pH

Le potentiel hydrogène (ou pH) mesure l'activité chimique des ions hydrogènes (H⁺) (appelés aussi couramment protons) en solution. Notamment, en solution aqueuse, ces ions sont

présents sous la forme de l'ion oxonium (également, et improprement, appelé ion hydronium). Plus couramment, le pH mesure l'acidité ou la basicité d'une solution.

Les mesures de pH sont réalisées sur les poudres de béton obtenues lors de la préparation des échantillons pour les dosages en ions solubles. Pour chaque échantillon, la poudre est mise en solution dans de l'eau déionisée (rapport poudre de béton / eau déionisée de 1:1). La mesure est effectuée, après équilibre entre la poudre et l'eau, à l'aide d'une sonde pH et d'un pH-mètre électronique.

Le pH d'un béton sain étant égal à 13, ces mesures nous permettent de déterminer si le phénomène de carbonatation du béton est activé lorsque les résultats sont inférieurs à 13. Ces mesures sont donc étroitement liées aux mesures de profondeur de carbonatation.

Pour rappel, le béton est carbonaté quand son pH a atteint une valeur de 9.

VI.2.4 - Mesure des teneurs en sulfates solubles

L'attaque sulfatique, comme l'attaque par les chlorures ne se produit que lors d'un apport suffisant en sulfates. Ces sulfates peuvent provenir de pollutions industrielles ou urbaines mais également des sols et des remblais ou du béton lui-même.

En milieu confiné, l'activité bactérienne est à l'origine de la production de sulfures, puis d'hydrogène sulfuré. Cet hydrogène sulfuré est ensuite oxydé par l'action de bactéries thio-oxydantes, ce qui conduit à la formation d'acide sulfurique. Cet acide se dissout dans le béton et les sulfates peuvent alors réagir avec certains composés du béton (notamment les aluminates), pour produire de l'ettringite secondaire. Lorsqu'ils sont produits en quantité importante, ces sels à caractère expansif conduisent à un gonflement du béton et à sa fissuration. Le béton perd alors sa cohésion et les granulats se déchaussent.

Lorsque le seuil, égal à 0,5% de sulfates libres en poids par rapport au ciment est atteint, le risque d'attaque par les sulfates devient important.

Le mode opératoire, pour l'analyse de ces mesures, est le même que celui des analyses de teneurs en chlorures libres.

Généralement, les teneurs en sulfates sont normales dans les bétons des réservoirs, et il est rare qu'une pathologie liée à une attaque sulfatique y soit détectée.

VII - PRECONISATIONS DE REPARATION D'UN CHATEAU D'EAU BETON ARME

VII.1 - Réparations courantes

VII.1.1 - Traitement des armatures corrodées et reconstitution de l'enrobage

- ❖ si les défauts d'enrobage sont ponctuels et limités, on peut se contenter de réparation limitée aux aciers apparents en prenant la précaution de purger bien au delà de la zone corrodée.
- ❖ si les défauts d'enrobage sont plus généralisés et/ou si la carbonatation de la pâte de ciment est plus importante, les travaux de ragréage devront être complétés par la mise en œuvre d'un inhibiteur de corrosion. Ce dernier est appliqué sur le parement béton, et permet d'abaisser la vitesse de corrosion des aciers, sans en affecter ses propriétés.

Type de travaux :

- ❖ mise en place d'un accès de type nacelle volante, ou échafaudage avec vérification par un organisme de contrôle agréé avant son utilisation,
- ❖ décapage de l'ensemble des surfaces à traiter, sondages, repiquage, purge des enduits altérés et décapage de toutes les traces,
- ❖ après décapage, suivant les cas :
 - ✓ mise à blanc, et passivation des aciers. Le remplacement des armatures est à prévoir si la perte de section est supérieure à 50%,
 - ✓ reconstitution du parement proprement dit à l'aide de mortiers spécifiques à base de liant hydraulique enrichi avec granulométrie adaptée à l'épaisseur à combler.

VII.1.2 - Traitement des fissures

Le traitement des fissures de faible ouverture s'opère par remplissage avec couche fibrée (peinture + silice additionnée) afin d'obtenir un bourrage optimum de l'ouverture. Suivant le cas, les fissures plus importantes font l'objet d'une ouverture pour calfatage avec un mastic acrylique.

Les fissures sont traitées après vérification qu'elles ne sont pas liées à la corrosion d'une armature.

Ces traitements ne concernent pas les fissures situés sur le parement intérieur de la cuve. Ces dernières sont traitées différemment et font l'objet d'explications dans le paragraphe VII.1.4 « Traitement de l'étanchéité de la cuve ».

VII.1.3 - Régénération des bétons carbonatés et/ou chlorés

Le faible taux de carbonatation et la faible pénétration de chlorures dans le béton du réservoir n'amène pas à en faire une extraction (qui n'est pas possible pour la carbonatation), mais plutôt à en limiter les effets par la mise en œuvre d'un inhibiteur de corrosion sur les parements extérieurs.

L'inhibiteur organo-minéral d'imprégnation, est un principe simple. La partie minérale se fixe sur les aciers par adsorption (*phosphatation*). La partie organique génère une barrière répulsive chargée négativement qui repousse les ions agressifs entrants, eux-mêmes chargés négativement.

Cette solution phosphatée en phase aqueuse a un très haut pouvoir de protection des aciers et pénètre très rapidement dans le béton.

Ce produit s'applique généralement en 2 ou 3 couches de 200 à 500g/m² suivant la porosité du béton de préférence par pulvérisation.

Un rinçage doit être effectué de manière à limiter les risques d'efflorescences.

Ce procédé s'utilise pour les parements extérieurs, et il implique par la suite la pose d'un revêtement d'imperméabilité. La mise en œuvre de ce dernier est décrit dans le paragraphe VII.1.7 « Imperméabilisation des parements extérieurs (ravalement) ».

Pour éviter la pénétration des chlorures par l'eau de la cuve, c'est un nouveau revêtement d'étanchéité intérieure qui est à mettre en œuvre (voir paragraphe VII.1.6 « Traitement de l'étanchéité de la cuve »).

VII.1.4 - Traitement de l'étanchéité de la coupole

Type de travaux :

- ❖ décapage de l'ancien revêtement sur toutes les formes de pentes sur l'ensemble des surfaces y compris sondages et enlèvement des zones instables suivant le cas,
- ❖ remise en état du support, purge des bétons et enduits, brossage et traitement des aciers apparents y compris sur le campanile, évacuation des gravois en décharge contrôlée,
- ❖ traitement des fissures,
- ❖ sondage de l'acrotère, purge des bétons, brossage et traitement des aciers apparents, reconstitutions nécessaires, élimination éventuelle des anciens dispositifs de levage, évacuation des gravois,
- ❖ vérification et reprofilage de la pente du caniveau de récupération des Eaux Pluviales, pour un meilleur écoulement de l'eau vers les nouveaux points de collecte disposés dans l'acrotère,
- ❖ mise en place de gargouilles en inox DN60 disposées dans l'acrotère pour l'évacuation des Eaux Pluviales vers l'extérieur,
- ❖ mise en œuvre d'un revêtement d'étanchéité de type membrane bitume élastomère par :
 - ✓ application d'un enduit d'imprégnation à froid avec mise en œuvre de renforts dans les angles,
 - ✓ mise en place des lés de bitume par collage à chaud avec recouvrements normalisés et traitement des relevés par membrane avec feuil aluminium.

VII.1.5 - Imperméabilisation de l'intrados de coupole de couverture

Type de travaux :

- ❖ mise en place d'un échafaudage mobile dans la cuve pour intervenir en toute sécurité,
- ❖ lavage haute pression,

- ❖ sondage de l'ensemble des surfaces, purges des bétons, traitement des aciers apparents, ragréages nécessaires,
- ❖ mise en œuvre d'un revêtement d'imperméabilisation sur toute la surface (*résine alimentaire appliquée au rouleau*) afin d'assurer une protection durable de la structure en béton et des aciers.

Pendant les travaux à l'intérieur de la cuve, il est important qu'une ventilation mécanique soit mise en place, afin de diluer et extraire les vapeurs toxiques des produits d'imperméabilisation.

VII.1.6 - Traitement de l'étanchéité de la cuve

Si des désordres sont observés ponctuellement sur l'étanchéité, des travaux de réparation sont rarement entrepris de façon localisée, car ils ne rentreraient pas dans le cadre de la garantie décennale et n'assureraient pas la pérennité de la totalité du revêtement.

Lorsque les désordres sont généraux, la réfection totale de l'étanchéité est préconisée.

Type de travaux :

- ❖ montage d'un échafaudage de pied roulant adapté à la forme de la cuve pour accès sur les parois verticales,
- ❖ décapage du support,
- ❖ resurfaçage des parois en contact avec l'eau présentant un aspect assez grossier,
- ❖ élimination si nécessaire d'éventuelles zones soufflées sur le fond de cuve, reconstitution du support, évacuation des gravois,
- ❖ traitement de fissures comprenant :
 - ✓ identification, repérage, matérialisation sur un schéma,
 - ✓ mesure d'amplitude au moyen d'un fissuromètre,
 - ✓ les fissures existantes dont l'ouverture est inférieure à $10/10^{\text{ième}}$ mm, sont pontées au moyen d'un adhésif plastifié de 5 à 10 cm de largeur selon sa provenance ou calfatées au mortier souple époxydique. Les fissures importantes font l'objet d'un bourrage complété par calfatage au mortier souple époxydique et pontées par bande stratifiée armée,

- ❖ mise en œuvre d'un revêtement d'étanchéité, conforme à la classe de l'ouvrage et accrédité de l'Attestation de Conformité Sanitaire, comprenant :
 - ✓ application d'une couche d'imprégnation générale en liant appropriée à base de résine époxydique sans solvant, mise en œuvre au rouleau,
 - ✓ pose et débullage d'un tissu de verre multi-axial,
 - ✓ application d'une seconde couche de liant en saturation mise en œuvre au rouleau,
 - ✓ saupoudrage de la couche de saturation avec de la silice fine, saupoudrage réalisé avec un lance poudre actionné par de l'air comprimé (*cette technique n'est pas présente sur tous les complexes en fonction de leur origine*). Cette action a pour but de créer une rugosité homogène pour permettre une parfaite adhésion de la couche de finition. Lorsque la totalité des surfaces est traitée (*voile, cheminée et fond de cuve*), on procède au contrôle général pour détecter d'éventuels défauts qui seront repris par meulage et rechargé en liant époxydique.
- ❖ contrôle di-électrique pour détections d'éventuelles porosités (contrôle réalisé par un organisme indépendant de l'entrepreneur),
- ❖ après les retouches effectuées et le temps de séchage requis (24 h minimum), application d'une couche de finition en atmosphère non condensante. La couche de finition peut être appliquée à la pompe avec réchauffeur en épaisseur de film,
- ❖ désinfection de la cuve après travaux, avant sa remise en service,
- ❖ définition d'une procédure de remise en eau,
- ❖ prélèvement pour analyse bactériologique (effectué par un laboratoire agréé),
- ❖ remise en service de l'ouvrage à l'issue des résultats de l'analyse de l'eau.

VII.1.7 - Imperméabilisation des parements extérieurs (ravalement)

Après traitement des aciers, et des fissures, et mise en œuvre éventuel d'un inhibiteur de corrosion, les travaux suivants d'imperméabilisation peuvent avoir lieu :

Type de travaux :

- ❖ traitement fongicide général par pulvérisation d'une solution anticryptogamique,
- ❖ application d'un complexe d'imperméabilisation s'accommodant de la fissuration et définit par les normes P84-403 et 84-404-3 (Revêtement hiérarchisé par classe de I1 à I4). Le revêtement est disposé au rouleau en trois couches (1 couche primaire suivie d'une couche intermédiaire et enfin une couche de finition).

VII.1.8 - Mise en conformité des accès et remplacement de serrureries diverses

Remplacement des équipements hydrauliques à l'intérieur de la cuve :

- ❖ démontage et évacuation en décharge des équipements hydrauliques à remplacer,
- ❖ remplacement des équipements hydrauliques immergés par tubes en acier inox 316 L (matériau accrédité de l'Attestation de Conformité Sanitaire), (*canalisations de trop-plein et de refoulement*),
- ❖ remplacements des gaines de traversée de génie civil de concept ancien par de nouvelles avec brides normalisées pour raccordement des nouveaux équipements hydrauliques,
- ❖ démontage et remplacement de la soupape de vidange en DN 100 y compris son raccordement sur les réseaux existants sous la cuve,

Concernant les équipements de sécurité, leur remplacement est à envisager s'ils sont hors norme. Si les équipements sont vétustes, il convient de les remettre en peinture.

Type de travaux :

- ❖ remplacement des différentes échelles et mise en place d'échelle en inox 316 L avec une inclinaison et munie de crinolines,

- ❖ remplacement de l'échelle de la cheminée d'accès à la cuve, et mise en place d'une ligne de vie avec 2 harnais de sécurité pour cette échelle,
- ❖ remplacement des garde-corps par une structure en inox 316 L s'ils ont une hauteur inférieure à 1 m,
- ❖ mise en conformité des garde-corps par ajout d'une plinthe et main courante, traitement par mise en peinture, s'ils ont la hauteur normale,
- ❖ dépose des baies de pavés de verre d'éclairage naturel et remplacement par des châssis métalliques inox ou aluminium munis d'un vitrage en polycarbonate,
- ❖ traitement par mise en peinture des échelles d'accès aux paliers intermédiaires, s'ils présentent quelques points de corrosion,
- ❖ fourniture et mise en place d'un portillon de sécurité au niveau des paliers intermédiaires et de l'accès au plancher technique,
- ❖ mise en place, au niveau du campanile, de grilles de ventilation en acier inox ou aluminium avec tamis anti-intrusion pour les volatiles et insectes,
- ❖ mise en place d'une crapaudine sur les points de collecte des Eaux Pluviales,
- ❖ installation d'un paratonnerre pour la protection des habitations à proximité.

VIII - REPARATION PAR AJOUT DE PRECONTRAINTE ADDITIONNELLE (MODELISATION ET NOTE DE CALCUL) : CAS PARTICULIER DU RESERVOIR SUR TOUR DE FERRIERES-EN-BRIE

VIII.1 - Introduction

Cette partie aborde une phase postérieure au diagnostic. A la suite des préconisations de réparations, un dimensionnement des solutions envisagées s'impose. Le cas particulier présenté ici est le renforcement d'une cuve altérée structurellement.

VIII.2 - Présentation de l'ouvrage

Le château d'eau de Ferrière en Brie est un ouvrage mixte en maçonnerie et béton armé dont l'année supposée de construction est 1860. Une reconstruction de la cuve, initialement métallique, en béton armé est présumée à l'après-guerre.

Ce réservoir est un ouvrage aérien d'une capacité de stockage de 400 m³ qui présente un intérêt patrimonial et architectural.



Photo 52 - Château d'eau de Ferrières-en-Brie



Photo 53 - Château d'eau de Ferrières-en-Brie

La structure présente les caractéristiques dimensionnelles suivantes :

- ❖ hauteur totale : 23,27 m,
- ❖ hauteur de fût : 16,28 m,
- ❖ diamètre intérieur du fût : 6,04 m (*à la base*) et 6,3 m (*au niveau du plancher technique*),
- ❖ diamètre intérieur de cuve : de 8,22 à 10,22 m.

Sa structure comprend :

- ❖ le plancher bas du fût,
- ❖ un fût de type voile en maçonnerie (briques),
- ❖ une cheminée centrale (*diamètre intérieur de 1 m*) permettant l'accès à la cuve et au palier de repos,
- ❖ une cuve conique en béton armé composée du fond de cuve et d'un voile incliné,
- ❖ une coupole de couverture en béton armé avec un acrotère périphérique.

Dans la cuve, les parements intérieurs sont protégés par un enduit fin.

Au niveau de la coupole, l'intrados et l'extrados sont bruts de décoffrage.

VIII.3 - Principaux désordres relevés

Une inspection détaillée et un diagnostic matériaux ont été réalisés au cours du second semestre 2009 pour déterminer l'origine des désordres et préconiser des solutions de réparation adéquates par la société CONCRETE.

Les résultats de l'inspection détaillée montrent que le réservoir est affecté par un certain nombre de désordres tels que :

- ❖ enduit (ép. 20 mm) décollé et sonnant le creux sur les parements extérieurs de la cuve,
- ❖ de nombreux aciers apparents corrodés en sous-face de coupole,
- ❖ de nombreuses fissures verticales et horizontales sur les parements intérieurs et extérieurs de la cuve,
- ❖ des équipements hydrauliques dans la cuve très corrodés,
- ❖ une sécurité insuffisante au niveau du rez-de-chaussée, des paliers intermédiaires, de l'échelle de cheminée et de l'accès à la coupole...
- ❖ absence de revêtement d'étanchéité dans la cuve et sur la coupole.

Les fissures surlignées par de la calcite observées sur le parement extérieur de la cuve traduisent le passage d'eau de l'intérieur vers l'extérieur et sont imputables à l'absence de revêtement d'étanchéité intérieur de cuve et donc à des défauts d'étanchéité.

VIII.3.1 - Solutions de renforcement de la structure

Les fissures identifiées lors de l'inspection sont vraisemblablement dues à des phénomènes de contraintes thermiques et de contrainte structurelle. Des sondages destructifs ont été effectués sur le voile de cuve afin de reconnaître le ferrailage présent. Suite à la vérification de dimensionnement de la cuve avec les armatures en place, il s'est avéré que les faces intérieures

de la cuve présentent un déficit en ferrailage sous l'effet de la pression hydrostatique et du gradient thermique (Cf §IX.2.3).

Un renforcement général de la cuve est donc nécessaire.

Plusieurs solutions existent pour un tel renforcement, à savoir :

- ❖ Tissu Fibres de carbone (TFC) : Ce procédé consiste à associer aux armatures internes insuffisantes de la cuve, un matériau résistant aux efforts de traction. Judicieusement collé sur les faces externes des zones tendues de la cuve à renforcer, les fibres de carbone tissées participent à la reprise des sollicitations de cette structure.
- ❖ Précontrainte additionnelle : celle-ci permet par le biais de cerces autour de la cuve:
 - ✓ - Une augmentation de la capacité en flexion
 - ✓ - Une augmentation de la capacité en traction

Dans le contexte particulier du château d'eau de Ferrières-en-Brie et pour des raisons d'ordre économique, la deuxième solution à savoir la précontrainte additionnelle a été préconisée.

Le renforcement consiste à disposer des cerces précontraintes autour de la structure. Les cerces reprennent les efforts de traction annulaires développés par la poussée hydrostatique. Les cerces sont constituées par des mono-torons avec ancrage, gainés et graissés individuellement protégés. En plus de sa propre protection, chaque toron est enfilé dans une gaine en Polyéthylène Haute Densité (PEHD) injectée au coulis de ciment avant mise en tension.

IX - RECHERCHE DES APTITUDES STRUCTURELLES DU VOILE DE CUVE

IX.1 - Caractéristiques générales des calculs

Acier :

Module d'élasticité $E = 210 \text{ Gpa}$

Limite d'élasticité $f_e = 400 \text{ Mpa}$ pour les aciers hautes adhérences

Béton :

Résistance en compression $f_{c28} = 25 \text{ Mpa}$

Documents de référence :

- ❖ Fascicule 74 – Construction des réservoirs en béton (Journal officiel)
- ❖ Règles B.A.E.L. 91 – Modificatif de Février 2000 – « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états limites »
- ❖ Règles B.P.E.L. 91 – « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états limite »
- ❖ R. BARES « Tables pour le calcul des dalles et des parois » - Edition DUNOD

Géométrie de la cuve :

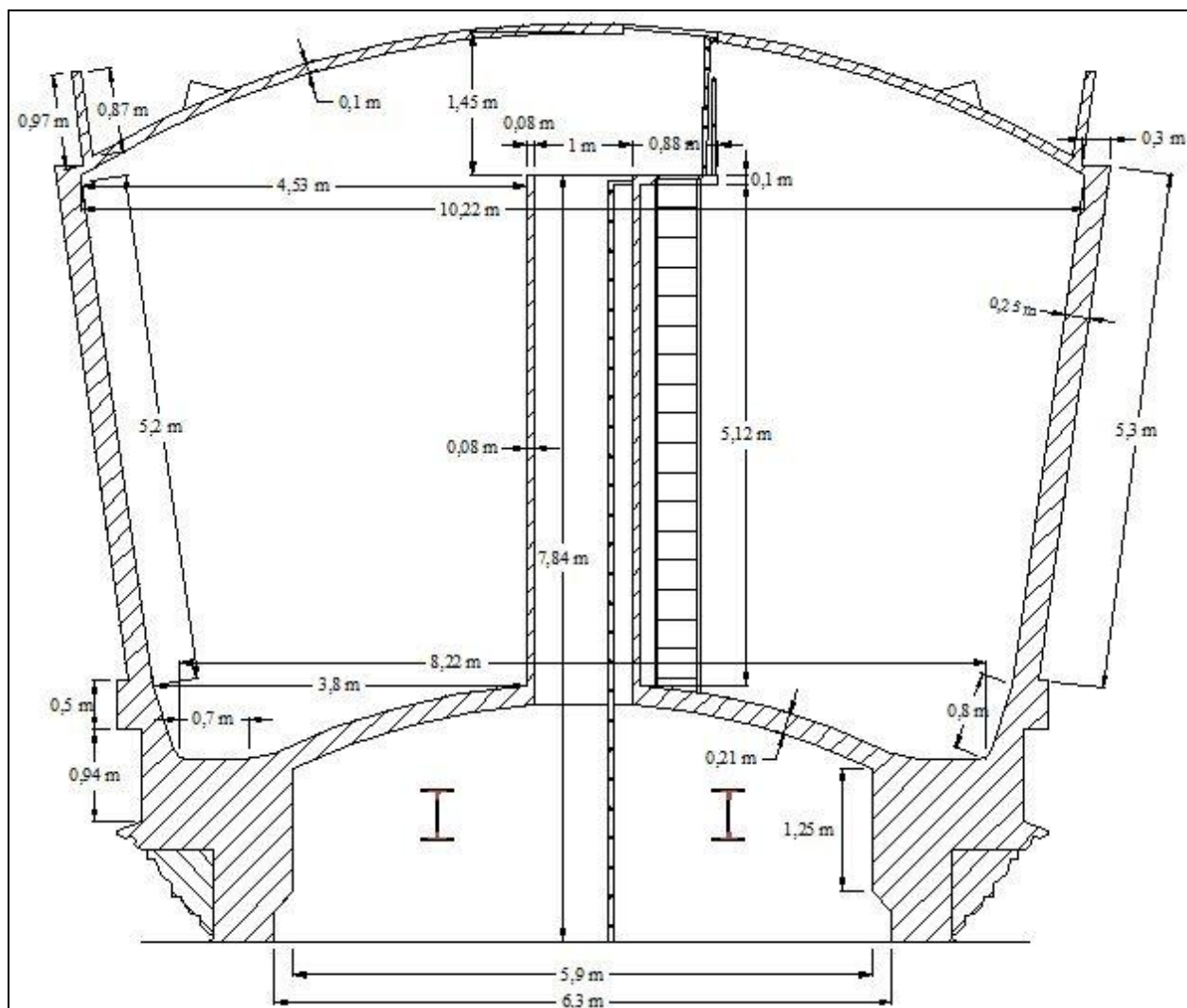


Figure 10 - Géométrie de la cuve

IX.2 - Vérification du dimensionnement de la cuve

L'inspection a permis de déterminer que la cuve était défaillante structuellement.

Il convient donc de vérifier au calcul, selon les règlements, si la structure composée de sa section béton et d'armatures est apte à reprendre les charges pour lesquelles elle est exploitée.

IX.2.1 - Calcul du ferrailage minimal

Les calculs sont menés à l'ELS. La pression hydrostatique crée sur la paroi de la cuve des efforts qui varient en fonction de la hauteur. La détermination des efforts normaux et des sections d'armatures horizontales (cerces) se fait par tranches de 1 m sur la hauteur de la cuve.

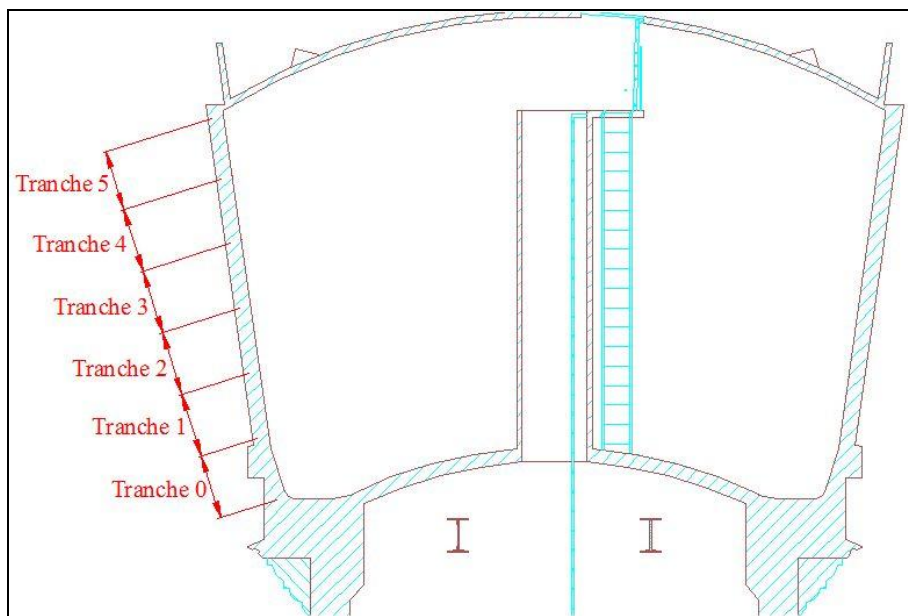


Figure 11 - Répartition des tranches sur la paroi de la cuve

Les différentes formules à considérer pour le dimensionnement de la cuve sont les suivantes :

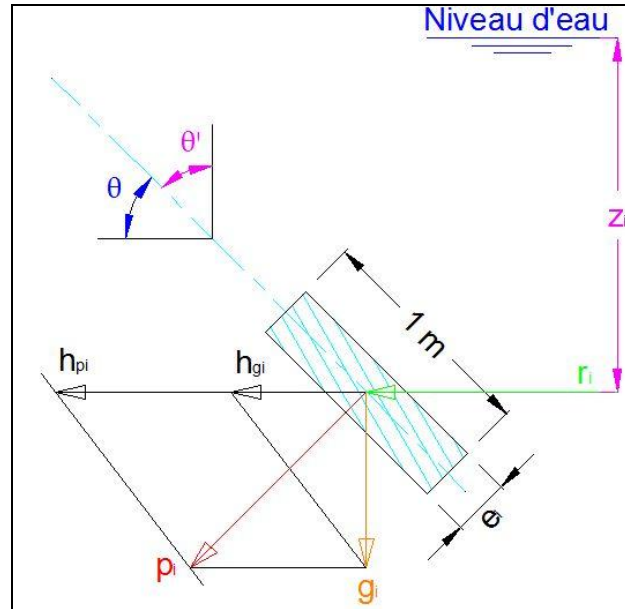


Figure 12 - Eléments de calcul du voile de cuve de tranche unitaire

- ❖ Distance entre le centre de gravité de la tranche et le niveau d'eau supérieur de la paroi :
 $z_i = \text{Ht. vertical de la paroi} - (\text{CdG} \times \cos \theta)$ (unité : m)
- ❖ Epaisseur moyenne du voile sur la tranche de 1 m : $e_i = \text{Ep. du voile en tête} + (\text{Ep. du voile en bas} - \text{Ep. du voile en haut}) \times (z_i / \text{Ht. vertical de la paroi})$ (unité : m)
- ❖ Rayon moyen de la paroi : $r_i = \text{Rayon intérieur en haut de la paroi} - (\text{Rayon intérieur en haut de la paroi} - \text{Rayon intérieur en bas de la paroi}) \times (z_i / \text{Ht. vertical de la paroi})$ (unité : m)
- ❖ Poids propre de la paroi sur la tranche de 1 m : $g_i = 25 \text{ kN/m}^3 \times e_i$ (unité : kN/m²)
- ❖ Résultante horizontale due au poids propre : $h_{gi} = g_i / \tan \theta$ (unité : kN/m²)
- ❖ Effort dû à la poussée de l'eau : $p_i = 10 \text{ kN/m}^3 \times z_i$ (unité : kN/m²)
- ❖ Résultante horizontale due à la poussée de l'eau : $h_{pi} = p_i / \sin \theta$ (unité : kN/m²)
- ❖ Résultante horizontale due au poids propre et à la poussée de l'eau : $h_i = h_{gi} + h_{pi}$ (unité : kN/m²)
- ❖ Effort normal dans la tranche unitaire de la paroi : $N_i = h_i \times r_i$ (unité : kN/m)

Grâce à cet effort normal, on peut en déduire la section minimale d'armature nécessaire par tranche de 1 m sur la hauteur de la paroi, en veillant à être supérieur à l'effort normal minimal nécessaire dans la tranche avec :

$$\overline{N}_i = A_1 \times \sigma_s$$

- ✓ Section d'armature choisie : A_1
- ✓ Contrainte admissible de l'acier : $\sigma_s = \alpha \times \sqrt{(\eta \times f_{t28} / \Phi) + (30 \times \eta)}$
 - * η : coefficient de fissuration de l'armature. Barre à haute adhérence $\eta = 1,6$
 - * f_{t28} : résistance caractéristique du béton à la traction - $f_{t28} = 0,6 + 0,06f_{c28}$ (en MPa)
 - * Φ : diamètre de l'armature pris en compte
 - * 30 : coefficient β pris pour une paroi en contact permanent avec l'eau ou une atmosphère saturée

La section A d'armatures doit cependant satisfaire la condition suivante :

$$A = \max [A_1 ; (N_i - B) / n \times \overline{\sigma}_{th} ; B \times f_{t28} / f_e]$$

Avec $B = e_i \times 1\text{m}$ (en m^2), $n = 13$, $\overline{\sigma}_{th} = 1,1 \times f_{t28}$ (en MPa) et $f_e = 400$ MPa

Tableau III - Dimensionnement des armatures de la jupe

Tranche	Longueur cumulée (m)	Zi (m)	Ni (kN/m)	Choix du Φ	A1 (cm ²)	A1 (u)	$\bar{N}_i$ (kN)	B (m ²)	A2 (cm ²)	A3 (cm ²)	Choix de section (u)
N° de tranche	Tranches de 1 m à partir du bas	Ht - CDGxcos(θ')	hi x ri	(mm)	Section d'armatures	Nb d'armatures / ml			[Ni - Bxobth] / (nxobth)		
1	1,22	5,38	252,44	16	20,11	10	294,30	0,25	-0,011	13,13	2 x 5 HA16
2	2,43	4,17	203,08	14	15,39	10	243,19	0,25	-0,012	13,13	2 x 5 HA14
3	3,65	2,97	150,15	12	11,31	10	187,26	0,25	-0,014	13,13	2 x 5 HA14
4	4,86	1,76	93,64	10	7,85	10	130,04	0,25	-0,016	13,13	2 x 5 HA14
5	6,08	0,56	33,56	8	5,03	10	83,23	0,25	-0,018	13,13	2 x 5 HA14

La section d'armature dimensionnée peut ainsi être comparée avec la section d'armature réellement en place dans la jupe.

La section réelle a été déterminée lors de sondages destructifs qui ont été fait sur le voile de cuve aux différentes tranches de 1 m.

Le tableau suivant nous permet de comparer l'effort normal calculé au dimensionnement, et l'effort normal résistant crée par les armatures réellement en place dans la cuve :

Tableau IV - Vérification de l'effort normal résistant (in-situ)

Ni (kN/m)	Φ in-situ	A in-situ (cm ²)	A in-situ (u)	Ni (kN) in-situ
hi x ri	(mm)	Section d'armatures	Nb d'armatures / ml	
252,44	14	23,09	15	382,33
203,08	14	23,09	15	382,33
150,15	12	16,96	15	296,87
93,64	10	11,78	15	220,44
33,56	6	4,24	15	96,53

L'effort normal engendré par les armatures est supérieur à l'effort normal sollicitant.

IX.2.2 - Calcul du gradient thermique

Il y a lieu de considérer les sollicitations dues aux déformations imposées par les variations de température.

Ces sollicitations dues au gradient thermique apparaissent dans la paroi, lorsque la température du liquide diffère de la température extérieure. A défaut de méthode plus élaborée, ce gradient et les moments induits peuvent être calculés par les formules ci-après tirés du Fascicule 74 « Construction des réservoirs ».

Gradient thermique

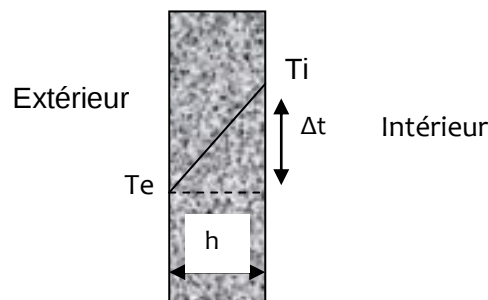


Figure 13 - Tranche de voile de cuve

On suppose que : T_i (Température intérieure) = 10° et T_e (Température extérieure) = 30° .

L'expression du gradient thermique est donnée par les formules suivantes :

$$\lambda_b = 1,75 \text{ W/m}^\circ\text{C}; \frac{1}{h_i} = 0,005 \text{ m}^2\text{ }^\circ\text{C/W}; \frac{1}{h_e} = 0,06 \text{ m}^2\text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$C_w = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i} + \frac{h_0}{\lambda_b}} = 5,24$$

$$\Delta t = (T_e - T_i) \frac{C_w h_0}{\lambda_b} = 13,2^\circ\text{C}$$

Le moment fléchissant provoqué par le gradient thermique tend la fibre la plus froide et a pour valeur :

$$M_{\Delta\theta} = \alpha \frac{\Delta t E I}{h_0}$$

avec $\begin{cases} \alpha : \text{coefficient de dilatation thermique du béton} = 10^{-5} \\ E : \text{Module du béton } (E_v, E_i \text{ ou } E_s \text{ selon le cas}) \\ I : \text{Inertie de la section tenant compte de la réduction de raideur due à la fissuration} \end{cases}$

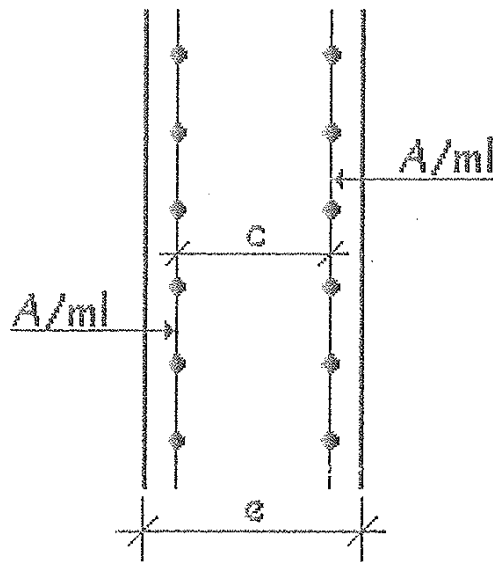
A P'ELS :

$$EI = \text{Max} \left[E_s I_s ; E_v \frac{e^3}{16} \right]$$

avec : $E_s = 200\,000 \text{ MPa}$ module d'élasticité de l'acier

$$I_s = \frac{A c^2}{2}$$

$E_v = 3700 \sqrt[3]{f_{c28}}$ module de déformation différée du béton, en MPa



Moment du au gradient thermique : $M_{\Delta\theta} = 5,81 \text{ KN.m / ml}$

IX.2.3 - Vérification du ferrailage horizontal au gradient thermique

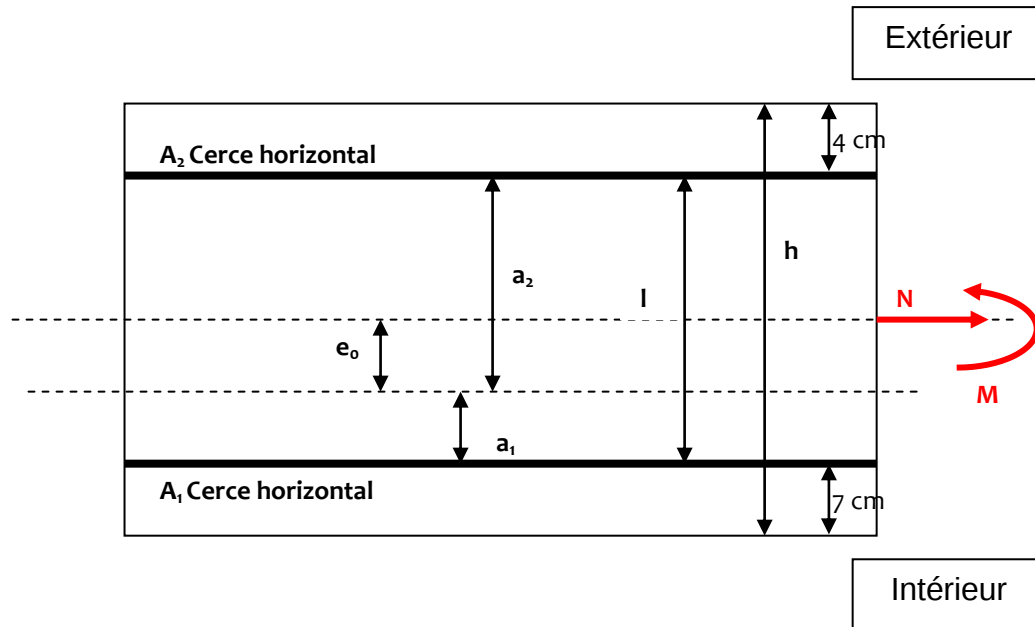


Figure 14 - Coupe sur voile de cuve avec disposition des 2 nappes d'armatures

Dans les sections sollicitées, la vérification au gradient thermique se fait comme suit :

- ❖ N_{ser} : effort normal résistant (dû aux armatures en place) dans la section
- ❖ M_{ser} : Moment fléchissant induit par le gradient thermique
- ❖ e_0 : excentricité de l'effort normal = M_{ser} / N_{ser}
- ❖ a_1 : distance de la nappe d'armature intérieure par rapport à e_0
- ❖ a_2 : distance de la nappe d'armature extérieure par rapport à e_0
- ❖ $A_2 \times \bar{\sigma}_s = (N_{ser} \times a_1) / (a_1 + a_2)$
- ❖ $A_1 \times \bar{\sigma}_s = N_{ser} - A_2$

Les résultats sont donnés dans le tableau ci-après pour les 3 tranches du bas de la cuve :

Tableau V - Comparaison entre les sections d'armatures sollicitantes et résistantes

Tranche	N_i (in-situ)	M	e_0	a_1	a_2	Φ	σ_s	$A_2 \cdot \sigma_s$	$A_1 \cdot \sigma_s$	A_1 nécessaire	A_2 nécessaire	A_1 in-situ	A_2 in-situ
	(kN/m)	(kN.m/ml)	(m)	(m)	(m)	(mm)	(MPa)	(K=kN/ml)	(K=kN/ml)	(cm ² /ml)	(cm ² /ml)	(cm ² /ml)	(cm ² /ml)
1	382,33	5,81	0,015	0,055	0,085	14	140,95	149,67	232,66	16,51	10,62	7,70	15,39
2	296,87	5,81	0,020	0,050	0,090	12	148,40	106,94	189,93	12,80	7,21	5,65	11,31
3	96,53	5,81	0,060	0,010	0,130	6	189,99	6,77	89,76	4,72	0,36	1,41	2,83

Pour les différentes tranches, la section d'armatures réellement en place (A_1 in-situ) est inférieure à la section d'armature nécessaire (A_1 nécessaire) qui devrait reprendre les sollicitations engendrées par la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur du réservoir.

Le renforcement de la structure est donc nécessaire en raison de la déficience de section d'armature de la nappe intérieure (A_1).

IX.3 - Calcul du renforcement par précontrainte - Modélisation de la structure

La modélisation de la cuve est faite sous le logiciel de calcul SAP2000. Elle permet de déterminer les efforts normaux et les contraintes exercées sur la jupe, dus aux différentes sollicitations (Poids propre, pression d'eau, gradient thermique, câbles de précontrainte).

Le calcul du renforcement par précontrainte sera effectué en ne considérant pas les armatures en place dans la jupe. Le travail du béton se fera donc uniquement en compression.

IX.3.1 - Chargement sous poids propre, eau et effets de température

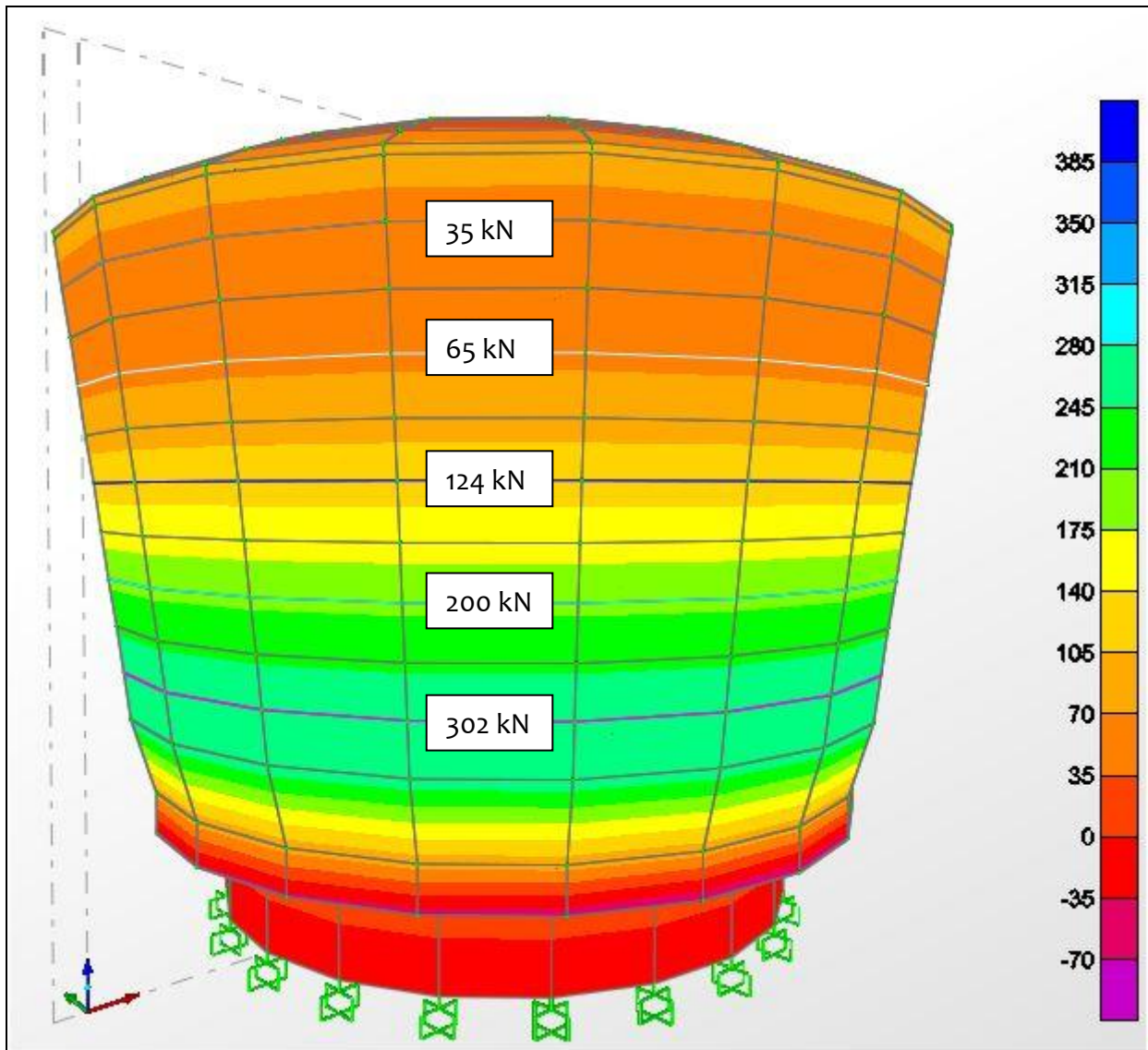


Figure 15 - Visualisation des efforts normaux sur la jupe

L'effort normal sollicitant varie entre 35 kN en partie haute de la jupe et 302 kN en partie basse.

IX.3.2 - Chargement sous poids propre, l'eau, les effets de température et la précontrainte

Les efforts dus à la précontrainte seront modélisés par un chargement linéaire s'appliquant perpendiculairement à la paroi. Soit N_p l'effort normal créée par la précontrainte. Cet effort normal doit satisfaire les 4 conditions suivantes :

- 1- $N_{p1} \geq [-N_i/S - M \times v/I] \times S$
- 2- $N_{p2} \geq [-N_i/S - M \times v'/I] \times S$
- 3- $N_{p3} \geq [-N_i/S - M \times v/I] \times S + 0,6f_{c28} \times S$
- 4- $N_{p4} \geq [-N_i/S - M \times v'/I] \times S + 0,6f_{c28} \times S$

Avec N_i l'effort normal dans la section, S l'aire de la section soit $0,25 \text{ m}^2$, M le moment dû au gradient thermique, v la distance entre la fibre supérieure et le centre de gravité de la section, v' la distance entre la fibre inférieure et le centre de gravité de la section et f_{c28} la résistance en compression du béton de la jupe.

Tableau VI - Calcul du chargement de la précontrainte (P_p)

Tranche	N_i (kN)	M (kN.m)	N_{p1} (kN)	N_{p2} (kN)	N_{p3} (kN)	N_{p4} (kN)	N_{pmin} (kN)	N_{pmax} (kN)	$N_{p \text{ choix}}$ (kN)	r (m)	P_p (kN/ml)
0	-302	5,81	163	441	3913	4191	441	3913	441	4,58	96
1	-302	5,81	163	441	3913	4191	441	3913	441	4,58	96
2	-200	5,81	61	339	3811	4089	339	3811	339	4,72	72
3	-124	5,81	-15	263	3735	4013	263	3735	263	4,87	54
4	-65	5,81	-74	204	3676	3954	204	3676	204	5,02	41
5	-35	5,81	-104	174	3646	3924	174	3646	174	5,16	34

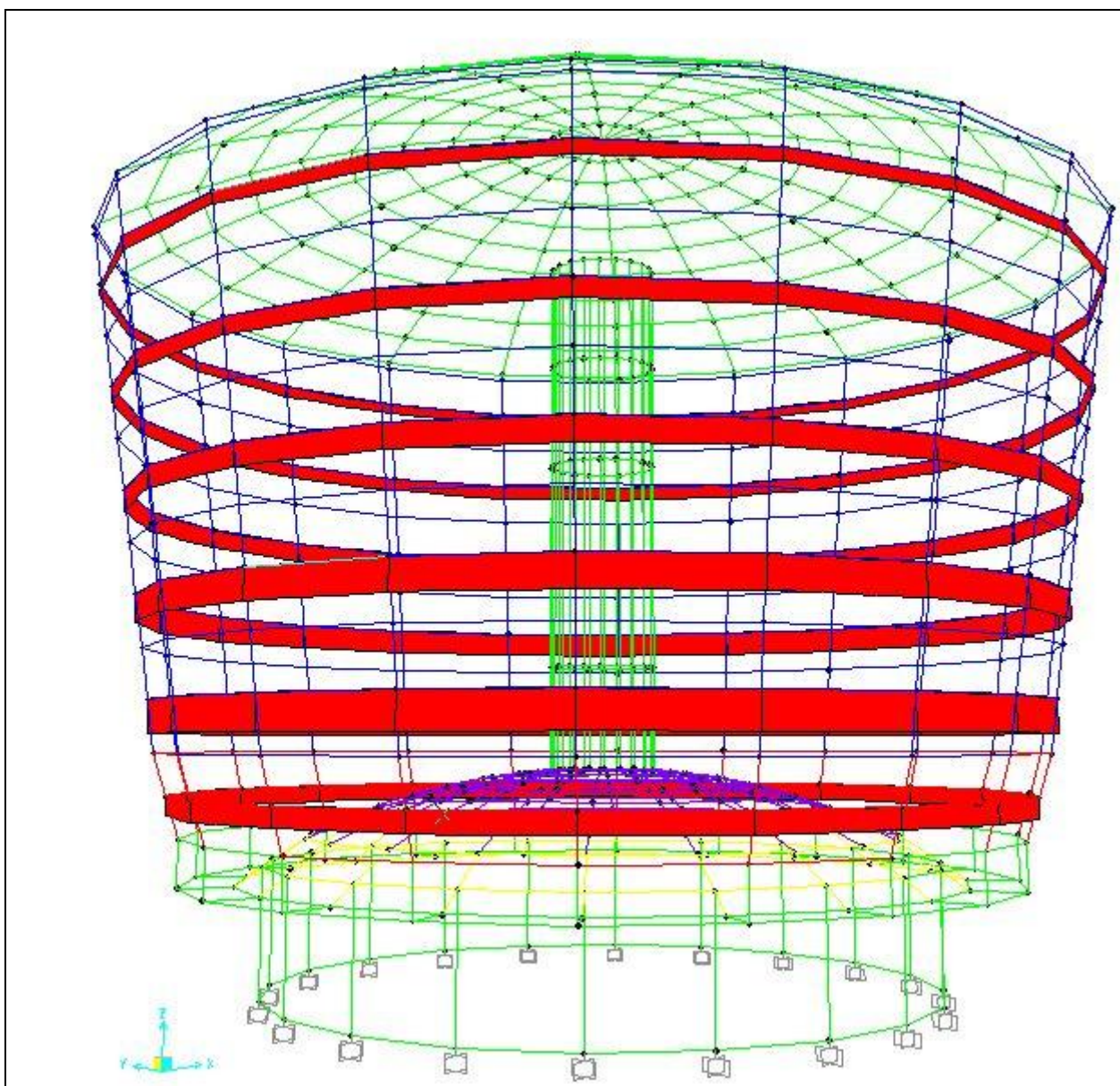


Figure 16 - Visualisation des efforts normaux engendrés par la précontrainte sur la jupe

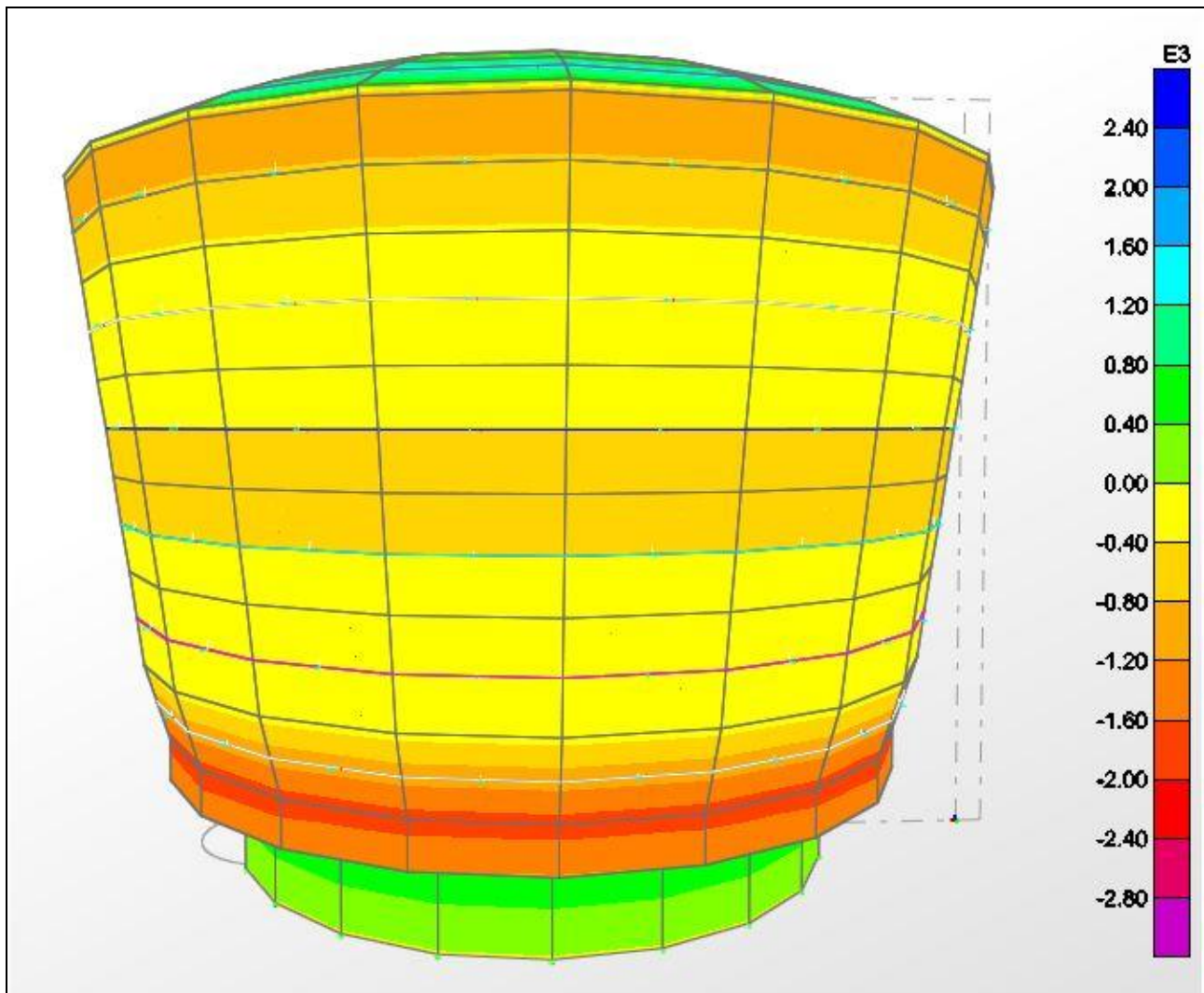


Figure 17 - Visualisation des contraintes engendrés par la précontrainte dans la jupe

Vérification de la contrainte du béton

Le règlement BPEL spécifie la contrainte limite de compression à ne pas dépasser dans le béton pour les réservoirs : $0 < \sigma < 0,6 \times f_{c28}$ soit $0 < \sigma < 15$ MPa

Les contraintes dans la jupe sont comprises entre 0,59 et 1,29 MPa. La jupe est donc vérifiée, et l'application de la précontrainte est possible sur les différentes tranches de la cuve.

X - CONCLUSION

La construction de réservoirs en béton armé a été extrêmement répandue en France au milieu du XX^e siècle. Aujourd'hui la majorité de ces ouvrages est encore en service et n'échappent pas à la loi générale du vieillissement des ouvrages en béton. Ils subissent, des dommages et des dégradations auxquels il importe de remédier bien avant que soit atteint le seuil de non-retour, qui rendrait l'ouvrage impropre à sa destination. Les désordres sont essentiellement structurels, et liés à l'étanchéité. Les facteurs principaux dégradant de la cuve et de son fût proviennent de l'agressivité de l'eau, des techniques de nettoyage et de désinfection des cuves, pour l'intérieur, et de l'exposition en altitude, l'ensoleillement différentiel, les cycles gel/dégel, les intempéries (neige et vent) pour l'extérieur.

Le nombre de désordres pouvant affecter un tel ouvrage est en effet très important. En outre, tirer des conclusions sur le comportement d'un ouvrage à court, moyen et long terme nécessite de maîtriser les données structurelles, environnementales, etc...

Les missions d'inspection et de diagnostic doivent donc clairement s'inscrire dans une démarche permettant de faire un état des lieux de l'ouvrage au regard du cahier des charges initial. Pour répondre de manière optimale à une problématique, il est nécessaire de faire un choix d'investigations et une analyse des désordres judicieux.

Ces missions sont des outils permettant de détecter les « zones d'ombre » des mécanismes de vieillissement des réservoirs. Ils constituent une aide décisionnelle pour le maître d'ouvrage.

Les travaux de réparation et de confortement tiennent compte de l'ensemble des préconisations élaborées à l'issue du diagnostic.

Ces travaux permettent de restaurer la structure, et de la conforter pour un usage prolongé et durable.

XI - REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Revues :

"Béton[s] le Magazine"

__ Les bétons de A à Z

Synthèse de travaux rédigés par des ingénieurs de l'AQC, SMABTP, Cefracor, Cérib, Lerm, LCPC et Sigma Béton - Hors Série 10 – Hiver 2010/2011.

Techniques de l'ingénieur

__ Stockage de l'eau : ouvrages en béton

B. DUCROT, B. FARGEOT, G. MATHIEU - 1998, Vol. CD3, n°C3670-C3673

Règles techniques, manuels pratiques, guides et recommandations :

__ CCTG (Cahier des Clauses Techniques Générales) Fascicule n°74, 1998

Construction des réservoirs en béton.

__ CCTG (Cahier des Clauses Techniques Générales) Fascicule n°65, 2008

Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou précontraint.

__ Règles NV65 (DTU Po6-002) avril 2000

__ Règlement BAEL 91 modifié 99

__ Règlement BPEL 91

Ouvrages de synthèse

__ Pathologie et réparation des ouvrages en béton de stockage et de transport des liquides
Commission constituée de membres de l'Administration, d'Organismes de contrôle, des Fabricants et des Entreprises

__ Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion – AFGC – Novembre 2003

__ La réhabilitation des ouvrages de génie civil de l'eau et de l'environnement – Guide méthodologique

Syndicat du Génie Civil de l'Eau et de l'Environnement – Juin 2008

__ Cours Ossature des bâtiments, Réservoir au sol

P. BODET – Centre des Hautes Etudes de la Construction (CHEC)

__ Cours Château d'eau

Auteur : J.P. BOUTIN, Professeur : P. BODET – Centre des Hautes Etudes de la Construction (CHEC)

Annales ITBTP (Institut technique du bâtiment et des travaux publics)

__ Calcul, réalisation et étanchéité des réservoirs, cuves, bassins, châteaux d'eau enterrés, semi enterrés, aériens, ouverts ou fermés

Annales de l'ITBTP n°486, 1990, page 1 à 72.

Sites Internet :

www.watertowers-of-belgium.net : site belge de présentation des réservoirs sur tour

www.chateau.deau.free.fr : site français de présentation des réservoirs sur tour

www.french-water.com : Union des Industries et Entreprises de l'Eau et de l'Environnement (UIE)

www.gcee.net : site du génie civil de l'eau et de l'environnement

www.eauxdemarseille.fr : site du groupe exploitant d'eau