

LES RÉSERVOIRS D'EAU EN BÉTON EN ALGERIE. DU CONSTAT D'UNE SITUATION À L'EXPRESSION D'UN BESOIN

Karima BOUZELHA, Hocine HAMMOUM, Naceur Eddine HANNACHI

Département de génie civil, Faculté du génie de la construction, Université Mouloud Mammeri,
15000 Tizi Ouzou, Algérie

PRÉAMBULE

Dans un précédent article paru récemment dans les Annales du BTP (n° 5, Nov. 2012), une modélisation physique a été mise en œuvre pour le diagnostic et l'analyse de risques d'un ouvrage de stockage d'eau potable dans le but de vérifier sa stabilité vis-à-vis d'un mécanisme de rupture. Cette modélisation a fourni des résultats d'une bonne précision. Dans cette approche déterministe, les auteurs se sont attachés à vérifier les contraintes développées dans la structure par rapport aux contraintes admissibles du matériau par un recalcul de l'ouvrage, partant de données réelles sur les sollicitations appliquées. Mais il faut noter toutefois que cette approche par modèle physique reste

réservée au diagnostic et à l'analyse approfondie de risques, liée à un mécanisme particulier. Elle ne peut pas être appliquée à l'échelle d'un parc entier et pour l'ensemble des mécanismes de vieillissement.

Dans cet article, les auteurs présentent une méthode par approche experte, à base d'index, permettant une évaluation simplifiée et rapide du risque, qui trouve sa principale application dans la planification de la maintenance. Elle peut être considérée comme une opération de pré-diagnostic qui intervient de façon systématique en amont des études approfondies pour la validation et l'analyse des **modèles physiques** vus précédemment. L'opération de pré-diagnostic des réservoirs a pour objet essentiel de prendre connaissance de l'état général des ouvrages, de

leur niveau de service et de sécurité actuelle et d'établir un premier classement des urgences d'intervention par rapport à des critères de sécurité. Correctement établi, par des experts, elle renseigne d'une manière assez fiable sur l'état général d'une famille d'ouvrages.

CONTEXTE

Dans le domaine du génie civil, les réservoirs sont considérés comme des ouvrages d'art hydrauliques et occupent une place très particulière parmi les constructions. Le comportement mécanique hyperstatique de ces ouvrages et le comportement particulier à l'effet hydrodynamique font d'eux des structures complexes. Si bien que leur calcul et leur construction demandent une spécialisation particulière, que peu de bureaux d'études et d'entreprises peuvent se flatter de posséder tant le niveau de qualification exigé est élevé. Leur implantation obéit à des considérations hydrauliques liées à la pression de service souhaitée, dont la solution est obtenue par un compromis avec les contraintes topographiques. Il s'ensuit que les sites privilégiés pour leur implantation sont des sommets de collines et de monticules, afin d'assurer la charge hydraulique nécessaire. C'est pour cette raison que les réservoirs sont souvent soumis à des conditions particulièrement rudes (exposition aux intempéries, au climat froid ...etc.). Ces ouvrages subissent aussi de fortes variations des surcharges d'exploitation en raison de la variation du niveau de l'eau contenue dans la cuve, de façon souvent quotidienne et pour certains 3 à 4 fois par jour durant toute leur période d'exploitation. On se rend ainsi compte qu'ils sont soumis à un régime sévère, qui justifie le soin particulier apporté à leur conception lors de la phase étude, à leur exécution lors de la phase de réalisation, mais surtout lors de leur longue phase d'exploitation, pour qu'ils puissent assurer leur fonction pendant la durée de vie qui leur a été assignée. Enfin, compte tenu de leur importance sociale, par le rôle qu'ils jouent dans la vie quotidienne du pays, ils sont des ouvrages sensibles à l'opinion publique : la fermeture d'un ouvrage même temporaire, pour une opération d'entretien ou de réparation, entraîne des réactions vives de la part des abonnés, prompts à dénoncer le laxisme, voire la négligence des services publics.

Si bien que le gestionnaire a besoin d'avoir une vision globale et une évaluation continue de l'état du patrimoine de réservoirs qu'il a en charge. L'idée générale est de disposer à tout moment des priorités d'intervention en fonction de l'évaluation des risques auxquels sont exposés les différents réservoirs. Pour cela, le gestionnaire a besoin de se baser sur des éléments fiables lui permettant de prendre des décisions relatives à l'entretien et à la maintenance, voire au renforcement de ses ouvrages.

C'est dans cette optique, que les auteurs ont développé une méthodologie à base d'indices, permettant une évaluation simplifiée et rapide de la vulnérabilité des réservoirs en béton. Cette méthode représente un excellent outil décisionnel au stade de l'expertise entre les mains des gestionnaires, qui auront à décider des solutions à adopter pour la réhabilitation ou la restauration d'un réservoir donné du parc. En dernière partie de l'article, un cas pratique de

réservoir de stockage d'eau potable, analysé avec cette méthode d'évaluation de la vulnérabilité, est présenté.

Le travail présenté dans cet article, à l'instar des précédents articles publiés dans les Annales du Bâtiment et des Travaux Publics (Hammoum et al, 2010 et 2012), s'inscrit clairement dans un environnement pratique de la profession d'expert, par le fait que la contribution a un caractère appliqué.

1. INTRODUCTION

Le vieillissement des réservoirs pose d'énormes problèmes liés à la disponibilité de l'infrastructure, aux exigences de performances de plus en plus sévères, aux gênes des abonnés et enfin à la difficulté de maîtriser les coûts d'entretien. Le gestionnaire de ces réservoirs doit s'assurer que l'ouvrage remplit ses fonctions au meilleur coût, dans le cadre d'exploitation prévu. Avec des moyens financiers limités, le gestionnaire en charge de ce patrimoine vieillissant se pose toujours la question : *par quel réservoir dois-je commencer les actions de maintenance pour à la fois assurer leur bon fonctionnement et optimiser les choix budgétaires ?*

Sauf que le diagnostic et l'expertise de ces réservoirs, présentant des pathologies diverses, sont des tâches complexes qui reposent sur un savoir-faire technique accumulé au fil des décennies. Si bien qu'un ingénieur expérimenté peut dès la première visite connaître l'origine probable du problème, mais pour un autre moins expérimenté la même tâche peut devenir difficile. Le diagnostic reste toujours un exercice dont le niveau de difficulté est très relatif. Devant le même problème exposé, les solutions proposées par les experts ne sont évidemment pas uniques. Chaque expert interprète le problème selon ses propres connaissances, car il n'existe pas de lois, mais une somme de savoir faire. Sans compter que dans certaines situations d'urgence (après un séisme par exemple), la tâche de diagnostic exige en même temps rapidité et efficacité. Face à ces situations exceptionnelles, il y a toujours un manque d'experts, si bien qu'on est amené à faire participer des ingénieurs moins expérimentés au diagnostic.

C'est dans cette optique que nous proposons, à travers notre article, une méthode simple et pratique permettant à un professionnel (technicien ou ingénieur) du génie civil d'évaluer rapidement la présomption de vulnérabilité aux aléas naturels (neige, vent, séisme...) d'un réservoir de stockage, en les guidant dans leur diagnostic. Cet indice de vulnérabilité permet au gestionnaire de fixer les priorités d'intervention dans son programme de réhabilitation ou de réparation. Il peut même être en mesure de décider de la restriction de service ou de la démolition d'un ouvrage.

2. LES RÉSERVOIRS DU PARC

Le parc algérien des réservoirs de stockage d'eau potable est de près de 40 000 unités, majoritairement construites en béton armé, et répartis d'une manière dispersée sur un très grand territoire. Ces réservoirs de stockage sont considérés



Figure 1 : Réservoir circulaire semi enterré en béton armé (Photo Hammoum)

comme des ouvrages d'art d'hydraulique et classés par le règlement parasismique Algérien (RPA 2003) comme étant des ouvrages publics d'intérêt national, ou ayant une importance socioculturelle et économique certaine.

Leur côté esthétique a longtemps été négligé par les ingénieurs et n'a jamais été le souci dominant des maîtres d'ouvrages. On est arrivé d'ailleurs à ce jour à une sorte de standardisation des silhouettes où les réservoirs types sont adaptés d'un site à l'autre en tenant compte uniquement des considérations géotechniques des sols d'implantation. Le souci primordial des maîtres d'ouvrages a toujours été d'ordre fonctionnel. Les modèles adoptés sont d'un aspect esthétique acceptable comme nous le présentons sur la figure 1. Ce n'est que depuis la dernière décennie que les maîtres d'ouvrages ont lancé la réalisation de plus beaux châteaux d'eau à proximité des grandes agglomérations urbaines, en forme de champignon, mais évidemment plus coûteux.

Quant aux formes, il existe dans le parc national des réservoirs de forme cubique et de forme cylindrique, la forme circulaire étant la plus répandue. Les formes de révolution sont en effet plus économiques car à capacité et hauteur de charge identiques, un réservoir cylindrique a une quantité de ferrailage, par mètre cube mis en œuvre, inférieure à celle d'un réservoir parallélépipédique. A la réalisation, certaines configurations et changements de direction des parois entraînent des dispositions constructives difficiles à réaliser, anticipant des pathologies à venir. Les réservoirs en béton précontraint ne figurent pas dans le patrimoine national des réservoirs hydrauliques géré par l'ADE. A notre connaissance, il n'en existe que dans le secteur industriel agroalimentaire. Quant aux réservoirs en maçonnerie, ils ne représentent qu'un très faible pourcentage et les seuls répertoriés remontent à la période coloniale. Ce type de réservoir a été abandonné en faveur des ouvrages en béton, en raison du manque de main d'œuvre artisanale qualifiée dans les ouvrages en maçonneries.

3. DES RÉSERVOIRS DU PARC MAL DOCUMENTÉS

Le gestionnaire tient un fichier par commune du parc de réservoirs qu'il a en charge, lequel comprend des informa-

tions sommaires sur leur état (nom du site, capacité de stockage, type de structure, coordonnées géographiques et quelques observations concernant le bon ou mauvais état de l'ouvrage). Nous présentons, en figure 2, une fiche signalétique type d'un réservoir, elle a été établie par le Bureau Geosystem Consult. Nous constatons bien que ces fichiers ne renseignent pas sur : l'âge de l'ouvrage, l'entreprise réalisatrice, les plans de coffrage et de ferrailage (as built ou de recollement), sur la nature du sol, l'historique des réparations antérieures et enfin les éventuelles incidents survenus durant les années de service. Nous en déduisons qu'il n'y a pas d'archivage complet de la donnée et de l'information, même lorsque les réservoirs sont gérés d'une manière correcte. Une difficulté supplémentaire provient de la dispersion des ouvrages sur un très grand territoire et de l'hétérogénéité du type de structure (réservoir au sol, enterré ou surélevé). Nous retiendrons que le parc des réservoirs apparaît comme mal documenté, voire pas du tout. L'acquisition des données sur l'ensemble du patrimoine est donc complexe et coûteuse du fait de l'hétérogénéité des réservoirs sur un vaste territoire.

4. ANALYSE DU SCHÉMA DE GESTION DU PATRIMOINE DES RÉSERVOIRS

Historiquement en Algérie, les réservoirs de stockage d'eau ont toujours fait partie des missions relevant du domaine de l'hydraulique et leur gestion est restée indissociable de celle de l'alimentation en eau potable et est passée par plusieurs étapes au fil des décennies (Toumi et al. 2004).

La période de 1962 à 1970 est marquée par le maintien de toutes les structures de la période antérieure (coloniale) à 1962. L'exploitation est assurée par les services communaux des eaux dans la majorité des cas. Ce type d'organisation était essentiellement orienté pour répondre à la satisfaction des seuls besoins des grandes agglomérations. Au cours de cette période, on assistera à une dégradation constante des infrastructures hydrauliques en général et des réservoirs de stockage en particulier, en raison essentiellement des difficultés croissantes rencontrées par les collec-

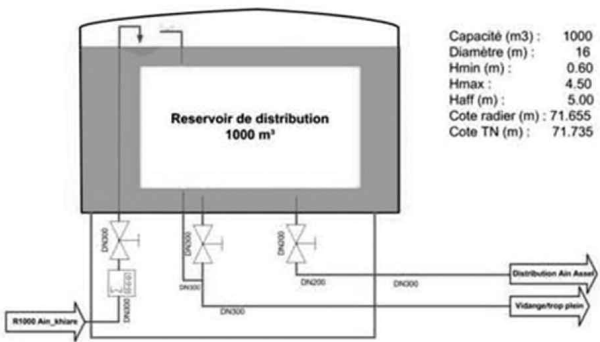

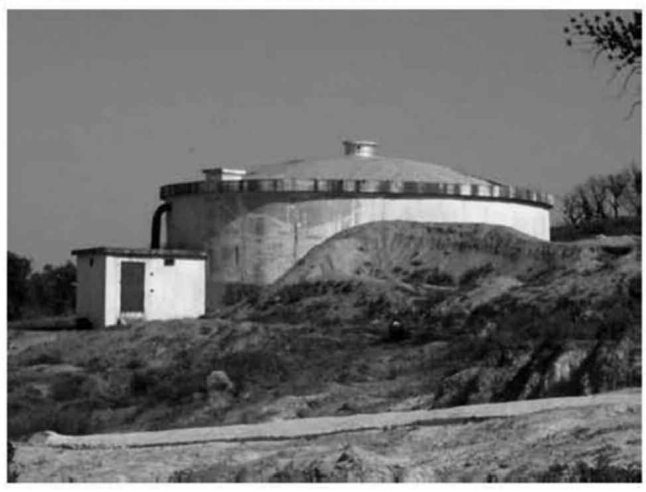

FICHE RESERVOIR			
Pays : ALGERIE	Lieu : AIN LAASSEL	Date de visite : 01/03/2009	
Secteur: EL TAREF	Type : <input style="width: 100px;" type="text"/>	Code: 3606-R1000-ALS	
Localisation: relevé au GPS Géodésique (UTM WGS 1984)	Htn (m) : 71,735	Est : 445 304,912 Nord : 4 071 394,704 Ortho : 71,735	
	Hrad (m) : 71,655		
	Hmin (m) : 0,6		
	Hmax (m) : 4,5		
	Haffl (m) : 5,0		
Capacite(m3): 1000			
Diam (m): 16			
Observation : les armatures sont visibles au niveau de la paroi.			
 <p style="text-align: center;">Réservoir 1000 m3 Ain_laassel</p>			
			

Figure 2 : Fiche signalétique type d'un réservoir (Geosystem Consult, 2010)

tivités locales dans l'exercice de cette mission par manque de moyens. Le 23 novembre 1970, le monopole du service de l'eau potable et par voie de conséquences des réservoirs d'eau sur l'ensemble du territoire fut confié à la SONADE (Société Nationale de Distribution de l'Eau), qui fut chargée de la gestion, de la maintenance et du renouvellement des infrastructures hydrauliques. En 1983, on assista à l'énoncé d'une décision de restructuration de la SONADE et la réintroduction d'une manière ambiguë de la compétence des collectivités locales en matière de service public de l'eau. La gestion du patrimoine hydraulique (canalisations et réservoirs d'eau) est transférée en pleine propriété à la wilaya ou à la commune concernée, par la création d'entreprises locales, en fonction de l'importance de l'infrastructure hydraulique et du parc de réservoirs à gérer. La période de 1987 à 1999 a été notamment marquée par la modification du statut des établissements de l'eau par le passage des entreprises économiques (EPE) aux entreprises publiques industrielles et commerciales EPIC et la création des agences de bassins hydrographiques. Le changement le plus important a été la création le 25 octobre 2000 d'un ministère des ressources puis la création de l'Algérienne des eaux (ADE) le 21 avril 2001, qui est un établissement public national à caractère industriel et commercial. Cet établissement couvre l'ensemble du territoire Algérien, organisé en cinq régions géographiques, 16 zones, 49 unités (MEAT, 1994). L'ADE a en charge entre autres la gestion des infrastructures de génie civil de stockage de l'eau.

Par delà les multiples péripéties enregistrées dans le transfert des compétences de gestion, il importe de souligner que la gestion des ouvrages hydrauliques s'est orientée fondamentalement sur le système d'entreprise étatique. Tous ceci a donné lieu à une déperdition des données et des documents d'archive. Les conséquences sont que les réservoirs sont des ouvrages non documentés et que les données sont insuffi-

santes. Pour déterminer les niveaux de dégradation et de gravité des défaillances, nous sommes donc contraints de faire appel au jugement de l'expert. Nous nous orientons de ce fait vers une méthode d'analyse qualitative de l'état de vulnérabilité des réservoirs. C'est l'objet de la prochaine section.

5. DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE DIAGNOSTIC POUR L'ANALYSE DE LA VULNÉRABILITÉ D'UN RÉSERVOIR

De nombreuses méthodes ont été développées par les gestionnaires de parcs d'ouvrages à partir de diagnostics pour évaluer leur état à des fins d'analyse des risques ou de programmation d'actions de maintenance. Nous citerons principalement l'approche par expertise, l'approche probabiliste, les méthodes de sûreté de fonctionnement et l'approche par modèles physiques. Parmi les méthodes expertes, nous pouvons citer la méthode italienne GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti) utilisée pour évaluer un parc de bâtiments en Italie. Elle a aussi été modifiée et adaptée pour évaluer la vulnérabilité sismique des bâtiments avec ossature en béton au nord du Maroc (Bezzazi et al. 2008). Dans le domaine des réservoirs de stockage, (Mathieu, 2003) le Cemagref d'Aix en Provence a mené des recherches depuis les années 1990 et a proposé des méthodes ayant pour but d'indiquer les ouvrages qui ont un environnement sensible, un caractère stratégique important et ceux qui présentent ou non des désordres structurels visuels de gravité variable. Par ailleurs, (Hammoum, 2012) s'est intéressé à l'évaluation de la vulnérabilité des réservoirs en béton aux aléas naturels

Type d'analyse	N°	Désignation des paramètres
Analyse environnementale	1	Implantation du réservoir
	2	Zone sismique
	3	Type de sol
	4	Zone de la neige
	5	Zone du vent
Analyse structurelle	6	Type de la structure
	7	Type de fondation
	8	Etanchéité des parois
	9	Etanchéité de la couverture
	10	Défauts apparents
Analyse fonctionnelle	11	Rôle de réservoir
	12	Importance du réservoir
	13	Fréquence d'entretien

Tableau 1 : Liste des paramètres d'analyse

(séisme...etc.), par la détermination d'un indice « Iv ». Le calcul de cet indice fait intervenir treize paramètres influents (environnementaux, structuraux et fonctionnels) qui sont résumés dans le tableau 1.

Chacun des treize paramètres correspond à une note élémentaire N_{ei} . Le principe de notation choisi correspond aux critères d'amplification des notes en fonction de l'accroissement des risques de vulnérabilité. Chaque élément de notation est affecté d'un coefficient P_i de pondération. La note élémentaire N_{ei} de chaque paramètre est comprise entre 1 et 4 : 1 correspond à la situation idéale et 4 à la situation critique avec deux notes intermédiaires. Il en est de même des poids de pondération P_i dont les valeurs varient de 1 à 4 : 1 pour une pénalisation minimale du paramètre et 4 pour une pénalisation maximale en considérant des situations intermédiaires.

Une plage d'évaluation plus large obligerait à plus de finesse dans l'analyse, ce qui peut donner lieu à des controverses au sein d'un même groupe d'experts qui aurait à analyser un même défaut ou pathologie. Une analyse sur un nombre important de valeurs pose des difficultés de recoupement des classes qualitatives et engendre une divergence d'analyse entre experts. L'expérience du Cemagref, dans le domaine d'évaluation des dégradations des ouvrages hydrauliques a montré qu'une analyse à 4 valeurs est bien adaptée au diagnostic rapide. C'est pour ces raisons que nous avons adopté cette analyse qualitative sur quatre valeurs.

La note partielle d'un paramètre est obtenue par le produit ($N_{ei} \cdot P_i$) et l'indice de vulnérabilité « Iv » s'exprime comme la somme des notes partielles des différents paramètres selon l'équation (1).

$$Iv = \sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot P_i \quad (1)$$

Pour un critère donné, nous pouvons construire une grille d'évolution de sa note partielle ($N_{ei} \cdot P_i$), en tenant compte de tous les scénarios possibles. Les résultats obtenus sont illustrés sur le tableau 2.

Note élémentaire N_{ei}		1	2	3	4
Pondération P_i	1	1	2	3	4
	2	2	4	6	8
	3	3	6	9	12
	4	4	8	12	16

Tableau 2 : Grille de hiérarchisation d'une note partielle d'un paramètre

En considérant tous les critères d'analyse énumérés précédemment (Tab. 1) au nombre de treize, nous proposons une classification, répartie en quatre niveaux de vulnérabilité :

- Le niveau gris : $13 \leq Iv \leq 49$: L'ouvrage présente un bon comportement aux aléas naturels et ne nécessite pas une attention particulière après sa réalisation et sa mise en service.
- Le niveau gris très claire 1 : $49 \leq Iv \leq 87$: Le réservoir présente une vulnérabilité moyenne aux aléas naturels.
- Le niveau gris claire 2 : $87 \leq Iv \leq 136$: Le réservoir a une vulnérabilité assez élevée aux aléas naturels.
- Le niveau gris foncé : $136 \leq Iv \leq 196$: Le réservoir présente une vulnérabilité élevée aux aléas naturels. Le réservoir doit être mis hors service ou à défaut en situation de restriction d'utilisation, dans des délais courts.

6. ÉTUDE DE CAS

Comme cas pratique, nous choisissons un réservoir de stockage d'eau potable d'une capacité de 2000 m³, qui a fait l'objet d'une expertise en juin 2008 et qui est implanté dans une ville côtière de l'Est de l'Algérie. Ce réservoir circulaire posé au sol a été réalisé en 1987 (Hammoum, 2010).

6.1. Évaluation de la vulnérabilité à la mise en service en 1987

Nous donnons ci-après (Tab. 3) le détail du calcul de l'indice de vulnérabilité simulé au jour de la mise en service, en 1987. La valeur de l'indice de vulnérabilité Iv trouvée classe le réservoir en orange 1. Il présente une vulnérabilité moyenne aux différents aléas naturels.

6.2. Évaluation de la vulnérabilité au jour de l'expertise en juin 2008

Une enquête de terrain a été entreprise en juin 2008 pour se rendre compte de la situation réelle du réservoir et ainsi évaluer son état par rapport à sa vulnérabilité aux aléas naturels, le but étant de fournir une aide à la décision au gestionnaire du parc. Nous avons, à partir des données collectées sur le terrain, évalué les 13 critères d'analyse de la vulnérabilité du réservoir, conformément à la méthode par approche experte exposée à la section 5. Durant notre mission de terrain, nous avons renseigné un dossier d'enquête qui comprend quatre volets principaux : la fiche descriptive de l'ouvrage, la fiche d'évaluation environnementale, la fiche d'évaluation structurelle et enfin la fiche d'évaluation fonctionnelle.

Recensement des défauts apparents

L'inspection visuelle lors de l'expertise a révélé les défauts apparents suivants :

- Epaufrure : Eclatement de la couche d'enrobage laissant ainsi les aciers dénudés à l'air libre sur environ une dizaine

Type d'analyse	Note élémentaire	Nei	Coefficient de pondération	Pi	Nei . Pi
Environnementale	Région côtière	4	Bande nord est	4,00	16,00
	Zone sismique IIa	2	Milieu urbain	4,00	8,00
	Sol meuble, type S3	3	Présence faille en surface	2,00	6,00
	Zone B	3	Toiture en voute	1,00	3,00
	Zone de vent I	2	Ph = 0.75, Pc = 1,00, Pt = 0.75, Ps = 0.75.	3,25	6,50
Structurelle	Réservoir posé au sol	3	Béton arme	3,00	9,00
	Radier	2	Tassement avec arrêt	1,00	2,00
	Classe B	2	Etanchéité satisfaisante	1,00	2,00
	Revêtement par membrane	4	Neuve, pas de désordres visibles, satisfaisante	2,00	8,00
	Niveau 1	1	Réservoir âgé de 1 an	1,00	1,00
Fonctionnelle	Station de pompage	3	Route revêtue	1,00	3,00
	Bâtiments du groupe 1B	3	Capacité 2000 m ³	3,00	9,00
	Semestrielle	3		1,00	3,00
Indice de vulnérabilité Iv					76,50

Tableau 3 : Indice de vulnérabilité au jour de la mise en service en 1987

d'endroits sur la paroi, avec des dimensions allant jusqu'à 15 cm chacun.

– Corrosion des aciers : Nous avons constaté une désintégration des armatures par attaque de l'air marin. Les aciers corrodés ont une longueur supérieure à 20 cm. La pathologie est observée sur environ six endroits de la paroi (Fig. 3).

– Suintement et fissures : Présence d'humidité et percolation de l'eau à travers le béton. Des fissures obliques de longueur supérieure à 1 m sont observées sur la paroi (Fig. 4).

Selon la classification de Mathieu (1996) et au vu des défauts énumérés plus haut, nous déduisons que le réservoir expertisé est classé selon un indice de gravité de niveau 3 (défauts spécifiques de gravité variable nécessitant un suivi et des investigations). Ces défauts traduisent

de façon très nette une modification du comportement de la structure et mettent en cause la durée de vie de l'ouvrage.

Évaluation de l'étanchéité de la couverture

Le complexe d'étanchéité de la couverture (Fig. 5) réalisé au paxalumun est en très mauvais état (complexe détérioré). Nous remarquons que la coupole n'a pas une forme de voûte, il s'agit vraisemblablement d'un problème d'exécution qui remonte à la réalisation.

Évaluation de l'étanchéité des parois

L'étanchéité du réservoir est assurée par un revêtement de type enduit de ciment hydrofugé en couche épaisse supérieure à 2,5 mm. Elle est de classe B selon le Fascicule 74. Le degré de satisfaction de l'étanchéité est médiocre et ceci



Figure 3 : Corrosion des aciers



Figure 4 : Suintement et fissures sur la paroi

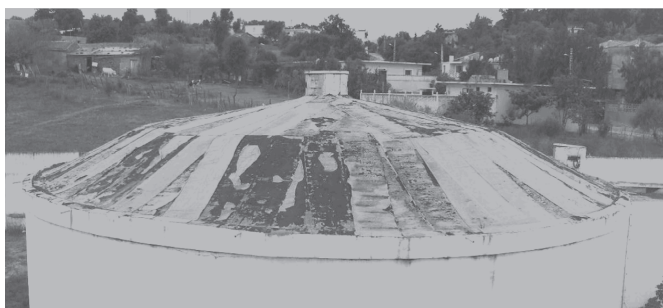


Figure 5 : Complexe d'étanchéité de la coupole

se traduit par la présence de fuites le long d'une longue fissure à la base de la paroi (Fig. 6) et la présence de plusieurs points de fuites et de suintement autour de la paroi.

Calcul de l'indice de vulnérabilité

Nous donnons ci-après le détail du calcul de l'indice de vulnérabilité au jour de l'expertise, avec les paramètres de l'évaluation structurelle ayant subi des pénalisations (Tab. 4). La valeur de l'indice de vulnérabilité obtenue reclasse le réservoir expertisé en orange 2 (vulnérabilité assez élevée).

6.3. Recommandation de réhabilitation et discussion

Pour renforcer le réservoir et éviter tout risque de dégradation, le mode de réparation que nous préconisons consiste à chemiser la paroi extérieure du réservoir. Ce chemisage en béton armé vise à reconstituer la nappe des aciers extérieurs corrodés, suite à l'exposition prolongée à l'air marin.



Figure 6 : Suintement et fuites sur la paroi

L'épaisseur de la couronne de béton (chemisage) nécessaire pour l'enrobage de la nouvelle nappe d'acier est de 10 cm. Les armatures de la nouvelle nappe extérieure doivent reprendre uniquement la moitié de la pression hydrostatique de l'eau, en considérant que l'autre moitié est déjà absorbée par la nappe intérieure qui est demeurée en bon état. Pour les calculs hydrostatiques, la paroi est décomposée en bandes horizontales de 1m. La contrainte de traction agissant à la base de chaque bande sera absorbée par des armatures en forme de cerces (armatures horizontales). Les résultats du calcul hydrostatique (efforts internes de traction et armatures horizontales en forme de cerces) mené sur la couronne en béton armé sont résumés ci-après

Type d'analyse	Note élémentaire	Nei	Coefficient de pondération	Pi	Nei . Pi
Environnementale	Région côtière	4	Bande nord est	4,00	16,00
	Zone IIa moyenne sismicité	2	Milieu urbain	4,00	8,00
	Sol meuble, type S3	3	Présence faille en surface	2,00	6,00
	Zone B	3	Toiture en forme de voute	1,00	3,00
	Zone I	2	Ph = 0.75, Pc = 1,00, Pt = 0.75, Ps = 0.75.	3,25	6,50
Structurelle	Réservoir posé au sol	3	Béton arme	3,00	9,00
	Radier	2	Tassement avec arrêt	1,00	2,00
	Classe B	2	Etanchéité insatisfaisante	4,00	8,00
	Revêtement par membrane	4	Dégradée, insatisfaisante	4,00	16,00
	Niveau 3 (défaut de classe E)	3	Réservoir âgé de 22 ans	3,00	9,00
Fonctionnelle	Station de pompage	3	Route revêtue	1,00	3,00
	Pour bâtiments du groupe 1B	3	Réservoir de capacité 2000 m ³	3,00	9,00
	Semestrielle	3		1,00	3,00
Indice de vulnérabilité I_v					98,50

Tableau 4 : Calcul de l'indice de vulnérabilité au jour de l'inspection en juin 2008

N° de la bande	Profondeur (m)	Pression (Kg/m ²)	Pression moyenne (Kg/m ²)	Effort Tu (Kg/ml)	Effort Ts (Kg/ml)	Ferrailage adopté
Bande I	6,00	3 000,00	2 750,00	40 845,06	27 230,04	1T16, e=14 cm
Bande II	5,00	2 500,00	2 250,00	33 418,68	22 279,12	1T16, e=14 cm
Bande III	4,00	2 000,00	1 750,00	25 992,31	17 328,21	1T14, e=14 cm
Bande IV	3,00	1 500,00	1 250,00	18 565,93	12 377,29	1T12, e=14 cm
Bande V	2,00	1 000,00	750,00	11 139,56	7 426,37	1T10, e=14 cm
Bande VI	1,00	500,00	250,00	3 713,19	2 475,46	1T10, e=14 cm

Tableau 5 : Pression hydrostatique à la base de chaque bande horizontale de la paroi

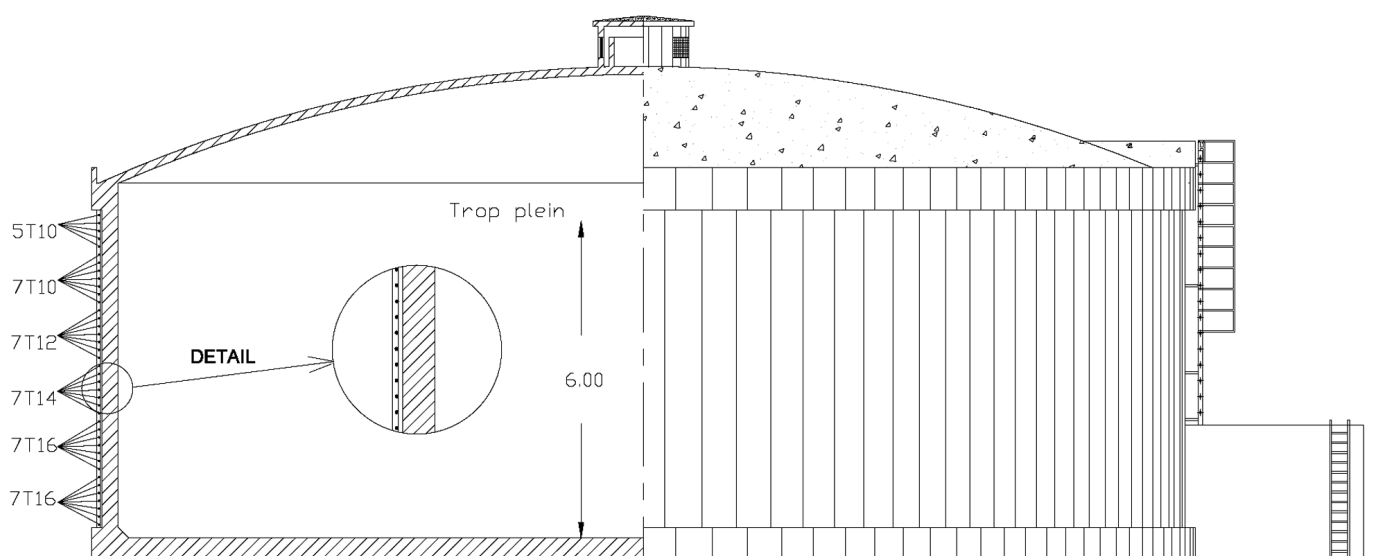


Figure 7 : Plan d'exécution du chemisage

(Tab. 5). Le plan d'exécution de l'opération de renforcement adopté pour notre réservoir est donné en Figure 7.

La valeur de l'indice de vulnérabilité a été recalculée après réhabilitation (Tab. 6), ce qui reclasse le réservoir expertisé en orange 1. Il présente après cette opération, une vulnérabilité moyenne aux différents aléas naturels.

La détermination de l'indice de vulnérabilité dans le cycle de vie du réservoir montre, à travers l'expertise du réservoir étudié, qu'au delà d'un certain degré de dégradation les conséquences sur le comportement de la structure ne sont plus négligeables. Les travaux de réparation ou de réhabilitation permettent de faire gagner de la performance à l'ouvrage, mais ne le remettent plus à sa performance initiale et originale comme nous pouvons le voir sur la figure 8.

7. CONCLUSION

Notre étude a consisté à proposer une méthode pour évaluer la vulnérabilité des réservoirs, afin d'améliorer leur gestion patrimoniale. La méthodologie à base d'indice, présentée dans cet article, permet une évaluation simplifiée

et rapide de la vulnérabilité des réservoirs en béton. Elle présente ainsi un excellent outil décisionnel au stade préliminaire de l'expertise entre les mains des ingénieurs experts, qui auront à décider des solutions à adopter pour la réhabilitation ou restauration de l'ouvrage.

Entre les mains des gestionnaires, elle permet de fixer les priorités d'intervention dans les programmes de réhabilitation ou de réparation. Ils sont même ainsi en mesure de décider de la restriction de service ou de la démolition. Par ailleurs, entre les mains des ingénieurs de bureau d'études, la méthode peut être utilisée en amont au stade de conception de l'ouvrage. L'indice de vulnérabilité peut à ce moment là prédire la politique de gestion du réservoir durant son exploitation et la fréquence de surveillance de l'ouvrage. Autrement dit, elle nous renseigne sur l'attention à accorder à l'ouvrage.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à présenter leurs remerciements à Geosystem Consult pour la documentation mise à leur disposition.

Type d'analyse	Note élémentaire	Nei	Coefficient de pondération	Pi	Nei . Pi
Environnementale	Région côtière	4	Bande nord est	4,00	16,00
	Zone sismique IIa	2	Milieu urbain	4,00	8,00
	Sol meuble, type S3	3	Présence faille en surface	2,00	6,00
	Zone B	3	Toiture en forme de voute	1,00	3,00
	Zone de vent N° I	2	Ph = 0.75, Pc = 1,00, Pt = 0.75, Ps = 0.75.	3,25	6,50
Structurelle	Réservoir posé au sol	3	Béton arme	3,00	9,00
	Radier	2	Tassement avec arrêt	1,00	2,00
	Classe B	2	Assez satisfaisante	2,00	4,00
	Revêtement par membrane	4	Assez satisfaisante	2,00	8,00
	Niveau 2	2	Réservoir âgé de 22 ans	3,00	6,00
Fonctionnelle	Station de pompage	3	Route revêtue	1,00	3,00
	Pour bâtiments du groupe 1B	3	Réservoir de capacité 2000 m ³	3,00	9,00
	Semestrielle	3	Entretien tous 1 fois/an	1,00	3,00
Indice de vulnérabilité Iv					83,50

Tableau 6 : Calcul de l'indice de vulnérabilité après réhabilitation du réservoir

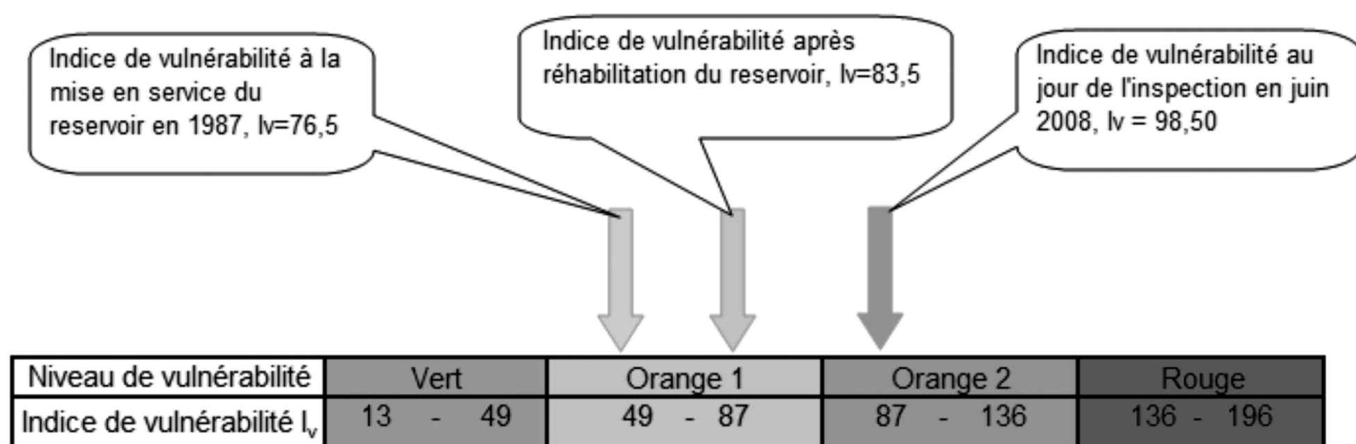


Figure 8 : Evolution de l'indice de vulnérabilité dans le cycle de vie du réservoir

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bezzazi M., Khamlichi A., Gonzalez J.R.A. (2008) - Vulnérabilité sismique des constructions de type béton armé aux Nord du Maroc, Revue Canadienne de Génie Civil, volume 35.
- DTR B-C 2-48. (2003) - Règles parasismiques algériennes – RPA 99/2003, CGS, Alger.
- Fascicule 74, texte officiel (1998) - Construction des réservoirs en béton - cahier des clauses techniques générales, Ministère de l'équipement des transports et du logement, Paris.
- Geosystem Consult – SEATA. (2010) - Diagnostic des ouvrages hydrauliques des wilayates Annaba, El Tarf, Rapport interne.
- Hammoum H., Bouzelha K., Hannachi N.E., Serre D. (2012) - Vulnerability assessment of the concrete tanks storage at natural hazards, in : M. Grantham, V. Mechtcherine, U. Schneck (Eds.), Concrete solutions, Ed. Taylor and Francis Group CRC Press, London, United Kingdom,
- H. Hammoum, K. Bouzelha, N.E. Hannachi. (2012) - Analyse d'un scenario de vieillissement de deux réservoirs jumelés par un calcul aux états limites, Annales du BTP, Ed. Eska, N° 5.

- Hammoum H., Bouzelha K. Abdesslem M. (2010) - Expertise d'un réservoir de capacité 2000 m³ à Jijel par la détermination de l'indice de vulnérabilité, in : M. Karama, A. Menou, A. Moudden, A. El hami (Eds.), International Symposium of Aircraft Materials ACMA 2010, Marrakech, Morocco, pp 18.
- H. Hammoum, K. Bouzelha, N.E. Hannachi. (2010) - Analyse hydrodynamique d'un réservoir circulaire en béton arme, posé au sol, Annales du BTP, Ed. Eska, N° 2-3.
- Mathieu G. (2003) - Méthodologie d'évaluation des ouvrages hydrauliques en béton appliquée un patrimoine. Annales du BTP, N° 5-6.
- Mathieu G. (1996) - Pathologie et réparation des ouvrages en béton de stockage et de transport des liquides, Annales du BTP, Numéro Spécial.
- Ministère de l'équipement et de l'aménagement du territoire (MEAT). (1994) - Historique relatif aux aspects juridiques et institutionnel, assises régionales de l'eau. Tizi Ouzou, Algérie.
- Toumi A., Chocat B. (2004) - L'assainissement en Algérie : Problématique, La Houille Blanche, N° 6.