

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU

FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Thèse présentée par :

**Hocine HAMMOUM**

Ingénieur d'état en génie civil de l'UMMTO, option « constructions hydrauliques et aménagements »  
Magister en génie civil de l'UMMTO, option « structures et matériaux »  
Maitre assistant classe « A » à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou

**Pour obtenir le grade de Docteur en Sciences**

**Spécialité : Génie Civil**

**THEME**

**DIAGNOSTIC ET ANALYSE DE RISQUES LIES AU  
VIEILLISSEMENT DES RESERVOIRS EN BETON ARME.  
DEVELOPPEMENT DE METHODES D'AIDE A L'EXPERTISE**

Soutenue publiquement le **lundi 16 avril 2012** devant le jury composé de :

<b>BAHAR</b> Professeur à l'Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene d'Alger	<b>Ramdane</b>	<b>Président</b>
<b>BOUZELHA</b> Maitre de conférences « A » à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou	<b>Karima</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>KACI</b> Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou	<b>Salah</b>	<b>Examineur</b>
<b>AMIRI</b> Maitre de conférences (HDR) à l'Université de La Rochelle (France)	<b>Ouali</b>	<b>Examineur</b>
<b>BENAMAR</b> Maitre de conférences à l'Université du Havre (France)	<b>Ahmed</b>	<b>Examineur</b>
<b>ELACHACHI</b> Maitre de conférences à l'Université de Bordeaux I (France)	<b>Sidi Mohammed</b>	<b>Examineur</b>
<b>HANNACHI</b> Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou	<b>Nacer Edinne</b>	<b>Invité</b>

# Remerciements

---

Je remercie madame **HAMMOUM née Karima BOUZELHA**, Maitre de conférences au département de génie civil de l'UMMTO, pour avoir bien voulu diriger cette thèse.

Un grand merci à Mr **Nacer Eddine HANNACHI**, Professeur au département de génie civil de l'UMMTO, pour ses encouragements, sans lesquels cette thèse n'aurait pas vu le jour.

J'exprime ma profonde gratitude à Mr **Ouali AMIRI**, Maitre de conférences (HDR) au département de génie civil de l'université de La Rochelle (France) pour ses encouragements et l'aide qu'il n'a cessé de m'apporter tout au long de l'élaboration de cette thèse.

Que Mr **Jean Pierre LABORDE**, Professeur à l'institut d'hydraulique de l'université de Nice (France), trouve ici mes remerciements, pour m'avoir reçu dans son département.

Que Mr **André LEJEUNE**, Professeur à l'institut de génie civil de l'université de Liège (Belgique), trouve ici mes remerciements, pour m'avoir reçu dans son département.

Que Mr **Ahmed BENAMAR**, Maitre de conférences au département de génie civil de l'université du Havre (France), trouve ici mes remerciements, pour m'avoir reçu dans son département.

Mes remerciements vont à Mr **Patrice MERIAUX**, chercheur au Cemagref, pour m'avoir reçu au Cemagref d'Aix en Provence (France) et avoir mis à ma disposition une riche documentation.

Je tiens à présenter mes remerciements au Docteur **Damien SERRE**, enseignant à l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris pour avoir mis à ma disposition une copie de sa thèse lors de mon passage à l'EIVP.

Je profite aussi pour remercier **Mr Gerard MATHIEU**, ancien chercheur au Cemagref (Aix en Provence, France) et animateur du groupe de travail du fascicule 74, pour avoir bien voulu relire la version initiale de cette thèse et m'avoir formulé ses remarques pertinentes.

Je n'oublierai pas de remercier Mr **Madjid TALI**, directeur d'exploitation à l'Algérienne des eaux pour les données qu'il a mises à ma disposition.

Qu'il me soit permis de remercier mon ami **Antoine ZOREIK**, ingénieur expert (Institut Polytechnique de Lorraine, France) consultant à African Geosystem Company, pour m'avoir initié au logiciel Access<sup>®</sup> et accompagné dans la réalisation de la base de données, malgré son planning très chargé.

Qu'il me soit permis de remercier le Mr **Boualem AISSANI**, Docteur ingénieur de l'université de Nancy et gérant de la SARL Geosystem Consult d'Alger qui m'a fait l'honneur de relire le dernier chapitre consacré à l'application SIG Réservoir.

Merci à Mr **Mouloud TOUAT**, Master of sciences de l'institut d'Hydraulique d'Odessa (ex. URSS) et gérant de la SARL African Geosystem Company pour avoir bien voulu financer ma formation sur les bases de données (Acces).

Merci à messieurs, **Ramdane BAHAR**, Professeur au département de génie civil de l'USTHB, **Salah KACI**, Professeur au département de génie civil de l'UMMTO et **Sidi Mohammed ELACHACHI**, Maitre de conférences à l'université de Bordeaux I, qui me font l'honneur d'évaluer ce travail de recherche.

Ma dernière pensée va tous naturellement à mes enfants, ma famille et mes proches, avec une pensée particulière à ma tante.

# Sommaire

---

Remerciements.....	2
Sommaire.....	3
Résumé	8
Abstract	9
Notations	10
Introduction générale .....	11
1. Chapitre 1 : Du constat d'une situation à l'expression d'un besoin .....	15
1.1. Introduction .....	16
1.2. Les réservoirs du parc national gérés par l'A.D.E .....	16
1.3. Gestion du patrimoine des réservoirs en Algérie.....	18
1.3.1. Au lendemain de l'indépendance : de 1962 à 1970 .....	18
1.3.2. Période de 1970 à 1983 .....	18
1.3.3. Période de 1983 à 1987 .....	18
1.3.4. Période de 1987 à 1999 .....	18
1.3.5. Période de 2000 à ce jour.....	18
1.4. Analyse du schéma de gestion du patrimoine des réservoirs.....	19
1.5. Les réservoirs du parc mal documentés .....	19
1.6. Le gestionnaire face aux réservoirs vieillissants.....	21
1.7. Les codes de calcul face aux réservoirs.....	21
1.8. Les pathologies rencontrées sur le parc Algérien de réservoirs .....	22
1.8.1. Aciers dénudés.....	23
1.8.2. Couverture dégradée.....	24
1.8.3. Corrosion des aciers.....	25
1.8.4. Corrosion de pièces métalliques .....	25
1.8.5. Défaut de disposition d'évacuation des eaux .....	26
1.8.6. Déformations .....	27
1.8.7. Ecaillage .....	27
1.8.8. Ségrégation .....	28
1.8.9. Qualité du béton des réservoirs du parc Algérien .....	28
1.8.10. Présence de végétation.....	30
1.8.11. Suintement.....	31
1.8.12. Efflorescence .....	31
1.8.13. Fissures .....	32
1.8.14. Défaut d'enrobage des armatures.....	33
1.8.15. Gonflement .....	33
1.8.16. Proportions et analyse des défauts dans le parc Algérien .....	34
1.9. Conclusion .....	36
2. Chapitre 2 : Synthèse bibliographique.....	38
2.1. Introduction .....	39
2.2. Approche par des modèles physiques .....	39
2.2.1. Modèle d'analyse de la stabilité selon la méthode d'Housner (états-limites).....	39
2.2.2. Les Modèles d'analyse du comportement.....	40
2.3. Approche par expertise.....	41
2.3.1. Etude du Cemagref .....	41
2.3.2. Méthode GNDT .....	43
2.3.3. Etude de Belhouene .....	44
2.3.4. Méthodes de l'indice de vulnérabilité sismique utilisées en Algérie .....	45
2.4. Approche statistique .....	46
2.5. La modélisation fonctionnelle par la sûreté de fonctionnement .....	47
2.5.1. Analyse Préliminaire des Risques / des Dangers (APR / APD).....	47
2.5.2. Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE) et de leur Criticité (AMDEC)	

2.5.3.	Méthode d'analyse Hazop .....	50
2.5.4.	What – If ?.....	52
2.5.5.	Arbre des défaillances (ADD) ou bien Arbre des Causes (MAC) .....	52
2.5.6.	Arbre des événements (ADE) .....	54
2.5.7.	Nœud papillon ou la méthode du diagramme causes conséquences.....	56
2.5.8.	Méthode du diagramme de Succès (MDS).....	58
2.5.9.	Méthode de Table de Vérité (MTV) .....	58
2.5.10.	Méthode des combinaisons de pannes résumées (MCPR) .....	59
2.6.	Quelques études d'analyse de sureté de fonctionnement dans le génie civil.....	59
2.6.1.	Travaux de L. Peyras.....	59
2.6.2.	Travaux de D. Serre .....	60
2.6.3.	Travaux de J. Boero et al.....	61
2.7.	Conclusion .....	62
3.	Chapitre 3 : Analyse d'une pathologie par une méthode physique.....	64
3.1.	Introduction .....	65
3.2.	Position du problème.....	65
3.3.	Méthode de calcul.....	67
3.3.1.	Calcul des actions d'impulsion.....	67
3.3.2.	Calcul de l'accélération $a_m$ .....	67
□	Coefficient d'accélération de zone « A » .....	68
□	Facteur de correction d'amortissement .....	68
□	Coefficient de comportement.....	68
□	Facteur de qualité .....	68
□	Périodes caractéristiques .....	69
□	Calcul de la période fondamentale T du réservoir.....	69
3.3.3.	Calcul des actions d'oscillation .....	69
3.3.4.	Calcul des moments de flexion.....	70
□	Action d'impulsion.....	70
□	Action d'oscillation .....	70
3.3.5.	Calcul des moments de renversement.....	70
□	Action d'impulsion.....	70
□	Action d'oscillation .....	70
3.3.6.	Etat limite ultime de stabilité .....	71
3.3.7.	Etat limite de service de niveau de fonctionnement minimal.....	71
3.4.	Calcul des contraintes verticales dans la paroi .....	71
3.5.	Etude de cas.....	72
3.5.1.	Calcul de la période fondamentale T.....	73
3.5.2.	Calcul de l'accélération $a_m$ .....	73
3.5.3.	Calcul de la résultante des pressions d'impulsion $P_i$ .....	73
3.5.4.	Calcul de la résultante des pressions d'oscillation $P_o$ .....	73
3.5.5.	Calcul du moment de flexion d'impulsion $M_{fi}$ .....	73
3.5.6.	Calcul du moment de flexion d'oscillation $M_{fo}$ .....	73
3.5.7.	Calcul du moment de renversement d'impulsion $M_{ri}$ .....	73
3.5.8.	Calcul du moment de renversement d'oscillation $M_{ro}$ .....	74
3.5.9.	Etat limite ultime de stabilité .....	74
3.5.10.	Etat limite de service de niveau de fonctionnement minimal.....	74
3.5.11.	Contraintes horizontales dans la paroi du réservoir .....	74
3.5.12.	Les contraintes verticales dans la paroi du réservoir .....	75
3.6.	Conséquences de l'effet hydrodynamique .....	75
3.7.	Organigramme de calcul .....	78
3.8.	Conclusion .....	79
4.	Chapitre 4 : Evaluation de la vulnérabilité des réservoirs en béton vis-à-vis des aléas naturels, par une approche par expertise.....	80
4.1.	Introduction .....	81
4.2.	Approche par expertise.....	81
4.3.	Evaluation de la vulnérabilité d'un réservoir .....	82
4.4.	Evaluation environnementale .....	83

4.4.1.	Implantation de l'ouvrage.....	83
4.4.2.	Zone sismique .....	84
4.4.3.	Type de sol .....	85
4.4.4.	Zone de la neige .....	85
4.4.5.	Action du vent .....	86
<input type="checkbox"/>	Hauteur du réservoir .....	86
<input type="checkbox"/>	Catégorie de terrain .....	86
<input type="checkbox"/>	Facteur topographique .....	87
<input type="checkbox"/>	Etat de la surface du réservoir.....	87
4.5.	Evaluation structurelle.....	87
4.5.1.	Type de structure.....	87
4.5.2.	Type de fondation .....	88
4.5.3.	Etanchéité des parois .....	88
4.5.4.	Etanchéité de la couverture .....	89
4.5.5.	Défauts apparents .....	89
4.6.	Evaluation fonctionnelle.....	90
4.6.1.	Rôle du réservoir .....	90
4.6.2.	Importance du réservoir.....	91
4.6.3.	Fréquence d'entretien.....	92
4.7.	Classification.....	92
4.8.	Etude de cas.....	93
4.8.1.	Présentation du réservoir.....	93
4.8.2.	Evaluation de la vulnérabilité du réservoir à la mise en service en 1987.....	93
4.8.3.	Evaluation de la vulnérabilité en cours d'exploitation (juin 2008) .....	94
<input type="checkbox"/>	Défauts apparents .....	94
<input type="checkbox"/>	Etanchéité de la couverture .....	95
<input type="checkbox"/>	Etanchéité des parois .....	96
<input type="checkbox"/>	Détermination de l'indice de vulnérabilité .....	96
4.8.4.	Recommandation de réhabilitation et discussion .....	97
4.8.5.	Pression hydrostatique sur chaque bande horizontale de la paroi .....	97
4.8.6.	Armatures de chaque bande horizontale de la paroi.....	98
<input type="checkbox"/>	A l'état limite ultime .....	98
<input type="checkbox"/>	A l'état limite de service .....	99
<input type="checkbox"/>	Condition de fragilité .....	99
4.8.7.	Plans d'exécution de la réhabilitation .....	99
4.9.	Conclusion .....	101
5.	Chapitre 5 : Evaluation de la criticité des réservoirs par la méthode de sureté de fonctionnement.....	102
5.1.	Introduction .....	103
5.2.	Les scénarios de vieillissement .....	103
5.2.1.	Scénario 1 : Déformation du sol de fondation .....	103
<input type="checkbox"/>	Le tassement .....	103
<input type="checkbox"/>	Liquéfaction des sols .....	104
<input type="checkbox"/>	Affouillement du sol de fondation.....	105
5.2.2.	Scénario 2 : Alkali-réaction .....	105
5.2.3.	Scénario 3 : Corrosion des aciers.....	107
5.2.4.	Scénario 4 : Dégradation des composants par réactions avec le milieu (vent, gel, neige).....	108
5.2.5.	Scénario 5 : Dégradation des enduits étanches.....	109
5.2.6.	Scénario 6 : Dégradation du revêtement d'étanchéité de couverture .....	110
5.2.7.	Scénario 7 : Faiblesse du réservoir vis-à-vis de l'effet hydrodynamique .....	111
<input type="checkbox"/>	Etat limite de service : Deux états doivent être satisfaits.....	111
<input type="checkbox"/>	Etat limite ultime de stabilité .....	111
5.3.	Analyse fonctionnelle des réservoirs .....	113
5.3.1.	Analyse fonctionnelle externe.....	113
<input type="checkbox"/>	Définition du système .....	113
<input type="checkbox"/>	Position dans le cycle de vie.....	113
<input type="checkbox"/>	Détermination des milieux extérieurs en interaction avec le système.....	114

□	Les fonctions principales et de contrainte du système global .....	114
5.3.2.	Analyse fonctionnelle interne.....	116
□	Analyse structurelle.....	116
□	Les Blocs diagrammes Fonctionnels des réservoirs.....	117
	Blocs diagrammes Fonctionnels définissant les relations de contact.....	117
	Blocs diagrammes Fonctionnels définissant les relations de flux de charges.....	117
	Blocs diagrammes Fonctionnels définissant les relations de flux hydrauliques .....	117
5.3.3.	Les tableaux d'analyse fonctionnelle.....	121
	Fonctions liées à des contacts.....	121
	Fonctions liées aux flux de charges.....	121
	Fonctions liées à des flux hydrauliques .....	121
5.4.	Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) .....	122
5.4.1.	Applications de l'AMDE dans l'industrie .....	122
5.4.2.	Applications de l'AMDE dans le génie civil.....	122
5.4.3.	Démarche générale de l'AMDE.....	123
5.4.4.	AMDE Processus .....	123
5.4.5.	AMDE Produit.....	125
5.4.6.	Représentation des scénarios de vieillissement sous forme de graphe causal.....	127
5.5.	Modélisation des mécanismes de vieillissement des réservoirs.....	129
5.5.1.	Classification des fonctions .....	129
5.5.2.	Classification des phénomènes.....	130
5.5.3.	Classification des symptômes .....	131
5.5.4.	Les scénarios de vieillissement .....	131
5.6.	Analyse de la criticité .....	132
5.6.1.	Concept de la criticité.....	132
5.6.2.	Proposition pour l'analyse de la criticité.....	132
5.6.3.	Analyse qualitative des dégradations .....	133
5.6.4.	Analyse de l'évolution de la gravité à l'échelle du composant .....	134
5.6.5.	Analyse qualitative de la gravité de la dégradation globale d'un réservoir.....	135
5.6.6.	Analyse de la criticité à l'échelle du composant .....	136
□	Mesure de l'occurrence de l'augmentation de la gravité de dégradation d'une fonction.....	136
□	Mesure des conséquences de la dégradation de la fonction .....	137
□	Analyse qualitative de la criticité .....	137
□	Définition des classes de criticité .....	137
5.6.7.	Analyse de la criticité globale d'un réservoir.....	138
5.7.	Etude de cas.....	140
5.7.1.	Présentation du réservoir.....	140
5.7.2.	Identification des scénarios de vieillissement recensés au niveau du réservoir expertisé.....	140
□	Scénario 3 : Corrosion des aciers.....	140
□	Scénario 4 : Dégradation des composants par réactions avec le milieu (vent, gel, neige).....	140
□	Scénario 5 : Dégradation des enduits étanches.....	140
□	Scénario 6 : Dégradation des revêtements d'étanchéité .....	140
□	Scénario 7 : Faiblesse du réservoir vis-à-vis de l'effet hydrodynamique .....	140
5.7.3.	Mise en œuvre de la méthode AMDEC .....	142
5.7.4.	Représentation des scénarios de vieillissement sous forme de graphe causal.....	144
5.7.5.	Liste de fonctions critiques.....	145
5.7.6.	Propositions d'actions correctives .....	147
5.7.7.	Synthèse de l'étude de cas .....	148
5.8.	Conclusion .....	149
6.	Chapitre 6 : Développement d'une application de gestion spatiale des ouvrages d'un parc	
	150	
6.1.	Introduction .....	151
6.2.	L'outil d'aide à la décision .....	151
6.3.	Les composants de l'application.....	152
6.3.1.	Le logiciel de la base de données « Microsoft Access ».....	152
6.3.2.	Le logiciel du SIG « Mapinfo Professional©» .....	153
6.4.	Architecture informatique de l'application.....	153

6.5.	Structure de la base de données sous Acces© .....	154
6.5.1.	La table « Fiche d'identification » .....	154
6.5.2.	La table « Fiche d'analyse environnementale» .....	155
6.5.3.	La table « Fiche d'analyse structurelle» .....	156
6.5.4.	La table « Fiche d'analyse fonctionnelle » .....	157
6.5.5.	Les relations entre les tables .....	158
6.5.6.	La requête « calcul de l'indice de vulnérabilité Iv» .....	158
6.5.7.	Les formulaires .....	159
6.6.	Le système de projection utilisé.....	160
6.7.	Validation de l'application sur un parc de réservoirs .....	161
6.7.1.	Objectif de l'étude de terrain .....	161
6.7.2.	Présentation du parc de réservoirs.....	161
6.7.3.	La collecte des données sur le terrain.....	163
6.7.4.	La saisie des données de terrain.....	163
6.7.5.	Analyse thématique .....	163
6.7.6.	Résultats et interprétation.....	166
6.8.	Conclusion .....	166
	Conclusion générale .....	168
	Références bibliographiques .....	172
	Annexe 1 : AMDE Process .....	177
	Annexe 2 : AMDE Produit.....	184
	Annexe 3 : Tableau d'analyse fonctionnelle .....	195

# Résumé

---

La **SONADE** (**SO**ciété **NA**tionale de **D**istribution d'**E**au potable), appelée actuellement **Algérienne Des Eaux (A.D.E.)**, a hérité d'un important patrimoine de réservoirs d'eau potable de l'administration coloniale. Par la suite, l'administration centrale par le biais des Directions de l'Hydraulique de Wilaya (**DHW**) a exécuté un ambitieux programme de réalisation d'ouvrages de stockage dans le cadre du développement local et sectoriel qui se poursuit jusqu'à aujourd'hui. Actuellement, ce patrimoine n'est plus jeune et l'âge moyen des réservoirs du parc Algérien est d'environ quarante ans.

Par ailleurs, une phase de diagnostic et d'expertise s'est ouverte vers la fin des années 1990, visant à entreprendre des réparations et réhabilitations de ces ouvrages. Cette opération est en cours sur la majeure partie du territoire.

Mon passage de près d'une décennie (1990 à 1999) dans le secteur de l'hydraulique a fait de moi un témoin privilégié de cette phase charnière de diagnostic où il a été beaucoup question de faire le point sur l'état du vieillissement des réservoirs du parc national. Ma qualité d'ingénieur civil dans le domaine de l'hydraulique, durant cette période, m'a permis d'être confronté très tôt aux lacunes du **RPA** qui n'aborde pas les ouvrages hydrauliques en général et les réservoirs en particulier. Ces lacunes se traduisent plus tard, en phase d'exploitation, par des pathologies très répandues sur le parc Algérien et ce en l'absence de toute méthodologie et/ou démarche fiable de diagnostic et d'expertise de ces ouvrages.

Cette thèse s'inscrit clairement dans un environnement pratique de la profession puisqu'elle vient combler les lacunes et insuffisances citées plus haut. Elle a un caractère applicatif de par les propositions très pratiques qu'elle suggère. Elle s'inscrit aussi, dans une démarche de développement durable par le fait qu'elle essaie d'apporter des solutions et méthodes pour identifier les réservoirs vulnérables en vue de rallonger leur vie.

La première méthode proposée est le modèle physique inspiré du modèle hydrodynamique de **Housner** auquel nous avons adapté le spectre de réponse du **RPA**. Nous proposons dans la foulée une relation pour le calcul de la période fondamentale d'un réservoir tenant compte de sa rigidité flexionnelle.

La seconde méthode développée est une méthode par **expertise** qui vise à faire un pré-diagnostic d'un réservoir par une analyse multicritères, inspirée des travaux du Cemagref.

La dernière méthode proposée dite de sureté de fonctionnement appelée **AMDEC** est empruntée au domaine de l'industrie (nucléaire, aéronautique ...) que nous adaptons au génie civil.

Enfin une application informatique basée sur la méthode de l'indice de vulnérabilité est développée. Couplée à un **SIG**, cette application est un puissant outil d'aide à la décision entre les mains de gestionnaires. Deux parcs de réservoirs ont été expertisés afin de tester cette application informatique.

**Mots clés** : *réservoirs en béton armé, expertise, vulnérabilité, vieillissement, AMDE, criticité, SIG.*

# Abstract

---

The **SONADE** (**SO**ciété **NA**tionale de **D**istribution d'**E**au potable), actually called **Algérienne Des Eaux** (A.D.E.), has inherited an important heritage of drinking water tank storage of the colonial administration. Subsequently, the central government through the Department of Hydraulics of Wilaya (**DHW**) has executed an ambitious program for building storage tanks in the local development sector, which continues until today. Currently, this heritage is not young and the average age of the Algerian tanks park is approximately forty years old.

A diagnostic phase and expertise has opened in the late 1990s, to undertake repairs and rehabilitation of these structures. This operation is in progress on most of the territory.

My passage nearly a decade (from 1990 to 1999) in the hydraulic sector has made me a privileged witness of this pivotal phase of diagnosis when it was much talk of an update on the status of aging national park tanks. My position as a civil engineer in the field of hydraulic, during this period, allowed me to be confronted early on the deficiencies of the Algerian Sismic Code (**RPA**) which does not cover hydraulic structures in general and water storage tanks in particular. These deficiencies are reflected later during the operating phase, by pathologies prevalent in the Algerian park and that in the absence of any methodology and/or diagnostic reliable approach and expertise of these hydraulic structures.

This thesis fits clearly in a professional practice as it fills shortcomings and deficiencies mentioned above. It has an applied character from the very practical proposals it suggests. It also fits in a sustainable development approach in that it tries to find solutions and methods to identify vulnerable tanks to extend their lives.

The first proposed method is the physical model based on the hydrodynamic model of **Housner** which we adapted the response spectrum of the **RPA**. We offer a relationship in the wake for the calculation of the fundamental period of a tank taking into account its flexural rigidity.

The second method is a method developed by **expertise** aimed at making a preliminary diagnosis of a tank through a multi-criteria analysis, inspired by the work of Cemagref.

The last method proposed called dependability **FMEA** is borrowed from the field of industry (nuclear, aviation ...) which we adapt to civil engineering.

Finally, a computer application based on the method of the vulnerability index is developed. Coupled with a **GIS**, this application is a powerful tool for decision support in the hands of managers. As practical examples to validate this computer application, two tank parks were expertised.

**Key words** : *reinforced concrete tanks, expertise, vulnerability, aging, FMEA, criticality, GIS.*

## Notations

---

$a_m$  : accélération maximale du sol [m/s<sup>2</sup>],

$d_{max}$  : hauteur maximale des vagues, après oscillation [m],

$g$  : accélération de la pesanteur [m/s<sup>2</sup>],

$h_i^*$  : niveau d'application des pressions d'impulsion engendrant un moment de renversement [m],

$h_i$  : niveau d'application des pressions d'impulsion engendrant un moment de flexion dans la paroi [m],

$h_o$  : niveau d'application des pressions d'oscillation engendrant un moment de flexion dans la paroi [m],

$h_o^*$  : niveau d'application des pressions d'oscillation incluant l'effet de la pression sur la base [m],

$q_i$  : pression au niveau de la base de la bande d'ordre (i) [t/m<sup>2</sup>],

$z_i$  : profondeur de la bande (i) à la base, jusqu'au trop plein [m],

$A$  : coefficient d'accélération de zone sismique,

$E$  : module d'élasticité du béton [MN/m<sup>2</sup>],

$H_e$  : hauteur d'eau utile dans le réservoir [m],

$H_t$  : hauteur totale du réservoir [m],

$I_x$  : moment d'inertie de la section transversale du réservoir [m<sup>4</sup>],

$M$  : moment de flexion dû à l'action sismique sur la paroi (impulsion et oscillation) [kNm],

$M_e$  : masse de l'eau dans le réservoir [t],

$M_{fi}$  : moment de flexion d'impulsion [kNm],

$M_{fo}$  : moment de flexion d'oscillation [kNm],

$M_i$  : masse d'impulsion [t],

$M_o$  : masse d'oscillation [t],

$M_{ri}$  : moment de renversement d'impulsion [kNm],

$M_{ro}$  : moment de renversement d'oscillation [kNm],

$P$  : poids du réservoir par unité de longueur [kN/m],

$P_i$  : résultante des pressions hydrodynamiques horizontales d'impulsion [kN],

$P_o$  : résultante des pressions hydrodynamiques horizontales d'oscillation [kN],

$Q$  : facteur de qualité de la structure [-],

$R$  : coefficient de comportement global de la structure [-],

$R_i$  : rayon intérieur du réservoir [m],

$R_e$  : rayon extérieur du réservoir [m],

$T$  : période fondamentale du réservoir [s],

$T_1, T_2$  : périodes caractéristiques associées à la catégorie du site [s],

$\eta$  : facteur de correction d'amortissement [-],

$\xi$  : pourcentage d'amortissement critique [%],

$\varpi$  : masse volumique de l'eau [t/m<sup>3</sup>],

$\phi_o$  : angle maximal d'oscillation de la surface libre de l'eau

$\Omega$  : section horizontale de la paroi circulaire du réservoir [m<sup>2</sup>],

$\omega_o$  : pulsation fondamentale de vibration du liquide en mouvement [1/s<sup>2</sup>],

## **Introduction générale**

---

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 réalisation demandent une spécialisation particulière, que peu de bureaux d'études et d'entreprises de réalisation peuvent se flatter de posséder tant le niveau de qualification exigé est élevé.

L'implantation des réservoirs 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 vient alors que les sites privilégiés pour cette implantation sont des sommets de collines et de monticules, afin d'assurer la charge nécessaire aux abonnés. C'est pour cette raison que les réservoirs sont soumis à des conditions très rudes (exposition aux intempéries, au climat froid ...etc.). Ces ouvrages subissent aussi de fortes variations de surcharge d'exploitation (eau contenue dans la cuve), de façon souvent quotidienne et pour certains 3 à 4 fois par jour durant toute leur longue période d'exploitation, ainsi que l'effet hydrodynamique suite à une excitation sismique.

On se rend compte facilement que les réservoirs 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.

Dans la réalité, les réservoirs vieillissent et ne sont pas toujours en bonne santé, et il n'est pas toujours facile de diagnostiquer leur maladie afin de prescrire le bon remède. Ce vieillissement des infrastructures de stockage de l'eau est au cœur des préoccupations des gestionnaires. Celui-ci 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.

Les gestionnaires ont besoin d'avoir une vision globale du patrimoine en termes d'objectifs et de contraintes ; c'est-à-dire de disposer d'une évaluation continue de l'état du patrimoine dans un contexte d'exploitation dynamique. Pour mener à bien cette entreprise, l'idée générale est de disposer à tout moment des priorités d'intervention en fonction de l'évaluation des risques auxquels sont exposés les réservoirs du patrimoine. Il doit s'assurer que l'ouvrage remplit ses fonctions au meilleur coût, dans le cadre d'exploitation prévu. Pour cela, il 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 l'ouvrage.

Evaluer la sécurité d'un ouvrage de génie civil en service, détecter les comportements anormaux, déterminer les origines d'une dégradation ou expertiser les causes d'un incident, prévoir les évolutions futures et les risques potentiels, décider des mesures appropriées ; telles sont les missions de diagnostic et d'analyse de risques accomplies par les ingénieurs spécialisés du génie civil. Disposer d'une capacité d'expertise de haut niveau apparaît donc comme un objectif essentiel des organismes de gestion qui les exploitent. Les enjeux sont avant tout d'assurer la sécurité des personnes et des biens menacés en cas de rupture, mais aussi la gestion des ouvrages la mieux adaptée (continuité de service, optimisation de leur maintenance, programmation des travaux de réparation). Les difficultés apparaissent très importantes : absence de méthodologie, données insuffisante ou absentes, mécanismes de vieillissement complexes et multiples, imprécision et incomplétude des informations, absence de culture d'archive, manque de transparence et réticence à la communication. Alors, face à ces ouvrages complexes et uniques, dans des contextes présentant des données insuffisantes, lors de diagnostics il est nécessaire de recourir au jugement des experts. A partir de leurs connaissances et de leur expérience, ces derniers vont fournir une interprétation, un avis ou une recommandation à la question posée.

Il est important de signaler qu'il y'a eu peu de travaux destinés à développer l'approche basée par le retour d'expérience dans le domaine des ouvrages hydrauliques, nous pouvons citer à titre d'exemple (Mathieu, 1996), (Peyras, 2003) et (Serre, 2005).

L'objectif de notre recherche est de proposer des méthodes d'aide au diagnostic et à l'analyse de risques en se basant sur le retour d'expérience. Elle vise à assister les ingénieurs spécialisés lors d'analyses préliminaires et rapides ou lors de synthèses d'études approfondies. Le principe de notre démarche est de tirer profit des connaissances et de l'abondant retour d'expérience accumulés par les experts pour de nouvelles missions. D'autres objectifs sont sous-jacents : sauvegarder l'expérience des experts seniors, accompagner les jeunes ingénieurs, accéder rapidement aux informations...etc.

Notre travail s'inscrit clairement dans le cadre d'une recherche appliquée, à vocation d'expertise et de diagnostic des réservoirs de stockage d'eau. Elle est le fruit d'une longue expérience passée au service des études, de réalisation de suivi et contrôle des travaux d'ouvrages hydraulique en général et réservoirs en particuliers. Par conséquent, il est nécessairement mené en considérant les pratiques de la profession, tenant compte des différentes normes, réglementation et codes de calcul actuellement en vigueur et présente une vocation applicative.

La thèse est structurée en six chapitres, répartis comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons le contexte dans lequel nous travaillons. Nous dressons un constat de la situation de gestion du patrimoine de réservoir dévolu à la société Algérienne des Eaux (A.D.E.), en expliquant les différentes phases de la vie de cette société pour comprendre les dispositifs généraux de gestion de ces ouvrages de génie civil. Nous présentons par ailleurs le parc de réservoir relevant du contrôle du ministère des ressources en eau qui va plus particulièrement nous intéresser tout le long de cette étude et nous relevons enfin les spécificités de ces ouvrages et de leur mode de gestion.

En second chapitre, il nous a semblé intéressant de faire un point bibliographique sur les méthodes de diagnostic et d'analyse de risques utilisées dans le contexte industriel puis dans celui du génie civil, en mettant l'accent sur les différentes méthodes d'expertiser les ouvrages (méthode physique, méthode par expertise, méthode statistique et enfin méthode de sûreté de fonctionnement). Ceci nous a permis d'établir des propositions pour conduire notre recherche.

Nous nous intéressons, au troisième chapitre, à une pathologie d'origine mécanique, en utilisant un modèle physique. Pour analyser la stabilité du réservoir ainsi que son comportement hydrodynamique (effet du liquide sur les parois sous l'action sismique), le modèle de Housner décompose le liquide en une action passive provoquant des efforts d'impulsion et une action active provoquant des efforts d'oscillation. Avec cette approche physique, dans cette section, nous avons mis en évidence deux phénomènes lors d'une excitation sismique. Ces deux phénomènes agissant simultanément, provoquent des fissures inclinées, laissant paraître des suintements qui se manifestent par la présence d'humidité parfois chargée en sels après percolation à travers le béton. Cette pathologie a été observée sur un large parc de réservoirs expertisés en Algérie. A travers cette étude, nous montrons que la négligence ou l'omission du phénomène hydrodynamique sous-estimait considérablement les contraintes de traction (horizontales et verticales) agissant dans la paroi, provoquant ainsi l'apparition des fissures.

Le chapitre quatre est consacré à l'évaluation de la vulnérabilité des réservoirs de stockage en béton vis-à-vis des aléas naturels, par une approche par expertise. Dans cette section, le concept de vulnérabilité aux aléas naturels est utilisé afin de prédire le niveau moyen de dégradations et de vieillissement pouvant survenir à grande échelle dans un réservoir de stockage des eaux. Pour estimer l'état de ces réservoirs de stockage, nous développons dans le cadre de cette étude une méthode de diagnostic basée sur l'indice de vulnérabilité ( $I_v$ ), en tenant compte de tous les paramètres influant ; environnementaux, structuraux et fonctionnels. A partir de cet indice, nous proposons une échelle de classification des réservoirs en trois niveaux de comportement, auxquels sont associés différentes couleurs. Le premier niveau regroupe les réservoirs ayant un bon comportement (couleur verte), le second comprend les réservoirs ayant un comportement moyen (couleur orange) et le troisième concerne les réservoirs ayant un mauvais comportement (couleur rouge). Pour l'application de la méthode, nous procédons au diagnostic d'un réservoir en béton armé implanté dans une ville côtière d'Algérie qui a donné lieu à une réhabilitation par chemisage externe de la paroi.

Au cinquième chapitre, nous abordons la modélisation du phénomène de vieillissement des réservoirs de stockage en utilisant les techniques de la Sûreté de Fonctionnement. Ces techniques permettent de modéliser les modes de défaillances du système (dans notre cas le réservoir), c'est-à-dire son aptitude à accomplir une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. Différentes méthodes de la Sûreté de Fonctionnement peuvent être utilisées principalement pour la modélisation fonctionnelle ; telles que l'AMDE (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets) et l'AMDEC (AMDE avec analyse de la Criticité). Cette méthode est apparue dans les années soixante dans le secteur aéronautique aux Etats Unis. Elle est introduite depuis peu dans le domaine du génie civil, en particulier dans le domaine des barrages (Peyras, 2003) et (Serre, 2005), dans le domaine des ouvrages maritimes (Boéro et al., 2006). En s'inspirant de ces derniers travaux, nous l'appliquons à l'analyse d'un réservoir en béton armé. Pour

ce faire, nous commençons par répertorier les principaux mécanismes de vieillissement des réservoirs en béton pouvant apparaître dès leur mise en service, puis nous procédons à l'analyse fonctionnelle externe qui nous permet d'obtenir les fonctions principales et de contrainte accomplies par le système dans sa globalité. Suite à cela, nous passons à l'analyse fonctionnelle interne à travers l'analyse structurelle du système qui nous permet de définir le rôle de chaque composant ainsi que les interactions entre ces derniers. A partir des blocs diagrammes fonctionnels, nous déterminons les fonctions de conception des composants du système. Après cela, nous appliquons la méthode AMDE pour analyser les défaillances potentielles du système, en considérant systématiquement l'un après l'autre, chaque composant du système en analysant ses modes de défaillances. Lorsque l'AMDE globale de tous les composants est terminée, une analyse d'évaluation des risques est effectuée pour toutes les défaillances précédemment identifiées. L'évaluation des risques potentiels se traduit par le calcul de la criticité, à partir de l'estimation du couple indice de gravité et de fréquence (probabilité). Une application pratique viendra clôturer ce chapitre.

Au niveau du sixième et dernier chapitre, une application informatique basée sur la méthode de l'indice de vulnérabilité vue au chapitre troisième a été développée. Cette application est constituée d'une base de données couplée avec des données cartographiques comme outil d'aide à la décision. Puis pour tester et valider cet outil d'aide à la décision, il a été appliqué à l'échelle réelle d'un parc de réservoir composé d'une vingtaine d'ouvrages dans la wilaya de Tizi Ouzou et géré par l'Algérienne Des Eaux (ADE). Une enquête de terrain de près de cinq mois a été nécessaire pour récolter les données d'expertise de chaque ouvrage du parc, reportées à l'aide des fiches de terrain conçues spécialement pour le terrain. Afin de permettre la gestion, l'analyse, l'affichage et une meilleure visualisation de ces données, un premier système d'information géographique (SIG) de ce patrimoine a été construit. Les réservoirs ont été implantés comme des objets ponctuels, auxquels nous avons rattaché de l'information géo référencée. Suite à cela des analyses thématiques ont été entreprises pour répondre à une demande de réhabilitation. Cette application représente un outil important d'aide à la décision pour les gestionnaires des ouvrages de stockage. Autrement dit, il nous renseigne sur l'attention à accorder aux ouvrages vulnérables après une analyse thématique. Cette manière de faire, nous permet une meilleure visualisation des priorités d'ouvrages à réhabiliter. Elle permet d'avoir à tout moment l'état de santé des ouvrages ainsi que de faire des projections futures.

---

## **1. Chapitre 1 : Du constat d'une situation à l'expression d'un besoin**

## 1.1. Introduction

---

La société « **Algérienne des eaux** » de gestion de la distribution de l'eau potable s'est résolument engagée dans une démarche de développement durable. Elle a pour objectif de prendre en considération les dimensions sociales, économiques et environnementales de son activité. L'entretien des infrastructures hydrauliques ne concerne pas uniquement les canalisations d'eau potable. Les réservoirs de stockage, de transit ou de tête (tampons) occupent une place primordiale dans le système d'alimentation des populations. C'est ce type d'ouvrage qui fera l'objet de notre intérêt.

Le ministère des ressources en eau par le biais de l'**ADE**, en tant que gestionnaire de ce patrimoine, est confronté au vieillissement de ce type d'infrastructure sous l'influence des catastrophes naturelles (inondations, séismes, vents, feux, glissements de terrains...etc.) qui ont toujours menacées ces ouvrages. Celui-ci doit s'assurer que l'ouvrage remplit ses fonctions au meilleur coût, dans le cadre d'exploitation prévu.

A travers ce chapitre, nous présenterons les réservoirs du parc national Algérien ainsi que l'entreprise en charge de ce patrimoine. Nous exposerons également l'analyse du mode de gestion face aux réservoirs vieillissant, en mettant en évidence le manque de données et le mutisme des codes de calcul (règlements) face à ces ouvrages. Ce qui nous amènera enfin à poser le contexte de notre étude.

## 1.2. Les réservoirs du parc national gérés par l'A.D.E

---

Le parc algérien des réservoirs de stockage d'eau potable géré par l'**Algérienne Des Eaux (ADE)** compte près de 40 000 réservoirs réparti d'une manière éparse sur un très grand territoire. Ces réservoirs de stockage sont considérés 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 coté esthétique a longtemps été négligé par les ingénieurs du secteur de l'hydraulique et n'a jamais été le souci dominant des maitres d'ouvrages. On est arrivé, d'ailleurs jusqu'à ce jour à une sorte de systématisation des silhouettes où les réservoirs types sont adaptés d'un site à un autre tenant compte uniquement des considérations géotechniques des sols d'implantation. Le souci primordial des maitres d'ouvrages a toujours été d'ordre fonctionnel et financier. Les modèles adoptés sont d'aspect esthétique acceptable comme nous le présentons sur les figures (1, 2 et 3). Ce n'est que depuis la dernière décennie que les maitres d'ouvrages lancent la réalisation de plus beaux châteaux d'eaux au niveau des grandes agglomérations urbaines (forme champignon), mais économiquement plus couteux.

Quant aux formes, il existe dans le parc de réservoirs géré par l'**Algérienne des Eaux** des réservoirs de forme cubique et de forme cylindrique. Mais la forme circulaire est incontestablement la plus répandue.

Les formes de révolution sont en général plus économiques que les surfaces planes comportant des changements de direction. À capacité et hauteur de charge identiques, un réservoir cylindrique a une quantité de ferrailage, par mètre cube mis en œuvre, inférieure à un réservoir parallélépipédique. À la mise en œuvre, certaines configurations et changements de direction pour les parois entraînent des dispositions constructives difficiles à réaliser, mais aussi des pathologies induites dès la conception et la réalisation.

Les ouvrages en béton précontraint et en maçonnerie ne seront pas abordés dans ce travail. Effectivement, les réservoirs en béton précontraint ne figurent pas dans le patrimoine national des réservoirs hydrauliques géré par l'Algérienne des eaux. A notre connaissance, il n'en existe que dans le secteur industriel (et à titre d'exemple nous pouvons citer les réservoirs de stockage en béton précontraint du groupe agroalimentaire Cevital au niveau du port de Bejaia). Quant aux réservoirs en maçonnerie, ils ne représentent qu'un très faible pourcentage. Les seuls réservoirs répertoriés remontent à la période coloniale. Ce type de réservoir a été abandonné en faveur des ouvrages en béton, pour manque de main d'œuvre artisanale qualifiée dans les ouvrages en maçonneries.



**Figure 1 :** *Réservoir surélevé sur tour en béton armé [photo Hammoum].*



**Figure 2 :** *Réservoir circulaire semi enterré en béton armé [photo Hammoum].*



**Figure 3 :** *Réservoir circulaire posé au sol en béton armé [photo Hammoum].*

*Nous retiendrons, que le parc géré par l'Algérienne des eaux est majoritairement constitué de réservoirs de forme circulaire. Les réservoirs au sol et enterrés sont constitués d'une coupole de couverture, d'une ceinture supérieure, d'une paroi et d'un radier. Quant aux réservoirs surélevés (châteaux d'eau), ils sont constitués d'une douzaine de composants que nous verrons dans le détail au chapitre 5.*

### **1.3. Gestion du patrimoine des réservoirs en Algérie**

---

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.

#### **1.3.1. Au lendemain de l'indépendance : de 1962 à 1970**

Cette période est marquée par le maintien de toutes les structures de la période antérieure (coloniale) à 1962. L'exploitation est ainsi assurée par les services des eaux communaux dans la majorité des communes. 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 aux réservoirs de stockage en particuliers, en raison essentiellement des difficultés croissantes rencontrées par les autorités locales dans l'exercice de cette mission par manque de moyens.

#### **1.3.2. Période de 1970 à 1983**

Le 23 novembre 1970, le monopole du service de l'eau potable et donc des réservoirs d'eau sur l'ensemble du territoire Algérien fut confiée 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 de génie civil.

#### **1.3.3. Période de 1983 à 1987**

En 1983, on assistera à l'énoncé d'une décision de restructuration de la SONADE et la réintroduction d'une manière ambiguë la compétence des collectivités locales en matière de service public de l'eau.

La gestion du patrimoine hydraulique (canalisation et réservoirs d'eau) est transférée en pleine propriété à la wilaya ou à la commune concernée, par la création d'entreprises régionales ou de wilaya, en fonction de l'importance de l'infrastructure hydraulique et du parc de réservoir à gérer.

#### **1.3.4. Période de 1987 à 1999**

Cette période 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.

#### **1.3.5. Période de 2000 à ce jour**

Le changement le plus important a été la création le 25 octobre 2000 d'un ministère des ressources en

eau 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 5 régions géographiques, 16 zones, 49 unités, l'ADE a en charge l'activité entre autre activité liée à l'eau, la gestion des infrastructures génie civil de stockage de l'eau (réservoirs).

*On se rend compte à travers l'évolution historique de près d'un demi siècle retracé sommairement précédemment qu'il y'a eu inflation de structures en charge des ouvrages hydrauliques. On peut dire qu'aucun schéma stable n'a pu fonctionner de manière correcte. En somme, la gestion des ouvrages hydrauliques s'est orientée fondamentalement sur l'entreprise hydraulique étatique.*

#### **1.4. Analyse du schéma de gestion du patrimoine des réservoirs**

---

Par delà les multiples péripéties enregistrées dans le transfert des compétences de gestion vus précédemment, il importe de souligner le manque de vision et d'approche méthodologique dans la gestion de ces ouvrages hydrauliques, qui ont donné lieu à une dilution des responsabilités, à un éparpillement des services et une déperdition de la donnée et des documents d'archive.

Il est intéressant de rappeler que des dépenses considérables ont été injectées dans la réalisation de ces ouvrages hydrauliques (réservoirs) par les Directions de l'Hydraulique de wilaya à travers les Programmes Sectoriels de Développement (PSD) et les collectivités locales à travers les Plans Communaux de Développements (PCD), sans une politique et résultats probants dans la maintenance et la surveillance de l'état de ces ouvrages. Il convient aussi de noter que la gestion de ces ouvrages confiée aux communes, dans le domaine de l'eau, ne pouvait être assurée de façon satisfaisante faute de moyens financiers et d'encadrement technique adéquat. Par ailleurs, les coûts de gestion ne sont couverts ni par le budget de fonctionnement ni par le recouvrement des redevances de la consommation en eau potable des abonnés du fait que le consommateur ne paie pas l'eau à son juste prix.

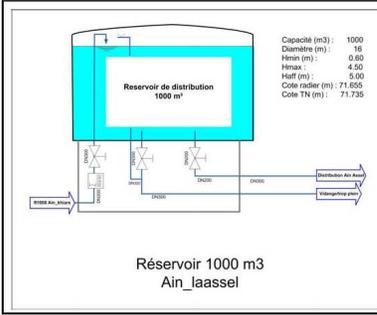
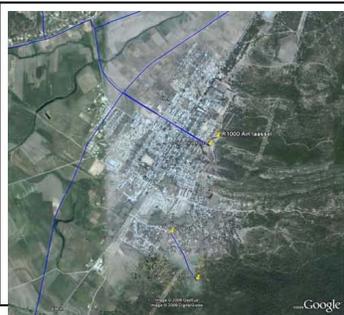
*Nous retiendrons que les ouvrages hydrauliques de génie civil sont réalisés aux prix et moyen financiers importants, sans que l'on se préoccupe de leur gestion. Or un ouvrage de génie civil vieillis dans le temps et devient moins performant et par voie de conséquence vulnérable aux aléas naturels. On montre facilement que les couts de maintenance et de réhabilitation augmentent au fur et à mesure du vieillissement de l'ouvrage, alors même que le niveau de performance décroît. Dans le temps, il devient onéreux de l'entretenir. C'est pour ces raisons qu'il est important de passer par un système expert qui puisse placer et dicter les priorités d'intervention des organismes de gestion, tenant compte des contraintes budgétaires significatives.*

#### **1.5. Les réservoirs du parc mal documentés**

---

La Direction d'exploitation de l'**ADE** tient un fichier par commune du parc de réservoir qu'elle a en charge de gérer. Ce fichier comprend les informations sommaires sur l'état du réservoir (nom du site, la capacité de stockage, le type de structure, coordonnées géographiques et quelques observations concernant le bon ou mauvais état de l'ouvrage). Nous présentons en figure (4) une fiche signalétique type d'un réservoir en service géré par la **SEATA (ADE d'Annaba)**, elle a été établie par le Bureau

d'études techniques **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 des éventuelles incidents survenus durant les années de service. On déduit qu'il n'y a aucune politique d'archivage de la donnée et de l'information, même lorsque les réservoirs sont gérés d'une manière correcte.

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

**Figure 4 :** Fiche signalétique type d'un réservoir [Geosystem-SEATA].

La difficulté supplémentaire provient de la dispersion des ouvrages sur un très grand territoire et de l'hétérogénéité du type de structure (réservoir au sol, réservoir enterré et enfin réservoir surélevé). Toutefois, il est intéressant de signaler que le Ministère des ressources en eau, par le biais de la direction générale de l'ADE, a lancé des programmes de diagnostic et de réhabilitation des ouvrages hydrauliques (réseaux d'eau potable et réservoirs) des quelques grands centres urbains chef lieu de wilaya (Alger, Oran, Annaba, ...). Ce programme a démarré en 2006 et va s'étaler sur quelques années encore, il vise à mieux connaître nos ouvrages hydrauliques et les recenser.

*En somme, nous retiendrons que le parc des réservoirs apparaît donc mal documenté, voire pas du tout et l'acquisition de données sur l'ensemble du patrimoine est complexe et couteuse du fait de l'hétérogénéité des réservoirs sur un vaste territoire.*

## **1.6. Le gestionnaire face aux réservoirs vieillissants**

---

A l'indépendance, l'administration Algérienne a hérité d'un modeste parc de réservoir de l'administration coloniale. Ce n'est qu'après cette période, par le biais des programmes spéciaux et à l'aide entreprises du BTPH (bâtiments, travaux publics et hydraulique) que les **DHW** se sont lancés dans une vaste phase de « construction » où il a fallu construire les **réservoirs**.

Aujourd'hui, nous sommes dans une nouvelle ère où il s'agit d'entretenir ce patrimoine qui vieillit. Cette gestion des ouvrages repose sur un savoir-faire technique qui s'est accumulé au fil des décennies. Nous sommes donc rentrés dans une phase de rénovation. L'âge moyen des réservoirs du patrimoine national est d'environ quarante ans et l'opinion publique devient de plus en plus exigeante vis-à-vis de la sécurité des personnes, la sécurité des services et la pérennité des biens.

*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 ?***

## **1.7. Les codes de calcul face aux réservoirs**

---

De graves séismes survenus en Algérie ces dernières années (El Asnam 1980, Oued Djer 1988, Tipaza 1989, Mascara 1994 et Boumerdes 2003) ont mis en évidence l'importance du génie parasismique dans la protection des populations et des biens matériels. Cela a conduit à la révision du Règlement Parasismique Algérien (RPA) à plusieurs reprises (RPA 81, RPA 88, RPA 99 et RPA 2003), tenant compte à chaque fois du retour d'expérience de près de trois décennies de pratique. Malgré ces diverses actualisations, les ouvrages hydrauliques en général et les réservoirs de stockage en particulier ne sont pas abordés dans le RPA. Un inventaire exhaustif de différents amendements apportés dans le temps au niveau des règlements parasismiques algériens montre de nombreuses insuffisances, relativement à une démarche de calcul fiable des réservoirs (au sol et surélevés).

Le RPA 81 fixe à 1000 m<sup>3</sup> la capacité à partir de laquelle il faut tenir compte de l'effet hydrodynamique, en zone II (moyenne sismicité) et zone III (forte sismicité).

Le RPA 88 classe les châteaux d'eau comme des structures de catégorie 8 ; structures régulières pour lesquelles le premier mode est prédominant et dont la modélisation est simple. Par son commentaire 2.3.2, il énonce que pour les châteaux d'eau d'une capacité supérieure à 1500 m<sup>3</sup>, en zone II et III, une étude hydrodynamique est nécessaire.

Le RPA 2003 classe les châteaux d'eau et réservoirs de grande et moyenne importance comme étant des ouvrages de groupe 1B, c'est-à-dire des ouvrages publics d'intérêt national, ayant une importance socioculturelle et économique certaine.

Dans la majorité des cas, l'ingénieur civil est conduit à recourir à une approche basée sur des règlements étrangers, pour la conception et calcul de ces ouvrages.

Parmi les règlements étrangers les plus récents, le DTU « règles PS69 révisées 82 », puis le DTU « règles PS92 », n'abordent pas la question des réservoirs.

Le fascicule 74 du ministère Français de l'équipement, des transports et du logement, traitant de la construction des réservoirs en béton, énonce que la justification de la tenue au séisme devra prendre en compte les actions dynamiques réciproques qui se développent entre le fluide et la cuve qui le contient ; c'est au fait l'effet hydrodynamique. Pour les méthodes de calcul, le fascicule 74 nous renvoie à des articles que le projeteur est invité à consulter. Nous citons à titre d'exemple (Davidovici et Haddadi, 1982) et (Housner, 1963).

En effet, (Davidovici et Haddadi, 1982) proposent des méthodes de calcul au séisme des réservoirs au sol et surélevés de différentes formes (circulaires et rectangulaires), tenant compte de l'effet hydrodynamique. Ils abordent même la méthode de Housner, que nous utilisons dans cet article.

L'eurocode 8 consacre sa partie 4 au calcul au séisme des réservoirs. Il suggère de modéliser le liquide du réservoir par le moyen d'un système mécanique équivalent où la masse du liquide est divisée en une masse d'impulsion et une autre masse d'oscillation.

Une étude intéressante menée par (Jaiswal et al., 2007) a présenté et comparé une dizaine de codes (Eurocode 8, IBS 2006/ASCE7, NZSEE et les standards américains de l'industrie) de calcul des réservoirs au séisme. Elle met en évidence la grande différence entre ces codes, et permet de conclure sur la nécessité d'une approche unifiée (à travers les différents codes de calcul) dans l'étude au séisme des réservoirs.

## **1.8. Les pathologies rencontrées sur le parc Algérien de réservoirs**

---

Cette section est rédigée pour donner un aperçu des différentes pathologies répandues sur le parc Algérien de réservoirs, sans avoir toutefois l'ambition d'être exhaustif. Il n'existe pas un document officiel Algérien, qui traite de la question. Pour ce faire, nous basons notre analyse sur une étude à l'échelle réelle d'un parc d'une commune côtière de l'est d'Algérie. Les résultats que nous présentons rentrent dans le cadre d'un programme national d'études centralisées par le ministère des ressources en eau, intitulé « diagnostic des ouvrages hydrauliques d'alimentation en eau potable des grandes villes ». L'une des missions de cette étude qui nous concerne particulièrement a consisté à identifier, répertorier les problèmes rencontrés sur les réservoirs de stockage du système d'adduction en eau potable de commune côtière de l'est d'Algérie et à proposer un plan de réhabilitation, car les défauts constatés sur un réservoir en service peuvent rapidement devenir très importants. Ce parc de réservoirs en béton armé est géré par ADE. Cette mission a duré près d'une année, entre les expertises de terrain et la rédaction des différents rapports y compris les délais de leur validation par le maître de l'ouvrage.

Dans le cadre de cette étude, plusieurs réservoirs ont été expertisés. Un rapport de procédure de diagnostic a été rédigé puis validé. A ce rapport de procédure sont rattachés plusieurs autres rapports de diagnostic, individualisés par ouvrage, comme consigné dans le tableau qui suit.

**Tableau 1 : Désignation des réservoirs expertisés**

<b>N°</b>	<b>Nom du site</b>	<b>Désignation des réservoirs</b>
1	BAZOUL	Réservoir 500 m <sup>3</sup>
2	TASSOUST	Réservoir 1000 m <sup>3</sup>
3	LAAKABI	Réservoir 500 m <sup>3</sup>
4	HARRATHEN	Réservoir 500 m <sup>3</sup>
5	MEZOUI	Réservoir 100 m <sup>3</sup>
6	HADDADA INFERIEURE	Réservoir 2000 m <sup>3</sup>
7	HADDADA SUPERIEURE	Réservoir 2000 m <sup>3</sup>
8		Réservoir 2000 m <sup>3</sup> R3
9	OULED AISSA INFERIEUR	Réservoir 2000 m <sup>3</sup> R1
10		Réservoir 2000 m <sup>3</sup> R2
11		Réservoir 1000 m <sup>3</sup>
12	OULED AISSA SUPERIEUR	Bâche 100 m <sup>3</sup>
13		Réservoir 2000 m <sup>3</sup> jumelé R1 (coté gauche)
14		Réservoir 2000 m <sup>3</sup> jumelé R2 (coté droit)
15		Réservoir 2000 m <sup>3</sup> isolé R3 (coté gauche)
16	LA CRETE	Réservoir 2000 m <sup>3</sup> isolé R4 (coté droit)
17		Réservoir 500 m <sup>3</sup> jumelé enterré (coté gauche)
18		Réservoir 500 m <sup>3</sup> jumelé enterré (coté droit)
19		Réservoir surélevé

Les défauts apparents rencontrés lors de cette enquête sont classés par ordre alphabétique et pour chaque phénomène, nous donnons, une définition, quelques causes probables de son apparition.

### 1.8.1. Aciers dénudés

Sont des armatures apparentes en contact du milieu extérieur. Cette pathologie est causée par la disparition ou l'insuffisance de l'enrobage du béton, par l'attaque du béton, par choc mécanique et enfin par le cloquage et gonflement de l'enrobage (ou éclat de l'enduit). L'exposition prolongée des armatures à l'air libre peut avoir pour conséquences, la corrosion des aciers.

Six (6) réservoirs expertisés sur le parc présentent cette pathologie d'aciers dénudés. Cette pathologie est causée par le manque d'enrobage (voir figure ci-dessous), l'enduit qui a été réalisé pour éviter la pénétration progressive de l'eau et des brouillards marins n'a pas résisté aux agressions naturelles et a fini par céder.



**Figure 5 :** Aciers dénudés sur la ceinture supérieure du réservoir La crête [Photo Hammoum].

### 1.8.2. Couverture dégradée

C'est le décollement ou le cloquage du complexe d'étanchéité du à la surpression des eaux d'infiltration (pluie ou fonte de neiges). Sur tout le parc expertisé la couverture est faite d'une couche de chape de ciment seule ou couverte par un complexe d'étanchéité en papier Kraft. La dégradation du complexe d'étanchéité engendre la dégradation de la chape de ciment et plus tard la dégradation de la masse du béton. Il faut reconnaître que vu la forme voutée des coupoles de couverture des réservoirs, ce système d'étanchéité est particulièrement attractive en raison de son cout d'investissement peu élève. Il n'est pas besoin de charpente, ni de tuiles. Enfin, la réfection de l'étanchéité est relativement facile à réaliser, et donc moins onéreuse que le remplacement de la couverture traditionnelle.

Dix (10) réservoirs expertisés sur le parc présentent cette pathologie de couverture dégradée. Les dégradations de surface sont à l'évidence provoquée par les cycles gel et dégel, aggravée par l'ambiance saline et par une eau acide (eaux de pluie). L'éclatement du complexe d'étanchéité (voir photo ci-après) favorise la pénétration progressive de l'eau et des brouillards marins. Après l'attaque du complexe d'étanchéité, c'est au tour de la chape d'étanchéité sous le complexe qui sous l'effet des mêmes agressions aura cet aspect « explosé » du béton. Ce phénomène ne peut qu'aller en s'accélégrant étant donné que sur tous les réservoirs du parc, nous avons constaté un manque d'entretien de cette étanchéité. La durée de vie de l'étanchéité asphalte est en moyenne de 30 ans, avec une fourchette de 25/35 ans (Saint Martin, 2008) et le manque d'entretien réduit sa durabilité de 30 ou 40 %.



**Figure 6 :** Complexe d'étanchéité de la coupole dégradé du réservoir Ouled Aissa [Photo Hammoum].

### 1.8.3. Corrosion des aciers

C'est la désintégration des armatures par électrolyse ou attaque chimique et s'observe sur les aciers dénudés. Parmi les causes probables de ce défaut, nous pouvons citer la prise en compte insuffisante de la notion de fissuration à l'état limite de service, l'exposition prolongée des aciers dénudés à l'air libre, la mauvaise étanchéité, l'enrobage insuffisant. Cette corrosion des aciers peuvent avoir comme conséquences des fissures dues à la redistribution des efforts, des épaufrures, l'aggravation des flèches permanentes, l'instabilité de l'ouvrage et enfin sa rupture.

Six (6) réservoirs expertisés sur le parc présentent cette pathologie de corrosion des aciers. Les armatures touchées sur la plupart des réservoirs sont les aciers horizontaux (voir photo ci-dessous). Hors ces aciers sont sollicités en traction simple (forme circulaire). Avec le temps et face à l'agression naturelle, ces aciers subissent une oxydation. Leur corrosion, aggravée par l'ambiance saline (milieu marin), entraîne une forte diminution de leur section des armatures qui aboutira à moyen terme à la ruine de l'élément touché de l'ouvrage.



**Figure 7 :** Corrosion des aciers du réservoir La crête [Photo Hammoum].

### 1.8.4. Corrosion de pièces métalliques

C'est l'altération de la robinetterie métallique contenue dans la chambre de manœuvre. Ces vannes sont très sollicitées par les fonteniers qui ont en charge la gestion du réseau de la ville. Ajouter à cela la sollicitation hydrostatique de ces pièces qui sous le poids des années finissent par céder. Les joints en caoutchouc disposés entre les brides des vannes ont une durée de vie limitée, finissent par céder sous la pression de l'eau. En résumé, cette robinetterie doit être changée avec une fréquence régulière.

La quasi-totalité des réservoirs (18 réservoirs) expertisés sur le parc présentent cette pathologie de corrosion de pièces métalliques (photo ci-dessous). Ce défaut engendre des pertes importantes d'eau pour l'organisme de gestion, qui sont estimées sur tous le réseau à 15 % de la consommation des abonnés. Sans compter que cette accumulation d'eau à l'intérieur des chambres des vannes rend impossible l'intervention sur le réservoir. Cette pathologie est révélatrice d'un laissé aller flagrant dans l'entretien et la réparation des ouvrages de la part de l'organisme de gestion.

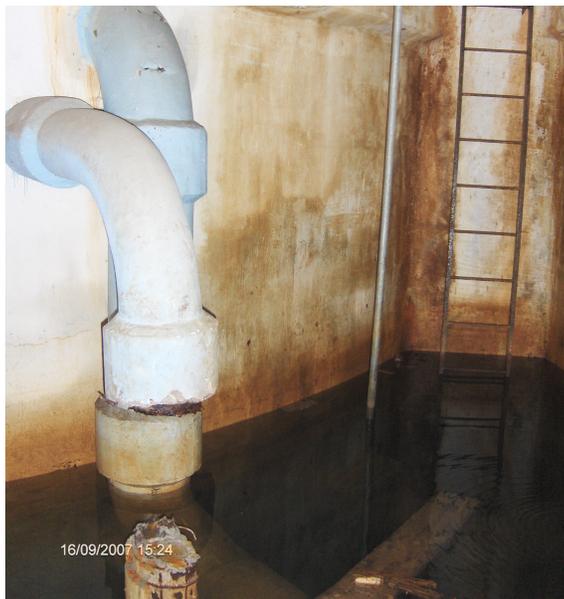


**Figure 8 :** *Corrosion de la robinetterie du réservoir Mezoui [Photo Hammoum].*

### **1.8.5. Défaut de disposition d'évacuation des eaux**

C'est un défaut lié aux circulations d'eau, il a pour origine soit une mauvaise conception, soit un vieillissement entraînant un écoulement défectueux ou inexistant des eaux. Ce défaut se manifeste par la stagnation des eaux.

La quasi-totalité des réservoirs (18 réservoirs) expertisés sur le parc présentent cette pathologie de défaut de disposition d'évacuation des eaux. Avec le temps, les vannes de la chambre des manœuvres fuient en vieillissant. Les eaux de fuite s'accumulent dans la chambre des vannes sans s'évacuer (voir photo ci-après). Ces stagnations font augmenter le taux d'humidité dans la chambre des vannes et augmentent le risque de corrosion des aciers dénudés. L'humidité pénètre aussi dans la masse du béton et sous l'effet du gel et dégel fait écarter les fissures. Ces eaux finissent par pénétrer sous le radier pour exercer des sous pression. Cette pathologie est révélatrice d'un laissé aller flagrant dans l'entretien et réparation des ouvrages de la part de l'organisme de gestion.



**Figure 9 :** *Stagnation des eaux dans la chambre des vannes du réservoir de la crête [Photo Hammoum].*

### 1.8.6. Déformations

Les déformations instantanées et permanentes sont toutes les déformations anormales du béton par rapport à sa forme d'origine. Les déformations dépassant les estimations de la note de calcul, apparues dans le temps après durcissement du béton sont des déformations permanente, elles ont pour origine la surcharge de l'ouvrage. Quant aux déformations en tonneaux qui sont des déformations anormales se manifestant dans des parois cylindriques, elles sont dues à la rigidité insuffisante des parois associée à une rotation éventuelle de l'encastrement sur le radier. Une déformation peut entraîner la mise hors service de l'ouvrage. Une déformation peut aussi entraîner une restriction d'exploitation qui peut se traduire par une diminution de la hauteur de liquide afin de réduire la pression hydrostatique sur la paroi. Un seul réservoir expertisé sur le parc présente cette pathologie de déformation. Dans la figure qui suit, nous présentons la déformation de la coupole du réservoir Ouled Aissa. La coupole n'a plus une forme voûtée. Il s'agit vraisemblablement d'un problème de coffrage qui a cédé durant la phase de la réalisation. L'état limite de service n'a pas été dépassé, du fait que depuis plus d'une trentaine d'années d'exploitation la coupole continue à remplir sa fonction de couverture.



**Figure 10 :** Déformation de la coupole du réservoir Ouled Aissa [Photo Hammoum].

### 1.8.7. Ecaillage

Est une fine couche de mortier durci, décollée de la surface et laissant à nu les agrégats. La cause probable de ce défaut est l'insuffisance d'enrobage. Les conséquences de cette pathologie sont les aciers dénudés et désintégration quand il y'a perte de granulats.



**Figure 11 :** Ecaillage sous la ceinture supérieure du réservoir Tassoust [Photo Hammoum].

Cinq (5) réservoirs expertisés sur le parc présentent cette pathologie d'écaillage. Les écaillages détachés rencontrés lors de notre expertise se situaient le long du tracé d'armatures et se manifestent par des gonflements et des traces de rouille. Il est vrai qu'il est difficile sur site de faire la différence entre l'épaufrure (fragment détaché de la masse du béton) et l'écaillage car le béton est recouvert par une couche d'enduit de mortier de ciment.

### 1.8.8. Ségrégation

C'est la variation dans la répartition des éléments du béton se traduisant par des concentrations différentes des composants du mélange. Ce défaut survient lors de la réalisation. Une ségrégation dans la masse de l'ouvrage conduit à un affaiblissement de sa résistance et une diminution de son étanchéité. Le symptôme est la présence de nids de cailloux. Cette pathologie est souvent rencontrée lors du décoffrage des parois comme nous pouvons le voir sur la figure ci-après, où des ségrégations de béton ont été remarquées et puis traitées avec un produit hydrofuge type Sika. Lors de notre expertise, cette pathologie n'a pas été directement observée du fait que la masse du béton est recouverte par une couche d'enduit au mortier de ciment. Elle est par contre déduite indirectement lorsque des suintements et fuites sont observés. Six (6) réservoirs expertisés sur le parc présentent donc cette pathologie de ségrégation.



**Figure 12 :** Traitement des ségrégations du béton sur paroi du réservoir Ait Bouyahia [Photo Hammoum].

### 1.8.9. Qualité du béton des réservoirs du parc Algérien

Lors de cette enquête de terrain nous nous sommes aussi intéressés à la qualité du béton des réservoirs du parc de réservoir Algériens. *Quelle est la résistance à la compression du béton en place dans les réservoirs du parc ?*

Aussi, un programme d'essai a été élaboré avec le CTC, laboratoire de contrôle agréé par le ministère de l'habitat et de la construction, qui est équipé du matériel approprié. Ces essais sont destinés à vérifier si la résistance du béton en place est convenable. Comme les réservoirs expertisés sont en service, nous avons opté pour des essais non destructifs combinés, c'est-à-dire des essais au scléromètre combinés aux essais à l'ultra-son afin d'éviter de compromettre l'étanchéité des parois. Les résultats de cette campagne d'essais sont consignés dans le tableau qui suit :

**Tableau 2 : Campagne d'essais indirects non destructifs combinés**

<i>Nom du site</i>	<i>Epaisseur</i>	<i>Indice</i>	<i>Lecture à</i>	<i>Vitesse</i>	<i>Résistance</i>
	<i>(mm)</i>	<i>sclerometrique</i>	<i>l'auscultateur</i>	<i>(m/s)</i>	<i>[Kg/cm<sup>2</sup>]</i>
La crête	260,00	37,50	61,70	4,21	306,00
	250,00	38,00	68,10	3,67	239,00
	200,00	36,40	63,70	3,14	179,00
	255,00	43,10	68,20	3,74	289,00
Ouled Aissa	310,00	38,40	86,50	3,58	233,00
	260,00	35,50	72,90	3,57	208,00
	300,00	42,40	79,30	3,78	288,00
	260,00	33,20	85,50	3,04	151,00
	260,00	40,90	77,20	3,37	230,00
Haddada inf	300,00	33,70	101,60	2,95	149,00
	310,00	40,00	89,80	3,45	232,00
	295,00	38,10	96,90	3,04	184,00
	300,00	41,10	743,00	0,40	89,00
Adouane	250,00	46,50	82,60	3,03	238,00
	240,00	25,60	60,70	3,95	161,00
	290,00	31,30	95,30	3,04	139,00
	260,00	49,60	108,00	2,41	209,00
Agrem	290,00	34,80	94,60	3,07	163,00
	300,00	32,10	99,40	3,02	143,00
	301,00	29,80	102,70	2,93	123,00
	290,00	35,50	82,60	3,51	203,00
	315,00	35,00	79,20	3,98	249,00
	305,00	30,90	84,10	3,63	177,00
Tassoust	415,00	38,00	105,90	3,92	268,00
	420,00	42,90	108,60	3,87	304,00
	420,00	44,10	103,20	4,07	345,00
	420,00	44,80	99,00	4,24	381,00
	390,00	44,20	95,40	4,09	349,00
	400,00	34,50	109,10	3,67	210,00

Pour l'analyse et le traitement de ces résultats, nous faisons appel à la norme NA 17004 qui présente les techniques de l'évaluation de la résistance à la compression du béton en place dans les structures en béton. Dans cette analyse, nous cherchons la résistance caractéristique à la compression sur site, pour laquelle 5 % de la population formée par toutes les déterminations possibles de résistance du volume de béton considéré sont censés être inférieurs. Le nombre de points de mesure (résultats) est n=29.

La résistance moyenne mesurée sur site est alors :  $f_{moy} = \sum_{i=1}^{29} f_{ci} = 222,03 \text{bars}$

La résistance caractéristique à la compression sur site de la zone d'essai (parc de réservoir expertisé) est

donnée par la relation :  $f_c = f_{moy} - k.s$

K est indiqué dans les dispositions nationales Algériennes. En l'absence de valeur, elle est prise égale à 1,48.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{ci} - f_{moy})^2}{n-1}} = 72,51$$

L'écart type « s » des résultats est donné par la relation suivante :

La résistance caractéristique à la compression du béton des réservoirs du parc expertisé, géré par l'ADE

est alors :  $f_c = f_{moy} - k.s = 114,72 \text{ bars}$

Conformément au fascicule 74, les bétons utilisés dans la construction des réservoirs d'eau doivent être dosés à  $400 \text{ kg/m}^3$  et doivent avoir comme résistance caractéristique 25 Mpa au minimum. Les réservoirs expertisés ont été réalisés par le même maître d'ouvrage (Direction de l'Hydraulique de Wilaya), les entreprises réalisatrices de ces ouvrages ont répondu à un même cahier de prescription technique basé sur le fascicule 74 même s'ils ont été réalisés à des périodes différentes. Donc les bétons fabriqués devaient répondre aux mêmes conditions de cahier des charges.

Au vu de l'analyse statistique menée conformément à la norme NA 17004, nous déduisons que la résistance à la compression du béton des réservoirs du parc est de qualité médiocre.

#### 1.8.10. Présence de végétation

La végétation (arbres et arbustes) pousse directement sur le remblai autour des réservoirs. Ce défaut est générateur de défauts plus graves. En premier lieu pour les matériaux (à cause des matières organiques agressives et du maintien de l'humidité) et en second lieu pour la structure (à cause de l'action mécanique des racines).



**Figure 13** : Présence de végétations autour du réservoir Ouled Aissa [Photo Hammoum].

Douze (12) réservoirs expertisés sur le parc présentent cette pathologie de présence de végétation autour des réservoirs, empêchant même dans certain sites l'accès à la chambre des vannes, ceci est révélateur de l'abondance de ces ouvrages par les organismes de gestion.

### 1.8.11. Suintement

C'est la présence d'humidité parfois chargée en sels après percolation à travers le béton, de taches blanches en surface du béton, provenant de la carbonatation. Le suintement est causé par la mauvaise étanchéité de l'ouvrage et l'efflorescence. Ce défaut se manifeste par la présence de taches d'humidité sur la paroi. Six (6) réservoirs expertisés sur le parc présentent cette pathologie de suintement. Sur les réservoirs présentant cette pathologie, nous avons observé des traces de fuites au niveau de la bande de fond de la paroi, laquelle bande est la plus sollicitée en traction tend la pression hydrostatique est la plus élevée. Nous liions cette pathologie à la présence de ségrégation au droit de ces suintements. La photo qui suit montre des suintements et des efflorescences sur une surface équivalente à 0,50 m<sup>2</sup> au fond de la paroi. Cette zone est caractérisée par une forte densification des aciers, elle compte trois types d'aciers verticaux (armatures d'attente, armatures d'encastrement paroi-radier et enfin armatures de répartition) ainsi que des armatures horizontales. Les gros graviers (15/25 mm) ont du mal à se mettre en place dans cette concentration d'acier et l'étroitesse de l'épaisseur de la paroi. L'opération de vibration du béton est difficile car l'aiguille de vibration a des difficultés à se frayer un chemin dans cette zone. Par conséquent, cette zone est très favorable à ce phénomène de ségrégation et par voie de conséquence de suintement.



Figure 14 : Suintement au réservoir Haddada [Photo Hammoum].

### 1.8.12. Efflorescence

C'est une tache blanche en surface du béton, provenant de la carbonatation. Elle est due à la mauvaise étanchéité de l'ouvrage. Elle a pour conséquences, la formation d'une pellicule d'efflorescence et peut être évolutive. Il faut être attentif aux efflorescences le long des aciers (risque de corrosion). Cinq (5) réservoirs expertisés sur le parc présentent cette pathologie d'efflorescence. Ceci est dû à la mauvaise porosité du béton constituant les parois et donc la mauvaise qualité du béton. Comme la qualité du béton est médiocre (voir défaut lié à la qualité du béton), cette pathologie était prévisible dans le parc expertisé.



**Figure 15** : Efflorescence au réservoir Harrathen [Photo Hammoum].

### 1.8.13. Fissures

La fissuration est une ouverture linéaire au tracé plus ou moins régulier dont la largeur est comprise entre 0,2 mm et 2 mm. Les fissures peuvent être longitudinales, transversales ou orientées. Ces fissurations apparaissent en général sur des surfaces soumises à une dessiccation (élimination de l'eau) excessive ou retrait avant la fin de prise du béton. Lorsque les fissures sont obliques, elles sont causées probablement à la construction ou résultant d'un tassement différentiel ou encore suite à un effet horizontal tel qu'un séisme. Ces fissures ont pour conséquence la perte de stabilité et la perte de la fonction d'étanchéité. Les fissures peuvent reproduire le quadrillage des armatures. Alors elles apparaissent à la construction par suite d'une vibration des armatures insuffisamment enrobées. Si les armatures ne sont pas protégées localement, cela va provoquer leur corrosion suite aux fuites et suintements qu'elles provoqueraient. Cinq (5) réservoirs expertisés sur le parc présentent cette pathologie de fissures. Les fissures en question sont obliques sur les parois des réservoirs, non parallèle aux axes principaux de la paroi. Elles sont localisées à la liaison paroi-radier traversantes dans le béton armé évoluent dans le temps, compromettant ainsi l'étanchéité de l'ouvrage. Nous tacherons de leur donner une explication à ces fissures, au chapitre 3, en privilégiant la piste de l'effet hydrodynamique provoqué par la sollicitation sismique.



**Figure 16** : Fissures horizontales et obliques au réservoir Ouled Aissa [Photo Hammoum].

#### 1.8.14. Défaut d'enrobage des armatures

C'est lorsque l'enrobage inférieur à celui indiqué dans le règlement ou celui imposé par l'environnement (atmosphère agressive). L'absence d'enrobage peut entraîner un défaut l'adhérence avec impossibilité de mobiliser localement des efforts de traction dans les aciers. Quatre (4) réservoirs expertisés sur le parc présentent cette pathologie de défaut d'enrobage des armatures. Nous présentons dans la figure ci-après un réservoir qui présente sur la quasi-totalité de sa paroi cette pathologie. Ce défaut d'enrobage remonte à la phase de réalisation, ceci pose donc un autre problème de control et de suivi des travaux. Ce défaut qui a survenu lors de la réalisation a provoqué un gonflement puis une épaufrure. L'épaufrure à son tour a entraîné des aciers dénudés qui à long terme se sont corrodés. Ce réservoir nous paraît très intéressant d'un point de vue pathologique, aussi il sera traité en détail comme application pratique dans le chapitre 4 « dans l'approche par expertise ».



**Figure 17 :** Absence d'enrobage des aciers verticaux du réservoir Ouled Aissa [Photo Hammoum].

#### 1.8.15. Gonflement

C'est l'augmentation du volume du béton. Cette pathologie est causée par le gel, attaque chimique, phénomène d'alcali-réaction (faïençage). Elle a pour conséquences des fissures puis un écaillage. Trois (3) réservoirs expertisés sur le parc présentent cette pathologie de gonflement.



**Figure 18 :** Gonflement au niveau de la ceinture supérieure du réservoir Tassoust [Photo Hammoum].

### 1.8.16. Proportions et analyse des défauts dans le parc Algérien

L'enquête sur le parc de la commune témoin peut être résumée dans le tableau qui suit, où nous résumons la proportion de présence de chaque défaut dans le parc expertisé.

La mauvaise qualité du béton est le défaut le plus fréquemment rencontré sur le parc expertisé avec un taux de 100%. Le défaut de disposition d'évacuation des eaux ainsi que la corrosion des pièces métalliques occupent la seconde place dans les défauts les plus fréquemment rencontrés avec un taux de 94,74%. La moitié des défauts (Aciers dénudés, corrosion des aciers, suintement, efflorescence, écaillage, fissures, défaut d'enrobage, gonflement) occupent pratiquement la même place avec un taux variant de 16 à 31 %. Leur proportion est proche les uns des autres, car ces défauts sont dépendants les uns des autres et font partie d'un même scénario de vieillissement.

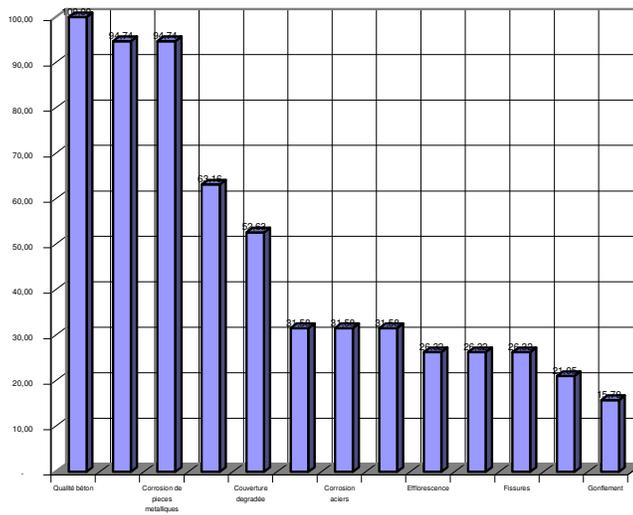


Figure 19 : Proportions des défauts dans le parc expertisé.

Le scénario de vieillissement le plus fréquemment rencontré dans le parc Algérien peut se résumer ainsi : Un défaut d'enrobage des aciers avec les surtensions peuvent entraîner à leur tour une épaufrure ou écaillage du béton, qui aura pour effet de dénuder les aciers. Ces aciers dénudés laissés à l'air libre finiront à long terme par se corroder. Cette corrosion induira une diminution de la section des aciers avant d'aboutir à la perte de fonction de l'élément résistant du réservoir.

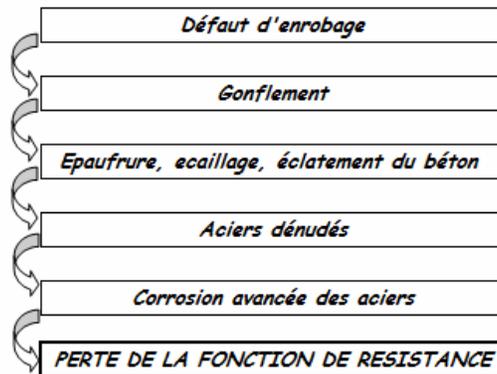


Figure 20 : Scénario de vieillissement « perte de résistance d'un élément résistant du réservoir »

**Tableau 3 : Identification des défauts par réservoir**

Nom du réservoir	Qualité Du béton	Disposition d'évacuation des eaux	Corrosion de pièces métalliques	Présence végétation	Couverture dégradée	Aciers dénudés	Corrosion aciers	Suintement	Efflorescence	Ecaillage	Fissures	Défaut enrobage	Gonflement
Bazoul	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Tassoust	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1
Laakabi	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Harathen	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mezoui	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Hadada inf	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Hadada sup	1	1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ouled Aissa inf R3	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0
Ouled Aissa inf R1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Ouled Aissa inf R2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Ouled Aissa sup 1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Ouled Aissa sup 2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
La crête R1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
La crête R2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
La crête R3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
La crete R4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
La crete jumelé gauche	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
La crête jumelé gauche	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
La crête surélève	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>12</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>
<b>Taux</b>	<b>100,00</b>	<b>94,74</b>	<b>94,74</b>	<b>63,16</b>	<b>52,63</b>	<b>31,58</b>	<b>31,58</b>	<b>31,58</b>	<b>26,32</b>	<b>26,32</b>	<b>26,32</b>	<b>21,05</b>	<b>15,79</b>

**Légende :**

- (1) pour « **présence de défaut** »
- (0) pour « **absence de défaut** »

## 1.9. Conclusion

---

A l'issu de ce chapitre nous retiendrons les idées fortes suivantes :

### **Du constat d'une situation .....**

Le parc de réservoirs géré par l'Algérienne des eaux est majoritairement constitué de réservoirs de forme circulaire, d'aspect esthétique acceptable avec une sorte de systématisation des silhouettes où des réservoirs types sont adaptés d'un site à un autre.

On se rend compte à travers l'évolution historique de l'entreprise de gestion, de près d'un demi siècle retracé dans ce chapitre qu'il y'a eu inflation de structures en charge des ouvrages hydrauliques. On peut dire qu'aucun schéma stable de gestion n'a pu fonctionner de manière correcte. En somme, la gestion des ouvrages hydrauliques s'est orientée fondamentalement sur l'entreprise hydraulique étatique. Finalement, les ouvrages hydrauliques de génie civil sont réalisés aux prix et moyen financiers importants, sans que l'on se préoccupe de leur gestion.

Le parc des réservoirs apparait donc mal documenté, voire pas du tout et l'acquisition de données sur l'ensemble du patrimoine est complexe et couteuse du fait de l'hétérogénéité des réservoirs sur un vaste territoire.

### **à l'expression d'un besoin.**

Un ouvrage de génie civil vieillit dans le temps et devient moins performant et par voie de conséquence vulnérable aux aléas naturels. On montre facilement que les coûts de maintenance et de réhabilitation augmentent au fur et à mesure du vieillissement de l'ouvrage, alors même que le niveau de performance décroît. Dans le temps, il devient onéreux de l'entretenir. C'est pour ces raisons qu'il est important de passer par un système expert qui puisse placer et dicter les priorités d'intervention des organismes de gestion, tenant compte des contraintes budgétaires significatives.

Finalement, 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 ?*

### **Le contexte de notre recherche.**

Notre travail de recherche consiste à proposer des méthodes pour évaluer la vulnérabilité ou la criticité des réservoirs, afin d'améliorer la gestion patrimoniale des réservoirs. Il s'agit de fournir, dans le cadre du diagnostic rapide des réservoirs :

- une évaluation de la vulnérabilité du parc d'ouvrages d'un gestionnaire,
- une vision globale de la vulnérabilité de son parc d'ouvrages,
- une meilleure programmation les travaux de maintenance sur l'ensemble du parc des réservoirs,;
- sur quel composant du réservoir doit être mené le diagnostic approfondi,
- une évaluation de l'impact d'éventuels travaux de maintenance sur le niveau vulnérabilité du parc de réservoirs.

Il est bien sûr évident que ce travail doit aboutir à des méthodes utilisables par les gestionnaires de réservoirs. Cela signifie que notre recherche doit permettre des développements dans un outil d'aide aux gestionnaires, à travers le **SIG Réservoirs** qui permet de rattacher des informations géo-référencées.

Notre recherche est menée en se basant sur le fait que la gestion de patrimoine d'ouvrages est un problème complexe qui induit de nombreuses décisions dans un contexte multi acteurs, multicritères, absence de méthodologie, mécanismes de vieillissement complexes et multiples, imprécision et incomplétude des informations, manque d'archives, manque de communication, insuffisance de données, il est nécessaire de ***recourir au jugement des experts***.

**La démarche à suivre pour répondre à cette problématique.**

Pour notre recherche, nous développerons plusieurs méthodes adaptées à nos besoins :

- une méthode physique basée sur un model mathématique,
- une méthode issue des sciences de l'ingénieur, basée sur une approche experte,
- une méthode issue de la sûreté de fonctionnement, basée sur l'analyse fonctionnelle et l'analyse des défaillances des réservoirs,
- une méthode issue des sciences de l'information géographique, comme les SIG, les bases de données spatiales, le géo-référencement des informations, les représentations cartographiques...

Le plan du manuscrit a été pensé de telle manière à consacrer un chapitre à chaque méthode de diagnostic et d'expertise. Ces méthodes sont exposées dans l'ordre où elles sont annoncées plus haut. Vu que notre recherche s'inscrit dans un environnement pratique de la profession (expertise), il nous a paru logique d'introduire à la fin de chaque chapitre une application pratique, dans le souci de rendre la méthode utilisable par les ingénieurs en charge des expertises.

Notons enfin, que la lecture intégrale du manuscrit peut laisser paraître quelques redondances. Elles ont été volontaires et ont pour but de rendre la lecture des chapitres quasi indépendante. Ainsi, le lecteur pourra, s'il le désire, se contenter de la lecture du chapitre traitant de la méthode d'expertise et de l'application pratique de son choix. Quant au lecteur amateur de solutions informatiques, bases de données et Système d'information géographiques, il trouvera une application informatique **SIG Réservoirs**, qui est un formidable outil d'aide à la décision pour les gestionnaires d'ouvrages.

## **2. Chapitre 2 : Synthèse bibliographique**

## 2.1. Introduction

---

De nombreux gestionnaires de parcs d'ouvrages et d'autres organismes ont développé différentes méthodes pour évaluer les ouvrages de génie civil à des fins de diagnostic, d'analyse des risques et de programmation d'actions de maintenances. Ces méthodes peuvent être groupées en deux familles (Zwingelstein, 1996) : les **méthodes internes** et les **méthodes externes** d'analyse de risques (Talon et al, 2009).

Les **méthodes internes** reposent sur la connaissance profonde du fonctionnement du système étudié (un ouvrage en génie civil). A partir de modélisations, il est alors possible de prévoir son comportement futur et d'analyser ensuite les risques. Selon le type de modèle décrivant le système, on distingue deux approches : La modélisation physique et La modélisation fonctionnelle par la Sûreté de Fonctionnement.

Les **méthodes externes** s'appliquent dans des contextes où la modélisation des mécanismes (physiques ou fonctionnels) n'est techniquement pas possible ou pas adaptée au niveau de préoccupation, compte tenu de sa complexité ou de son coût. En fonction des informations disponibles, on distingue les méthodes basées sur l'analyse statistique et celles basées sur l'expertise.

Dans ce chapitre, nous allons présenter ces quatre familles d'approche de l'analyse de risque, valable dans l'industrie comme en génie civil. Pour chacune d'elle, les applications aux réservoirs seront examinées.

## 2.2. Approche par des modèles physiques

---

Les modèles physiques sont des méthodes traditionnelles basées sur la modélisation mécanique des processus continus ou discontinus de dégradation du système : L'ouvrage est examiné sous l'angle de sa sécurité structurale, à partir des équations mathématiques d'états limites régissant les phénomènes et des modèles mécaniques de comportement de rupture. Elle implique une connaissance approfondie du système et sa représentation sous forme de modèles physiques et mathématiques, appuyés par simulation numérique.

Nous pouvons classer les modèles physiques disponibles en deux catégories : Les modèles d'analyse de la stabilité (d'états limites) et les modèles d'analyse du comportement des matériaux et des ouvrages (d'étude du comportement). Dans le domaine des réservoirs de stockage des fluides, le modèle le plus connu est celui de Housner.

### 2.2.1. Modèle d'analyse de la stabilité selon la méthode d'Housner (états-limites)

Les modèles d'états-limites s'attachent à représenter soit les pertes de fonctionnalité d'un ouvrage (les états-limites de service), soit les modes de ruine ou les pertes d'équilibre statique (les états-limites ultimes). Ainsi, il permet d'apprécier la sécurité de l'ouvrage en déterminant les critères de stabilité liés aux états limites dans les conditions réelles d'exploitation.

Dans l'approche déterministe, le projeteur s'attache à vérifier que les contraintes développées dans la structure restent inférieures aux contraintes admissibles du matériau ou de la structure (Calgaro, 1996).

Dans le domaine des réservoirs et d'après l'Eurocode 8 (partie 4 : consacrée aux réservoirs), la stabilité d'ensemble du réservoir vis-à-vis de l'effondrement doit être satisfaite, sous l'effet de l'action sismique à

l'ELU. La stabilité d'ensemble se rapportant à un comportement de corps rigide peut être perdue par glissement ou renversement. Il y'a lieu de considérer la somme des deux moments de renversement (d'impulsion et d'oscillation). Quant à la vérification au glissement, nous considérons la somme de la force d'impulsion et de la force d'oscillation comme résultante des forces horizontales.

A titre d'illustration, la figure qui suit présente la modélisation d'un réservoir surélevé sollicité au séisme, tenant compte de l'effet hydrodynamique. Ouvrage particulièrement vulnérable à ce genre de sollicitation.

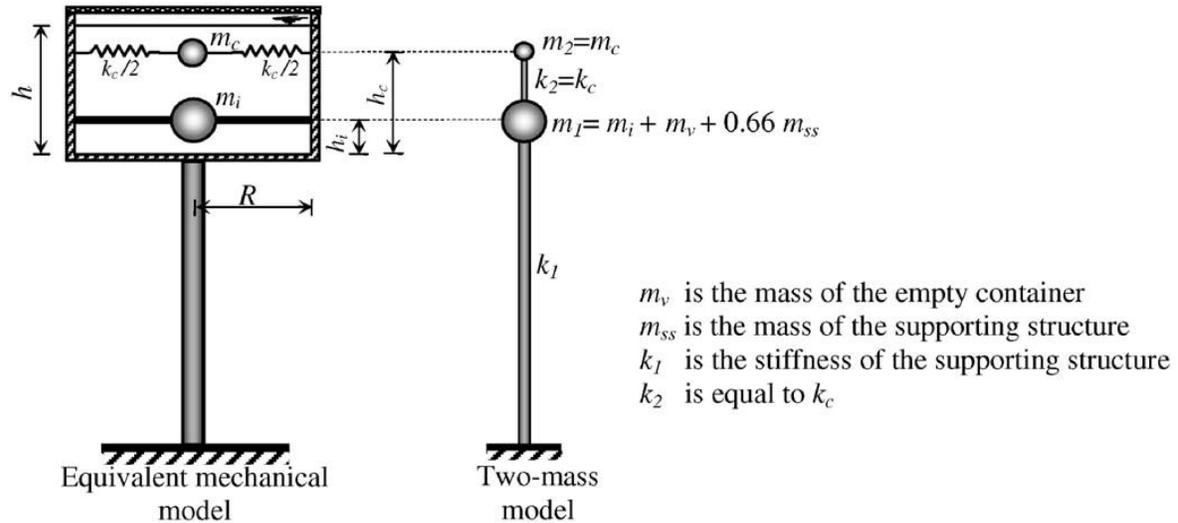


Figure 21 : Analyse hydrodynamique à deux degrés de liberté selon Housner (Livaoglu,2006)

### 2.2.2. Les Modèles d'analyse du comportement

Le modèle d'analyse du comportement de matériaux et des ouvrages est mis en œuvre en diagnostic et en analyse de risques afin d'apprécier la normalité des déplacements, de prédire les déplacements ou de déterminer les contraintes et les déformations. Par la modélisation des lois de comportement, il est alors possible d'estimer les évolutions futures d'un ouvrage sous l'effet d'un mécanisme et de mesurer les deux paramètres qui vont permettre de déterminer le risque

Dans le domaine des réservoirs et d'après l'Eurocode 8 (partie 4 : consacrée aux réservoirs), ces modèles du comportement sont utilisés dans le cadre de la vérification de l'état limite de service du niveau de fonctionnement minimal des réservoirs. Il y'a lieu de s'assurer que sous l'effet de l'action sismique de dimensionnement appropriée, le réservoir peut subir un endommagement de certains de ses composants, dans la mesure où toutefois, après les opérations de contrôle des dommages, la capacité du système peut être restaurée jusqu'à un niveau de fonctionnement prédéfini. Le réservoir conserve son étanchéité aux fuites du contenu. Un franc bord doit être prévu afin de prévenir les dommages au toit dus à l'effet de vague, ou pour prévenir le débordement du liquide lorsque le réservoir n'a pas de toit rigide.

La hauteur maximale des vagues, après oscillation, selon l'Eurocode 8 (CEN, 1998), est donnée par la relation suivante :

$$d_{\max} = 0.84 \frac{a_m}{g} R_i$$

Où :  $a_m$  est l'accélération du sol,  $R_i$  le rayon intérieur du réservoir et  $g$  l'accélération de la pesanteur.

A titre d'illustration, la figure qui suit présente la déformée du radier du réservoir posé au sol sous l'effet de vague induite par l'effet hydrodynamique.

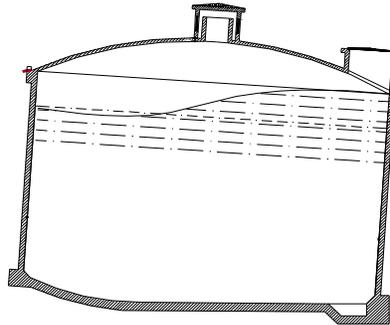


Figure 22 : Comportement d'un réservoir posé au sol, sous l'effet hydrodynamique.

### 2.3. Approche par expertise

Le diagnostic et l'analyse de risque peuvent être réalisés par expertise pure. Elle rentre dans le cadre d'études préliminaires ou de diagnostic rapide. Cette approche qui fait appel à l'inspection visuelle est pratiquée par les experts lorsqu'ils ne disposent pas de données suffisantes sur l'ouvrage. Elles reposent sur les seules connaissances et retour d'expérience des experts. Différentes études ont été menées pour développer l'analyse de risques par expertise. Certains domaines du génie civil formalisent cette approche par le développement d'outils d'aide à l'expertise basés sur la capitalisation des connaissances experte et du retour d'expérience.

#### 2.3.1. Etude du Cemagref

En 1990 Mathieu a proposé une méthode d'évaluation applicable aux réservoirs 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. Cette méthode est basée sur différents types d'analyses ; structurelles, fonctionnelles et environnementales, comme le montre l'organigramme ci-dessous.

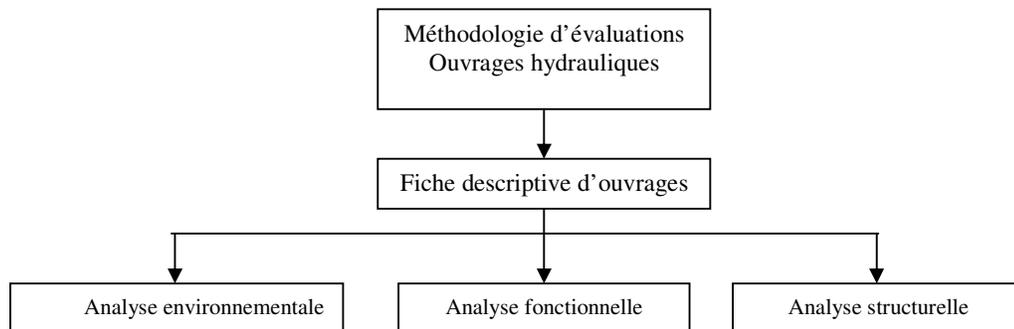


Figure 23 : Organigramme de la méthodologie d'évaluation des réservoirs (Mathieu, 2003).

Une note élémentaire  $N_{ei}$ , variant de 1 à 4, est attribuée pour chacun des paramètres d'évaluation. Le principe de notation correspond aux critères d'amplification des notes en fonction de l'accroissement des

risques. Chaque élément de notation est affecté d'un coefficient  $P_i$  de pondération (appelé poids). La note partielle d'un paramètre est alors obtenue par le produit :  $N_{ei} \cdot P_i$ .

Dans la cadre de la mise à jour du fascicule 74 consacré aux ouvrages destinés à contenir ou transporter de l'eau autres que les grands barrages et les canalisations, Mathieu et un groupe d'experts ont mis en commun leurs connaissances et leur expérience pour analyser les pathologies et codifier les problèmes de réparation et d'entretien de ces ouvrages. Leurs travaux s'inscrivent tout à fait dans les préoccupations des gestionnaires des réservoirs et qui ont vocation d'assurer la maintenance à partir de critères et d'éléments de diagnostic précis. L'étude dresse un bilan complet des pathologies et la réparation des ouvrages destinés à contenir ou à transporter des liquides réalisés en béton armé, béton précontraint ou en maçonnerie. Elle s'applique aux ouvrages suivants : réservoirs d'eau, stations d'épuration, stations de traitement, ouvrages de prise, de vidange, canaux, ponts canaux, stations de pompages, de relevage, bâches, bassins tampons, cheminées d'équilibre, bassins, déversoirs d'orage en assainissement, piscines.

Dans sa première partie, l'étude propose un classement des défauts apparents des ouvrages et une énumération des modes de réparation possibles pour chacun des cas. Tout défaut apparent est rangé dans une classe (et éventuellement dans une sous classe) qui correspond à un indice de gravité. L'étude définit six classes, dont la gravité va en croissant de A vers F comme suit :

- Indice de gravité A : - Ouvrage en bon état (neuf ou ancien), sans défaut.
- Indice de gravité B : Défaut existants dès la naissance de l'ouvrage et sans conséquences importantes autres qu'esthétique.
- Indice de gravité C : Défauts, dont l'évolution risque de se faire anormalement.
- Indice de gravité D : Défauts révélateurs d'une évolution de la dégradation d'un ouvrage. Ils sont rangés en 3 sous classes.
  - D1. Défauts qui indiquent un début d'évolution,
  - D2. Défauts qui indiquent une évolution avancée pour des pièces (ou ouvrages) qui ne sont pas en contact avec des liquides.
  - D3. Défauts qui indiquent une évolution avancée pour des pièces (ou ouvrage) en contact avec des liquides.
- Indice de gravité E : Défauts qui traduisent de façon très nette une modification du comportement de la structure et qui mettent en cause la durée de vie de l'ouvrage.
- Indice de gravité F : Défauts indiquant la proximité d'un état limite et nécessitant soit une restriction d'utilisation, soit la mise hors service de l'ouvrage.

La seconde partie, sous forme de compléments et d'annexes à la première partie, aborde principalement les techniques de réparation des fondations, structures et étanchéité et dresse un tableau récapitulatif des défauts apparents des ouvrages par l'indice de gravité.

Toujours dans la cadre de la mise à jour du fascicule 74, une seconde étude de Mathieu et *al.* s'intéresse au problème de l'étanchéité des réservoirs. Elle propose un tableau des critères de choix de l'étanchéité sur ouvrages neufs et des critères de choix de cette même étanchéité sur des ouvrages anciens non étanches. Elle souligne surtout l'importance du phénomène de l'alcali réaction et rappelle les principes de prévention. Les auteurs proposent un classement des réservoirs selon leur mode d'étanchéité en quatre

catégories comme suit :

- 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 n'assurant qu'une fonction mécanique,
- classe D : ouvrages construits à l'aide d'éléments préfabriqués.

### 2.3.2. Méthode GNDT

En Italie, l'utilisation d'une technique d'évaluation pour assigner des indices de vulnérabilité a été proposée pour la première fois par (Benedetti et Petrini, 1984). Cette technique a été développée par la suite par le Groupe national de défense contre les tremblements de terre (GNDT) du Conseil national de recherche de l'Italie (CNR). La méthode GNDT, maintenant largement utilisée, a permis de répertorier des milliers de bâtiments à travers l'Italie (Augusti et Ciampoli, 2000). Elle a été établie en distinguant les bâtiments en maçonnerie des bâtiments en béton armé.

L'indice de vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie se calcule, en combinant des informations descriptives (typologiques et qualitatives) et des informations quantitatives pour paramètres, décrits au tableau qui suit. Pour chaque paramètre, on définit la classe de vulnérabilité  $I_{vi}$  comprise entre A et D. La moins vulnérable est la classe A. Elle traduit la conformité de ce paramètre vis-à-vis de l'intégrité de la structure. La plus vulnérable est la classe D. Elle traduit la situation la plus défavorable, tandis que les classes B et C représentent des situations intermédiaires.

L'indice de vulnérabilité de base  $I_v$  se calcule comme la somme pondérée des  $I_{vi}$ . Le tableau 4 montre que chaque paramètre structurel est caractérisé par une classe de vulnérabilité entre A et D et par une pondération ( $W_i$ ) pour tenir compte de l'importance de chacun des paramètres dans le comportement globale de la structure.

**Tableau 4.** *Classes de vulnérabilité et pondération de chacun des paramètres structuraux, ajustés à partir des endommagements observés.*

N°	Paramètre	A	B	C	D	$W_i$
1	Type et organisation du système porteur	0	5	20	45	1
2	Qualité du système porteur	0	5	25	45	0,25
3	Résistance conventionnelle	0	5	25	45	1,5
4	Implantation et fondations	0	5	25	45	0,75
5	Planchers et toitures (diaphragme)	0	5	15	45	Variable
6	Configuration en plan	0	5	25	45	0,5
7	Configuration en élévation	0	5	25	45	Variable
8	Maçonneries	0	5	25	45	0,25
9	Toiture	0	15	25	45	Variable
10	Éléments non structuraux	0	0	25	45	0,25
11	État de conservation ou maintenance	0	5	25	45	1

Pour les paramètres 5,7 et 9, la pondération  $W_i$  varie entre 0,5 et 1, suivant la classe de vulnérabilité.

### 2.3.3. Etude de Belhouene

Cette étude propose de quantifier la vulnérabilité sismique des bâtiments en béton armé, en développant la méthode de l'index de vulnérabilité. Ceci a nécessité la définition des paramètres influant sur la détermination de cet index, ainsi que de leurs coefficients de pondération. L'index ainsi calculé, permet la classification des bâtiments. Pour cette classification, elle propose trois classes. La première regroupe les structures ayant un bon comportement, la seconde, un comportement moyen et enfin, la troisième regroupe les constructions ayant une mauvaise tenue au séisme. Elle développe aussi un code de calcul en langage Delphi. Cet outil développé permet de faire le diagnostic des bâtiments existants en béton armé par l'analyse de la vulnérabilité sismique. Cette méthode est développée en tenant compte de l'influence des éléments structuraux et non structuraux sur la réponse sismique de la construction. Elle consiste à attribuer une valeur numérique à chaque bâtiment, dite index de vulnérabilité  $I_v$ , qui est une représentation de sa qualité sismique.

Les paramètres utilisés pour le calcul de l'index de vulnérabilité sont au nombre de quatorze, définis par l'approche experte, basée sur le retour d'expérience de sismicité en Algérie. Afin de caractériser chacun des paramètres de l'étude, un certain nombre d'informations sur le bâtiment est nécessaire, obtenues par le renseignement de fiche d'évaluation ou d'enquêtes développée dans la cadre de cette recherche.

**Tableau 5.** Classification des paramètres et leur coefficient  $K_i$ .

$N^{\circ}$	Paramètre	Classe A	Classe B	Classe C
1	Système de contreventement	0,25	1,25	2,25
2	Qualité du système de contreventement	0,25	0,50	0,75
3	La capacité sismique	0,00	0,25	0,50
4	Type de sol	0,25	0,50	0,75
5	Diaphragme horizontal	0,25	0,50	0,75
6	Régularité en plan	0,25	0,50	0,75
7	Régularité en élévation	0,25	0,75	1,75
8	Qualité des nœuds	0,25	0,50	0,75
9	Phénomène du poteau court	0,25	0,50	0,75
10	Détails	0,25	0,50	0,75
11	Maintenance	0,25	0,75	1,25
12	Modifications	0,25	0,50	0,75
13	Entrechoquement	0,25	0,50	0,75
14	Implantation de l'ouvrage	0,25	0,50	0,75

L'index de vulnérabilité «  $I_v$  » s'exprime alors comme la somme de :  $I_v = \sum_{i=1}^{14} K_i$

**Tableau 6.** Classification des structures en fonction de la vulnérabilité «  $I_v$  ».

Classe	Verte	Orange	Rouge
Index de vulnérabilité $I_v$	3,25 - 6,25	6,25 - 10,25	10,25 - 13,25

La validation de cette théorie a été réalisée sur plusieurs exemples tirés des rapports d'expertise de l'organisme national de contrôle technique des constructions « CTC Ouest ».

### 2.3.4. Méthodes de l'indice de vulnérabilité sismique utilisées en Algérie

La ville de Blida est classée comme étant région à forte sismicité (zone III) d'après le Règlement Parasismique Algérien 99/2003. De part le passé, la ville a été secouée par plusieurs séismes destructeurs. Blida est un grand centre administratif, industriel, commercial, militaire, universitaire, sportif, et sanitaire. De ce fait, elle requière une attention particulière pour la protéger contre le phénomène sismique. A cet effet, un scénario catastrophe sismique de la ville de Blida a été réalisé en utilisant la méthode RADIUS (Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas Against Seismic Disaster). L'analyse est faite en considérant les aspects géologiques du terrain ainsi que les aspects structuraux du système urbain de la ville. Ce scénario a permis d'évaluer les pertes humaines et matérielles provoquées par un éventuel séisme, ceci permettra aux autorités locales de mener des actions préventives pour réduire les dégâts.

A Alger, et plus particulièrement dans les communes les plus anciennes, le bâti existant est constitué en majeure partie de constructions en maçonnerie (pierre et/ou brique). Ce parc immobilier constitue un patrimoine de valeur socio-économique et culturelle importante. Les expertises effectuées sur ce bâti ainsi que les enquêtes post-sismique qui ont eu lieu sur ce territoire ont montré la faible résistance de ce type de construction vis-à-vis du séisme. En conséquence, l'étude de la vulnérabilité sismique de ces constructions s'avère nécessaire et constitue une étape primordiale pour la réduction des pertes dues aux séismes dans cette ville. Cette vulnérabilité peut être réduite si des mesures préventives sont prises. La méthode de l'indice de vulnérabilité consiste à identifier des paramètres structuraux ou non structuraux ayant une influence sur la réponse sismique de la structure. En se basant sur les développements effectués par (Benedetti et al., 1988), on en propose le tableau 7 suivant dont des paramètres interviennent pour l'estimation de la qualité sismique des constructions à Alger.

**Tableau 7.** Paramètres appliqués dans la méthode de l'indice de vulnérabilité pour les constructions en maçonnerie en Algérie.

N°	Paramètre	A	B	C	D	Facteur de pondération
1	Résistance totale au cisaillement	0	5	25	45	1,5
2	Régularité en plan	0	5	25	45	0,5
3	Régularité en élévation	0	5	25	45	0,5
4	Connexion de murs	0	5	25	45	1
5	Type de murs	0	5	25	45	0,25
6	Plancher	0	5	25	45	0,25
7	Toiture	0	15	25	45	0,25
8	Conditions de sol	0	5	25	45	0,75
9	Détails	0	0	25	45	0,25
10	Maintenance	0	5	25	45	1
11	Socioculturel	0	5	25	45	0,5

Les résultats de cette étude, appliquée sur la ville d'Alger, sont satisfaisants et ont été conformités avec les endommagements enregistrés lors de séisme de Zemouri du 21 mai 2003.

## 2.4. Approche statistique

---

Les stratégies de maintenance reposent sur la prévision de l'évolution des ouvrages, en fonction de leur environnement et des sollicitations auxquelles ils seront soumis. Ces stratégies dépendent du type du parc d'ouvrages (Cremona, 2002). Un parc d'ouvrage est caractérisé notamment par le nombre d'ouvrages le composant (pour les parcs d'ouvrages ponctuels : ponts, barrages,... ou pour les parcs d'ouvrages linéaires : réseaux enterrés, routes, digues,...) et par leur homogénéité ou leur hétérogénéité. Dans le contexte d'un parc important d'ouvrages ponctuels homogènes ou d'ouvrages linéaires homogènes, où des données statistiques sont disponibles et où les mécanismes sont bien maîtrisés, la maintenance basée sur la fiabilité est une méthode intéressante. Elle est fondée entre autres sur la connaissance des taux de fiabilité des éléments du système (Zwingelstein, 1996) :

- identification des paramètres rentrant dans les conditions d'états-limites,
- caractérisation statistique de ces paramètres (lois et moments),
- recherche des probabilités de non respect des conditions d'état-limite.

Cette approche est couramment appliquée dans l'industrie Offshore et le nucléaire, mais aussi aux réseaux de distribution. Nous renvoyons le lecteur intéressé vers (Zwingelstein, 1996).

La maintenance basée sur la fiabilité trouve ses limites dès lors que les données sont en quantités insuffisantes : mesures expérimentales difficiles, données statistiques peu nombreuses ... etc. Les calculs de probabilité deviennent alors rapidement complexes, voire impossibles et leur validité devient difficile à démontrer. Dans le cadre d'un parc d'ouvrages ponctuels ou linéaires hétérogènes, dans des situations de structures mal connues, les données disponibles sont de mauvaise qualité ou en petite quantité et rendent difficile la prévision de l'évolution des dégradations. Dans ce contexte, la façon la plus simple d'évaluer les évolutions futures des dégradations est d'examiner les lois d'évolution d'ouvrages existants de même conception et ayant connu des mécanismes analogues en se basant sur le retour d'expérience (Cremona, 2002).

Sauf que, l'analyse de la dégradation d'une structure de génie civil en béton armé, devient plus complexe quand plusieurs facteurs de dégradation se combinent. Ainsi, une dégradation qui génère de la fissuration entraîne l'accélération d'autres dégradations qui profitent de cette fissuration. De plus, l'expérience a montré que les conditions d'exposition, par nature très variables à petite échelle pour un ouvrage donné (orientation, exposition au vent, à la pluie, au soleil, ...), modifient considérablement la vitesse des mécanismes de dégradation, en particulier dans le cas de la carbonatation qui dépend des conditions d'humidité. Cette difficulté est prise en compte grâce à l'analyse statistique. Un phénomène de dégradation est alors décrit avec une probabilité d'occurrence. En conséquence, la durée de service limite se verra également établie avec un intervalle probabiliste (figure 24).

Par ailleurs, l'analyse du cycle de vie s'applique à des éléments ou parties d'ouvrages plus ou moins critiques. Le passage à l'échelle de l'ouvrage peut se faire de plusieurs façons.

Une première méthode déterministe consiste à faire un recalcul de l'ouvrage, partant de données contemporaines réelles sur les matériaux et la géométrie. Le degré de sécurité par rapport aux états limites de conception ou par rapport aux conditions actuelles de chargement peut ainsi être apprécié. Il est également possible d'utiliser des modèles intégrant la variabilité spatiale et temporelle des propriétés des matériaux et des actions exercées sur les ouvrages pour estimer leur performance.

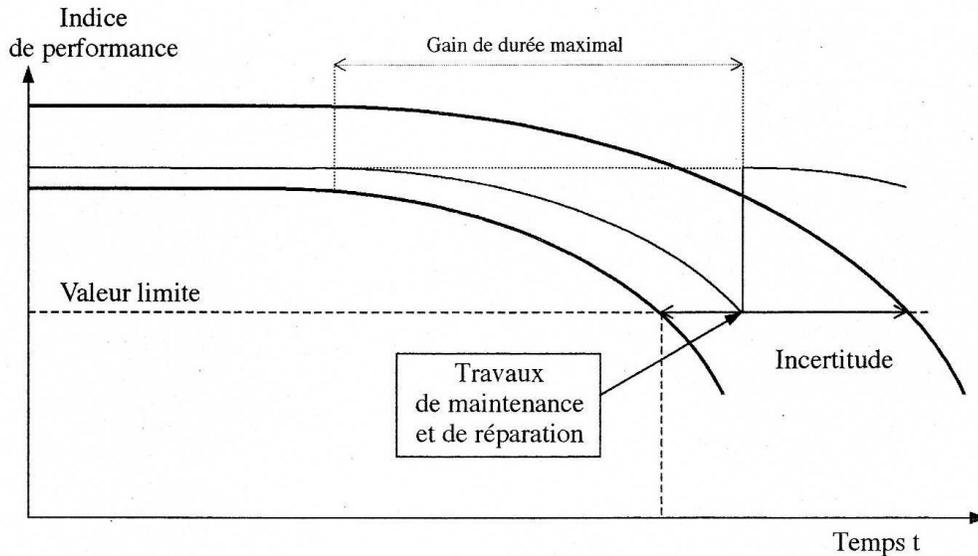


Figure 24 : Variation de l'évolution de la performance en fonction du temps.

## 2.5. La modélisation fonctionnelle par la sûreté de fonctionnement

La Sûreté de Fonctionnement est définie comme la **science des défaillances**. L'analyse de la sûreté de fonctionnement d'un ouvrage repose sur la prévision de l'évolution de sa performance (aptitude au service, sécurité structurale, durabilité), en fonction de l'environnement et des sollicitations auxquelles il est soumis. La réalisation d'une étude de sécurité des systèmes fait appel à différents outils d'analyse, très diversifiés quant à leurs performances, leur complexité. Seules, les caractéristiques essentielles des méthodes les plus utilisées ainsi que les critères permettent de les distinguer (critères techniques et d'usage). Les méthodes que nous présenterons dans cette section sont extraites de (Bouhlali, 2006).

### 2.5.1. Analyse Préliminaire des Risques / des Dangers (APR / APD)

L'Analyse Préliminaire des Risques (Dangers) a été développée au début des années 1960 dans les domaines aéronautiques et militaires. Cette méthode sert à identifier les risques d'un système au stade de sa conception, de les situer et par suite, de définir des règles et des procédures permettant d'éliminer ou de maîtriser les situations dangereuses et les accidents potentiels ainsi mis en évidence (Lievens, 1976). En conséquence, cette méthode ne nécessite généralement pas une connaissance approfondie et détaillée du système étudié.

La description des résultats obtenus s'effectue au moyen de divers modes de présentation :

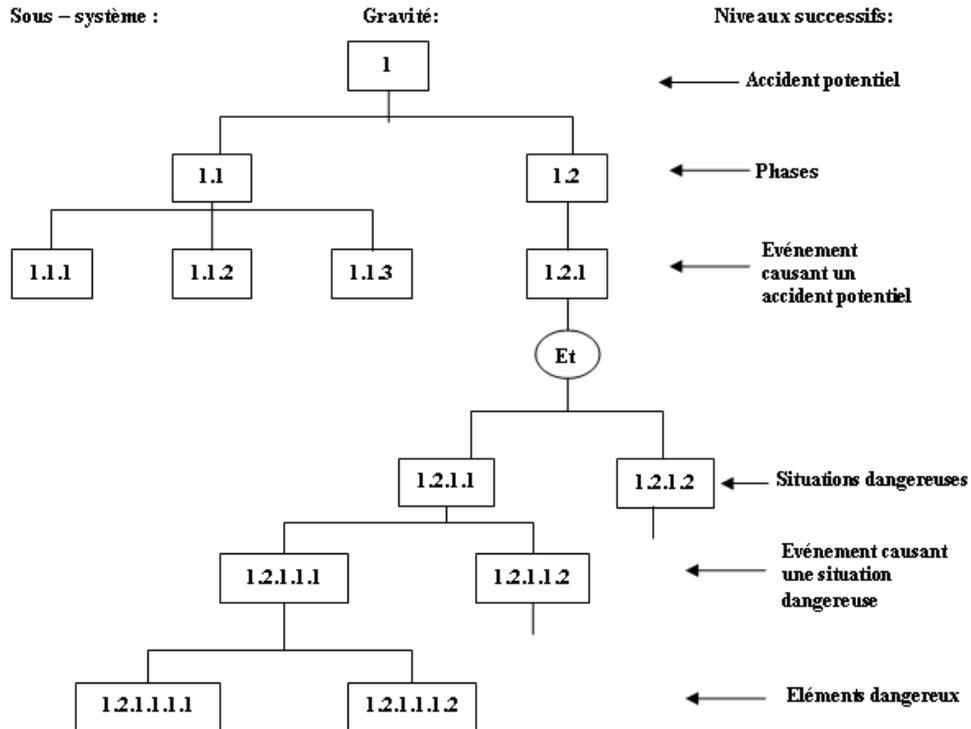
- Tableaux à colonnes : ils permettent d'ordonner les informations utiles en fonction de notions prédéfinies,
- Arbre logique : pour chaque sous-système étudié, comprenant mention de la gravité des conséquences en cas d'accident, cet arbre décompose l'enchaînement des circonstances qui conduisent à l'événement indésirable.

Le tableau est rempli par un spécialiste possédant une bonne connaissance du système, en tenant compte des relations dynamiques existantes entre les différentes étapes de l'analyse.

**Arbres logiques**

Une présentation différente des données issues de l'APR peut être obtenue en utilisant une structure de type arborescent (figure 25).

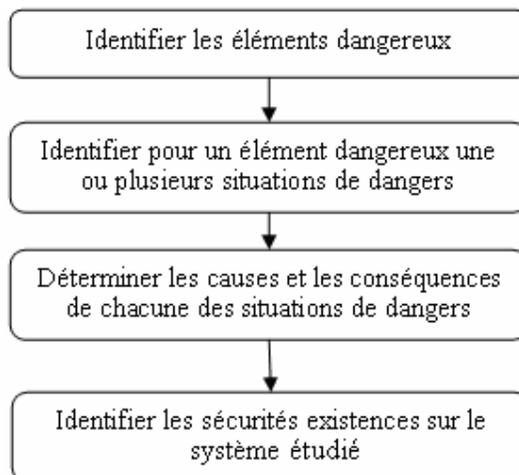
Pour chaque sous système étudié, comprenant mention de la gravité des conséquences en cas d'accident, cet arbre décompose l'enchaînement des circonstances qui conduisent à l'événement indésirable (répétition). Les notions utilisées restent inchangées par rapport à la présentation sous forme de tableaux. Seul diffère l'aspect, qui présente l'intérêt de mieux montrer l'enchaînement des causalités.



**Figure 25 :** Présentation sous forme d'arbre logique des données issues de l'analyse préliminaire des risques (Lievens, 1976).

**Méthodologie d'analyse préliminaire des risques**

La méthodologie d'analyse préliminaire des risques comporte quatre phases (figure 26).



**Figure 26 :** La méthodologie d'analyse préliminaire des risques.

### ***Limites et avantages de l'APR***

Le principal avantage de l'Analyse Préliminaire des Risques est de permettre un examen relativement rapide des situations dangereuses. Par rapport aux autres méthodes, elle apparaît comme relativement économique en terme de temps passé et ne nécessite pas un niveau de description du système étudié très détaillé. En revanche, l'APR ne permet pas de caractériser finement l'enchaînement des événements susceptibles de conduire à un accident majeur pour des systèmes complexes. Comme son nom l'indique, il s'agit à la base d'une méthode préliminaire d'analyse qui permet d'identifier des points critiques devant faire l'objet d'études plus détaillées. Elle permet ainsi de mettre en lumière les équipements qui peuvent nécessiter une étude plus fine menée grâce à des outils tels que l'AMDEC, l'HAZOP ou l'analyse par arbre des défaillances.

### **2.5.2. Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE) et de leur Criticité (AMDEC)**

C'est l'outil d'analyse le plus utilisé et l'un des plus efficaces parmi l'ensemble des techniques inductives disponibles. Introduite dans l'aéronautique depuis 1960, elle s'est peu à peu imposée dans le spatial, le nucléaire, la chimie, l'industrie automobile, etc. Elle commence par une description du système, de sa morphologie et de son fonctionnement. Ensuite, on recense les défaillances de chaque sous système ou composant.

Elle permet une analyse systémique et très complète des modes de défaillance des composants, de leurs causes et de leurs effets sur le système; on évalue ainsi l'importance des modes de défaillances vis-à-vis de la sûreté de fonctionnement; les résultats de l'analyse sont présentés sous forme de tableau. L'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) est une extension de l'AMDE qui inclut une analyse de criticité des modes de défaillances.

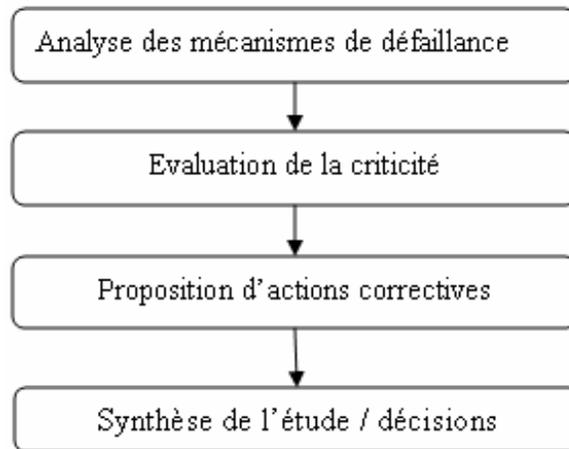
#### ***Méthodologie de l'AMDEC***

Phase 1 : Analyse des mécanismes de défaillance de manière exhaustive. Identification des mécanismes de défaillance de manière exhaustive.

Phase 2 : Evaluation de la criticité. Détermination des défaillances critiques par comparaison au seuil de criticité acceptable prédéfini.

Phase 3 : proposition d'actions correctives. Diminution du niveau de criticité des défaillances en agissant sur un ou plusieurs des critères (fréquence, gravité, probabilité de non détection de la défaillance).

Phase 4 : Synthèse de l'étude / décisions. Effectuer un bilan et fournir les éléments permettant de lancer les actions à effectuer.



**Figure 27** : La méthodologie AMDEC.

### **Limites et avantages de l'AMDEC**

L'AMDEC s'avère très efficace lorsqu'elle est mise en œuvre pour l'analyse de défaillances simples d'éléments conduisant à la défaillance globale du système. De par son caractère systématique et sa maille d'étude généralement fine, elle constitue un outil précieux pour l'identification de défaillances potentielles et les moyens d'en limiter les effets ou d'en prévenir l'occurrence.

Comme elle consiste à examiner chaque mode de défaillance, ses causes et ses effets pour les différents états de fonctionnement du système, l'AMDEC permet d'identifier les modes communs de défaillances pouvant affecter le système étudié.

Les modes communs de défaillances correspondent à des événements qui de par leur nature ou la dépendance de certains composants, provoquent simultanément des états de panne sur plusieurs composants du système. Les pertes d'utilités ou des agressions externes majeurs constituent généralement des modes communs de défaillance.

Dans le cas des systèmes particulièrement complexes comptant un grand nombre de composants, l'AMDEC peut être très difficile à mener et particulièrement fastidieuse compte tenu du volume important d'informations à traiter. Cette difficulté est décuplée lorsque le système considéré comporte de nombreux états de fonctionnement. Par ailleurs, l'AMDEC considère des défaillances simples et peut être utilement complétée, selon les besoins de l'analyse, par des méthodes dédiées à l'étude de défaillances multiples comme l'analyse par arbre des défaillances par exemple.

### **2.5.3. Méthode d'analyse Hazop**

La méthode Hazop, pour *Hazard Operability*, a été développée par la société Imperial Chemical Industries (ICI) au début des années 1970. Elle a depuis été adaptée dans différents secteurs d'activité. En considérant de manière systématique les dérives des paramètres d'une installation en vue d'en identifier les causes et les conséquences, cette méthode est particulièrement utile pour l'examen de systèmes thermo-hydrauliques, pour lesquels des paramètres comme le débit, la température, la pression, le niveau, la concentration... sont particulièrement importants pour la sécurité de l'installation.

### **Principe de Hazop**

La méthode de type Hazop est dédiée à l'analyse des risques des systèmes thermo-hydrauliques pour lesquels il est primordial de maîtriser des paramètres comme la pression, la température, le débit... L'Hazop suit une procédure assez semblable à celle proposée par l'AMDE. L'Hazop ne considère plus des modes de défaillances mais les dérives potentielles (ou déviations) des principaux paramètres liés à l'exploitation de l'installation. De ce fait, elle est centrée sur l'installation à la différence de l'AMDE qui est centrée sur les composants.

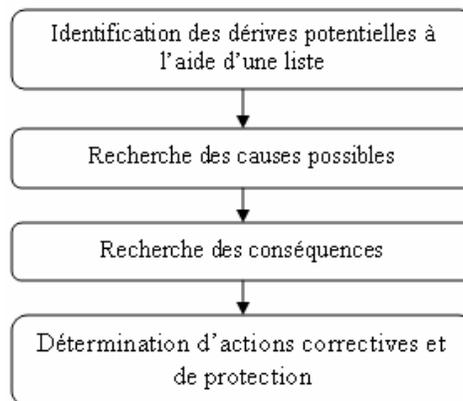
Pour chaque partie constitutive du système examiné (ligne ou maille), la génération (conceptuelle) des dérives est effectuée de manière systématique par la conjonction :

- De mots-clés comme par exemple «Pas de», «Plus de», «Moins de», «Trop de»
- Des paramètres associés au système étudié. Des paramètres couramment rencontrés concernent la température, la pression, le débit, la concentration, mais également le temps ou des opérations à effectuer.

A l'origine, l'Hazop n'a pas été prévue pour procéder à une estimation de la probabilité d'occurrence des dérives ou de la gravité de leurs conséquences. Cet outil est donc parfois qualifié de qualitatif. Néanmoins, dans le domaine des risques accidentels majeurs, une estimation a priori de la probabilité et de la gravité des conséquences des dérives identifiées s'avère souvent nécessaire. Dans ce contexte, l'Hazop doit donc être complétée par une analyse de la criticité des risques sur les bases d'une technique quantitative simplifiée.

### **Méthodologie de l'Hazop**

La méthodologie de l'Hazop est basée sur quatre phases comme on peut le constater sur la figure suivante :



**Figure 28 : La méthodologie de l' HAZOP.**

### **Limites et avantages de Hazop**

L'Hazop est un outil particulièrement efficace pour les systèmes thermo - hydrauliques. Cette méthode présente tout comme l'AMDE un caractère systématique et méthodique. Considérant, de plus, simplement les dérives de paramètres de fonctionnement du système, elle évite entre autres de considérer, à l'instar de l'AMDE, tous les modes de défaillances possibles pour chacun des composants du système. En revanche, l'Hazop permet difficilement d'analyser les événements résultant de la combinaison simultanée de plusieurs défaillances.

Par ailleurs, il est parfois difficile d'affecter un mot clé à une portion bien délimitée du système à étudier. Cela complique singulièrement l'identification exhaustive des causes potentielles d'une dérive. En effet, les systèmes étudiés sont souvent composés de parties interconnectées si bien qu'une dérive survenant dans une ligne ou maille peut avoir des conséquences ou à l'inverse des causes dans une maille voisine et inversement. Bien entendu, il est possible a priori de reporter les implications d'une dérive d'une partie à une autre du système. Toutefois, cette tâche peut rapidement s'avérer complexe.

#### **2.5.4. What – If ?**

La méthode dite «What-If ?» est une méthode dérivée de l'Hazop. Elle suit donc globalement la même procédure et les informations présentées au paragraphe précédent pour l'Hazop restent donc valables ici. La principale différence concerne la génération des dérives des paramètres de fonctionnement. Ces dérives ne sont plus dans ce cas envisagées en tant que combinaison d'un mot clé et d'un paramètre, mais fondées sur une succession de questions de type de la forme : «QUE (What) se passe-t-il SI (If) tel paramètre ou tel comportement est différent de celui normalement attendu ?». Il apparaît ainsi que l'efficacité de la méthode «What-If ?» repose en grande partie sur l'expérience des personnes réunies au sein du groupe de travail. Cette méthode paraît donc moins fastidieuse à mener que l'Hazop mais est réservée à une équipe expérimentée.

#### **2.5.5. Arbre des défaillances (ADD) ou bien Arbre des Causes (MAC)**

L'analyse par arbre des défaillances fut historiquement la première méthode mise au point en vue de procéder à un examen systématique des risques. Elle a été élaborée au début des années 1960 par la compagnie américaine Bell Telephone et fut expérimentée pour l'évaluation de la sécurité des systèmes de tir de missiles.

Visant à déterminer l'enchaînement et les combinaisons d'évènements pouvant conduire à un événement redouté pris comme référence, l'analyse par arbre des défaillances est maintenant appliquée dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique, le nucléaire, l'industrie chimique,...Elle est également utilisée pour analyser a posteriori les causes d'accidents qui se sont produits. Dans ces cas, l'évènement redouté final est généralement connu car observé. On parle alors d'analyse par arbre des causes, l'objectif principal étant de déterminer les causes réelles qui ont conduit à l'accident.

##### ***Principe de l'ADD***

L'analyse par arbre de défaillances est une méthode de type déductif. En effet, il s'agit, à partir d'un événement redouté défini a priori, de déterminer les enchaînements d'évènements ou combinaisons d'évènements pouvant finalement conduire à cet événement. Cette analyse permet de remonter de causes en causes jusqu'aux évènements de base susceptibles d'être à l'origine de l'évènement redouté.

Les évènements de base correspondent généralement à des :

- évènements élémentaires qui sont généralement suffisamment connus pour qu'il ne soit pas utile d'en rechercher les causes. Ainsi, leur probabilité d'occurrence est également connue,;
- évènements ne pouvant être considérés comme élémentaires mais dont les causes ne seront pas développées faute d'intérêt,

- évènements dont les causes seront développés ultérieurement au gré d'une nouvelle analyse par exemple,
- évènements survenant normalement et de manière récurrente dans le fonctionnement du procédé ou de l'installation.

Quelle que soit la nature des éléments de base identifiés, l'analyse par arbre des défaillances est fondée sur les principes suivants :

- ces évènements sont indépendants,
- ils ne seront pas décomposés en éléments plus simples faute de renseignements, d'intérêt ou bien parce que cela est impossible,
- leur fréquence ou leur probabilité d'occurrence peut être évaluée.

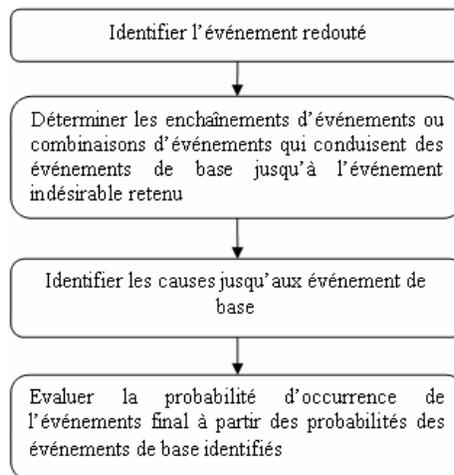
Ainsi, l'analyse par arbre des défaillances permet d'identifier les successions et les combinaisons d'évènements qui conduisent des évènements de base jusqu'à l'évènement indésirable retenu.

Les liens entre les différents évènements identifiés sont réalisés grâce à des portes logiques (de type «ET» et «OU» par exemple). Cette méthode utilise une symbolique graphique particulière qui permet de présenter les résultats dans une structure arborescente.

A l'aide de règles mathématiques et statistiques, il est alors théoriquement possible d'évaluer la probabilité d'occurrence de l'évènement final à partir des probabilités des évènements de base identifiés.

### ***Méthodologie de l'arbre de défaillance***

L'objectif principal de la méthode d'arbre des causes est l'analyse des causes des accidents.



**Figure 29 :** *La méthodologie de l'arbre des causes.*

La figure 30 représente un exemple d'un arbre des causes pour une fuite.

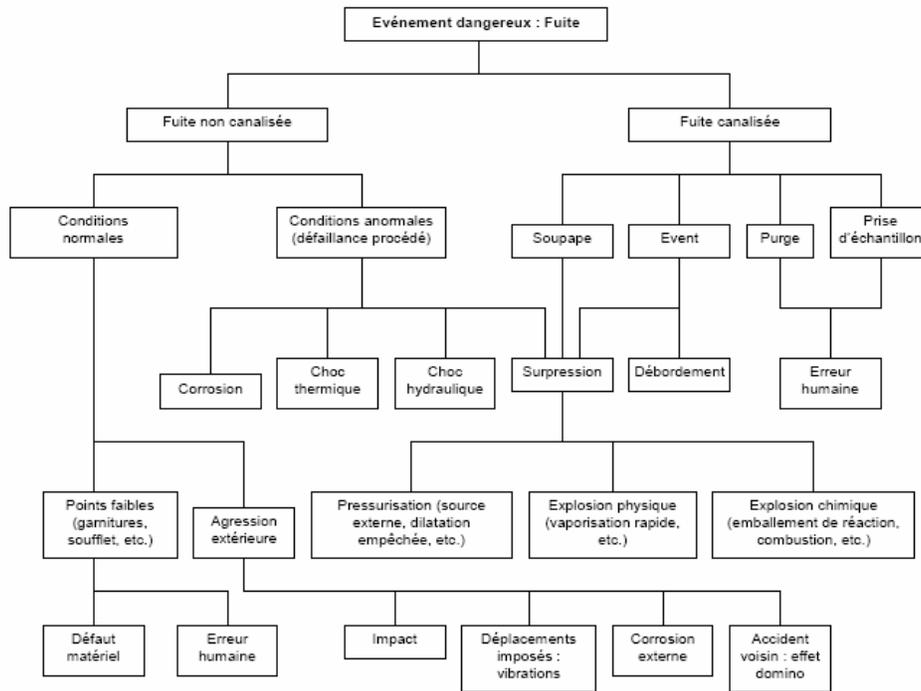


Figure 30 : Arbre des causes générique pour une fuite.

### Limites et avantages de l'ADD

Le principal avantage de l'analyse par arbre des défaillances est qu'elle permet de considérer des combinaisons d'événements pouvant conduire in fine à un événement redouté. Cette possibilité permet une bonne adéquation avec l'analyse d'accidents passés qui montre que les accidents majeurs observés résultent le plus souvent de la conjonction de plusieurs événements qui seuls n'auraient pu entraîner de tels sinistres. Par ailleurs, en visant à l'estimation des probabilités d'occurrence des événements conduisant à l'événement final, elle permet de disposer de critères pour déterminer les priorités pour la prévention d'accidents potentiels.

L'analyse par arbre des défaillances porte sur un événement particulier et son application à tout un système peut s'avérer fastidieuse. En ce sens, il est conseillé de mettre en œuvre au préalable des méthodes inductives d'analyse des risques. Ces outils permettent d'une part d'identifier les événements les plus graves qui pourront faire l'objet d'une analyse par arbre des défaillances et d'autre part, de faciliter la détermination des causes immédiates, nécessaires et suffisantes au niveau de l'élaboration de l'arbre.

Depuis une dizaine d'années, des logiciels informatiques sont commercialisés afin de rendre plus aisée l'application de l'arbre des défaillances. Ces outils se montrent très utiles pour la recherche des coupes minimales, la détermination des probabilités ainsi que pour la présentation graphique des résultats sous forme arborescente.

### 2.5.6. Arbre des événements (ADE)

L'analyse par arbre d'événements a été développée au début des années 1970 pour l'évaluation du risque lié aux centrales nucléaires à eau légère. Particulièrement utilisée dans le domaine du nucléaire, son utilisation s'est étendue à d'autres secteurs d'activité.

De par sa complexité proche de celle de l'analyse par arbre des défaillances, cette méthode s'applique préférentiellement sur des sous-systèmes bien déterminés. Elle apporte une aide précieuse pour traiter des systèmes comportant de nombreux dispositifs de sécurité et de leurs interactions. A l'instar de l'analyse par arbre des défaillances dont elle s'inspire, elle permet d'estimer les probabilités d'occurrence de séquences accidentelles.

Cette méthode est particulièrement utilisée dans le domaine de l'analyse après accidents en vue d'expliquer les conséquences observées résultant d'une défaillance du système.

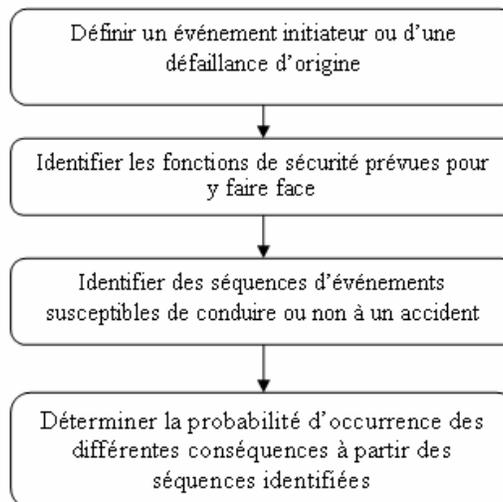
### **Principe de l'ADE**

L'analyse par arbre des défaillances, vise à déterminer, dans une démarche déductive, les causes d'un événement indésirable ou redouté retenu a priori. A l'inverse, l'analyse par arbre d'évènements suppose la défaillance d'un composant ou d'une partie du système et s'attache à déterminer les événements qui en découlent. A partir d'un événement initiateur ou d'une défaillance d'origine, l'analyse par arbre d'évènements permet donc d'estimer la dérive du système en envisageant de manière systématique le fonctionnement ou la défaillance des dispositifs de détection, d'alarme, de prévention, de protection ou d'intervention...

Ces dispositifs peuvent concerner aussi bien des moyens automatiques qu'humains (intervention des opérateurs) ou organisationnels (application de procédures).

### **Méthodologie de l'arbre des conséquences de l'ADE**

La méthode des conséquences utilise pour l'analyse après les accidents en vue d'expliquer les scénarios de défaillance ou bien de rupture.



**Figure 31** : La méthodologie de l'arbre de l'évènement.

La figure 32 montre un exemple d'arbre d'évènement dans le domaine industriel.

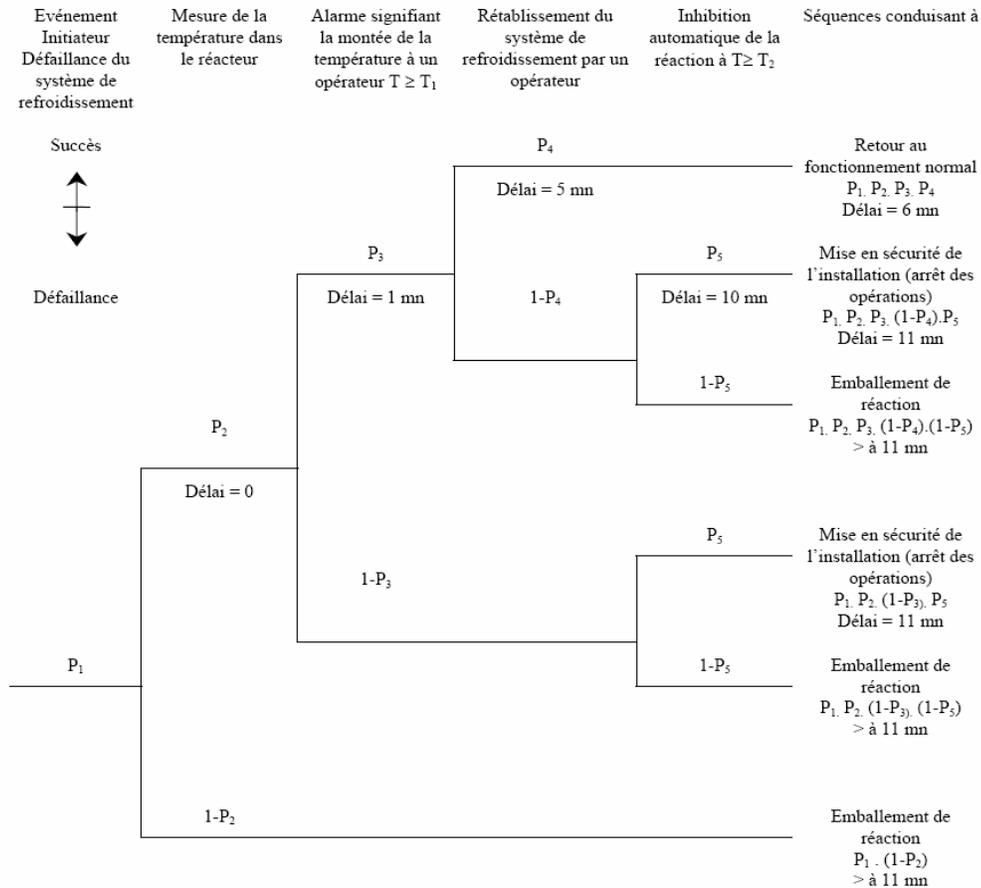


Figure 32 : Un exemple d'un arbre d'événement.

**Limites et avantages de l'ADE**

L'analyse par arbre d'évènements est une méthode qui permet d'examiner, à partir d'un événement initiateur, l'enchaînement des évènements pouvant conduire ou non à un accident potentiel. Elle trouve ainsi une utilité toute particulière pour l'étude de l'architecture des moyens de sécurité (prévention, protection, intervention) existants ou pouvant être envisagés sur un site. A ce titre, elle peut être utilisée pour l'analyse d'accidents à posteriori. Cette méthode peut s'avérer rapidement lourde à mettre en œuvre. En conséquence, il faut définir avec discernement l'événement initiateur qui fera l'objet de cette analyse.

**2.5.7. Nœud papillon ou la méthode du diagramme causes conséquences**

Le «nœud papillon» est une approche de type arborescente largement utilisée dans les pays européens comme les Pays-Bas qui possèdent une approche probabiliste de la gestion des risques. Le nœud papillon est utilisé dans différents secteurs industriels par des entreprises comme SHELL qui a été à l'origine du développement de ce type d'outils.

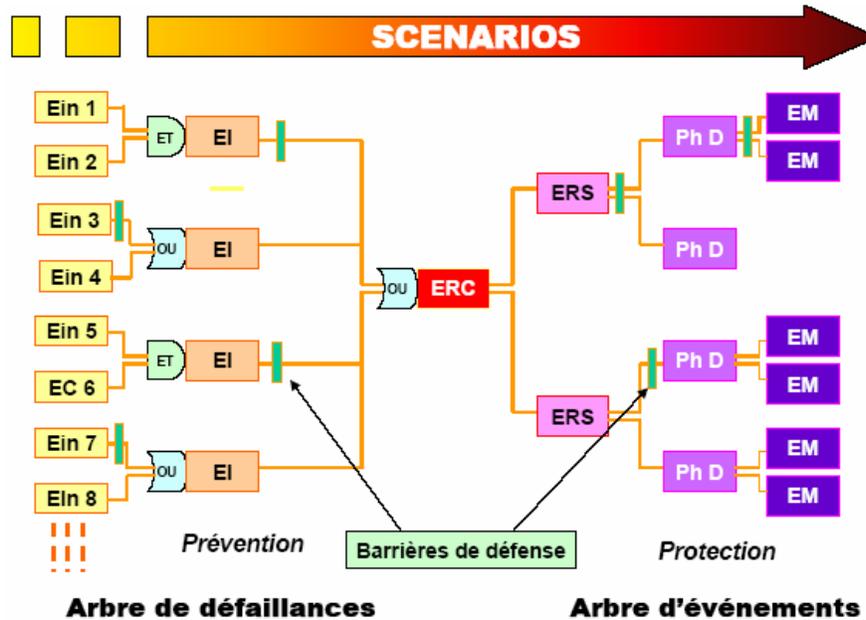
Cette méthode se révèle intéressante pour l'analyse des causes et des conséquences d'un événement initiateur que l'on redoute de voir survenir dans un système.

Elle se caractérise par le caractère presque simultané de l'analyse déductive des causes et de l'analyse inductive des conséquences, combinant ainsi les principes des MAC et MACQ.

Elle est intéressante pour l'analyse des systèmes où l'ordre dans lequel surviennent les défaillances est important; néanmoins, elle apparaît difficile à utiliser pour l'analyse de systèmes trop complexes.

**Principe de la méthode Nœud papillon**

Le nœud papillon est un outil qui combine un arbre de défaillance et un arbre d'événements. Il peut être représenté sous la forme suivante :



**Figure 33 :** Représentation de scénarios d'accident selon le modèle du nœud papillon.

Le point central du nœud papillon, appelé ici événement redouté Central, désigne généralement une perte de confinement ou une perte d'intégrité physique (décomposition). La partie gauche du nœud papillon s'apparente alors à un arbre des défaillances s'attachant à identifier les causes de cette perte de confinement. La partie droite du nœud papillon s'attache quant à elle à déterminer les conséquences de cet événement redouté central tout comme le ferait un arbre d'événements.

Sur ce schéma, les barrières de sécurité sont représentées sous la forme de barres verticales pour symboliser le fait qu'elles s'opposent au développement d'un scénario d'accident. De fait, dans cette représentation, chaque chemin conduisant d'une défaillance d'origine (événements indésirable ou courant) jusqu'à l'apparition de dommages au niveau des cibles (effets majeurs) désigne un scénario d'accident particulier pour un même événement redouté central.

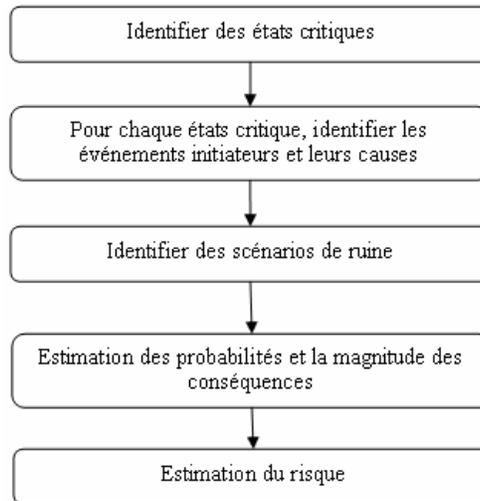
Cet outil permet d'apporter une démonstration renforcée de la bonne maîtrise des risques en présentant clairement l'action de barrières de sécurité sur le déroulement d'un accident.

**Méthodologie du diagramme causes-conséquences**

La procédure d'analyse de risque est présentée sur la figure 34, elle est constituée de 2 parties : l'analyse des causes ou fautes et l'analyse des conséquences.

L'analyse des causes par des états ou conditions critiques et «remonte» vers leurs événements initiateurs et leur cause primaires. L'analyse des conséquences par ces mêmes états ou conditions

critiques pouvant se développer en accidents ou en ruine et «descend» vers les conséquences possibles sous forme de différents scénarios.



**Figure 34.** La méthodologie de l'analyse des causes - conséquences.

#### **Limites et avantages de la méthode Nœud papillon**

Le Nœud Papillon offre une visualisation concrète des scénarios d'accidents qui pourraient survenir en partant des causes initiales de l'accident jusqu'aux conséquences au niveau des cibles identifiées. De ce fait, cet outil met clairement en valeur l'action des barrières de sécurité s'opposant à ces scénarios d'accidents et permet d'apporter une démonstration renforcée de la maîtrise des risques. En revanche, il s'agit d'un outil dont la mise en œuvre peut être particulièrement coûteuse en temps. Son utilisation doit donc être décidée pour des cas justifiant effectivement un tel niveau de détail.

#### **2.5.8. Méthode du diagramme de Succès (MDS)**

La méthode du Diagramme de succès (MDS) conduit à une modélisation du fonctionnement d'un système. Le diagramme de succès obtenu permet le calcul, généralement aisé, de la fiabilité (ou disponibilité) du système supposé irréparable.

Dans certaines conditions très restrictives, ce calcul peut être étendu à ceux de la fiabilité, de la disponibilité et de la maintenabilité d'un système réparable.

Cette méthode est utilisable lorsqu'une analyse détaillée des causes de défaillance (et de leurs combinaisons) n'est pas requise et lorsqu'il y a indépendance entre les défaillances (et les réparations) des composants.

Par ailleurs, il existe une correspondance entre les modélisations par diagramme de succès et par arbre des causes. La méthode de décompte des composants (MDC) est dérivée de la MDS ; elle admet que le système peut être représenté par un diagramme série.

#### **2.5.9. Méthode de Table de Vérité (MTV)**

Cette méthode nécessite l'étude de toutes les combinaisons d'états de fonctionnement et de panne des composants; c'est donc théoriquement la méthode la plus rigoureuse qui puisse exister. La table de vérité obtenue peut faire l'objet d'une réduction de nature booléenne ; on obtient ainsi les combinaisons pertinentes.

Cependant, la MTV n'est plus applicable dès que le nombre de composants est grand, étant donné le nombre, alors très important, de combinaisons à considérer.

Néanmoins, on peut parfois imaginer l'utiliser à un niveau de décomposition d'un système ou d'un ensemble de systèmes élémentaires tel que le nombre de combinaisons de défaillances reste limité ; ceci est parfois le cas au niveau des fonctions. Les inconvénients de cette méthode sont réduits par son informatisation.

### **2.5.10. Méthode des combinaisons de pannes résumées (MCPR)**

Elle est une méthode inductive débutant par l'AMDE et se poursuivant par le regroupement des pannes et de leurs combinaisons jusqu'à l'obtention de tous les fonctionnements anormaux des systèmes à analyser. Elle se présente ainsi comme une extension et une généralisation de l'AMDE qui en constitue la première étape.

Cette méthode se caractérise par l'introduction de certains concepts spécifiques à cette méthode : pannes résumées internes, pannes résumées externes, pannes résumées globales. La notion «d'effets» permet d'établir le lien entre les pannes et les fonctionnements anormaux, les événements indésirables, etc. L'analyse quantitative sera effectuée en ayant recours aux méthodes d'analyse quantitative (ex. MAC). Cette méthode se prête bien à des analyses systématiques, pratiquées sur des ensembles de systèmes élémentaires complexes en interaction.

L'organisation des études relatives à un ensemble complexe des systèmes est facilitée par une telle méthode. Elle paraît également bien adaptée à la prise en compte d'analyses de sûreté de fonctionnement dès la conception d'un ensemble de systèmes complexes.

## **2.6. Quelques études d'analyse de sûreté de fonctionnement dans le génie civil**

---

### **2.6.1. Travaux de L. Peyras**

(Peyras, 2003) s'est intéressé aux barrages relevant du contrôle du ministère de l'environnement. Son étude menée à l'unité de recherche des ouvrages hydrauliques du Cemagref (Aix en Provence) propose des méthodes d'aide au diagnostic et à l'analyse de risques dans le cadre d'une approche par expertise. Compte tenu de l'hétérogénéité du parc de barrages et face à des ouvrages complexes et uniques, dans des contextes présentant des données insuffisantes, lors de diagnostics préliminaires ou en synthèse d'analyses approfondies, l'auteur a recouru au jugement des experts. A partir de leurs connaissances et de leur expérience, ces derniers vont fournir alors une interprétation, un avis ou une recommandation à la question posée. L'étude vise deux contextes d'utilisation :

- le diagnostic rapide et préliminaire, où l'expertise pure constitue l'approche de base,
- le diagnostic approfondi qui intervient lors de l'analyse et de la validation de modèles physiques ou fonctionnels et de traitement statistique des données d'auscultation.

Face à un ouvrage dégradé, l'expert cherche à savoir quels sont les mécanismes impliqués (phase de diagnostic) et à quelles évolutions il faut ensuite s'attendre dans le temps (phase d'analyse de risques). Pour cela, les besoins de l'expert pour accomplir sa mission de diagnostic et d'analyse de risques des barrages peuvent être identifiés :

- une base de connaissances de mécanismes de vieillissement de barrages pour le diagnostic ;

- une base de données d'historiques de vieillissement pour l'analyse de risques.

L'objectif des bases de données d'historiques est de permettre à l'expert leur utilisation dans le cadre d'un raisonnement par analogie, pour l'identification et la prévision des évolutions des mécanismes.

La recherche de (Peyras, 2003) aboutit aux résultats suivants :

- Le premier résultat concerne la modélisation des scénarios de vieillissement. Ils comportent en développement la réalisation de l'analyse fonctionnelle des barrages et en recherche l'adaptation de la méthode AMDE à notre contexte et la proposition d'un modèle de représentation des scénarios au moyen de graphes orientés. Ce modèle enchaîne des séquences fonctionnelles de défaillance et structure l'information liée au vieillissement autour de trois variables (symptôme, phénomène et fonction).
- Le deuxième résultat est lié, dans un cadre plus applicatif, à l'analyse des connaissances expertes. Cette étude a établi la synthèse des mécanismes de vieillissement des barrages, puis organisé les données. Il a alors rempli une première base de connaissances relative à la pathologie des barrages.
- La troisième famille de résultats concerne la capitalisation des informations relatives au retour d'expérience. Sur la base d'analyses qualitatives des variables et de leur évolution, l'étude a proposé une méthode pour constituer des historiques de vieillissement. Elle a aussi développé des méthodes qualitatives pour évaluer la criticité des pertes de performance, celles des fonctions des composants, mais aussi la criticité de la perte de performance globale du barrage, ainsi qu'une méthode pour prendre en compte les événements extérieurs exceptionnels (crues, séismes).

*Cette méthode vise à assister les ingénieurs spécialisés lors d'analyses préliminaires et rapides ou en synthèse d'études approfondies. La démarche adoptée met à profit les connaissances et le retour d'expérience des experts.*

### **2.6.2. Travaux de D. Serre**

(Serre, 2005) s'est intéressé aux digues de protection contre les inondations relevant du contrôle du ministère de l'environnement. Son étude, menée à l'unité de recherche des ouvrages hydrauliques du Cemagref (Aix en Provence), développe des outils d'aide à la gestion des digues, permettant d'établir des priorités dans les actions de maintenance à réaliser sur l'ensemble du linéaire du parc.

Les objectifs essentiels des gestionnaires de digues et de l'administration qui les contrôlent sont avant tout d'assurer la sécurité des personnes et des biens protégés par ces ouvrages, mais aussi l'optimisation de la programmation des actions de maintenance dans un contexte d'ouvrages de grand linéaire (pouvant atteindre plusieurs centaines de kilomètres) et de budget forcément limité. Ce long linéaire pose une question majeure : par où commencer les actions de maintenance pour à la fois assurer le bon fonctionnement des digues et optimiser les choix budgétaires ?

Cette recherche s'inscrit dans ce cadre. Son objectif essentiel est de proposer des méthodes d'évaluation de la performance d'un parc de digues, à travers des indicateurs de performance. S'agissant d'ouvrages à grands linéaires, les méthodes développées doivent pouvoir être intégrées dans un Système d'Information Géographique (SIG), afin de cartographier les ouvrages selon leurs niveaux de performance et de localiser les tronçons de digues les plus fragiles.

L'étude rappelle les dispositifs généraux de gestion des ouvrages de génie civil, et présente le parc de digues de protection contre les inondations, qui fait l'objet la recherche, et relève les spécificités de ces ouvrages et de leurs modes de gestion. Dans ce cadre, il nous a semblé intéressant de faire une étude bibliographique sur les méthodes de gestion patrimoniale utilisées dans le domaine des ouvrages de génie civil à grand linéaire, puis de présenter la pratique actuelle de gestion des digues, permettant ensuite d'établir des propositions pour conduire notre recherche.

L'étude établit une synthèse des mécanismes de rupture des digues en remblai, représentant la majorité du parc de digues en France. Elle présente une collection complète de mécanismes de rupture et propose ensuite un modèle de rupture de digue. Cette recherche détaille l'Analyse Fonctionnelle (AF) et l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE), adaptées au contexte particulier des digues.

Une partie est consacrée à l'évaluation multicritère de la performance des digues, et examine comment sont construits de façon générale les indicateurs de performance, puis dans le contexte particulier des ouvrages linéaires de génie civil. Elle propose alors des indicateurs de performance des digues, puis étudie ensuite les méthodes multicritères d'aide à la décision qui permettent, à partir d'un raisonnement fondé sur plusieurs critères, de proposer une évaluation globale de la performance d'un ouvrage. Elle propose d'utiliser une méthode multicritère d'affectation à base de règles adaptée au cas des digues.

*L'étude intègre enfin les indicateurs de performance des digues et la méthode multicritère choisie dans un Système d'Information Géographique (SIG). Toute la méthode est enfin appliquée à un type particulier de digue, avec une application au mécanisme d'érosion interne.*

### **2.6.3. Travaux de J. Boero et al.**

(Boero et al, 2006) ont mis en œuvre une méthodologie d'analyse de risques afin d'optimiser la gestion de parcs d'ouvrages de génie civil à fort enjeu. Aussi, dans les structures portuaires, les gestionnaires sont amenés à planifier des opérations de maintenance (surveillance et entretien) sur un patrimoine hétérogène et comprenant un nombre important d'ouvrages aux fonctions variées. La maintenance curative étant en général très coûteuse en coûts directs comme en conséquences indirectes (arrêts d'exploitation, ...), le recours à une méthodologie permettant d'anticiper les interventions et de hiérarchiser les priorités est de première importance.

Les approches de type risque sont en plein essor car elles permettent de répondre à ce besoin méthodologique et intègrent les évolutions des phénomènes dans le temps (corrosion, trafic portuaire, ...), ce qui est impératif dès qu'il s'agit d'élaborer des plans pluriannuels de maintenance.

Pour illustrer ce savoir-faire, une analyse de risques d'un quai gabions vis à vis de la corrosion en milieu marin est menée. L'analyse de risques menée sur le quai gabions comporte trois étapes :

- Etape 1 : une Analyse de Risques Qualitative (ARQL) afin d'inventorier de manière exhaustive les Modes de Défaillance (MdD) et de les hiérarchiser à l'aide d'un indicateur de risques, la Criticité.
- Etape 2 : une Analyse de Risques Quantitative (ARQN) pour évaluer les probabilités associées aux principaux modes de défaillance.
- Etape 3 : un cadrage de la maintenance.

La démarche consiste à identifier et hiérarchiser les modes de défaillances en fonction de leur criticité (Analyse de Risques Qualitative). Une Analyse de Risques Quantitative détermine alors, de manière plus fine, la probabilité de défaillances des modes les plus critiques.

L'analyse de risques qualitative menée au niveau du quai gabions a mis en évidence que les mécanismes de corrosion électrolytique (chlorures) et biologique (bactéries) sont à l'origine des modes de défaillance les plus critiques pour le quai étudié.

L'analyse de risques quantitative a permis de constater que les risques associés à un percement de palplanches dépendent principalement des mécanismes de corrosion biologique. La conséquence ultime de cette défaillance réside dans la fuite partielle ou totale du sable contenu dans les gabions et/ou festons. Par ailleurs, les risques associés à la défaillance des pieux résultent de la fuite de sable et/ou de la corrosion des pieux, dont la cinétique dépend en grande partie de la pénétration de l'eau de mer dans le remblaiement de sable. Ces phénomènes ont pour conséquences de diminuer, voir même d'annuler totalement la capacité portante des pieux en frottement latéral, ce qui peut se traduire par une perte de stabilité du quai. La complexité du problème montre l'intérêt d'une approche par les risques qui apporte des éléments d'aide à la décision et permet d'aboutir à des plans de maintenance priorisés.

*Enfin, l'étude a conclu sur la nécessité de mettre en place des plans de maintenance de base et plus élaborés, conditionnels aux mesures et calculs effectués.*

## **2.7. Conclusion**

---

Ce que nous pouvons retenir de ce chapitre est que :

### **Les modèles physiques**

La modélisation physique est mise en œuvre pour le diagnostic et l'analyse de risques d'un ouvrage dont on cherche à vérifier la stabilité vis-à-vis d'un mécanisme de rupture ou à étudier le comportement. Elle fournit alors des résultats de grande précision. Elle reste réservée au diagnostic et à l'analyse de risques approfondis ou à l'étude d'un mécanisme particulier. *Cette méthode sera développée au chapitre 3 pour analyser et expliquer une pathologie mécanique d'un réservoir d'eau potable.*

### **Approche statistique**

L'approche probabiliste reste réservée au traitement des données d'auscultation. Elle constitue alors une méthode puissante pour le diagnostic et l'analyse de risques approfondie (Buyle-Bodin, 2002). Pour le

cas des réservoirs qui nous concerne, où l'on ne dispose d'aucune information d'auscultation (ouvrages mal documentés, vu en chapitre 1) et où les données relatives aux incidents ou au vieillissement ne sont pas en nombre suffisant, *cette approche n'est pas d'un grand apport.*

### **Approche par expertise**

Les méthodes à base d'index vues précédemment permettent une évaluation simplifiée et rapide du risque et trouvent ainsi leurs principales applications 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, fonctionnels ou statistiques. 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 de restauration par rapport à des critères de sécurité. Le pré-diagnostic ne permet généralement pas d'une manière suffisante de déterminer les travaux nécessaires de restauration ouvrage par ouvrage. Correctement établi, par des Experts, elle renseigne d'une manière assez fiable sur l'état général de l'ouvrage. *Cette approche sera développée au chapitre 4 pour un réservoir de stockage.*

### **Les méthodes de sûreté de fonctionnement dans le génie civil**

On a pu voir que les techniques de la sûreté de fonctionnement sont apparues depuis peu de temps dans le domaine du génie civil en particulier dans le domaine des barrages (Peyras 2003, Serre 2005). La méthode des arbres d'événements est privilégiée pour la modélisation. Elle fournit des mesures de sûreté de fonctionnement correspondant à des probabilités subjectives, obtenues par jugement d'experts.

Ces techniques constituent des approches puissantes pour le diagnostic et l'analyse de risques. Elles mettent en évidence, pour un ouvrage donné, les scénarios de rupture et les composants les plus critiques, et à l'échelle d'un parc entier, les ouvrages les plus dangereux. Les techniques de la sûreté de fonctionnement présentent cependant des avantages pour nos travaux, en particulier pour la modélisation du fonctionnement des réservoirs et des mécanismes de vieillissement.

Cependant, dans le cas des systèmes particulièrement complexes comme c'est notre cas, où un réservoir compte un grand nombre de composants, l'AMDEC peut être très difficile à mener et particulièrement fastidieuse compte tenu du volume important d'informations à traiter. Il vient que le coût de telles études est important et cette approche reste réservée aux grands ouvrages dont on veut connaître la sécurité et prioriser les actions. Il s'avère difficile d'envisager d'appliquer ce type d'approche à l'échelle d'un parc complet de réservoirs de moyennes dimensions. *Ces interrogations trouveront leurs réponses au chapitre 5.*

### **3. Chapitre 3 : Analyse d'une pathologie par une méthode physique**

### 3.1. Introduction

---

Une enquête effectuée sur un large parc de réservoirs expertisé laisse paraître une pathologie très répandue (Hammoum, 2008) : le défaut rencontré est une fissure oblique sur la paroi du réservoir, non parallèle aux axes principaux de la paroi. Ces fissures localisées à la liaison paroi-radier traversantes dans le béton armé évoluent dans le temps, compromettant ainsi l'étanchéité de l'ouvrage. Selon la classification de (Mathieu, 1996), cette pathologie a un indice de gravité D (défaut révélateur d'une évolution avancée de la dégradation de l'ouvrage en contact avec le liquide).

Or ces réservoirs de stockage remplissent des besoins vitaux de la population. Leur étude doit leur permettre de demeurer fonctionnels pendant et après un séisme. Cette tâche devient encore plus délicate lorsqu'on sait que dans un réservoir partiellement rempli, l'excitation sismique met une partie du fluide en mouvement (ce qui conduit à la formation de vagues en surface, entraînant la naissance de contraintes sur les parois, pouvant provoquer l'endommagement de la coupole ainsi que la paroi).

Ce phénomène est appelé l'effet hydrodynamique, et son appréciation devient difficile. En Algérie, le règlement parasismique impose de tenir compte de l'effet hydrodynamique uniquement pour les réservoirs d'une capacité supérieure à 1500 m<sup>3</sup>, en zone de moyenne et forte sismicité.

Dans le domaine des réservoirs de stockage des fluides, le modèle physique le plus connu est celui de (Housner, 1963). Pour analyser la stabilité du réservoir ainsi que son comportement hydrodynamique (effet du liquide sur les parois sous l'action sismique), Housner décompose le liquide en une action passive provoquant des efforts d'impulsion et une action active provoquant des efforts d'oscillation.

A travers le présent chapitre, illustré par une application numérique, on tentera de faire le lien de cause à effet entre la pathologie rencontrée sur les réservoirs et la non prise en compte de l'effet hydrodynamique dans les calculs de conception des réservoirs.

### 3.2. Position du problème

---

Lorsqu'un réservoir est couvert et entièrement plein, il n'y a naturellement pas de mouvement relatif du liquide par rapport au réservoir, à la suite d'une excitation sismique. D'un point de vue dynamique, tout se passe comme si l'ensemble liquide - réservoir constituait une masse unique. Par ailleurs, dans les réservoirs partiellement remplis, l'excitation met une partie du fluide en mouvement ; ce qui conduit à la formation de vagues en surface, entraînant la naissance de contraintes sur les parois.

Pour étudier l'action du liquide sur les parois du réservoir, on utilise l'approche développée par Housner (Housner, 1963), dans laquelle l'action du liquide est décomposée en une action passive provoquant des efforts d'impulsion et une action active provoquant des efforts d'oscillation.

Les efforts d'impulsion proviennent de ce qu'une partie de la masse du liquide, dite masse passive, réagit par inertie à la translation des parois du réservoir. Son système mécanique équivalent est obtenu en considérant une masse  $M_i$  liée rigidement au réservoir à une hauteur  $h_i$  telle qu'elle exerce sur les parois les mêmes efforts horizontaux que la masse d'eau équivalente (Figure 35).

Quant aux efforts d'oscillations, ils proviennent de ce qu'une autre partie de la masse du fluide, dite masse active, se met en mouvement d'oscillation sous l'action du séisme. Son équivalent mécanique s'obtient en considérant une masse  $M_o$  retenue par des ressorts de raideurs  $K_o$  à un niveau  $h_o$ , dont les

oscillations horizontales exercent les mêmes efforts vibratoires que la masse active du liquide (figure 36). Pour le calcul du moment de flexion des parois, les seules actions prises en compte sont celles sur les parois. Dans ce cas, la masse  $M_o$  est appliquée à un niveau  $h_o$  (figure 37).

Pour le calcul du moment de renversement d'ensemble, on prend en compte l'action des surpressions sur le fond du réservoir. Dans ce cas, la masse  $M_o$  est appliquée à un niveau  $h_o^*$  (Figure 38).

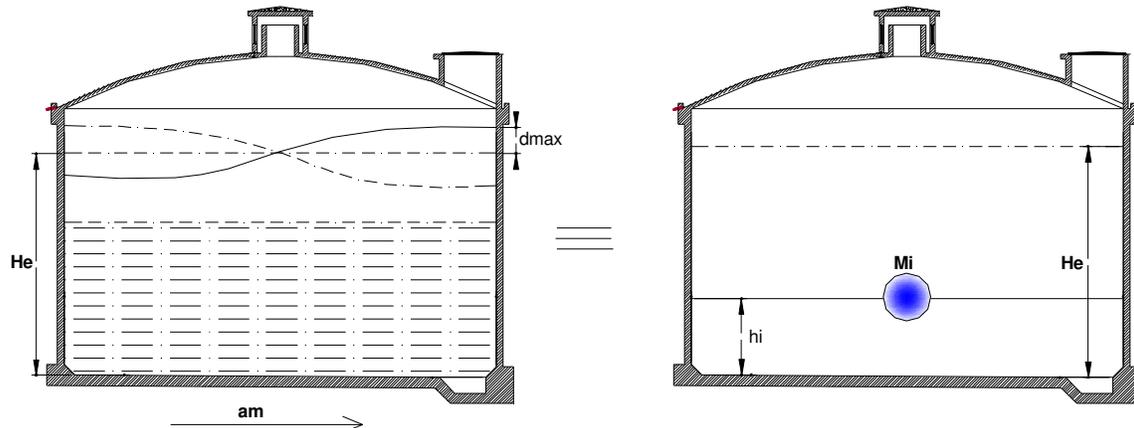


Figure 35 : Système physique et mécanique équivalent des pressions d'impulsion.

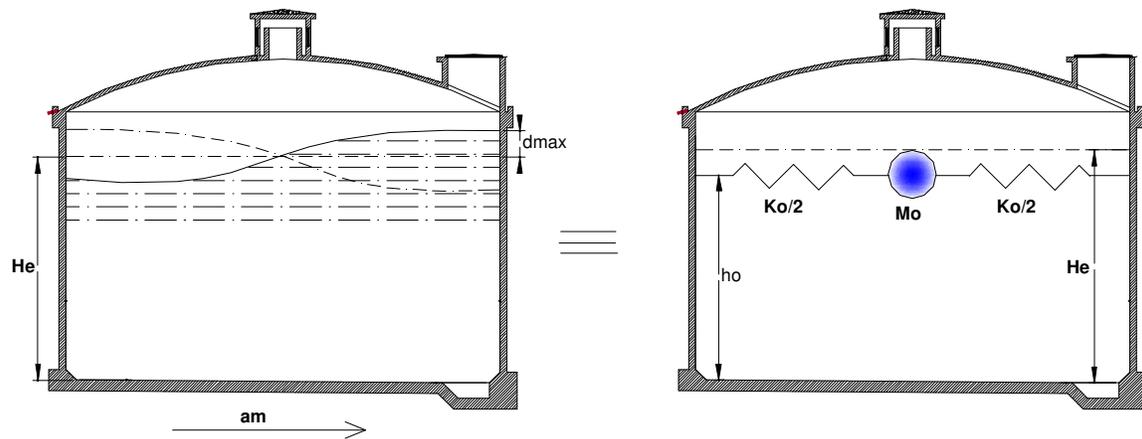


Figure 36 : Système physique et mécanique équivalent des pressions d'oscillation sur les parois.

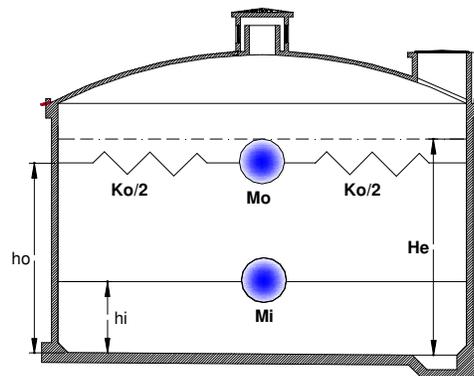
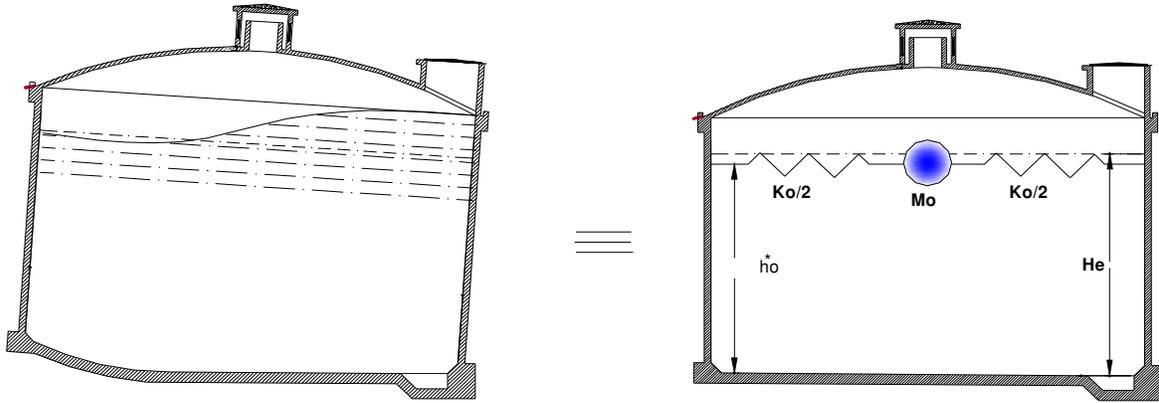


Figure 37 : Modèle à une masse passive  $M_i$  (impulsion) et une masse active  $M_o$  (oscillation).



**Figure 38** : Système physique et mécanique équivalent des pressions d'oscillation, actions sur les parois et sur la base

### 3.3. Méthode de calcul

#### 3.3.1. Calcul des actions d'impulsion

Soit un réservoir cylindrique à base horizontale et parois verticales soumis à une accélération maximale  $a_m$ . En considérant un liquide incompressible et en exprimant le principe de conservation de masse et le principe fondamental de la dynamique, on détermine l'expression de la résultante des pressions hydrodynamiques horizontales d'impulsion  $P_i$  :

$$P_i = M_i a_m \quad (1)$$

avec :

$$M_i = M_e \frac{\text{th} \left( \sqrt{3} \frac{R_i}{H_e} \right)}{\left( \sqrt{3} \frac{R_i}{H_e} \right)} \quad (2)$$

#### 3.3.2. Calcul de l'accélération $a_m$

L'accélération  $a_m$  imposée au réservoir, compte tenu de son interaction avec le sol, est une donnée du code de calcul en fonction de la zone sismique et d'autres paramètres. Elle représente une fraction de l'accélération de la pesanteur. Le RPA 2003 propose, pour sa détermination, la relation suivante :

$$\frac{a_m}{g} = \begin{cases} 1.25 A \left( 1 + \frac{T}{T_1} \left( 2.5 \eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5 \eta (1.25 A) \left( \frac{Q}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5 \eta (1.25 A) \left( \frac{Q}{R} \right) \left( \frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5 \eta (1.25 A) \left( \frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left( \frac{3}{T} \right)^{5/3} \left( \frac{Q}{R} \right) & T > 3.0s \end{cases} \quad (3)$$

- **Coefficient d'accélération de zone « A »**

« A » est le coefficient d'accélération de zone, fonction de la zone sismique et du groupe d'usage de l'ouvrage. Le RPA 2003 classe les réservoirs de stockage comme étant des ouvrages de groupe 1B.

**Tableau 8. Coefficient d'accélération de zone A.**

Groupe	Zone sismique			
	I sismicité faible	IIa sismicité moyenne	IIb sismicité moyenne	III sismicité élevée
1A	0,15	0,25	0,30	0,40
1B	0,12	0,20	0,25	0,30
2	0,10	0,15	0,20	0,25
3	0,07	0,10	0,14	0,18

- **Facteur de correction d'amortissement**

$\eta$  est un facteur de correction d'amortissement, donné par la formule suivante :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2 + \xi}} \geq 0,70 \quad (4)$$

où  $\xi$  désigne le pourcentage d'amortissement critique. Sa valeur est fonction du matériau constitutif, du type de la structure et de l'importance des remplissages.

**Tableau 9. Pourcentage d'amortissement critique  $\xi$ .**

Remplissage	Portiques		Voile ou mur
	Béton armé	Acier	B.A. et maçonnerie
<b>Léger</b>	6	4	<b>10</b>

Le réservoir peut être à défaut assimilé à une structure en voile en béton armé. Aussi, nous considérons comme pourcentage d'amortissement critique  $\xi=10\%$ , conformément au tableau 9.

- **Coefficient de comportement**

« R » représente le coefficient de comportement global de la structure. Sa valeur unique est donnée en fonction du système de contreventement. Notre ouvrage peut être considéré comme étant une structure en voiles porteurs, classée par le RPA 2003, de catégorie 3, dans ce cas  $R = 3,50$ .

- **Facteur de qualité**

Q est le facteur de qualité de la structure, donné par la formule suivante :

$$Q = 1 + \sum P_q \quad (5)$$

Dans cette relation,  $P_q$  désigne les pénalités à retenir selon que le critère de qualité est satisfait ou non, conformément au tableau 10. Pour le cas d'un réservoir posé au sol, le facteur de qualité Q est pris égal à 1, car les six pénalités sont observées.

**Tableau 10. Pénalités observées Pq.**

N°	Critère q	Facteur Pq	
		Observé	Non observé
1	Conditions minimales sur les files de contreventement	0	0.05
2	Redondance en plan	0	0.05
3	Régularité en plan	0	0.05
4	Régularité en élévation	0	0.05
5	Contrôle de qualité des matériaux	0	0.05
6	Contrôle de qualité de l'exécution	0	0.10

- **Périodes caractéristiques**

T1, T2 sont des périodes caractéristiques associées à la catégorie du site Si.

**Tableau 11. Périodes caractéristiques T1, T2.**

Site	S1	S2	S3	S4
	Site rocheux	Site ferme	site meuble	site très meuble
T1 (s)	0,15	0,15	0,15	0,15
T2 (s)	0.30	0.40	0.50	0.70

- **Calcul de la période fondamentale T du réservoir**

La valeur de la période fondamentale du réservoir peut être estimée à partir de formules empiriques, ou calculée par des méthodes analytiques ou numériques. Les relations empiriques proposées par le RPA sont applicables uniquement aux bâtiments. Dans le cas des réservoirs posés au sol, pouvant être assimilés de façon réaliste à un prisme de section transversale constante, nous proposons la relation suivante (DTU, 1984) :

$$T = 1.79 H_t^2 \sqrt{\frac{P}{g EI}} \quad (6)$$

Cette relation suppose implicitement, qu'il s'agit d'oscillations planes non couplées avec d'autres modes d'oscillations ; c'est-à-dire qu'il s'agit d'oscillations dans lesquelles les diverses masses composant la structure se déplacent parallèlement à un même plan, sans exciter de ce fait les oscillations perpendiculaires à ce plan. Cette condition est satisfaite par les structures présentant un plan de symétrie vertical, comme c'est le cas des réservoirs circulaires. En plus des caractéristiques géométriques de l'ouvrage (dimensions du réservoir), cette dernière relation fait appel à la rigidité flexionnelle (EI), et à la répartition uniforme du poids de l'ouvrage (P). Ce sont là deux paramètres absents dans les relations empiriques proposées dans le RPA 2003.

### 3.3.3. Calcul des actions d'oscillation

En partant des mêmes hypothèses que précédemment, en exprimant d'une part l'énergie potentielle acquise par la formation de vague en surface, et d'autre part l'énergie cinétique de l'ensemble du système, on établit l'expression de la distribution des surpressions hydrodynamiques. La résultante de pression hydrodynamique horizontale d'oscillation sera donnée par la formule suivante :

$$P_o = 1.20 M_o g \phi_0 \quad (7)$$

La fraction de l'eau dans le réservoir qui se met en vibration est la masse  $M_o$  donnée par la relation :

$$M_o = M_e \cdot 0.318 \frac{R_i}{He} \operatorname{th} \left( 1.84 \frac{He}{R_i} \right) \quad (8)$$

L'angle maximal d'oscillation  $\phi_o$  de la surface libre est exprimé en fonction du spectre d'accélération  $a_m$  :

$$\phi_o = 0.83 \frac{a_m}{g} \quad (9)$$

### 3.3.4. Calcul des moments de flexion

- **Action d'impulsion**

Le moment de flexion sur les parois sous l'action d'impulsion, est donnée par :

$$M_{fi} = P_i h_i \quad (10)$$

Le niveau d'application  $h_i$  des pressions d'impulsion par rapport au radier est exprimée par :

$$h_i = \frac{3}{8} H_e \quad (11)$$

- **Action d'oscillation**

Le moment de flexion sur les parois sous l'action d'oscillation s'écrit :

$$M_{fo} = P_o h_o \quad (12)$$

Le niveau d'application  $h_o$  des pressions d'oscillation par rapport au radier est donné par :

$$h_o = H_e \left[ 1 - \frac{1}{1.84 \operatorname{th} \left( 1.84 \frac{H_e}{R_i} \right)} + \frac{1}{1.84 \frac{H_e}{R_i} \operatorname{sh} \left( 1.84 \frac{H_e}{R_i} \right)} \right] \quad (13)$$

### 3.3.5. Calcul des moments de renversement

- **Action d'impulsion**

Le moment de renversement d'ensemble, sous l'action d'impulsion, est donnée par :

$$M_{ri} = P_i \cdot h_i^* \quad (14)$$

Le niveau d'application  $h_i^*$  des pressions d'impulsion, incluant l'effet de la pression sur la base s'écrit :

$$h_i^* = \frac{3}{8} H_e + \frac{1}{2} \left( \frac{\sqrt{3} \frac{R_i}{H_e}}{\operatorname{th} \left( \sqrt{3} \frac{R_i}{H_e} \right)} - 1 \right) \quad (15)$$

- **Action d'oscillation**

Le moment de renversement d'ensemble sous l'action d'oscillation, est exprimée par :

$$M_{ro} = P_o \cdot h_o^* \quad (16)$$

Le niveau d'application  $h_o^*$ , des pressions d'oscillation incluant l'effet de la pression sur la base est tel que :

$$h_o^* = H_c \left[ 1 - \frac{\operatorname{ch}\left(1.84 \frac{H_c}{R_i}\right) - 2}{1.84 \frac{H_c}{R_i} \operatorname{sh}\left(1.84 \frac{H_c}{R_i}\right)} \right] \quad (17)$$

### 3.3.6. Etat limite ultime de stabilité

Sous l'effet de l'action sismique à l'ELU, la stabilité d'ensemble du réservoir vis-à-vis de l'effondrement doit être satisfaite. La stabilité d'ensemble se rapportant à un comportement de corps rigide peut être perdue par glissement ou renversement. A cet effet, il y'a lieu de satisfaire les deux inégalités suivantes :

$$\text{Moment stabilisant} \geq \text{Moment renversant} \quad (18)$$

$$\text{Résultante verticale} \geq \text{Résultante horizontale} \quad (19)$$

Pour le moment renversement, nous considérons, la somme des deux moments de renversement, précédemment calculés (d'impulsion et d'oscillation). Quant à la résultante des forces horizontales, nous considérons la somme de la force d'impulsion et de la force d'oscillation.

### 3.3.7. Etat limite de service de niveau de fonctionnement minimal

Il y'a lieu de s'assurer que sous l'effet de l'action sismique de dimensionnement appropriée, le réservoir peut subir un endommagement de certains de ses composants, dans la mesure où toutefois, après les opérations de contrôle des dommages, la capacité du système peut être restaurée jusqu'à un niveau de fonctionnement prédéfini. Le réservoir conserve son étanchéité aux fuites du contenu. Un franc bord doit être prévu afin de prévenir les dommages au toit dus à l'effet de vague, ou pour prévenir le débordement du liquide lorsque le réservoir n'a pas de toit rigide.

La hauteur maximale des vagues, après oscillation, est donnée par la relation suivante (Davidovici et al., 1982):

$$d_{\max} = \frac{0.408 R_i}{\left( \frac{g}{\omega_0^2 \phi_0 R_i} - 1 \right) \operatorname{th}\left(1.84 \frac{H_c}{R_i}\right)} \quad (20)$$

La pulsation fondamentale de vibration du liquide en mouvement  $\omega_0$  est exprimée par l'équation :

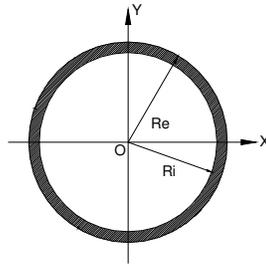
$$\omega_0^2 = \frac{g}{R_i} 1.84 \operatorname{th}\left(1.84 \frac{H_c}{R_i}\right) \quad (21)$$

Selon l'Eurocode 8 (CEN, 1998), la contribution prédominante pour la hauteur de l'onde de ballotement est assurée par le premier mode fondamental, et l'expression du pic du bord est la suivante :

$$d_{\max} = 0.84 \frac{a_m}{g} R_i \quad (22)$$

## 3.4. Calcul des contraintes verticales dans la paroi

La section de la paroi a une forme d'un anneau, soumise à un effort normal vertical  $N$  qui n'est autre que le poids de l'ouvrage sur la base de la paroi et à un moment de flexion du aux forces horizontales, à savoir la force d'impulsion et la force d'oscillation. Ainsi, la paroi sous l'action sismique sera sollicitée en flexion composée.



**Figure 39.** Coupe horizontale de la paroi circulaire du réservoir.

Sur les fibres extrêmes (fibre supérieure et fibre inférieure) de la paroi se développent des contraintes normales verticales (de compression ou de traction), estimées par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{N}{\Omega} \pm \frac{M}{I_X} R_c \quad (23)$$

La section horizontale de la paroi circulaire du réservoir s'écrit :  $\Omega = \pi (R_c^2 - R_i^2)$  (24)

Le moment d'inertie  $I_X$  de la paroi par rapport à l'axe  $Ox$  s'écrit :  $I_X = \frac{\pi}{2} (R_c^4 - R_i^4)$  (25)

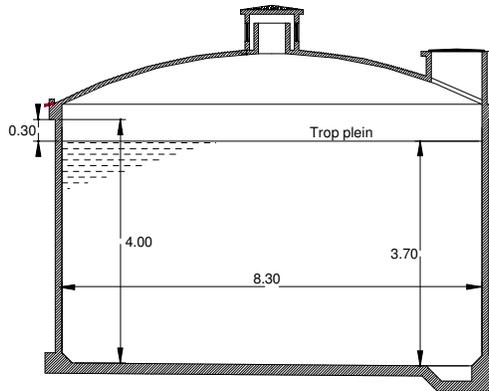
$M$  est le moment de flexion du à l'action sismique sur la paroi (impulsion et oscillation), et s'écrit

$$M = M_{fi} + M_{fo} \quad (26)$$

$N$  est le poids des différents éléments du réservoir sur la base de la paroi (coupole, paroi et enduits).

### 3.5. Etude de cas

Considérons un réservoir en béton armé de capacité  $200 \text{ m}^3$  (figure 40), implanté sur un site meuble dans la commune de Boumerdes, classée zone III de forte sismicité.



**Figure 40.** Coupe transversale du réservoir posé au sol.

Les caractéristiques géométriques du réservoir sont données comme suit :

- hauteur d'eau utile du réservoir  $H_e = 3,70 \text{ m}$ ,
- hauteur au dessus du trop plein =  $0,30 \text{ m}$ ,
- hauteur totale de la paroi =  $4,00 \text{ m}$ ,
- rayon intérieur du réservoir  $R_i = 4,15 \text{ m}$ .

### 3.5.1. Calcul de la période fondamentale T

Hauteur de la structure  $H_t = 6,15$  m.

Poids par mètre linéaire du réservoir  $P = 190,88$  kN/m.

Moment d'inertie de la paroi par rapport à l'axe horizontal  $I_x = 30,59$  m<sup>4</sup>.

Module d'élasticité du béton  $E = 32164,20$  MN/m<sup>2</sup>.

La période fondamentale  $T = 0,01$  s.

### 3.5.2. Calcul de l'accélération $a_m$

Coefficient d'accélération de zone A = 0,30.

Période caractéristique  $T_1 = 0,15$  s.

Période caractéristique  $T_2 = 0,50$  s.

Facteur de qualité  $Q = 1,00$ .

Facteur de correction d'amortissement  $\eta = 0,76$ .

Coefficient comportement structure  $R = 3,50$ .

L'accélération du sol  $a_m = 3,68$  m/s<sup>2</sup>.

### 3.5.3. Calcul de la résultante des pressions d'impulsion $P_i$

La masse d'inertie  $M_i = 98,80$  t

La résultante des pressions d'impulsion  $P_i = 363,48$  kN

### 3.5.4. Calcul de la résultante des pressions d'oscillation $P_o$

Masse d'eau en oscillation  $M_o = 66,16$  t

Angle maximal d'oscillation  $\phi_o = 0,31$

Résultante des pressions d'oscillation  $P_o = 242,43$  kN

### 3.5.5. Calcul du moment de flexion d'impulsion $M_{fi}$

Niveau d'application des pressions d'impulsion  $h_i = 1,39$  m

Moment de flexion d'impulsion  $M_{fi} = 504,32$  kNm

### 3.5.6. Calcul du moment de flexion d'oscillation $M_{fo}$

Niveau d'application des pressions d'oscillation  $h_o = 2,44$  m

Le moment de flexion d'oscillation  $M_{fo} = 591,73$  kNm

### 3.5.7. Calcul du moment de renversement d'impulsion $M_{ri}$

Niveau d'application des pressions d'impulsion incluant la pression sur la base  $h_i^* = 1,90$  m

Le moment de renversement d'impulsion  $M_{ri} = 690,46 \text{ kNm}$ .

### 3.5.8. Calcul du moment de renversement d'oscillation $M_{ro}$

Niveau d'application des pressions d'oscillation incluant la pression sur la base  $h_o^* = 3,09 \text{ m}$ .

Le moment de renversement d'oscillation  $M_{ro} = 748,12 \text{ kNm}$ .

### 3.5.9. Etat limite ultime de stabilité

Masse du réservoir plein = 321,60 t.

Rayon extérieur du réservoir = 4,28 m.

Moment stabilisant  $M_s = 13\,764,78 \text{ kNm}$ .

Moment de renversement  $M_r = 1\,438,59 \text{ kNm}$ .

$$\text{Rapport } \frac{M_s}{M_r} = 9,57$$

L'ELU de stabilité d'ensemble du réservoir vis-à-vis de l'effondrement est satisfait. C'est la particularité des réservoirs posés au sol.

### 3.5.10. Etat limite de service de niveau de fonctionnement minimal

La pulsation  $\omega_o^2 = 4,03 \text{ s}^{-2}$

La hauteur des vagues  $d_{\max} = 2,07 \text{ m}$

Le calcul, met en évidence la formation de vagues en surface qui atteignent une hauteur importante, dues à l'excitation de l'eau en mouvement. Cette hauteur est supérieure à la hauteur au dessus du niveau libre de l'eau ( $d_{\max} = 2,07 \text{ m} > 0,30 \text{ m}$ ). On déduit alors que la vague d'eau passe au dessus la ceinture supérieure et va s'abattre sur la coupole de couverture, risquant de l'endommager.

### 3.5.11. Contraintes horizontales dans la paroi du réservoir

Partant du constat du paragraphe précédent, nous avons mené deux calculs parallèles. Le premier est un calcul hydrostatique classique où le niveau de l'eau est pris égal à  $H_e = 3,70 \text{ m}$ . Le second est un calcul hydrodynamique où la hauteur de l'eau est prise égale à ( $H_e + d_{\max} = 5,77 \text{ m}$ ).

Considérant que la cuve se calcule par bandes de 1,00 m de hauteur, sous l'effet de la pression de l'eau agissant de l'intérieur du réservoir sur toute la hauteur. Chaque bande est soumise à une pression hydraulique de forme trapézoïdale que nous admettons rectangulaire.

La pression hydraulique de l'eau sur chaque bande de la paroi est donnée par :  $q_i = \rho \cdot z_i$

$$\text{La pression moyenne de la bande } i \text{ est : } Q_i = \frac{(q_i + q_{i+1})}{2}$$

Sous l'action des pressions de l'eau sur chaque bande, celle-ci sera tendue avec un effort de traction correspondant à :  $T_i = R_i \cdot Q_i$

**Tableau 12.** Pression hydrostatique et hydrodynamique sur chaque bande de la paroi.

Bande i	Calcul hydrostatique		Calcul hydrodynamique	
	Profondeur $z_i$ (m)	Pression $q_i$ (t/m <sup>2</sup> )	Profondeur $z_i$ (m)	Pression $q_i$ (t/m <sup>2</sup> )
Bande I	3,70	3,70	5,77	5,77
Bande II	2,70	2,70	4,77	4,77
Bande III	1,70	1,70	3,77	3,77
Bande IV	0,70	0,70	2,77	2,77

**Tableau 13.** Pression moyenne hydrostatique et hydrodynamique sur chaque bande.

Bande i	Calcul hydrostatique	Calcul hydrodynamique	
	Pression moyenne $Q_i$ (t/m <sup>2</sup> )	Pression moyenne $Q_i$ (t/m <sup>2</sup> )	Différence (%)
Bande I	3,20	5,26	64,64
Bande II	2,20	4,26	94,02
Bande III	1,20	3,26	172,37
Bande IV	0,35	1,38	295,50

Nous constatons que l'effet hydrodynamique peut majorer la pression de l'eau contre les bandes de la paroi et par voie de conséquence les contraintes de traction horizontales dans celles-ci de façon importante (valeurs pouvant aller de 65 à 295 %) en fonction de la profondeur de la bande par rapport au niveau du trop plein.

### 3.5.12. Les contraintes verticales dans la paroi du réservoir

Le poids du réservoir à la base de la paroi (coupole, paroi et enduits)  $N = 497,70$  N.

Moment total de flexion (impulsion + oscillation)  $M = 1\,096,06$  kNm.

Surface horizontale totale de la paroi  $\Omega = 3,44$  m<sup>2</sup>

Contrainte normale de **compression** sur la fibre supérieure :  $\sigma_{\max} = 2,98$  Mpa .

Contrainte normale de **traction** sur la fibre inférieure :  $\sigma_{\min} = -0,09$  Mpa .

Ces calculs mettent en évidence, sous l'effet hydrodynamique, l'apparition des contraintes de traction verticales dans la paroi du réservoir ( $\sigma_{\min} = -0,09$  Mpa ).

Ces contraintes de traction, auraient été occultées, négligées, si le calcul avait été mené juste sous l'action hydrostatique. Car on aurait obtenu uniquement des contraintes de compression tout autour de la paroi, d'une valeur de l'ordre de  $\sigma = 1,45$  Mpa .

## 3.6. Conséquences de l'effet hydrodynamique

Les calculs menés au paragraphe précédent, ont mis en évidence deux phénomènes lors d'une excitation sismique :

- Une surtension (contraintes de traction horizontales) des bandes de la paroi circulaire, laquelle provoquerait une fissuration verticale dans la bande, si elle n'est pas absorbée par des armatures horizontales (cerces) suffisantes.

- L'apparition de contraintes de traction verticales dans la paroi, qui provoqueraient des fissurations horizontales (figure 41 & 42), si elles ne sont pas absorbées par des armatures verticales (de construction ou de répartition) suffisantes.



**Figure 41.** Fissure horizontale à la base de la paroi [Photo Hammoum].

Ces deux phénomènes agissant simultanément, provoquent des fissures inclinées, laissant paraître des suintements qui se manifestent par la présence d'humidité parfois chargée en sels après percolation à travers le béton.



**Figure 42.** Fissure horizontale au niveau de la bande du fond de la paroi [Photo Hammoum].

Cette pathologie a été observée sur un large parc de réservoirs expertisés en Algérie. La figure 43, prise sur un réservoir de stockage actuellement en service, de forme circulaire en béton armé, à Jijel (ville côtière d'Algérie) classée IIa de moyenne sismicité, illustre bien ce défaut (Hammoum et al, 2010).



**Figure 43.** *Fissures inclinées à la base de la paroi [Photo Hammoum].*

### 3.7. Organigramme de calcul

L'étude hydrodynamique approchée par la méthode analytique de Housner, souvent méconnue par les ingénieurs civils de bureaux d'études, se prête bien à la programmation. Aussi un programme de calcul informatique a été développé sur un classeur Excel. Nous présentons ci-après son organigramme.

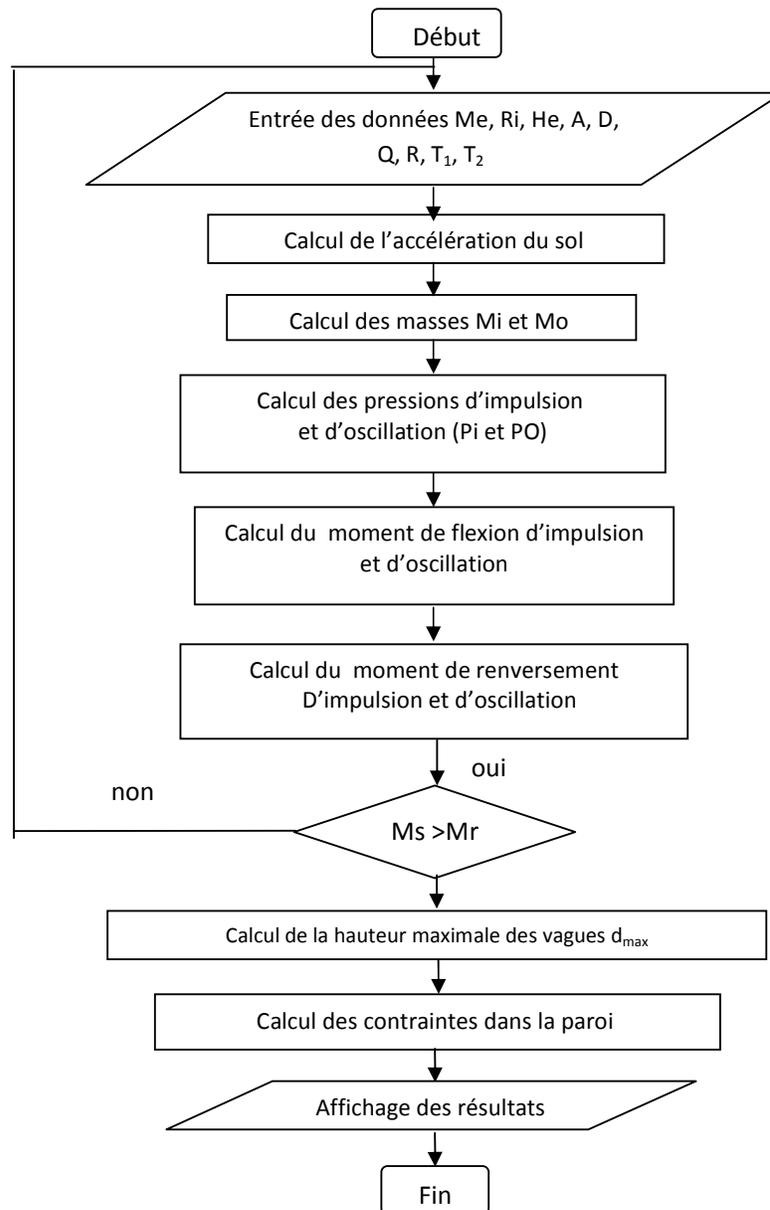


Figure 44. Organigramme de l'étude hydrodynamique approchée par la méthode de Housner.

### 3.8. Conclusion

---

Les règles et normes constructives propres à chaque pays dépendent de nombreux facteurs. Il serait illusoire de vouloir établir un parallèle rigoureux entre les différentes règles, ou de souhaiter obtenir une uniformisation parfaite entre tous les règlements. Néanmoins, la quasi-totalité des méthodes d'évaluation de l'accélération du sol est basée sur la théorie dynamique du génie sismique.

Tous les codes et standards suggèrent de modéliser le système liquide-réservoir par un système mécanique équivalent, où la masse du liquide est divisée en une masse d'impulsion et une deuxième masse d'oscillation, tel que c'est développé par la méthode de Housner.

Dans ce chapitre, nous avons montré que la négligence ou l'omission du phénomène hydrodynamique sous estimait considérablement les contraintes de traction (horizontales et verticales) agissant dans la paroi. Cette négligence est la cause principale de l'apparition des fissures obliques sur la paroi du réservoir, localisées à la liaison paroi-radier ; compromettant ainsi l'étanchéité de l'ouvrage. Ces fissurations constituent une pathologie très largement observée sur des réservoirs actuellement en service en Algérie, particulièrement en zone IIb (moyenne sismicité) et zone III (forte sismicité).

Contrairement à ce qui est énoncé dans le RPA, la prise en compte de l'effet hydrodynamique dans les calculs des réservoirs, quelque soit leur capacité de stockage n'est pas un non sens.

Les relations empiriques proposées par celui ci pour le calcul de la période fondamentale, ne sont pas applicables aux réservoirs. Pour cela, nous proposons une relation qui tient compte des oscillations planes non couplées avec d'autres modes d'oscillations. Cette relation fait appel à la rigidité flexionnelle (EI) et à la répartition uniforme du poids de l'ouvrage (P).

En considérant les nouveaux défis qui attendent notre société en termes de respect de l'environnement et les nouvelles contraintes induites par le développement durable, les ingénieurs de génie civil doivent intégrer des facteurs environnementaux dans leurs calculs. Pour ce faire, le RPA peut s'inspirer de l'expérience de l'Eurocode 8, qui affecte un coefficient d'importance à l'accélération du sol (ce coefficient dépend de l'usage du réservoir et du risque majeur pour les vies humaines et des conséquences économiques, sociales et pour l'environnement).

Enfin, cette recherche souhaite poser les jalons sur une réflexion, en vue de la mise au point urgente d'un règlement parasismique algérien des ouvrages hydrauliques.

*Notons, toutefois, que cette approche par modèle physique reste réservée au diagnostic et à l'analyse de risques approfondis ou à l'étude d'un mécanisme particulier. Cependant, elle ne peut pas être appliquée à l'échelle d'un parc entier et pour l'ensemble des mécanismes de vieillissement.*

## **4. Chapitre 4 : Evaluation de la vulnérabilité des réservoirs en béton vis-à-vis des aléas naturels, par une approche par expertise**

---

## 4.1. Introduction

Le parc algérien des réservoirs de stockage d'eau potable compte près de 40 000 réservoirs et est majoritairement construit en béton armé. Le retour d'expérience de près d'un demi-siècle de gestion a mis en évidence une grande disparité du comportement de ces ouvrages, qui se manifeste par plusieurs pathologies (Hammoum *et al*, 2010). Le manque d'entretien de ces réservoirs, directement exposés aux menaces naturelles amène une accélération du phénomène de vieillissement. Le diagnostic et l'expertise de ces réservoirs ayant des pathologies diverses sont des tâches complexes.

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 dans le niveau de difficulté est très relatif. Devant le même problème exposé, les solutions proposées par les experts ne sont pas évidemment uniques. Chaque expert interprète le problème selon ses propres connaissances, car il n'existe pas une loi dite de diagnostic, mais il y a un savoir faire pour le diagnostic. Dans certaines situations d'urgence (exemple, après un grave séisme), la tâche de diagnostic exige au même temps rapidité et efficacité. Devant ces situations exceptionnelles, il y a toujours une insuffisance d'experts, si bien qu'on est amené à faire participer les ingénieurs les moins expérimentés dans la tâche de diagnostic. C'est ainsi que nous proposons, à travers cette section, 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 ... etc.) d'un réservoir de stockage, en les guidant dans leur diagnostic. Ce critère de vulnérabilité permet au gestionnaire de fixer les priorités d'intervention dans son programme de réhabilitation ou de réparation. Il est même en mesure de décider de la restriction de service ou de la démolition d'un ouvrage.

## 4.2. Approche par expertise

Le diagnostic et l'analyse de risque peuvent être réalisés par expertise pure dans le cadre d'études préliminaires ou de diagnostic rapide. Cette approche qui fait appel à l'inspection visuelle est pratiquée par les experts lorsqu'ils ne disposent pas de données suffisantes sur l'ouvrage. Elle repose sur les seules connaissances et retour d'expérience des experts.

Parmi ces 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 armé au nord du Maroc (Bezzazi *et al.*, 2008). La méthode GNDT fait intervenir onze paramètres structuraux, architecturaux et de situation qui permettent de calculer l'indice de vulnérabilité  $I_v$  au séisme, soit :

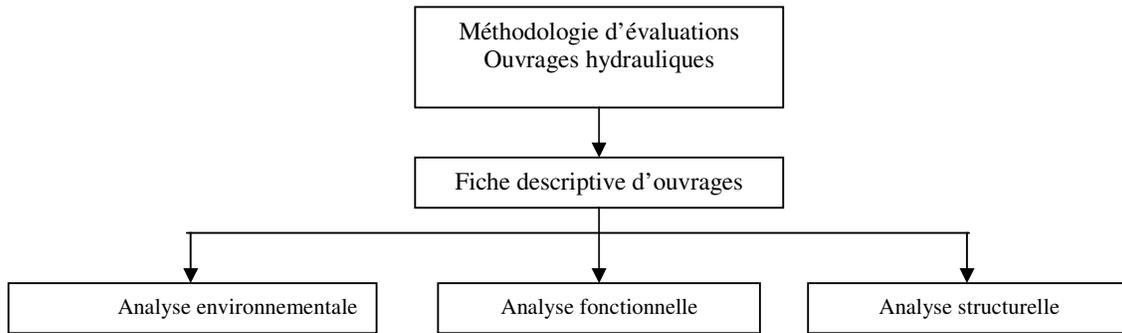
$$I_v = 12,5 + 2,5 \cdot \sum_{i=1}^{11} K_i \cdot W_i$$

Où  $K_i$  désigne la qualification attribuée à chaque paramètre et  $W_i$  la pondération associée.

Cet indice  $I_v$  est normalisé de sorte que ses valeurs soient comprises entre 0 et 100 et trois niveaux de qualification sont retenus A, B et C.

Dans le domaine des réservoirs de stockage, Mathieu au Cemagref (Aix en Provence, France) a mené des recherches depuis les années 1990 et a proposé des méthodes d'évaluation structurelles, fonctionnelles et environnementales 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. L'organigramme ci-dessous schématise la méthodologie d'évaluation de ces ouvrages hydrauliques (Mathieu, 2003).



**Figure 45.** Organigramme de la méthodologie d'évaluation des réservoirs (Mathieu, 2003).

L'évaluation structurelle prend en compte divers aspects liés à la problématique de pérennité des ouvrages hydrauliques en béton, tant par le comportement des fondations et structures, que par les divers matériaux utilisés. L'analyse de l'environnement de l'ouvrage est faite sous la quintuple entrée des contextes géologique, sismique, hydraulique, neige, vent et des critères architecturaux. L'analyse de l'évaluation fonctionnelle est faite sous la triple entrée du niveau d'utilisation, des usagers de l'eau et de la sécurité des ouvrages.

### 4.3. Evaluation de la vulnérabilité d'un réservoir

En se basant sur l'approche de (Mathieu, 2003), nous nous intéressons à l'évaluation de la vulnérabilité d'un réservoir donné en béton vis-à-vis des aléas naturels (séisme, vent, neige,...), par la détermination d'un indice  $I_v$ . Pour le calcul de cet indice, nous faisons intervenir treize (13) paramètres qui sont résumés dans le tableau 14.

**Tableau 14.** Liste des paramètres d'analyse

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	Étanchéité des parois
	9	Étanchéité de la couverture
Analyse fonctionnelle	10	Défauts apparents
	11	Rôle de réservoir
	12	Importance du réservoir
	13	Fréquence d'entretien

Chacun des treize paramètres sera sanctionné par 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 des 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'expert qui aurait à analyser un même défaut ou pathologie. Donc, une analyse sur un nombre important de valeurs pose des difficultés de recoupement des classes qualitatives et évite ainsi 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 énumérées que nous avons adopté une analyse qualitative des états sur quatre valeurs pour les défauts et dégradations.

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

$$I_v = \sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot P_i = N_e + N_s + N_f$$

Nous désignons par ( $N_e$ ,  $N_s$ ,  $N_f$ ) les notes globales respectivement de l'analyse environnementale, de l'analyse structurelle et de l'analyse fonctionnelle.

Le choix des paramètres 1, 2, 3, 4 et 5 de l'analyse environnementale est dicté par des considérations d'implantations topographiques et hydrauliques au moment de la conception de l'étude. Par conséquent, la note globale de l'analyse environnementale  $N_e$  reste constante dans le temps.

Les paramètres 6, 7, 8, 9 et 10 caractérisent l'état des différents éléments structuraux du réservoir au moment de l'inspection visuelle par l'ingénieur expert. Elle résulte des dommages et vieillissement cumulés suite aux attaques et agressions d'ordre naturels (neige, vent, séisme, gel...). A cet effet, la note globale de l'analyse structurelle  $N_s$  est variable dans le temps.

Les paramètres 11, 12 et 13 ont un rapport avec les enjeux, la vocation et de l'usage de l'eau du réservoir. Pour cette raison, la note globale de l'analyse fonctionnelle  $N_f$  demeure constante dans le temps, sauf si le gestionnaire décide de lui changer d'affectation.

La notion de l'indice de vulnérabilité est liée à l'instant où l'on inspecte le réservoir. Il vient qu'un même réservoir peut avoir plusieurs indices de vulnérabilités durant son cycle de vie. Si nous considérons que  $I_{v0}$  est l'indice de vulnérabilité à l'instant initial où le réservoir est mis en service, après une durée  $t$  d'exploitation, cet indice va passer à  $I_{v1}$  ( $I_{v1} > I_{v0}$ ). Son état de dégradation et son état de vieillissement atteint dans le temps va le rendre plus vulnérable aux aléas naturels qu'à son état initial. Par conséquent, pour faire baisser l'indice de vulnérabilité, il est nécessaire d'agir directement sur les paramètres de la note globale de l'analyse structurelle  $N_s$ , et ce en passant par un projet de réhabilitation ou de réparation du réservoir. C'est ce que nous tacherons de démontrer à travers l'application pratique.

## 4.4. Evaluation environnementale

### 4.4.1. Implantation de l'ouvrage

Un réservoir est exposé à diverses agressions de son milieu d'implantation naturel ; tels que les écarts de température, l'humidité, la présence et l'attaque par les chlorures, l'effet du gel et du dégel et l'air

marin. L'implantation de l'ouvrage est abordée ici sous le double aspect de la climatologie et de l'hydrologie. Le découpage climatique de l'Algérie peut être représenté globalement par cinq zones. Pour chaque zone, nous proposons une note élémentaire, tel que l'illustre le tableau 15.

**Tableau 15. Notes élémentaires de l'implantation de l'ouvrage**

N°	Lieu d'implantation de l'ouvrage	N <sub>ei</sub>
1	Montagne : Précipitations importantes avec plusieurs mois consécutifs d'enneigement.	1
2	Vallées du tell : climat froid et humide à faibles amplitudes thermiques avec des chutes de neige abondantes.	2
3	Hauts plateaux et Nord de l'Atlas Saharien : climat froid et sec en hiver et chaud et sec en été avec de forts écarts de température.	2
4	Grandes étendues sahariennes : climat froids et sec en hiver avec de forts écarts de température, chaud et sec en été.	3
5	Région côtière : climat humide avec des embruns en bord de mer. Milieux agressif par la présence d'eaux plus ou moins salines.	4

Les pondérations  $P_i$  sont déterminées à partir du paramètre hydrologique (tableau 16). Trois lois régissent la répartition des pluies en Algérie et ont été définies par Seltzer en 1946, comme suit :

- la hauteur de pluie augmente avec l'altitude. Elle est plus élevée sur les versants exposés aux vents humides que sur les autres,
- elles augmentent de l'Ouest vers l'Est,
- elles diminuent à mesure qu'on s'éloigne de littoral méditerranéen vers le sud.

**Tableau 16. Coefficients de pondération en fonction de la situation géographique**

N°	Situation géographique.	$P_i$
1	Réservoir situé sur la bande nord - Est de l'Algérie	4
2	Réservoir situé sur la bande nord au centre de l'Algérie	3
3	Réservoir situé sur la bande nord - Ouest de l'Algérie	2
4	Réservoir situé au sud de l'Algérie	1

#### 4.4.2. Zone sismique

En Algérie, le critère de zonage sismique (DTR B-C 2-48, 2003), classe le territoire en quatre zones de sismicité croissante. Nous proposons pour les différentes zones les notes élémentaires données dans le tableau 17.

**Tableau 17. Notes élémentaires de la zone sismique**

N°	Zone	Sismicité	Nei
1	Zone 0	négligeable	1
2	Zone I	Faible	1
3	Zone IIa	moyenne	2
4	Zone IIb	moyenne	3
5	Zone III	Elevée	4

Par ailleurs, les coefficients de pondération  $P_i$  dépendent du risque majeur que représente le réservoir pour les vies humaines, conséquences économiques et sociales comme cela a été observé lors des

séismes survenus en Algérie (El Asnam 1980, Oued Djer 1988, Tipaza 1989, Mascara 1994 et Boumerdes 2003). Ces coefficients sont déterminés selon la nature du site d'implantation (tableau 18).

**Tableau 18.** Coefficients de pondération en fonction du site de l'ouvrage

N°	Site d'implantation de l'ouvrage	P <sub>i</sub>
1	En rase campagne	1
2	En milieu rural	2
3	Dans une zone industrielle	3
4	En milieu urbain	4

#### 4.4.3. Type de sol

L'aspect géologique est pris en compte en analysant la catégorie du site d'implantation qui est fonction des propriétés mécaniques du sol (tableau 19). Les sites sont classés en quatre catégories par le Règlement Parasismique Algérien (DTR B-C 2-48, 2003) en fonction de la vitesse moyenne de l'onde de cisaillement  $V_s$ .

**Tableau 19.** Notes élémentaires en fonction des conditions du terrain

N°	Type de sol	Nature de sol	Vitesse moyenne	N <sub>ei</sub>
1	Catégorie S <sub>1</sub>	Sol rocheux	$V_s \geq 800$ m/s	1
2	Catégorie S <sub>2</sub>	Sol ferme	$V_s \geq 400$ m/s	2
3	Catégorie S <sub>3</sub>	Sol meuble	$V_s \geq 200$ m/s	3
4	Catégorie S <sub>4</sub>	Sol très meuble	$V_s < 200$ m/s	4

Les poids  $P_i$  sont déterminés par certains effets du site d'implantation (liquéfaction des sables, le glissement de terrain, présence de faille en surface et les éboulements rocheux) qui peuvent considérablement amplifier les oscillations du sol et provoquer la perte de tout ouvrage de génie civil, même parasismique. Les ouvrages qui y sont implantés peuvent parfois subir des charges sismiques jusqu'à cinq fois plus élevées que les constructions similaires situées dans une zone moins dangereuse (Zacek, 2004). Il est donc impératif d'en tenir compte dans une étude de vulnérabilité et le recours à un géotechnicien ou géologue serait souhaitable. En résumé, nous pouvons définir les poids  $P_i$  comme indiqué dans le tableau 20.

**Tableau 20.** Coefficients de pondération en fonction des effets de site

N°	Effet de site d'implantation de l'ouvrage	P <sub>i</sub>
1	Risque de liquéfaction de sol en milieu alluvionnaire	1
2	Présence de faille en surface	2
3	Risque d'éboulement rocheux	3
4	Risque de glissement de terrain	4

#### 4.4.4. Zone de la neige

Le Règlement Neige et Vent 99 (DTR C 2-4.7., 2000) dresse une carte de neige en décomposant le territoire Algérien en quatre zones. La surcharge de neige sur le sol  $S_k$  par unité de surface est fonction de la localisation géographique (zone) et de l'altitude  $H$  par rapport au niveau de la mer (tableau 21).

**Tableau 21.** Notes élémentaires en fonction du zonage de neige

N°	Zone de neige	N <sub>ei</sub>
1	Zone A	4
2	Zone B	3
3	Zone C	2
4	Zone D	1

Notons que pour la zone D dans le désert Algérien, nous observons plutôt l'ensablement des terrasses de couverture. La pondération  $P_i$  du paramètre de zone de neige est déterminée par la forme de la toiture ; selon qu'elle favorise ou non l'accumulation de la neige (tableau 22).

**Tableau 22.** Coefficients de pondération en fonction de la forme de la toiture

N°	Toiture de couverture	P <sub>i</sub>
1	En forme de voute	1
2	En pentes à un ou deux versants	2
3	A versants multiples ou à redans	3
4	Avec discontinuités de niveaux marquées ou horizontales	4

#### 4.4.5. Action du vent

Le Règlement Neige et Vent 99 a recours à la notion de vitesse de référence du vent  $V_{ref}$  pour le découpage du territoire Algérien, en trois zones de vent.  $V_{ref}$  est définie comme une vitesse moyenne sur dix minutes mesurée dans les conditions conventionnelles avec une période de retour de 50 ans. Le tableau 23 donne les notes élémentaires correspondant à l'action du vent.

**Tableau 23.** Notes élémentaires de l'action du vent

N°	Zones de vent	Vitesse de référence $V_{ref}$ [m/s]	N <sub>ei</sub>
1	Pas d'action de vent	---	1
2	Zone I	25	2
3	Zone II	28	3
4	Zone III	31	4

Les coefficients de pondération  $P_i$  seront déterminés en se référant au Règlement Neige et Vent pour tenir compte des facteurs de site pouvant amplifier l'effet du vent sur le réservoir :

- **Hauteur du réservoir**

- réservoir enterré :  $P_h = 0.25$ ,
- réservoir semi enterré :  $P_h = 0.50$ ,
- réservoir au sol :  $P_h = 0.75$ ,
- réservoir surélevé :  $P_h = 1.00$ .

- **Catégorie de terrain**

- en bord de mer, au bord d'un plan d'eau offrant au moins 5 km de longueur au vent, régions lisses et sans obstacles :  $P_c = 0.25$ ,

- régions de culture avec haies et avec des petites fermes, maisons ou arbres.  $P_c = 0.50$ ,
- zones industrielles ou suburbaines, forêts :  $P_c = 0.75$ ,
- zones urbaines dont au moins 15% de la surface est occupée par des bâtiments de hauteur moyenne supérieure à 15 m :  $P_c = 1,00$ .

- **Facteur topographique**

- Site 1 : site plat aux alentours des vallées et oueds sans effet d'entonnoir :  $P_t = 0.25$ ,
- Site 2 : site aux alentours des vallées et oueds avec effet d'entonnoir :  $P_t = 0.50$ ,
- Site 3 : site aux alentours des plateaux :  $P_t = 0.75$ ,
- Site 4 : site montagneux ou aux alentours des collines :  $P_t = 1,00$ .

- **Etat de la surface du réservoir**

- Lisse (béton lisse, peinture lisse, paroi bien enduite) :  $P_s = 0.25$ ,
- Peu rugueux (béton moyennement rugueux, paroi mal enduite) :  $P_s = 0.50$ ,
- Rugueux (béton rugueux, paroi non enduite) :  $P_s = 0.75$ ,
- Très rugueux (ondulations, nervures, plissements) :  $P_s = 1.00$ .

Le coefficient de pondération  $P_i$  sera donné par la somme des pondérations partielles des quatre facteurs.  $P_i = P_h + P_c + P_t + P_s$

## 4.5. Evaluation structurelle

### 4.5.1. Type de structure

La connaissance du système structurel et de la nature des matériaux avec lesquels sont réalisés les éléments structuraux est indispensable pour comprendre le comportement du réservoir vis à vis d'une excitation sismique pour pouvoir ainsi donner des explications probables aux dommages observés. Les notes élémentaires correspondant aux types de structures sont illustrées sur le tableau 24.

**Tableau 24.** Notes élémentaires en fonction du type de structure

N°	Type de structure	$N_{ei}$
1	Réservoir enterré	1
2	Réservoir semi enterré	2
3	Réservoir posé au sol	3
4	Réservoir surélevé (château d'eau)	4

Les coefficients  $P_i$  sont déterminés en fonction du type de matériaux utilisés pour la réalisation des éléments structuraux de l'ouvrage (tableau 25).

**Tableau 25.** Coefficients de pondération en fonction du type de matériaux

N°	Type de matériaux des éléments	$P_i$
1	Charpente métallique	1
2	Béton précontraint	2
3	Béton arme	3
4	Maçonnerie	4

### 4.5.2. Type de fondation

La particularité des réservoirs est qu'ils subissent de fortes variations de surcharge d'exploitation (eau contenue dans la cuve), de façon souvent quotidienne et pour certains 3 à 4 fois par jour durant toute leur longue période d'exploitation (Mathieu, 2003). Le type de fondation nous renseigne sur le comportement d'ensemble du réservoir vis-à-vis de ces chargements cycliques. Une note est alors associée à chaque type de fondation (tableau 26).

**Tableau 26.** Notes élémentaire en fonction du type de fondations

N°	Type de fondation	N <sub>ei</sub>
1	Puits ou pieux	1
2	Radier général	2
3	Semelles continues	3
4	Semelles isolées	4

Comme le sol de fondation subit un chargement cyclique (plusieurs fois par jour), le mécanisme physique mis en jeu est le tassement de la fondation. Ce phénomène, fréquemment rencontré, génère des fissures dans la structure ainsi que des désordres importants ou localisés dans un élément résistant qui peuvent entraîner la limitation ou l'interdiction de l'exploitation du réservoir. C'est pour cette raison que les poids  $P_i$  sont déterminés compte tenu des tassements éventuels subits par la fondation (Tableau 27).

**Tableau 27.** Coefficients de pondération en fonction des tassements de la fondation

N°	Etat des tassements	P <sub>i</sub>
1	Pas de tassements apparents	1
2	Début d'évolution du tassement avec arrêt	2
3	Tassement indiquant une évolution avancée	3
4	Tassement qui traduit une modification du comportement de la structure	4

### 4.5.3. Etanchéité des parois

Les réservoirs sont classés selon leur mode d'étanchéité (Ducrot *et al*, 1999) comme suit :

- 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 n'assurant qu'une fonction mécanique,
- classe D : ouvrages construits à l'aide d'éléments préfabriqués.

Ce qui nous amène à proposer les notes élémentaires du tableau 28, en fonction des classes d'étanchéité. Quant aux poids  $P_i$ , ils sont déterminés en fonction du degré de satisfaction de cette étanchéité tels que donnés au tableau 29.

**Tableau 28.** Notes élémentaires en fonction du mode d'étanchéité de la paroi

N°	Mode d'étanchéité de la paroi	N <sub>ei</sub>
1	Classe A	1
2	Classe B	2
3	Classe C	3
4	Classe D	4

**Tableau 29.** Coefficient de pondération en fonction de l'état de l'étanchéité

N°	Etat de l'étanchéité de la paroi	P <sub>i</sub>
1	Satisfaisante	1
2	Assez satisfaisante	2
3	Moyennement satisfaisante	3
4	Insatisfaisante	4

#### 4.5.4. Etanchéité de la couverture

Les notes élémentaires sont allouées en fonction du type de revêtement réalisé conformément au tableau 30. Quant aux poids P<sub>i</sub>, ils sont déterminés en fonction du degré de dégradation et par voie de conséquence de l'état de satisfaction de cette étanchéité comme indiqué au tableau 31.

**Tableau 30.** Notes élémentaires en fonction du type d'étanchéité de la couverture

N°	Type de couverture	N <sub>ei</sub>
1	Revêtement par imprégnation de surface	1
2	Revêtement de type enduit	2
3	Revêtement résine synthétique	3
4	Revêtement par membrane	4

**Tableau 31.** Pondération en fonction du degré de satisfaction de l'étanchéité

N°	Etat de l'étanchéité de la couverture	P <sub>i</sub>
1	Neuve, pas de désordres visibles, satisfaisante	1
2	Peu de désordres visibles, assez satisfaisante	2
3	Vétuste, moyennement satisfaisante	3
4	Dégradée, insatisfaisante	4

#### 4.5.5. Défauts apparents

Pour les défauts rencontrés, le support à cette étude est la connaissance experte contenue dans la documentation technique relative à la pathologie des réservoirs. Près d'une centaine de défauts apparents sur les réservoirs en béton armé, béton précontraint et en maçonnerie ont été recensés par Mathieu. Il associe à chaque défaut un indice de gravité et propose un mode de réparation du défaut et dresse également une échelle croissante d'évaluation des désordres constituée de quatre niveaux (Mathieu et al., 1996).

- Niveau 1 : Peu ou pas de désordres visibles. Rien à signaler de particulier. Suivi et entretien normal de l'ouvrage (annuel ou biennuel, suivant nature et destination).

- Niveau 2 : Quelques défauts, ouvrage à surveiller.
- Niveau 3 : Défauts spécifiques de gravité variable. Demande un suivi et des investigations.
- Niveau 4 : L'ouvrage ne peut assurer sa fonction en toute fiabilité. Le risque de ruine est important. Il faut envisager éventuellement des solutions confortative de première urgence et/ou la démolition de l'ouvrage.

Ce qui nous amène à proposer les notes élémentaires du tableau 32. Le défaut apparent n'a de sens, que si on lui associe l'âge de l'ouvrage. Ce qui nous amène à proposer les coefficients de pondérations  $P_i$  contenus dans le tableau 33.

**Tableau 32.** Notes élémentaires en fonction de l'indice de gravité du défaut

N°	Indice de gravité	$N_{ei}$
1	Niveau 1	1
2	Niveau 2	2
3	Niveau 3	3
4	Niveau 4	4

**Tableau 33.** Coefficients de pondération en fonction de l'âge de l'ouvrage

N°	Age de l'ouvrage	$P_i$
1	Age du réservoir inférieur à 10 ans	1
2	Age compris entre 11 ans et 20 ans	2
3	Age compris entre 21 ans et 30 ans	3
4	Age du réservoir supérieur à 30 ans	4

## 4.6. Evaluation fonctionnelle

### 4.6.1. Rôle du réservoir

L'intérêt accordé à un réservoir par le gestionnaire du patrimoine de réservoirs de stockage est fonction du rôle qu'il occupe dans le système d'alimentation. La note élémentaire accordée à ce paramètre dépend de la position du réservoir dans le schéma d'alimentation en eau potable comme indiqué au tableau 34. Quant aux poids  $P_i$ , ils sont déterminés en fonction de l'état de l'accessibilité pour l'entretien ou la réparation de l'ouvrage expertisé comme proposé au tableau 35.

**Tableau 34.** Notes élémentaires du rôle de réservoir

N°	Rôle du réservoir dans le système d'alimentation	$N_{ei}$
1	Réservoir brise charge ou de transit	1
2	Réservoir de distribution	2
3	Réservoir de tête (ou réservoir tampon)	3
4	Réservoir de station de pompage	4

**Tableau 35.** Pondération en fonction de l'état de l'accessibilité pour entretien

N°	Etat de l'accessibilité du réservoir	$P_i$
1	Accessibilité par route revêtue	1
2	Accessibilité par piste carrossable	2
3	Accessibilité par sentier piéton	3
4	Réservoir inaccessible	4

#### 4.6.2. Importance du réservoir

En s'inspirant du RPA 2003, les bâtiments (alimentés par les réservoirs) peuvent être classés en quatre groupes d'usage, en fonction de leur importance vis-à-vis de la protection des personnes (abonnés) abritées, des biens économiques et culturels de la communauté qu'ils représentent.

- *Groupe 1A* : Bâtiments d'importance vitale qui doivent demeurer opérationnels après un séisme majeur pour les besoins de la survie de la région, de la sécurité publique, de la défense nationale et le bâtiment abritant les centres de décisions stratégiques.

- *Groupe 1B* : Bâtiments de grande importance abritant fréquemment de grands rassemblements de personnes, tels qu'une grande mosquée, des bâtiments à usage de bureaux, des bâtiments industriels et commerciaux, scolaires, universitaires, constructions sportives et culturelles, pénitenciers, grands hôtels, bibliothèques ou d'archives d'importance régionale, musée, établissements sanitaires autres que ceux du groupe 1A et les centres de production ou de distribution d'énergie.

- *Groupe 2* : Ouvrages courants ou d'importance moyenne tels que bâtiments d'habitation collective ou à usage de bureaux, bâtiments pouvant accueillir au plus 300 personnes simultanément tels que, des bâtiments à usage de bureaux, des bâtiments industriels, des parkings de stationnement publics,...

- *Groupe 3* : Ouvrages de faible importance tels que les bâtiments industriels ou agricoles abritant des biens de faibles valeurs, bâtiments à risque limité pour les personnes et les constructions provisoires

Nous pouvons alors déduire que l'intérêt accordé à un réservoir dépend aussi de la sureté de distribution de l'eau aux bâtiments abritant les usagers. Ce qui nous amène à proposer les notes élémentaires du tableau 36.

**Tableau 36.** Notes élémentaires en fonction de l'importance de l'ouvrage

N°	Importance du réservoir	N <sub>ei</sub>
1	Le réservoir alimente des bâtiments du groupe 3	1
2	Le réservoir alimente des bâtiments du groupe 2	2
3	Le réservoir alimente des bâtiments du groupe 1B	3
4	Le réservoir alimente des bâtiments du groupe 1A	4

Le second aspect qui mérite d'être abordé pour compléter la sécurité et la sureté de distribution des abonnés est la capacité de stockage. C'est dans cette optique que nous proposons des poids P<sub>i</sub> en fonction de la capacité de stockage du réservoir comme indiqués au tableau 37.

**Tableau 37.** Pondération en fonction de la capacité de stockage du réservoir

N°	Capacité de l'ouvrage	P <sub>i</sub>
1	entre 0 à 500 m <sup>3</sup>	1
2	entre 500 m <sup>3</sup> et 1 000 m <sup>3</sup>	2
3	entre 1000 m <sup>3</sup> et 2 000 m <sup>3</sup>	3
4	supérieur à 2 000 m <sup>3</sup>	4

### 4.6.3. Fréquence d'entretien

La maîtrise du vieillissement des réservoirs en service ne peut être assurée que par des opérations d'entretien et de réparation. Cette opération influe directement sur le niveau de vulnérabilité des réservoirs. Ce qui nous amène à proposer les notes élémentaires données au tableau 38.

La pondération à considérer pour ce paramètre est le rôle du réservoir dans le réseau d'alimentation et son importance dans la distribution des abonnés. Or ces paramètres ont déjà été abordés plus haut. Ce qui nous amène à considérer une pondération égale à 1 pour toutes les fréquences d'entretien.

**Tableau 38.** Notes élémentaires en fonction de la fréquence d'entretien du réservoir

N°	Fréquence d'entretien	Nei
1	Mensuelle	1
2	Trimestrielle	2
3	Semestrielle	3
4	Annuelle	4

### 4.7. Classification

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 39.

**Tableau 39.** Grille de hiérarchisation d'une note partielle d'un paramètre

		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

En considérant tous les critères d'analyse énumérés précédemment au nombre de treize, nous proposons une classification, répartie en quatre niveaux de vulnérabilité, comme montrée en tableau 40:

**Tableau 40.** Classification d'un réservoir en fonction de son «  $I_v$  »

Niveau de vulnérabilité	Vert	Orange 1	Orange 2	Rouge
Indice de vulnérabilité $I_v$	13 - 49	49 - 87	87 - 136	136 - 196

- **Le niveau vert :  $13 \leq I_v \leq 49$**  : Le réservoir expertisé n'est pas vulnérable. L'ouvrage présente un bon comportement aux aléas naturels et ne nécessite pas une attention particulière après sa réalisation et sa mise en service. Seules les interventions ordinaires périodiques sont nécessaires.

- **Le niveau orange 1 :  $49 \leq I_v \leq 87$**  : Le réservoir présente une vulnérabilité moyenne aux aléas naturels.

- **Le niveau orange 2 :  $87 \leq I_v \leq 136$**  : Le réservoir a une vulnérabilité assez élevée aux aléas naturels.

- **Le niveau rouge :  $136 \leq I_v \leq 196$**  : 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, immédiatement.

## 4.8. Etude de cas

### 4.8.1. Présentation du réservoir

L'ouvrage qui a fait l'objet de notre expertise en juin 2008 est un réservoir de stockage d'eau potable de capacité 2000 m<sup>3</sup> (figure 46), implanté dans la ville côtière de Jijel en Algérie (Hammoum *et al.* 2010). Ce réservoir circulaire posé au sol et réalisé en 1987 a les caractéristiques géométriques mesurées sur site et consignées dans le tableau 41.



Figure 46. Vue générale du réservoir expertisé

Tableau 41. Caractéristique générales du réservoir

Périmètre extérieur du réservoir (mesuré sur site)	64,10	m
Diamètre extérieur du réservoir déduit du périmètre	20,40	m
Hauteur totale de la paroi mesurée sur site	6,20	m
Hauteur au dessus du niveau libre du liquide mesurée sur site	0,20	m
Epaisseur des parois déduite	0,30	m
Hauteur d'eau utile dans le réservoir	6,00	m
Diamètre intérieur du réservoir	19,80	m
Epaisseur de la coupole	0,15	m
Capacité réelle du réservoir	1 848,13	m <sup>3</sup>
La flèche de la coupole f	2,06	m
Le rayon de courbure de la coupole R	24,83	m
La surface de la coupole S	321,18	m <sup>2</sup>

### 4.8.2. Evaluation de la vulnérabilité du réservoir à la mise en service en 1987

Nous donnons ci-après le détail du calcul de l'indice de vulnérabilité simulé au jour de la mise en service en 1987 dans le tableau 42.

**Tableau 42. Indice de vulnérabilité au jour de la mise en service en 1987**

Paramètre	Note élémentaire	Nei	Coefficient de pondération	Pi	Nei . Pi
1	Région côtière	4	Bande nord est	4,00	16,00
2	Zone sismique IIa	2	Milieu urbain	4,00	8,00
3	Sol meuble, type S3	3	Présence faille en surface	2,00	6,00
4	Zone B	3	Toiture en voute	1,00	3,00
5	Zone de vent I	2	Ph = 0.75, Pc = 1,00, Pt = 0.75, Ps = 0.75.	3,25	6,50
6	Réservoir posé au sol	3	béton arme	3,00	9,00
7	Radier	2	tassement avec arrêt	1,00	2,00
8	classe B	2	Etanchéité satisfaisante	1,00	2,00
9	revêtement par membrane	4	Neuve, pas de désordres visibles, satisfaisante	2,00	8,00
10	Niveau 1	1	Réservoir âgé de 1 an	1,00	1,00
11	Station de pompage	3	route revêtue	1,00	3,00
12	Bâtiments du groupe 1B	3	Capacité 2000 m <sup>3</sup>	3,00	9,00
13	Semestrielle	3		1,00	3,00
<b>Indice de vulnérabilité Iv</b>					<b>76,50</b>

La valeur de l'indice de vulnérabilité ( $49 \leq I_v \leq 87$ ) simulée au jour de la mise en service en 1987 classe le réservoir, en **orange 1**. Il présente une vulnérabilité moyenne aux différents aléas naturels.

#### 4.8.3. Evaluation de la vulnérabilité en cours d'exploitation (juin 2008)

- **Défauts apparents**

L'inspection visuelle lors de l'expertise du réservoir 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 d'endroit de la paroi avec des dimensions allant jusqu'à 15 cm chacun (figure 47).
- Présence de végétation : Présence de trois bananiers d'une hauteur de deux mètres chacun autour du réservoir (figure 48).
- 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. Cette pathologie est observée sur environ six endroits de la paroi (figure 49).
- 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 (figure 50).



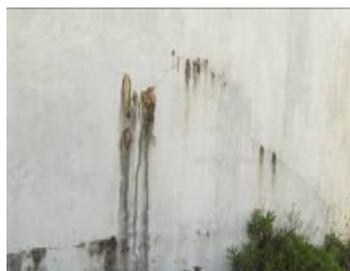
**Figure 47.** Epaufrure, aciers dénudés



**Figure 48.** Présence de végétation



**Figure 49.** Corrosion des aciers



**Figure 50.** Suintement et fissures sur la paroi

Selon la classification de Mathieu et au vu des défauts énumérés plus haut, nous déduisons que le réservoir expertisé est classé 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 qui mettent en cause la durée de vie de l'ouvrage.

- **Etanchéité de la couverture**

Le complexe d'étanchéité de la couverture 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.



**Figure 51.** Complexe d'étanchéité de la coupole du réservoir détérioré

- **Etanchéité 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, l'étanchéité du réservoir est de classe B. Le degré de satisfaction de l'étanchéité est médiocre et ceci se traduit par la présence de fuites le long d'une longue fissure à la base de la paroi (figure 52) et la présence de plusieurs points de fuites et suintement autour de la paroi (figure 53).



Figure 52. Suintement et fuites sur la paroi



Figure 53. Fuite sur la paroi du réservoir

- **Détermination de l'indice de vulnérabilité**

Nous donnons 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 (tableau 43). La valeur de l'indice de vulnérabilité obtenue [ $87 < (I_v=98,50) < 136$ ] reclasse le réservoir expertisé en **orange 2**. Il présente une vulnérabilité assez élevée aux différents aléas naturels. Remarquons que de tous les défauts structuraux énumérés plus haut, celui qui classe le réservoir dans ce niveau de vulnérabilité est le défaut de corrosion des aciers. Le réservoir est constitué de deux nappes, et celle qui fait l'objet de notre inquiétude est la nappe extérieure qui ne présente pas un enrobage suffisant ; ce qui l'expose aux agressions de l'atmosphère chargée de sels marins. L'analyse structurelle est liée à l'entretien du réservoir et est rendue responsable pour une grande partie du niveau de vulnérabilité global. Par conséquent, pour faire baisser l'indice de vulnérabilité, il est nécessaire d'agir directement sur l'évaluation structurelle  $N_s$ , en passant par un projet de réhabilitation.

**Tableau 43.** Calcul de l'indice de vulnérabilité au jour de l'inspection en juin 2008

Paramètre	Note élémentaire	Nei	Coefficient de pondération	Pi	Nei . Pi
1	Région côtière	4	Bande nord est	4,00	16,00
2	Zone IIa moyenne sismicité	2	Milieu urbain	4,00	8,00
3	Sol meuble, type S3	3	Présence faille en surface	2,00	6,00
4	Zone B	3	Toiture en forme de voute	1,00	3,00
5	Zone I	2	Ph = 0.75, Pc = 1,00, Pt = 0.75, Ps = 0.75.	3,25	6,50
6	Réservoir posé au sol	3	béton arme	3,00	9,00
7	Radier	2	tassement avec arrêt	1,00	2,00
8	classe B	2	Etanchéité insatisfaisante	4,00	8,00
9	revêtement par membrane	4	Dégradée, insatisfaisante	4,00	16,00
10	Niveau 3 (défaut de classe E)	3	Réservoir âgé de 22 ans	3,00	9,00
11	Station de pompage	3	route revêtue	1,00	3,00
12	Pour bâtiments du groupe 1B	3	Réservoir de capacité 2000 m <sup>3</sup>	3,00	9,00
13	Semestrielle	3		1,00	3,00
<b>Indice de vulnérabilité I<sub>v</sub></b>					<b>98,50</b>

#### 4.8.4. 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 du réservoir de l'extérieur. Ce chemisage en béton armé vise à reconstituer la nappe des aciers extérieurs corrodés, suite à l'exposition prolongée à l'air marin. 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 demeure 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). Chaque bande d'un mètre est soumise à une charge trapézoïdale que nous admettons rectangulaire lors du calcul. Les résultats du calcul hydrostatique ; efforts internes de traction et armatures horizontales en forme de cerces ; mené sur la paroi de la chemise sont résumés dans ce qui suit.

#### 4.8.5. Pression hydrostatique sur chaque bande horizontale de la paroi

La pression unitaire de l'eau sur chaque bande de la paroi est donnée par relation suivante :

$$q_i = \varpi . h_i$$

Avec :  $q_i$  : pression au niveau de la base de la bande d'ordre (i),

$\varpi$  : Masse volumique de l'eau,

$h_i$  : profondeur de la bande (i) à la base, jusqu'au trop plein.

La pression moyenne de la bande (i) est :  $Q_i = \frac{1}{2}(q_i + q_{i+1})$

Sous l'action des pressions de l'eau sur chaque bande, celle-ci sera tendue avec un effort de traction

correspondant :  $T_i = \frac{D}{2}.Q_i$

**Tableau 44.** Pression hydrostatique à la base de chaque bande horizontale de la paroi

N° de la bande	Profondeur (m)	Pression (Kg/m <sup>2</sup> )
<i>Bande I</i>	6,00	3 000,00
<i>Bande II</i>	5,00	2 500,00
<i>Bande III</i>	4,00	2 000,00
<i>Bande IV</i>	3,00	1 500,00
<i>Bande V</i>	2,00	1 000,00
<i>Bande VI</i>	1,00	500,00

**Tableau 45.** Pression moyenne hydrostatique au niveau de chaque bande de la paroi

N° de la bande	Pression moyenne (Kg/m <sup>2</sup> )
<i>Bande I</i>	2 750,00
<i>Bande II</i>	2 250,00
<i>Bande III</i>	1 750,00
<i>Bande IV</i>	1 250,00
<i>Bande V</i>	750,00
<i>Bande VI</i>	250,00

Cet effort de traction dans chaque bande (i) sera absorbé par les armatures circulaires, sous forme de cerces.

A l'état limite ultime :  $T_u = 1,5 \cdot \frac{D}{2} \cdot Q_i$

A l'état limite ultime :  $T_s = \frac{D}{2} \cdot Q_i$

**Tableau 46.** Efforts de traction au niveau de chaque bande de la paroi

N° de la bande	Etat limite ultime	Etat limite de service
	Effort $T_u$ (Kg/ml)	Effort $T_s$ (Kg/ml)
<i>Bande I</i>	40 845,06	27 230,04
<i>Bande II</i>	33 418,68	22 279,12
<i>Bande III</i>	25 992,31	17 328,21
<i>Bande IV</i>	18 565,93	12 377,29
<i>Bande V</i>	11 139,56	7 426,37
<i>Bande VI</i>	3 713,19	2 475,46

#### 4.8.6. Armatures de chaque bande horizontale de la paroi

- **A l'état limite ultime**

La section des armatures tendues sur chaque bande sera donnée par :

$$A_u \geq \frac{T_u}{\left( \frac{f_e}{\gamma_s} \right)}$$

**Tableau 47.** Ferrailage des bandes horizontales à l'ELU

N° de la bande	Effort Tu (Kg/ml)	Au (cm <sup>2</sup> /ml)
Bande I	40 845,06	11,52
Bande II	33 418,68	9,43
Bande III	25 992,31	7,33
Bande IV	18 565,93	5,24
Bande V	11 139,56	3,14
Bande VI	3 713,19	1,05

- **A l'état limite de service**

La section des armatures tendues sur chaque bande sera donnée par :

$$A_s \geq \frac{T_s}{\sigma_{st}}$$

La contrainte  $\sigma_{st}$  dépend de l'état d'ouverture des fissures dans le béton. Pour le calcul de la paroi, nous considérerons, la fissuration comme étant très préjudiciable (selon le BAEL 91 révisé 99, lorsque la section de béton est exposée à un milieu agressif ou doit assurer une étanchéité).

$$\sigma_{st} = 0,8 \min \left( \frac{2}{3} \cdot f_e ; \max \left( \frac{f_e}{2} ; 110 \sqrt{\eta \cdot f_{ij}} \right) \right)$$

Où

$\eta = 1,6$  si l'acier est haute adhérence

$\eta = 1,0$  si l'acier est rond lisse

**Tableau 48.** Ferrailage des bandes horizontales à l'ELS

N° de la bande	Effort Ts (Kg/ml)	As (cm <sup>2</sup> /ml)
Bande I	27 230,04	16,19
Bande II	22 279,12	13,25
Bande III	17 328,21	10,30
Bande IV	12 377,29	7,36
Bande V	7 426,37	4,42
Bande VI	2 475,46	1,47

- **Condition de fragilité**

La sollicitation provoquant la fissuration du béton ne doit pas entraîner le dépassement de la limite élastique dans l'acier. Alors la section entièrement tendue est considérée non fragile si :

$$A_{min} \geq B \cdot \frac{f_{t28}}{f_e} \geq 5,25 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

#### 4.8.7. Plans d'exécution de la réhabilitation

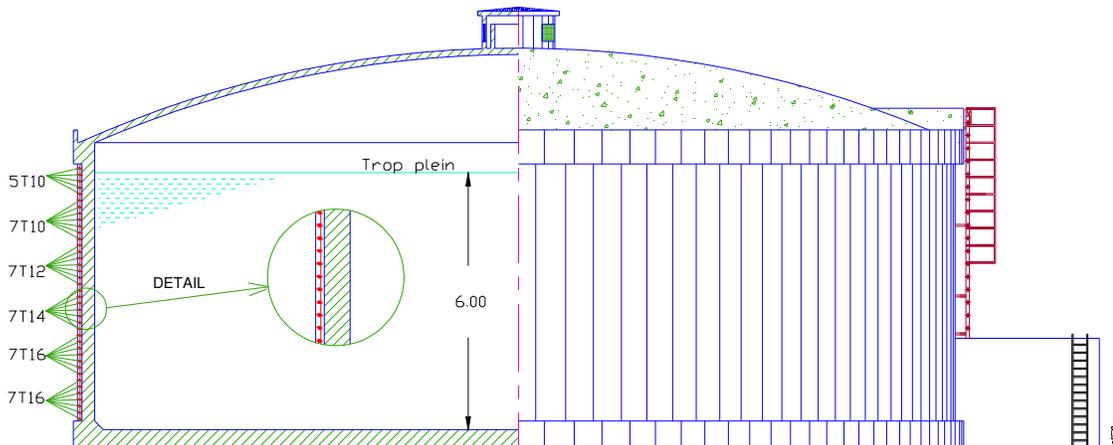
D'après le RPA 2003, le pourcentage total minimum d'armatures longitudinales, sur toute la section d'une bande de la paroi est de 0.5 % de B, soit donc : 5,00 cm<sup>2</sup>/ml.

Enfin, la section d'armature à adopter pour chaque bande est :  $A = \max(A_u ; A_s ; A_{min} ; A_{RPA})$

**Tableau 49.** Armatures des cerces horizontales sur chaque bande

N° de la bande	Au (cm <sup>2</sup> /ml)	As (cm <sup>2</sup> /ml)	Amin (cm <sup>2</sup> /ml)	A <sub>RPA</sub> (cm <sup>2</sup> /ml)	A adopté (cm <sup>2</sup> /ml)	Ferrailage
Bande I	11,52	16,19	5,25	5,00	16,19	1T16, e=14 cm
Bande II	9,43	13,25	5,25	5,00	13,25	1T16, e=14 cm
Bande III	7,33	10,30	5,25	5,00	10,30	1T14, e=14 cm
Bande IV	5,24	7,36	5,25	5,00	7,36	1T12, e=14 cm
Bande V	3,14	4,42	5,25	5,00	5,25	1T10, e=14 cm
Bande VI	1,05	1,47	5,25	5,00	5,25	1T10, e=14 cm

Le ferrailage de la paroi est complété par des armatures verticales de répartition. Leur section représente la moitié de la section des cerces, soit donc 1 HA 14 mm tous les 15 cm (représentant une section de 10,77 cm<sup>2</sup>/ml). D'après le RPA, il faut assurer une longueur minimale de recouvrement = 50.φ (Zone IIa), soit donc 50 cm. L'enrobage, sera pris égal à 4 cm de la paroi en contact avec l'air. Le plan d'exécution du renforcement adopté pour notre réservoir est donné en figure 54.


**Figure 54.** Plan d'exécution du chemisage

**Tableau 50.** Calcul de l'indice de vulnérabilité après réhabilitation du réservoir

Paramètre	Note élémentaire	Nei	Coefficient de pondération	Pi	Nei . Pi
1	Région côtière	4	Bande nord est	4,00	16,00
2	Zone sismique IIa	2	Milieu urbain	4,00	8,00
3	Sol meuble, type S3	3	Présence faille en surface	2,00	6,00
4	Zone B	3	Toiture en forme de voute	1,00	3,00
5	Zone de vent N° I	2	Ph = 0.75, Pc = 1,00, Pt = 0.75, Ps = 0.75.	3,25	6,50
6	Réservoir posé au sol	3	béton arme	3,00	9,00
7	Radier	2	tassement avec arrêt	1,00	2,00
8	classe B	2	Assez satisfaisante	2,00	4,00
9	revêtement par membrane	4	Assez satisfaisante	2,00	8,00
10	Niveau 2	2	Réservoir âgé de 22 ans	3,00	6,00
11	Station de pompage	3	route revêtue	1,00	3,00
12	Pour bâtiments du groupe 1B	3	Réservoir de capacité 2000 m <sup>3</sup>	3,00	9,00
13	Semestrielle	3	entretenu tous 1 fois/an	1,00	3,00
<b>Indice de vulnérabilité Iv</b>					<b>83,50</b>

Nous donnons ci-dessus, le détail du calcul de l'indice de vulnérabilité après réhabilitation, tenant compte des paramètres de l'évaluation structurelle ayant subi des dépénalisations (tableau 50). La valeur de l'indice de vulnérabilité recalculé après réhabilitation ( $I_v=83,50$ ) 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 remet plus à sa performance initiale et originelle comme nous pouvons le voir sur la figure 55.

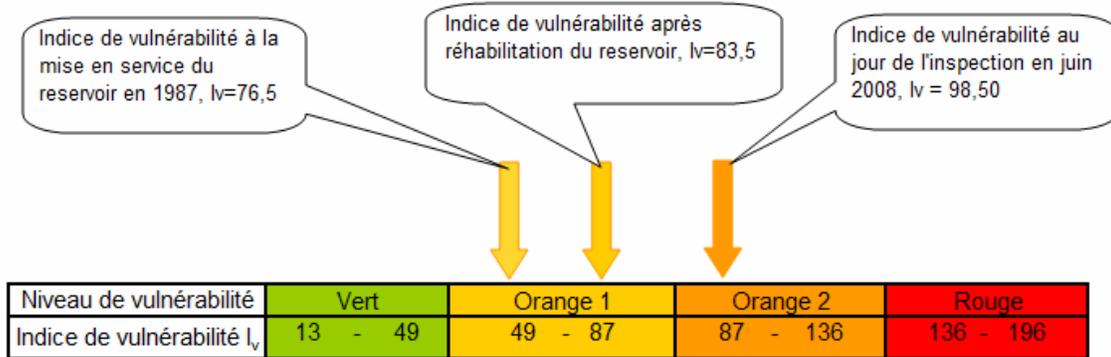


Figure 55. Evolution de l'indice de vulnérabilité dans le cycle de vie du réservoir

#### 4.9. Conclusion

La méthodologie à base d'indice, présentée dans cette section, permet une évaluation simplifiée et rapide de la vulnérabilité des réservoirs en béton armé. 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 son programme de réhabilitation ou de réparation. Ils sont même en mesure de décider de la restriction de service ou de la démolition d'un réservoir. En somme, d'optimiser sa gestion sous des contraintes budgétaires significatives.

Par ailleurs, entre les mains des ingénieurs de bureau d'études, la méthode peut être utilisée 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.

*Les méthodes à base d'index permettent une évaluation simplifiée et rapide du risque et trouvent ainsi leurs principales applications dans la planification de la maintenance. Toutefois, le diagnostic et l'analyse de risques qui en résultent restent sommaires et ne répondent pas vraiment aux objectifs des gestionnaires. L'inconvénient majeur de ce type d'approche réside dans l'analyse global et sommaire de l'ouvrage et ne permet pas d'analyser le réservoir à partir d'une granularité inférieure, à l'échelle du composant de l'ouvrage comme nous le verrons au chapitre 5 dans le cadre de la méthode de sûreté de fonctionnement.*

## **5. Chapitre 5 : Evaluation de la criticité des réservoirs par la méthode de sureté de fonctionnement**

---

## 5.1. Introduction

---

Dans l'industrie, on parle de plus en plus de **sûreté de fonctionnement**. Cette discipline, qui a acquis ce nom et sa forme actuelle principalement au cours du dernier demi-siècle dans les secteurs de la défense, de l'aéronautique, de l'espace, du nucléaire serait désormais indispensable, à tous les secteurs de l'industrie, se voit de plus en plus appliquée dans le génie civil.

La sûreté de fonctionnement consiste à ne pas considérer un système uniquement à travers son cahier des charges comme s'il ne devait jamais avoir comme comportements et comme effets que ceux pour lesquels il a été conçu. Donc la sûreté de fonctionnement tend à « tout prévoir » (à ne pas confondre avec « empêcher tout accident ») et à prendre en compte toute information accessible. La sûreté de fonctionnement permet de prendre en compte de façon explicite les défaillances, les incertitudes, les aléas... dans toute la mesure des connaissances qu'on détient à leur propos. Cela souligne aussi le fait qu'il n'y a pas de démarche sûreté de fonctionnement possible s'il n'y a pas de connaissances. La sûreté de fonctionnement est toujours totalement dépendante de la connaissance du système étudié. La recherche de ces informations, en particulier par le retour d'expérience et les essais, est donc indissociable de la sûreté de fonctionnement.

Par cette méthode nous viserons à étudier le système « réservoir » sous l'angle des fonctions qu'il doit remplir et pour les quelles il est conçu, pour comprendre son fonctionnement. Nous établirons de façon systématique et exhaustive les relations fonctionnelles à l'intérieur et à l'extérieur du système « réservoir ». Nous déterminerons les interactions entre les composants du système « réservoir » et son environnement de façon à établir, de manière formelle, les liens entre les défaillances des fonctions, leurs causes et leurs effets. Quant à l'analyse fonctionnelle, elle consistera à recenser, ordonner, caractériser et valoriser les fonctions de défaillance du système « réservoir ». Enfin cette méthode permettra d'évaluer la criticité de la défaillance de chaque fonction de composant avant de passer à l'évaluation de la criticité globale de défaillance du réservoir.

Dans le contexte national Algérien, les réservoirs de stockage sont de typologie variée, hétérogène au sein d'un même parc et possèdent une documentation technique incomplète, généralement inexistante (voir chapitre 1). Face à un tel parc, une approche basée sur la modélisation fonctionnelle et appuyée par la connaissance experte est nécessaire.

## 5.2. Les scénarios de vieillissement

---

L'objectif de cette section est de dresser les principaux mécanismes de vieillissement des réservoirs en béton pouvant apparaître dès la mise en service de l'ouvrage. Il seront nécessaires à la mise en œuvre de l'AMDE. Un scénario de vieillissement est défini comme un enchaînement de causes et d'effets qui conduisent à la dégradation des caractéristiques et propriétés de l'ouvrage.

### 5.2.1. Scénario 1 : Déformation du sol de fondation

- **Le tassement**

La particularité de ces ouvrages d'art est qu'ils sont caractérisés par leur poids important concentrés sur une petite surface. Les réservoirs subissent de fortes variations de surcharge d'exploitation (eau contenue dans la cuve), de façon souvent quotidienne et pour certains 3 à 4 fois par jour durant toute leur longue période d'exploitation, en fonction des besoins de consommation des populations desservies.

Pour illustrer ce phénomène, nous donnons à titre indicatif un exemple de charge transmise au sol d'un réservoir de capacité 100 m<sup>3</sup>, réservoir considéré relativement de faible capacité dans le parc des réservoirs géré par l'Algérienne des eaux (voir tableau 51).

Tableau 51 : descente de charge dans un réservoir posé au sol

N°	Désignation de l'élément	Poids de l'élément (tonnes)
1	Poids de la coupole	7,66
2	Poids du Lanterneau	1,48
3	Poids de la ceinture supérieure	4,15
4	Poids de l'acrotère	1,70
5	Poids de la cuve cylindrique	20,22
6	Poids du radier	16,29
7	Poids du béton propre	14,35
8	Enduit ordinaire extérieur	1,48
9	Enduit ordinaire intérieur	1,31
10	Enduit étanche intérieur	1,31
11	Enduit de finition extérieur	1,48
12	Chape de ciment sur radier pour forme de pente	0,73
13	Poids de l'étanchéité multicouche sur coupole	2,38
14	Poids de la surcharge d'entretien Q sur la coupole	3,83
15	Poids de l'eau	100,00
16	Poids de la neige	1,92
<b>Poids total de l'ouvrage sur le sol (tonnes)</b>		<b>180,09</b>

On se rend compte que le sol de fondation subit un chargement cyclique ; plusieurs fois par jour ; passant ainsi de la charge 180 tonnes (réservoir plein) à 80 tonnes (réservoir vide). Avec une variation de charge de 100 tonnes. Ce phénomène est encore plus important lorsque le réservoir en question est de grande capacité pouvant atteindre un volume de 5000 m<sup>3</sup>. Le mécanisme physique ici en jeu est le tassement de la fondation sous l'effet du poids du réservoir. C'est le phénomène le plus fréquemment rencontré. Il s'agit d'un déplacement vertical d'un appui ou de plusieurs appuis. On parle alors d'un tassement différentiel d'une partie de la fondation. Ce mécanisme a pour effet de générer des fissures dans la structure, de provoquer la rupture des canalisations dans la chambre des vannes ainsi que les désordres importants ou localisés dans un élément résistant qui peut entraîner la limitation ou l'interdiction de l'exploitation du réservoir.

Tous les sols se déforment sous les charges qui leur sont appliquées, avec des amplitudes qui peuvent aller de quelques millimètres à quelques mètres. L'amplitude des déformations du sol dépend de la nature et de l'état du sol. Les déformations les plus importantes sont celles des massifs d'argiles molles saturées, qui peuvent durer pendant de longues périodes (quelques mois à quelques dizaines d'années). La première conséquence de la déformation générale de la fondation est l'affaissement du réservoir.

- **Liquéfaction des sols**

Dans certains sols sableux saturés, l'augmentation de la pression interstitielle sous l'effet de plusieurs cycles de déformations alternées d'origine sismique peut conduire à une perte de résistance au cisaillement momentanée, accompagnée de déformations dont l'amplitude peut être illimitée (compacité initiale lâche) ou limitée (compacité initiale dense). En pente, il en résulte un danger accru de glissements de terrain qui peuvent être encore plus dévastateurs que les effets directs du séisme. En terrain moins

accidenté, l'effet peut provoquer l'affaissement de zones étendues dans lesquelles la perte de portance des fondations entraîne l'enfoncement ou le renversement du réservoir.

Ce phénomène a été largement observé lors du séisme d'El Asnam en 1980 (figure 56) et le séisme de Boumerdes (figure 57). C'est pour cette raison que le RPA 2003, préconise que l'évaluation du potentiel de liquéfaction devra être envisagée dans le cas des ouvrages du groupe 1B (châteaux d'eau et réservoirs de grande et moyenne importance) en zone sismique III (forte sismicité) et ceci, moyennant les données sismiques complémentaires suivantes :

- Accélérations maximales au sol prises égales à la valeur du coefficient de zone A (% g),
- Magnitude d'ondes de surface  $M_s$  égale à 6.5 et 7.0, respectivement en zones sismiques II et III.



Figure 56. Sol liquéfié à El Asnam 1980



Figure 57. Sol liquéfié à Boumerdes 2003

- **Affouillement du sol de fondation**

C'est un mécanisme de dégradation du sol de la fondation. La dégradation des matériaux de la fondation peut résulter d'un processus physique lié à l'infiltration des eaux dans le sol de fondation. Ce mécanisme se manifeste par l'attaque du terrain naturel de fondation sous l'action des eaux pluviales ou souterraines. La circulation de l'eau au sein de la fondation conduit au transport des particules puis peut provoquer l'érosion du sol et ainsi l'affouillement de la fondation pouvant entraîner le basculement du réservoir.

### 5.2.2. Scénario 2 : Alkali-réaction

L'alkali-réaction est une réaction chimique entre certaines formes de silice et de silicate, pouvant être présentes dans les granulats et les alcalins du béton. Elle correspond à une attaque du granulat par le milieu basique du béton et provoque la formation d'un gel de réaction (silicate alcalin) dont l'expansion engendre, sous certaines conditions des gonflements.

Selon (Godart, 2008), La dégradation du béton des ouvrages résultant du phénomène d'alkali-réaction a été répertoriée dans de nombreux pays. En France, les premières identifications ont été décelées depuis les années 1970 sur des ouvrages hydrauliques. En général, les désordres dus à l'alkali-réaction apparaissent à des échéances variables de deux à dix ans au plus. Le développement des phénomènes dus à l'alkali-réaction est lent et difficilement maîtrisable.

La pathologie et les manifestations externes se signalent par un ou plusieurs des symptômes suivants :

- Une fissuration,
- Un faïençage à mailles plus ou moins larges ou en étoile ou une fissuration orientée suivant une direction fonction de la distribution des armatures.
- Des exsudations blanches formées de calcites et parfois, de gels translucides.
- Des cratères avec des éclatements localisés en forme de petits cônes résultant de gros granulats superficiels qui sont visibles au fond des cratères d'éclatement.
- Des colorations ou décolorations



**Figure 58** : maillage de fissures sur la paroi intérieure d'un réservoir (Godart)

Le développement des phénomènes d'alcali-réaction dans les bétons nécessite la conjugaison de trois facteurs ou conditions nécessaires :

- Une teneur élevée en alcalins dans la phase liquide interstitielle du béton,
- La présence de produits réactifs dans les granulats (minéraux réactifs),
- De l'eau ou un environnement humide.

Et les différentes observations faites sur ces ouvrages, en contact permanent avec l'eau ou des ambiances humides, montrent que les facteurs environnementaux particuliers défavorables vis-à-vis du développement des phénomènes dus à l'alcali-réaction sont : *Actions hydrauliques, pluviométrie, hygrométrie*. Mais la *température et l'ensoleillement* sont souvent des éléments aggravants.

*Les actions hydrauliques* : Elles peuvent provenir aussi bien de l'eau contenue dans le réservoir qui se traduit par une action de l'intérieur de l'ouvrage vers l'extérieur, que de remontées capillaires, sous pression, nappes phréatiques, inondations, qui provoquent une action de l'extérieur vers l'intérieur du réservoir.

*La pluviométrie* : Elle a une action non négligeable sur l'environnement de l'ouvrage, qui peut être aggravée sur les parties d'ouvrage non exposées à l'ensoleillement et/ou subissant éventuellement le ruissellement local de l'eau provenant des coupoles de couvertures.

*L'hygrométrie* : A l'intérieur des ouvrages, l'humidité relative est proche de la saturation tandis qu'à l'extérieur, l'humidité relative moyenne est comprise entre 70 et 85 %.

*Les températures* : Les températures sont quasi constantes tout au long de la journée en Algérie.

*L'ensoleillement* : En Algérie, le soleil se trouve rapidement à un angle proche du zénith et la durée journalière de l'ensoleillement est plus importante.

Autant le nombre de publications traitant de l'étude du phénomène physico-chimique de la réaction est important, autant l'expérience sur le traitement d'ouvrages existants atteints est faible. Lors des journées d'études ENPC de février 1995, une méthode relative au diagnostic de l'alcali réaction sur ouvrages a été proposée par M. Salomon, dont les grandes lignes ont été reprises par G. Mathieu et al dans un numéro spécial des annales du BTP (juillet 1996).

### 5.2.3. Scénario 3 : Corrosion des aciers

Cette section est principalement inspirée du rapport élaboré par le groupe de travail (AFGC / CEFRACOR, 2003) à la demande du Comité Scientifique et Technique de l'AFGC. L'objectif de ce groupe "*Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion*" a été d'établir des recommandations aux gestionnaires, maîtres d'ouvrages et maîtres d'œuvres pour guider dans le choix du mode de réhabilitation le mieux adapté pour une structure présentant de la corrosion, et ceci en fonction de critères tels que le processus de dégradation concerné, les caractéristiques du béton armé, le milieu environnant, les contraintes et sujétions rencontrées, etc.

La principale cause de corrosion dans les réservoirs d'eau en béton est liée aux circulations d'eau dues soit à la présence de fissures d'origines diverses (thermiques, mécaniques,...) ou de défauts d'enrobages des armatures, notamment si le milieu contient des sels agressifs (chlorures notamment).



**Figure 59** : Corrosion des aciers du tronc de cône

Sur les réservoirs existants souffrant de fissures, ou de fuites diffuses, les réparations consistent à colmater les défauts ou à installer une étanchéité.

La rouille formée est le plus souvent gonflante et provoque une désagrégation de l'enrobage, par épaufrure, éclatement ou fissuration. Une fois que l'armature a commencé à se corroder, les fissures apparaissent très tôt même dans un béton de bonne résistance mécanique. Les produits de corrosion diffusent facilement dans un béton poreux et tachent le parement (traces de rouille).

Les conséquences des désordres sont multiples :

- *L'aspect de l'ouvrage*

Les efflorescences et les taches de rouille conséquence de la pénétration d'agents agressifs dans l'enrobage de béton, altèrent l'aspect de l'ouvrage. Ce point est parfois considéré comme étant de peu d'importance, par le gestionnaire des ouvrages. Par contre, ce sont les fissurations et les fracturations du béton qui commencent à inquiéter le gestionnaire, car des éclats de béton peuvent se produire.

- *La stabilité de la construction*

L'une des conséquences de la corrosion des armatures du béton armé est un affaiblissement de la structure. La corrosion des armatures du béton armé peut entraîner un appauvrissement des capacités portantes de la structure. Cette perte de résistance se manifeste par des altérations des matériaux qui sont les suivantes.

*Pertes de section du béton* : Le foisonnement des oxydes de fer développe des contraintes qui peuvent endommager le béton, allant jusqu'à l'éclater. Il en résulte que les sections résistantes de béton diminuent, les contraintes s'organisent, et transitent par les zones adjacentes.

*Pertes de section des armatures* : La corrosion métallique est une dissolution, donc une perte de section des armatures. Le facteur de sécurité pris en compte dans les calculs de dimensionnement, s'en trouve réduit.

*Ancrage et entraînement des armatures* : Les oxydes de fer forment autour des armatures une gaine qui, à partir d'une certaine importance, peut diminuer leur adhérence au béton. Cette perte d'entraînement des barres conduit alors à une perte générale de la résistance de la structure. La mobilisation des efforts par les barres en traction, comme c'est le cas dans plusieurs éléments des réservoirs (ceinture supérieure, paroi ..... ) peut être modifiée par un glissement relatif de l'ancrage lors de sollicitations, la mobilisation des efforts se fait alors avec de plus grandes déformations.

#### **5.2.4. Scénario 4 : Dégradation des composants par réactions avec le milieu (vent, gel, neige)**

Les désordres dont souffrent les structures et les ouvrages d'art peuvent avoir pour origine les agressions du milieu, les atmosphères industrielles, les ambiances marines (air marin chargé en sel) l'action des intempéries, en particulier le vent et les cycles de gel et dégel.

Des particules de matières diverses en suspension dans l'air sont agitées et transportées par le vent. Lorsque ces particules heurtent la paroi d'un réservoir, l'impact s'effectue avec une certaine énergie cinétique, qui est fonction de la masse et de la vitesse de déplacement (au carré) des grains. Selon la nature de la paroi, son élasticité, sa rugosité, les particules peuvent adhérer ou rebondir. Ces points d'impact, constamment renouvelés, peuvent provoquer une micro destruction locale. La vitesse du vent joue un rôle important qui dépend de nombreux facteurs : l'altitude, les turbulences ; les écrans créent des obstacles. Suivant l'orientation des parois aux vents dominants, l'érosion sera plus ou moins importante.

Les basses températures retardent et peuvent même empêcher complètement la prise et le durcissement des bétons. Dans le premier cas, les bétons peuvent, après la période de froid, reprendre une résistance

quasi normale, mais il faut mener les opérations de décoffrage avec prudence. Dans le second cas, il faut envisager la démolition du béton non durci.

Il est cependant possible de bétonner par temps froid, moyennant certaines précautions qui sont prises couramment (chauffage de l'eau, des granulats, coffrages isothermes...) dans les pays au climat rude.



Figure 60 : Dégradation des peintures et enduits en ambiance marine [Photo Hammoum]

### 5.2.5. Scénario 5 : Dégradation des enduits étanches

L'étanchéité est la qualité caractéristique d'un ouvrage à s'opposer au passage de l'eau dans les limites d'un débit de fuite défini par l'exploitant de l'ouvrage. L'étanchéité peut être réalisée soit par la structure du réservoir elle-même ou par un traitement d'imperméabilisation de masse ou de surface. Le fascicule 74 classe les réservoirs en fonction de leur mode de réalisation de leur étanchéité comme suit :

**classe A** : Ouvrages dont l'étanchéité est assurée par la structure seule, avec éventuellement un traitement d'imperméabilisation. Cette classe ne concerne que les réservoirs en béton armé ou en béton précontraint.

**classe B** : Ouvrages dont l'étanchéité est assurée par la structure, complétée par un revêtement d'imperméabilisation. Ce revêtement d'imperméabilisation est un écran intérieur adhérent à son support, pouvant assurer l'étanchéité mais ne résistant pas à une fissuration appréciable du support. C'est le cas des enduits à base de mortiers hydrauliques épais ou minces.

**classe C** : Ouvrages dont l'étanchéité est assurée par un revêtement d'étanchéité, adhérent ou non au support. La structure assure alors uniquement une fonction mécanique,

**classe D** : Ouvrages construits à l'aide d'éléments préfabriqués.

La dégradation de l'élément étanche est du principalement à l'insuffisance ponctuelle ou localisée d'étanchéité dans la masse ou de l'imprégnation d'origine, ceci concerne bien les réservoirs de classe A. Comme nous pouvons aussi rencontrer un manque d'étanchéité généralisé. Dans le cas des réservoirs avec enduit, la perte d'étanchéité peut avoir comme origine le manque d'adhérence de l'enduit de mortier sur la paroi, le décollement ou encore le cloquage de ce dernier de la paroi. Le manque d'adhérence,

décollement cloquage du à la pression de l'eau résulte d'une application sur support humide ou saturé, ou d'une préparation insuffisante de préparation du support ou de l'action de sous pression. La dégradation de l'étanchéité résulte de la fissuration d'un enduit ayant pour origine la fissuration du support.

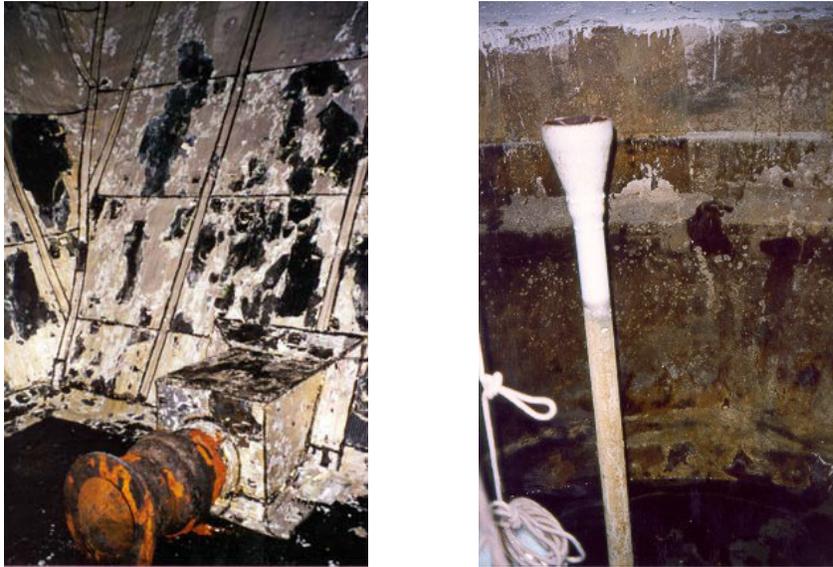


Figure 61 : Dégradation de l'enduit étanche interne de la paroi d'un réservoir (Leca, 2004)

### 5.2.6. Scénario 6 : Dégradation du revêtement d'étanchéité de couverture

Ce mécanisme concerne les réservoirs munis d'une étanchéité artificielle composé d'un complexe d'étanchéité type papier Kraft. Ces dispositifs d'étanchéité sont susceptibles de se dégrader sous l'effet de différents agents : gradients thermiques (températures élevées, gel-dégel), UV, chocs mécaniques.



Figure 62 : Dégradation du complexe d'étanchéité sur coupole [photo Hammoum].

*Chocs mécaniques* : La pathologie des étanchéités sur les coupoles de couverture en béton s'explique notamment par la variation dimensionnelle du support. Les causes de ces désordres sont d'origines mécaniques telles : déformation excessive de la coupole de couverture par suite d'un tassement différentiel de l'ouvrage, d'un retrait lors du séchage du béton ou encore du fluage de ce dernier.

*Les gradients thermiques* : les fortes et rapides variations de température ambiante provoquent des contraintes élevées sur le revêtement de la coupole de couverture. Ces sollicitations thermiques peuvent entraîner la déformation du revêtement amont en membranes souples ou la fissuration d'un masque amont en béton.

Les UV : Ces produits d'étanchéité sont constitués de bitumes oxydes ayant la particularité de se dégrader assez rapidement sous l'action des rayons UV et, par suite, de se fissurer.

### 5.2.7. Scénario 7 : Faiblesse du réservoir vis-à-vis de l'effet hydrodynamique

Il a été mis en évidence dans le chapitre 3 que les réservoirs en général et les châteaux d'eau en particulier sont très vulnérable à l'action hydrodynamique provoquée par une excitation sismique. C'est pour cette raison que l'Eurocode 8 dans sa partie 4 recommande d'effectuer les deux vérifications suivantes :

- **Etat limite de service : Deux états doivent être satisfaits**

La prescription « **d'intégrité complète** » implique le fait que le système considéré, incluant un ensemble déterminé d'éléments accessoires intégrés, demeure complètement utilisable et étanche sous l'effet d'un événement sismique ayant une probabilité de dépassement annuel établie en fonction des conséquences de la perte de fonctionnement et/ou de la fuite du contenu.

La prescription de « **niveau de fonctionnement minimal** » implique que sous l'effet de l'action sismique de dimensionnement appropriée, le réservoir peut subir un endommagement de certains de ses composants, dans la mesure où toutefois, après les opérations de contrôle des dommages, la capacité du système peut être restaurée jusqu'à un niveau de fonctionnement prédéfini.

Il y'a lieu de s'assurer que le réservoir conserve son étanchéité aux fuites du contenu. A cet effet il y'a lieu d'éviter que la vague de la surface libre du liquide ne vienne endommager la coupole de couverture du réservoir. En résumé, afin d'éviter le débordement ou son heurt contre la coupole, le déplacement vertical maximal de la surface du liquide doit être calculé.

Selon l'Eurocode 8, la contribution prédominante pour la hauteur de l'onde de ballotement est assurée

par le premier mode fondamental, et l'expression du pic du bord est la suivante :

$$d_{\max} = 0.84 \frac{a_m}{g} R_i$$

- **Etat limite ultime de stabilité**

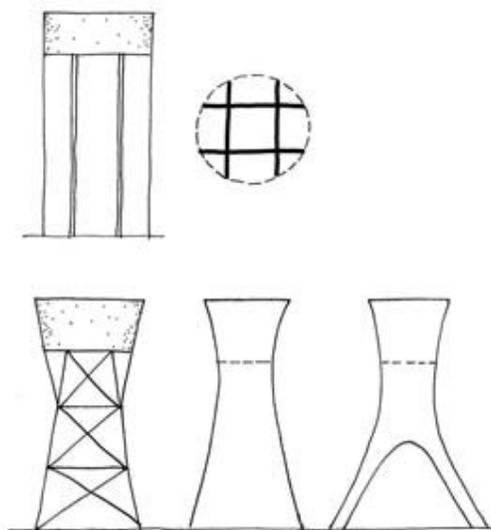
Sous l'effet de l'action sismique à l'ELU, la stabilité d'ensemble du réservoir vis-à-vis de l'effondrement doit être satisfaite. La stabilité d'ensemble se rapportant à un comportement de corps rigide peut être perdue par glissement ou renversement. Néanmoins le soulèvement est acceptable s'il en est tenu compte de manière adéquate dans le calcul et dans les vérifications de la structure ainsi que de la fondation.

Les réservoirs posés au sol ont cette particularité d'être stables vis-à-vis de l'effondrement, comme nous avons pu le voir dans l'étude de cas du chapitre 3. Ce qui n'est pas le cas des châteaux d'eau qui sont des structures en pendule inverse avec une variation brutale de masse et de rigidité, qui leur donne une vulnérabilité aux excitations sismiques comme nous pouvons le voir sur la figure 63.

C'est pour ces raisons, qu'il est recommandé en zone sismique, d'opter pour les formes de supports proposées dans la figure 64. Il est recommandé d'opter pour des supports en voiles en béton armé, avec une variation progressive de sa forme, en partant d'une base élargie. Ces formes visent à favoriser un meilleur comportement des châteaux d'eau à la sollicitation sismique.



**Figure 63** : Château effondré suite au séisme El Asnam 1980 (Zacek, 2004).



**Figure 64** : Formes recommandées pour un meilleur comportement (Zacek, 2004).

### 5.3. Analyse fonctionnelle des réservoirs

L'objectif de cette section est d'identifier toutes les fonctions du système, qui dans notre cas est le réservoir, en considérant chacun de ses composants, pour ensuite identifier leurs modes de défaillance, leurs causes et effets. Pour ce faire, nous procédons à l'analyse fonctionnelle externe qui nous permettra d'obtenir les fonctions principales et de contrainte accomplies par le système considéré dans sa globalité. Puis l'analyse fonctionnelle interne ; à travers l'analyse structurelle du système ; va nous permettre de définir le rôle de chaque composant ainsi que les interactions entre ces derniers. Ceci va aboutir à la construction des Blocs diagrammes Fonctionnels qui matérialiseront les relations entre les composants du système et les relations entre les composants et les milieux extérieurs. A partir des blocs diagrammes fonctionnels, nous déterminons les fonctions de conception des composants du système.

#### 5.3.1. Analyse fonctionnelle externe

Par l'analyse fonctionnelle externe, nous allons traduire les besoins qui seront satisfait par le réservoir (le système) sous forme de fonctions : **les fonctions principales et les fonctions de contrainte**.

- **Définition du système**

Avant l'analyse fonctionnelle, il est nécessaire de définir le système qui va être étudié. Le système de génie civil que nous étudions est composé du réservoir proprement dit (structure de génie civil hors du sol), de sa semelle de fondation, son équipement hydraulique, son système de drainage et du sol d'assise comme présenté dans la figure qui suit.

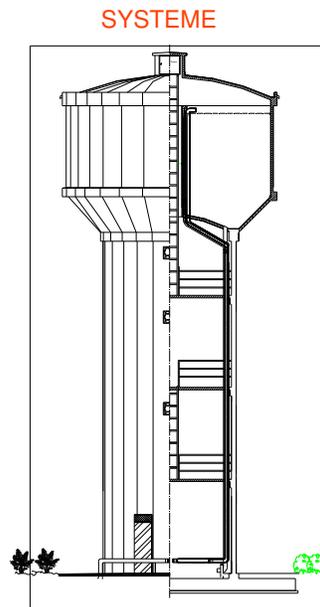


Figure 65 : Définition et limite du système (Réservoir surélevé)

- **Position dans le cycle de vie**

Le réservoir passe par différentes étapes durant son cycle de vie, de la conception à l'exploitation en passant par la réalisation. Dans notre démarche, nous nous intéressons à la phase d'exploitation, qui est

influencée par le processus de conception et de réalisation. Car nous aurons à expertiser un réservoir en phase de service.

- *Le processus de conception* : La géologie du site, géotechnique du site, choix des matériaux, dimensionnement, étude hydrostatique et étude hydrodynamique
- *Le processus de réalisation de l'ouvrage* : Le choix de l'entreprise, control des matériaux et suivi des travaux.
- *L'exploitation du réservoir* : L'exploitation dans les conditions normales d'exploitation, l'exploitation dans les conditions exceptionnelles lors d'un séisme....

• **Détermination des milieux extérieurs en interaction avec le système**

En examinant l'environnement du réservoir, nous établissons le recensement des éléments matériels qui peuvent agir sur le réservoir et nous examinons leurs interactions. Nous avons abouti au tableau qui suit.

**Tableau 52** : définition des milieux extérieurs

Type	Milieux extérieurs
Géologie du site	Sol de fondation
Météorologie	Soleil
	Température
	Vent
	Pluie
	Neige
	Froid
	Humidité
	Gel et dégel
Activité de l'homme en amont	Villes, villages, habitations, agriculture, industrie
	Ouvrages en amont liés à l'eau : Sources, stations de pompage, station de traitement, forages, réservoirs et barrages
Evénement extérieurs exceptionnels	Choc mécanique
	Séisme
Milieu à proximité du réservoir	Végétation
Divers autres systèmes	L'homme : exploitant, abonnés, agriculteurs
	Normes : recommandations liées à la sécurité et aux règles de l'art
Activité de l'homme en aval	Ouvrages en aval liés à l'eau : Station de pompage, réservoirs,

• **Les fonctions principales et de contrainte du système global**

Par l'analyse fonctionnelle externe, nous obtenons les fonctions principales et de contrainte accomplies par le système considéré dans sa globalité. Nous matérialisons les interactions entre le système et son environnement au moyen d'un Bloc diagramme Fonctionnel dans lequel nous distinguons les relations de contact (représentées par des segments droits) et de flux (représentées par des arcs).

Les fonctions principales traduisent l'objet de l'action d'un système. Nous en déduisons les fonctions principales d'un réservoir :

- Le réservoir stocke l'eau,
- Le réservoir régule la consommation des abonnés,
- Le réservoir fournit de l'eau aux ouvrages hydrauliques aval (stations, réservoirs).

Au final, l'analyse est réduite à une seule fonction principale « **Le réservoir sert à contenir de l'eau** ».

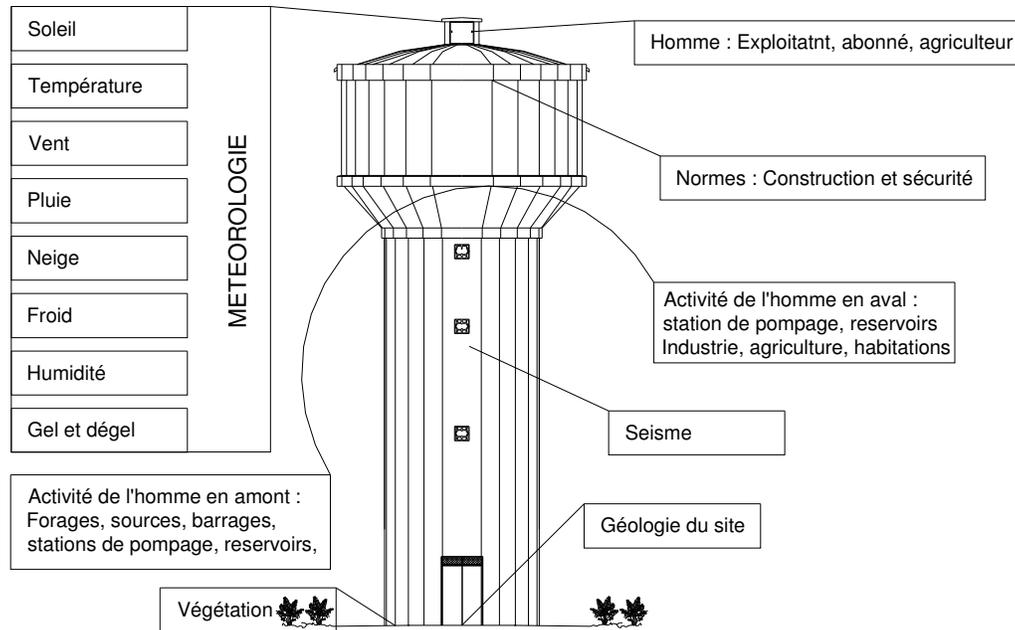


Figure 66 : Bloc diagramme Fonctionnel du système

Conformément à l'article I.2.1.1. du Fascicule 74, « *Les ouvrages concernés ont pour objet de **contenir** des eaux brutes, résiduaires ou destinées à la consommation humaine ou des eaux éventuellement chargées de matières dissoutes et en suspension.....une attention toute particulière doit être portée à l'étanchéité des réservoirs qui en conditionne les performances* »

Quant aux fonctions de contrainte, elles sont obtenues en examinant les milieux extérieurs en interaction avec le réservoir. Toutes ces fonctions de contrainte devant assurer la stabilité du réservoir, peuvent se résumer en une seule qui est : « **Le réservoir résiste aux sollicitations** ».

Tableau 53 : définition des fonctions de contrainte

Milieu extérieur	Fonctions de contraintes
Géologie du site	Le réservoir résiste aux agressions du sol
	Le réservoir résiste aux déformations et tassements du sol
Météorologie	Le réservoir résiste aux UV du soleil
	Le réservoir résiste aux écarts de la température
	Le réservoir résiste aux agressions du vent
	Le réservoir résiste aux agressions de la pluie
	Le réservoir résiste aux agressions de la neige
	Le réservoir résiste aux agressions du froid
	Le réservoir résiste aux agressions du gel et dégel
Activité de l'homme en amont et aval	Le réservoir résiste aux agressions du milieu extérieur amont et aval
Événement extérieurs exceptionnels	Le réservoir résiste au séisme et à l'effet hydrodynamique
	Le réservoir résiste aux chocs mécaniques
Milieu à proximité du réservoir	Le réservoir résiste aux agressions de la végétation
Normes de l'art	Le réservoir doit résister aux effets hydrostatiques conformément aux codes et normes de calcul en vigueur, en conditions normales d'exploitation
	Le réservoir doit résister aux agressions chimiques

### 5.3.2. Analyse fonctionnelle interne

Après l'analyse globale du système, nous recherchons maintenant le rôle et la participation de ses composants, chacun d'entre eux assurant des fonctions contribuant au fonctionnement global du réservoir. Dans l'analyse des réservoirs, nous souhaitons une description précise des mécanismes physiques s'opérant dans la structure permettant de prendre en compte les défaillances des différents composants constituant le réservoir, les mécanismes de vieillissement à l'échelle des composants et enfin les effets des défaillances des composants sur le système global.

- **Analyse structurelle**

L'analyse structurelle permet de lister tous les composants constitutifs du réservoir, de repérer leur position physique au sein de l'ouvrage et de déterminer les interactions avec les autres composants. Elle consiste à découper le réservoir, selon les limites données dans la définition, en composants, afin d'en construire une vision plus précise. Nous présentons dans cette étude le découpage d'un réservoir surélevé composé d'une douzaine de composants, dont voici le détail.

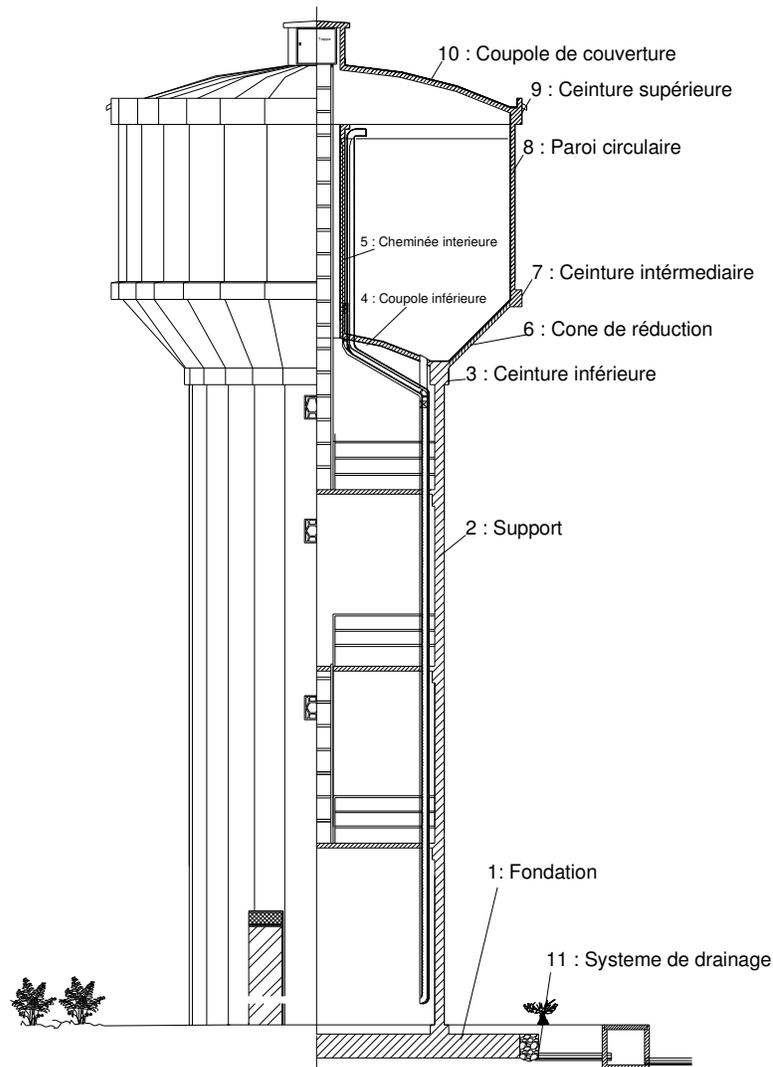


Figure 67 : Décomposition structurelle du réservoir surélevé

**Tableau 54** : Liste des composants d'un réservoir surélevé

<b>N° de nomenclature</b>	<b>Nom du composant</b>	<b>Nature du matériau</b>
1	Fondation	Béton armé
2	Support	Béton armé
3	Ceinture inférieure	Béton armé
4	Coupole inférieure	Béton armé
5	Cheminée intérieure	Béton armé
6	Cône de réduction	Béton armé
7	Ceinture intermédiaire	Béton armé
8	Paroi circulaire	Béton armé
9	Ceinture supérieure	Béton armé
10	Coupole de couverture	Béton armé
11	Système de drainage	Drain en moellons Buses en béton

Dans le cas d'un réservoir au sol ou enterré, l'analyse structurelle se limiterait à quatre composants, comme détaillé au tableau ci-après.

**Tableau 55** : Liste des composants d'un réservoir posé au sol

<b>N° de nomenclature</b>	<b>Nom du composant</b>	<b>Nature du matériau</b>
1	Coupole de couverture	Béton armé
2	Ceinture supérieure	Béton armé
3	Paroi cylindrique	Béton armé
4	Radier	Béton armé

- **Les Blocs diagrammes Fonctionnels des réservoirs**

Les fonctions de conception que réalisent les composants du système sous-entendent des fonctions de contact et de flux. Elles expriment les interactions des composants entre eux, mais aussi entre les composants et les milieux extérieurs. Elles sont matérialisées à travers les Blocs diagrammes Fonctionnels. Les trois principaux *Blocs diagrammes Fonctionnels* concernent les catégories de relations suivantes :

*Blocs diagrammes Fonctionnels définissant les relations de contact*

Ce Bloc diagramme Fonctionnel indique l'ensemble des contacts entre les composants entre eux et entre les composants et les milieux extérieurs. Il permet par la suite d'examiner les fonctions de contact (préparation de surface et d'appui), mais aussi les transferts possibles de flux entre les composants (figure 68).

*Blocs diagrammes Fonctionnels définissant les relations de flux de charges*

Ce Bloc diagramme Fonctionnel met en évidence les différentes actions extérieures agissant sur chaque composant du réservoir. Nous distinguons les forces de pesanteur, les poussées hydrostatiques, le chargement sismique, l'effet hydrodynamique, les chocs accidentels et les sous-pressions agissant sous la fondation (figure 69).

*Blocs diagrammes Fonctionnels définissant les relations de flux hydrauliques*

Les flux hydrauliques reflètent les circulations d'eau dans le réservoir. Nous séparons les flux associés à la fonction de vidange du système, à l'évacuation des eaux du trop plein, à la distribution des abonnés, au drainage des eaux d'infiltrations d'eau et aux eaux de ruissellement (figure 70).

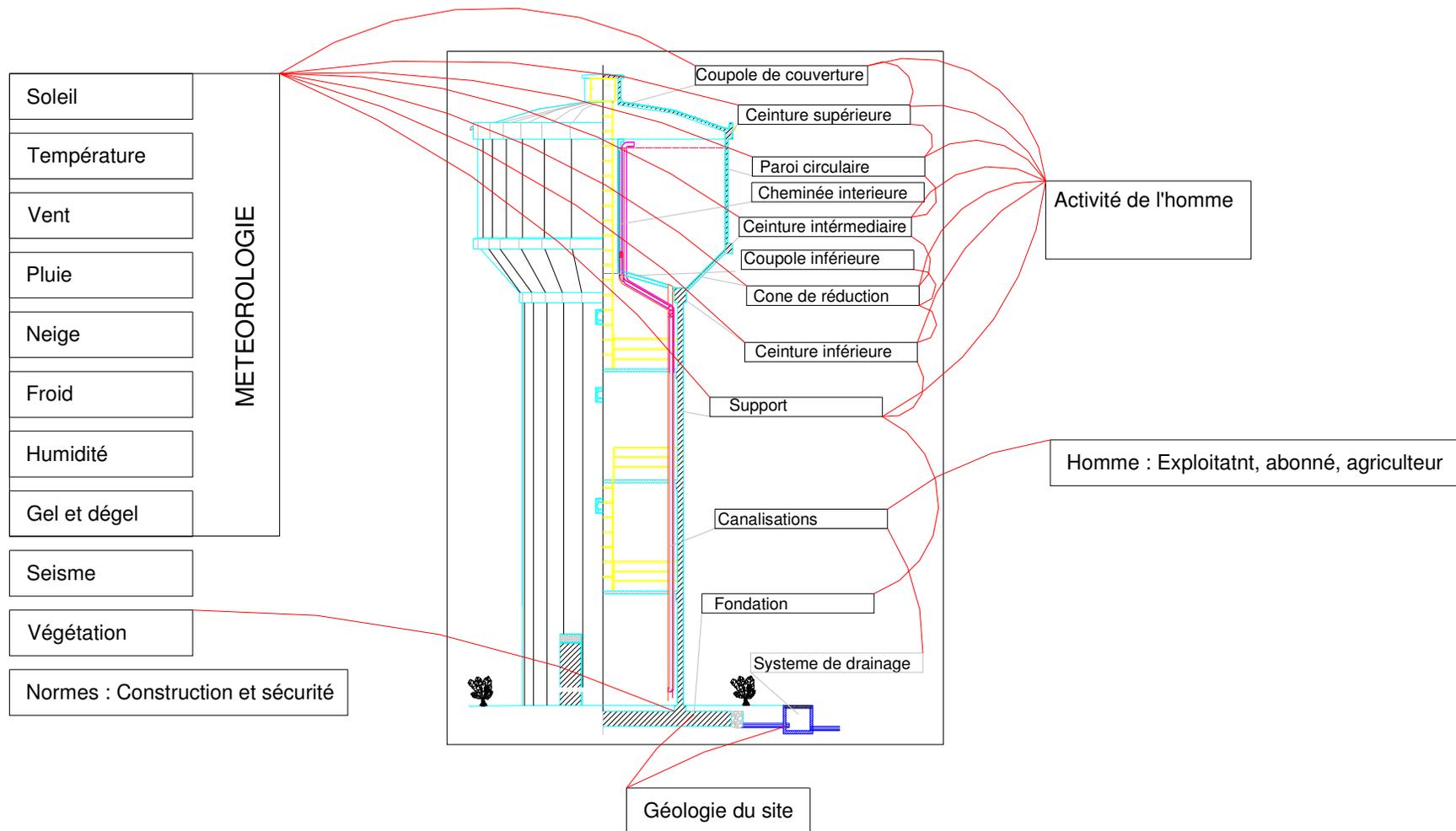


Figure 68 : Bloc diagramme fonctionnel des flux de contact

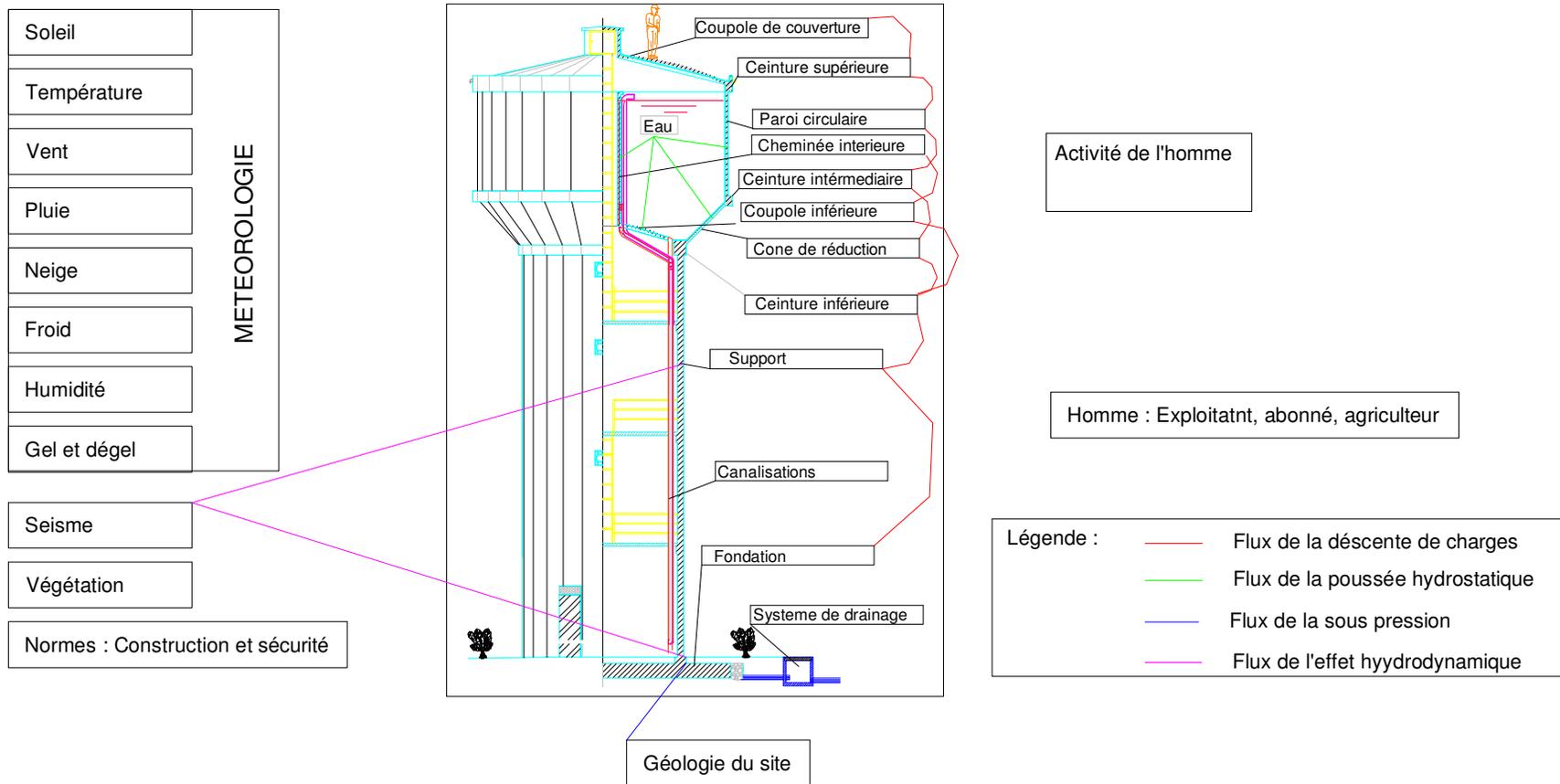


Figure 69 : Bloc diagramme fonctionnel des flux de charges

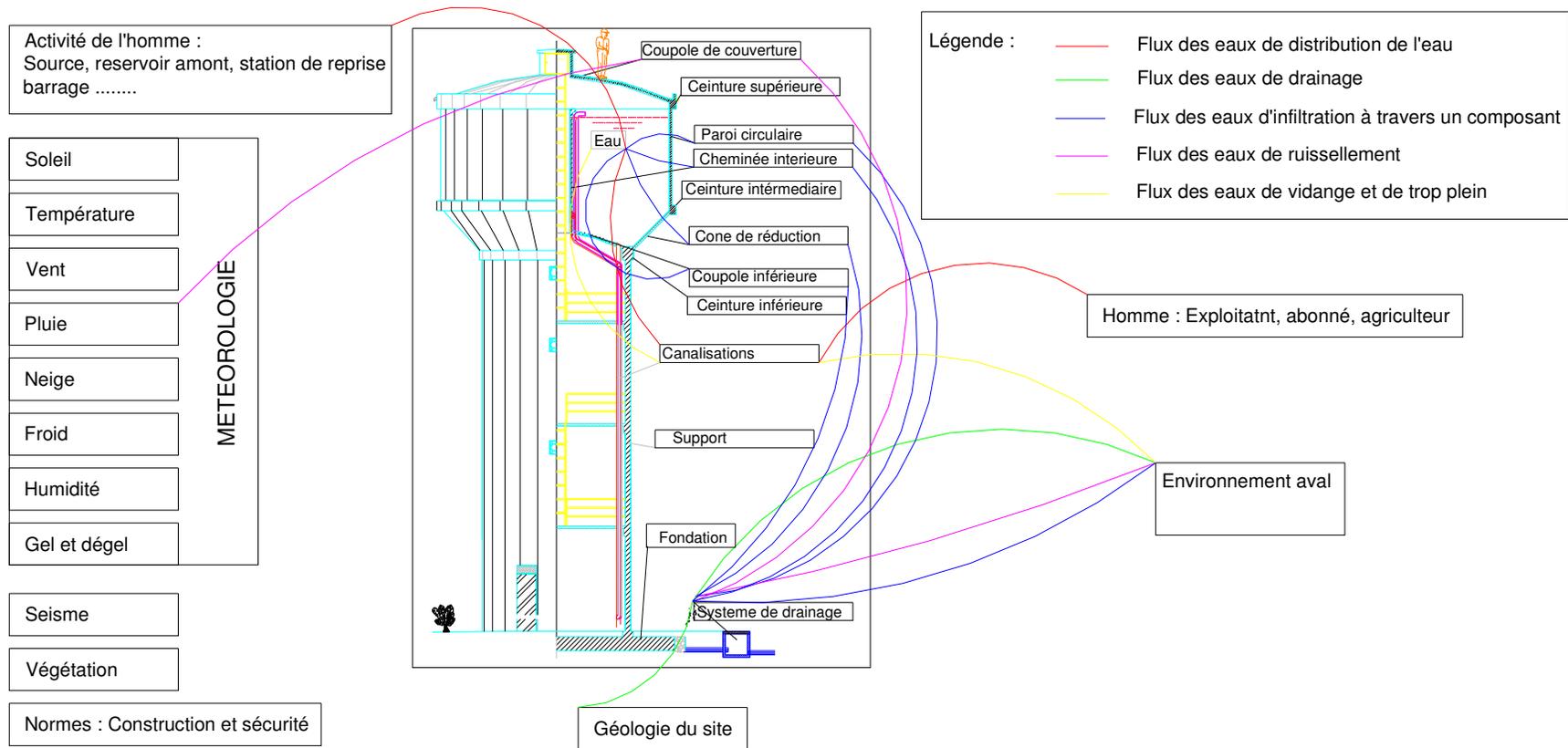


Figure 70 : Bloc diagramme fonctionnel des flux hydrauliques

### 5.3.3. Les tableaux d'analyse fonctionnelle

A partir des blocs diagrammes fonctionnels, nous déterminons les fonctions de conception des composants du système. Elles correspondent, pour chaque composant, aux réactions face aux interactions de contact et de flux avec les autres composants et les milieux extérieurs. Les différentes interactions entre les composants conduisent à distinguer deux catégories de fonctions de conception : **les fonctions de contact et les fonctions de flux.**

#### Fonctions liées à des contacts

Nous distinguons deux catégories de fonctions liées aux contacts :

- des fonctions de préparation de la surface pour le composant supérieur ;
- des fonctions d'appui pour des composants voisins au composant considéré.

Nous regroupons ces fonctions dans une seule syntaxe :

- ***préparer les surfaces de contact***

#### Fonctions liées aux flux de charges

Les flux de charges induisent des fonctions de résistance aux sollicitations mécaniques et de transmission de sollicitations mécaniques provenant des différents milieux extérieurs telles que :

- le poids propre d'un composant voisin ;
- les surcharges d'exploitation sur la toiture de couverture ;
- la poussée hydrostatique de l'eau de la cuve ;
- la poussée hydrodynamique due au séisme ;
- les chocs accidentels.
- les sous-pressions sous les fondations;

Nous regroupons ces fonctions dans deux syntaxes :

- ***résister aux sollicitations mécaniques***
- ***transmettre les sollicitations mécaniques***

#### Fonctions liées à des flux hydrauliques

Elles sont induites par la circulation de l'eau dans le réservoir. Nous distinguons les fonctions :

- limiter les infiltrations provenant d'un composant ou d'un milieu extérieur et allant vers un autre composant ou milieu extérieur ;
- assurer l'étanchéité d'un composant ;
- collecter les eaux d'infiltration d'un composant (ou un milieu extérieur) vers un autre ;
- drainer les eaux d'infiltration provenant d'un composant ou d'un milieu extérieur ;

Nous regroupons ces fonctions dans trois syntaxes :

- ***limiter les flux hydrauliques***
- ***collecter les flux hydrauliques***

## 5.4. Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)

La méthode AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) est une méthode inductive d'analyse des défaillances potentielles d'un système. Elle considère, systématiquement l'un après l'autre, chaque composant du système et analyse ses modes de défaillances. Un mode de défaillance est la manière par laquelle le système étudié ne va plus remplir sa fonction : à chaque fonction non remplie ou mal remplie correspond un mode de défaillance. Ceux-ci doivent être quantifiés en fonction de différents paramètres. On procède ensuite à la hiérarchisation des modes de défaillance.

### 5.4.1. Applications de l'AMDE dans l'industrie

Cette méthode a fait l'objet de nombreux guides et normes, mis au point pour chaque contexte industriel particulier : NF X60-510, CEI 812-1985 et MIL-STD-1269A.

La méthode AMDE a été utilisée originellement dans le traitement des risques potentiels inhérents aux activités de production de l'armement nucléaire. Progressivement, elle a été adaptée à l'ensemble des activités à risques (nucléaire civil ; domaine aéronautique, spatial ; grands travaux), puis a été intégrée dans les projets industriels. De nos jours, son emploi est très répandu dans le monde industriel soit pour améliorer l'existant, soit pour traiter préventivement les causes potentielles de non-performance des nouveaux produits, procédés ou moyens de production.

L'AMDE est une méthode d'analyse prévisionnelle de la fiabilité qui permet de recenser systématiquement les défaillances potentielles d'un dispositif puis d'estimer les risques liés à l'apparition de ces défaillances, afin d'engager les actions correctives à apporter au dispositif. L'AMDE a fait son apparition en France dans le domaine aéronautique (Concorde puis Airbus) au cours des années 1960. Introduite dans l'industrie manufacturière de série depuis les années 1980, son application y reste, encore aujourd'hui, très répandue.

Les années	Domaine d'application
1950	la méthode FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) est introduite aux États-Unis dans le domaine des armes nucléaires.
1960	cette méthode est mise en application en France sous le nom d'AMDEC pour les programmes spatiaux et aéronautiques.
1970	son application est étendue aux domaines du nucléaire civil, des transports terrestres et des grands travaux.
1980	l'AMDEC est appliquée aux industries de produits et de biens d'équipement de production.

### 5.4.2. Applications de l'AMDE dans le génie civil

L'AMDE a été utilisée depuis le début des années 2000 dans différents domaines du génie civil. Notre recherche bibliographique a montré des applications intéressantes en génie civil, notamment dans le domaine des barrages (Peyras, 2003), dans le domaine des digues (Serre, 2005) et dans le domaine des infrastructures portuaires (J. BOERO et al, 2006). **Quant aux réservoirs de stockage d'eau en béton armé, à notre connaissance, aucune recherche remarquable n'a été mise en évidence.**

### 5.4.3. Démarche générale de l'AMDE

L'AMDE va déterminer, pour chaque fonction accomplie par les composants du réservoir, tous les modes de défaillance (fonctions non ou mal réalisée) susceptibles d'apparaître aux différents cycles de la vie de l'ouvrage, leurs causes et leurs effets. Outre la connaissance précise des séquences de défaillance, l'AMDE va alors nous permettre de structurer les informations relatives au vieillissement des réservoirs.

En première phase, nous procédons à l'**AMDE Processus** et nous obtenons ainsi une description du réservoir à la fin de sa construction, en particulier ses modes de défaillance potentiels liés aux défauts de conception et de réalisation.

Ensuite, nous réalisons une **AMDE Produit** sur un réservoir qui sera de qualité variable en fonction de sa réalisation. Outre les défaillances liées à l'exploitation de l'ouvrage, l'AMDE Produit met alors en évidence l'influence du processus de conception et réalisation sur son comportement futur.

### 5.4.4. AMDE Processus

L'AMDEC-Process est utilisée pour étudier les modes de défaillances engendrés par le processus de conception et de réalisation du système. Comme le réservoir objet de notre étude est en exploitation, l'AMDEC Process peut nous permettre d'améliorer le processus de conception et de réalisation. Bien sur, nous focalisons notre analyse, non pas sur les causes des modes de défaillances, mais plutôt sur leur effets, car ils introduisent les répercussions futures dans la vie du réservoir.

Dans l'application aux réservoirs, nous avons réalisé l'**AMDE Process** pour les réservoirs surélevés (châteaux d'eau) qui a permis de recenser quelques 140 modes à granularité intermédiaire de la défaillance de processus de conception et de réalisation. Ces défauts mis en évidence sont susceptibles de produire ensuite de nouvelles défaillances en phase d'exploitation.

Nous présentons dans le tableau qui suit un extrait de l'**AMDE Process** réalisée pour un réservoir surélevé en béton armé posé sur support en tour. Le tableau complet, reporté en **annexe 1**, analyse successivement les 11 composants du réservoir surélevé en béton armé posé sur support en tour type.

Tableau 56 : Extrait de la structure de l'AMDE Process appliquée aux réservoirs surélevés.

N°	Composant	Opération du processus	Mode de défaillance	Effets possibles de la défaillance du processus
1	2	3	4	G
1	Coupole de couverture	<b>Conception</b>		
		Hypothèses concernant les surcharges d'exploitation	Charges et surcharges non conformes au DTR "charges & surcharges"	<i>fissures, épaufrure, déformations</i>
		Hypothèses concernant les surcharges climatiques	Surcharge climatique non conforme au DTR "neige et vent"	<i>fissures, épaufrure, déformations</i>
		Hypothèses sur les effets de liaisons hyperstatiques	Négligence de l'encastrement " coupole - ceinture"	<i>fissures, épaufrure, déformations</i>
		Vérification de la stabilité au flambement de la voute	Négligence de la vérification de la voute au flambement	<i>déformations</i>
		<b>Réalisation</b>		
		Opération de coffrage	Absence de contreventement des étais Absence de soin apporté au coffrage de la liaison coupole - ceinture	<i>déformations, fers non adhérents, fissures</i> <i>déformations, fers non adhérents, fissures</i>
		Opération de ferrailage	Usage des aciers non certifiés Enrobage des aciers insuffisants aux normes de construction Ancrage de barres radiales insuffisantes	<i>chute de résistance, cassure, déformations</i> <i>Absence d'enrobage</i> <i>déformations, fers non adhérents, fissures</i>
		Opération de bétonnage	Utilisation d'une composition irrégulière Ségrégation suite à une vibration intense ou à une densité de ferrailage	<i>ségrégation, chute de résistance</i> <i>Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers</i>
		Opération de décoffrage	Décoffrage avant durcissement total du béton	<i>déformations, fers non adhérents, fissures</i>

### 5.4.5. AMDE Produit

Avec l'AMDE Produit nous répertorions les différents modes de défaillance en service, liés au processus de conception et réalisation mais aussi aux aléas pouvant apparaître lors de son exploitation.

Pour cela, nous remplissons rigoureusement chaque colonne du tableau **AMDE Produit** tel qu'il est obtenu : Composant, fonction, mode de défaillance, cause, effet, symptôme et moyen de détection. L'analyse adoptée est similaire à celle utilisée sur les barrages par (Peyras, 2003) et celle utilisée sur les digues de protection par (Serre, 2005).

Tableau 57 : Structure de l'AMDE Produit adaptée aux réservoirs.

<i>N°</i>	<i>Composant</i>	<i>Fonctions</i>	<i>Mode de défaillance</i>	<i>Cause possible de défaillance</i>	<i>Effet possible de la défaillance</i>	<i>Symptôme de la défaillance</i>	<i>Moyen de la détection</i>
1	2	3	4	5	6	7	8

Avec :

**La colonne (1)** : Numéro du composant correspondant à l'analyse structurelle du système,

**La colonne (2)** : Nom du composant obtenue lors de l'analyse structurelle du système,

**La colonne (3)** : Fonction de conception du composant obtenue à partir de l'analyse fonctionnelle,

**La colonne (4)** : Le mode de défaillance.

Nous distinguons deux types de mode de défaillance :

- la défaillance (totale) d'une fonction, pouvant correspondre, d'une part à une fonction qui était réalisée et qui ne l'est plus, d'autre part à une fonction qui n'a jamais été réalisée ;
- la dégradation d'une fonction, qui correspond à une fonction partiellement ou mal réalisée.

**La colonne (5)** : Les causes possibles de la défaillance

Nous obtenons les causes d'une défaillance d'un composant à partir des Blocs diagrammes Fonctionnels. Elles peuvent avoir quatre origines possibles :

- les différents flux (de charges, hydraulique et de contact) sollicitant le composant ;
- les contacts avec les milieux extérieurs ou les composants environnants ;
- l'état intrinsèque du composant (caractéristiques propres ou dégradation du composant) ;
- le processus de conception ou de réalisation du composant.

**La colonne (6)** : Les effets possibles de la défaillance

De façon analogue aux causes, les Blocs diagrammes Fonctionnels donnent les effets possibles d'une défaillance. Nous distinguons trois catégories de conséquences, selon qu'elles portent sur :

- les flux émis par le composant ;
- les contacts avec les milieux extérieurs ou les composants environnants ;
- l'état intrinsèque du composant.

**La colonne (7)** : Les symptômes et leurs moyens de détection

Nous présentons dans le tableau qui suit un extrait de l'**AMDE** réalisée pour un réservoir surélevé en béton armé posé sur support en tour. L'AMDE Produit est réalisée à la granularité intermédiaire : les modes de défaillance, leurs effets et leurs causes possibles sont examinés au niveau du composant. Le tableau complet, reporté en annexe 2, analyse successivement les 11 composants du réservoir surélevé en béton armé posé sur support en tour type.

Tableau 58 : Extrait de la structure de l'AMDE Produit appliquée aux réservoirs surélevés.

N°	Composant	Fonctions	Mode de défaillance	Cause possible de défaillance	Effet possible de la défaillance	Symptôme de la défaillance	Moyen de la détection
1	2	3	4	5	6	7	8
2	Ceinture supérieure	<b>Résister aux sollicitations mécaniques</b> résister à l'effort de traction généré par la coupole	La fonction "résister aux sollicitations mécaniques" est dégradée ou défaillante	<b>Flux de charge</b>  <i>Surcharges d'exploitation sur la coupole</i> <b>Processus de conception - réalisation</b>  <i>Voir AMDE processus</i>  <b>Etat intrinsèque du composant</b> Milieu extérieur (vent, soleil, neige, gel ...) Eclatement du béton <i>Epaufrure</i>	<b>Etat intrinsèque du composant</b>  <i>fissures</i> <i>fissures, déformations, cassure</i> <i>chute de résistance</i> <i>Absence d'enrobage, traces rouille, épaufrure</i> <i>ségrégation, fers non adhérents</i> <i>aciers dénudés, corrosion aciers</i>	<i>Fissures</i>  <i>Présence de rouille aciers visibles</i>	Observation visuelle  Observation visuelle Observation visuelle
		<b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b> transmettre la composante verticale vers la paroi	La fonction "transmettre les sollicitations mécaniques" est dégradée ou défaillante	<b>Processus de conception - réalisation</b>  <i>Mauvaise disposition du ferrailage</i> <i>Longueur de recouvrement insuffisante</i> Ancrage des aciers insuffisant <i>Aciers non adhérents</i>	<b>Etat intrinsèque du composant</b>  <i>Aciers dénudés</i> <i>Corrosion des aciers</i>	<i>Constat des déformations aciers visibles</i> <i>Présence de rouille</i>	Observation visuelle Observation visuelle Observation visuelle
		<b>Préparer la surface de contact</b> préparer la surface de contact de la coupole	La fonction "préparer la surface de contact" est dégradée ou défaillante	<b>Processus de conception - réalisation</b>  <i>reprise de bétonnage</i> <b>Etat intrinsèque du composant</b> déformation de la ceinture supérieure	<b>Surface de contact</b>  <i>Déformation de la coupole</i>	Constat des déformations	Observation visuelle

### 5.4.6. Représentation des scénarios de vieillissement sous forme de graphe causal

Après l'AMDE, nous pouvons modéliser les scénarios de vieillissement s'opérant dans un réservoir, en enchaînant les séquences chronologiques de défaillance, représentant les mécanismes physiques se produisant au sein du système et conduisant à des pertes ou dégradations de fonctions. Au sein d'une séquence de défaillance, nous lions les causes aux modes de défaillance, puis aux effets qui se manifestent par des symptômes. Cette démarche se résume dans la figure ci-dessous.

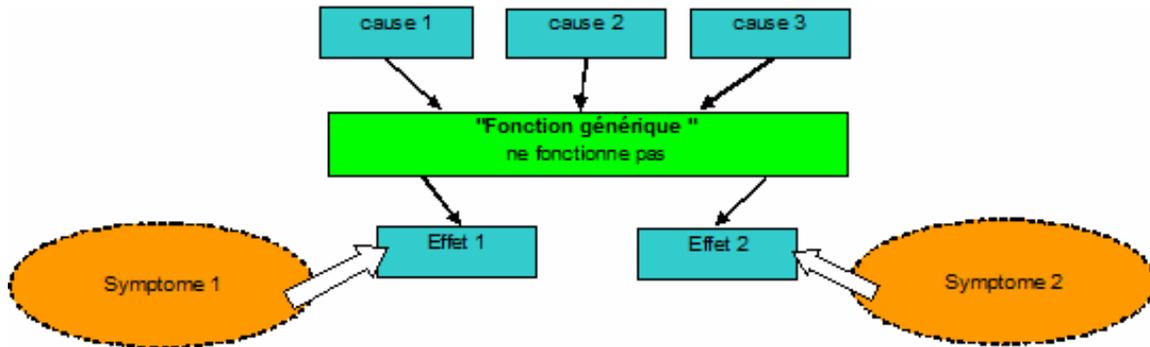


Figure 71: Schéma conceptuel d'une séquence de défaillance dans un scénario de vieillissement

Nous donnons ci-après à la figure 72, le graphe orienté du scénario de vieillissement « **déformation des fondations** » qui est l'enchaînement de la défaillance des deux fonctions « **colleter les flux hydraulique** » et « **limiter le flux hydraulique** » sous forme d'un graphe orienté comme suit :

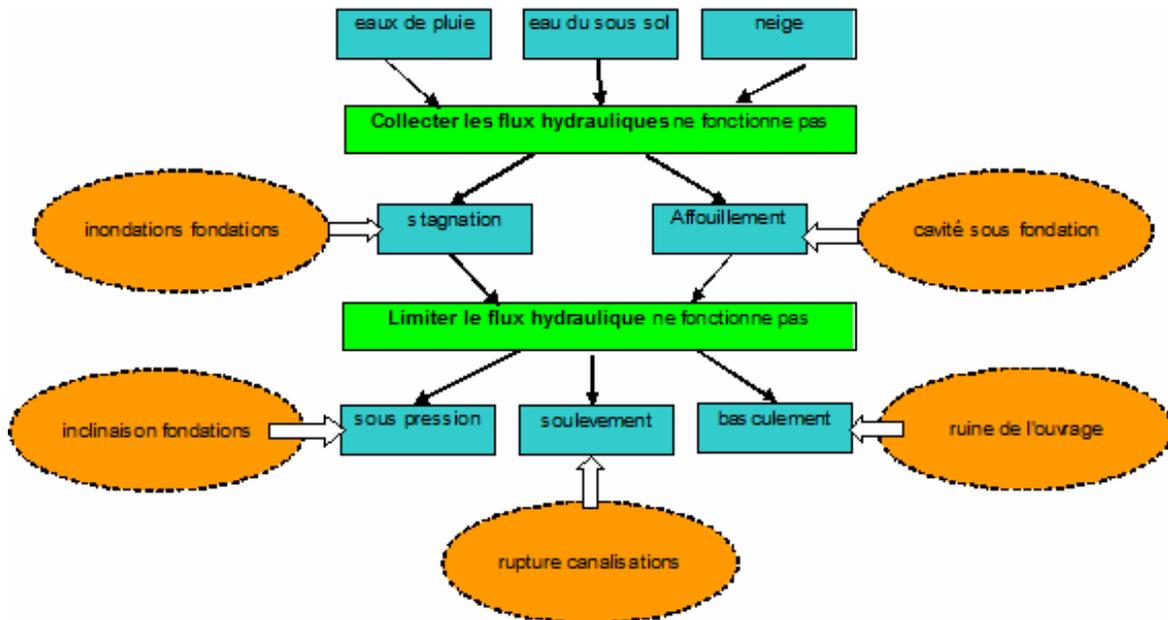


Figure 72: Graphe orienté du scénario de vieillissement « **déformation des fondations** »

La figure 73, représente le graphe orienté du scénario de vieillissement « **dégradation du revêtement d'étanchéité de couverture** » qui est l'enchaînement de la défaillance des deux fonctions « **colleter les flux hydraulique** » et « **limiter le flux hydraulique** » sous forme d'un graphe orienté comme suit :

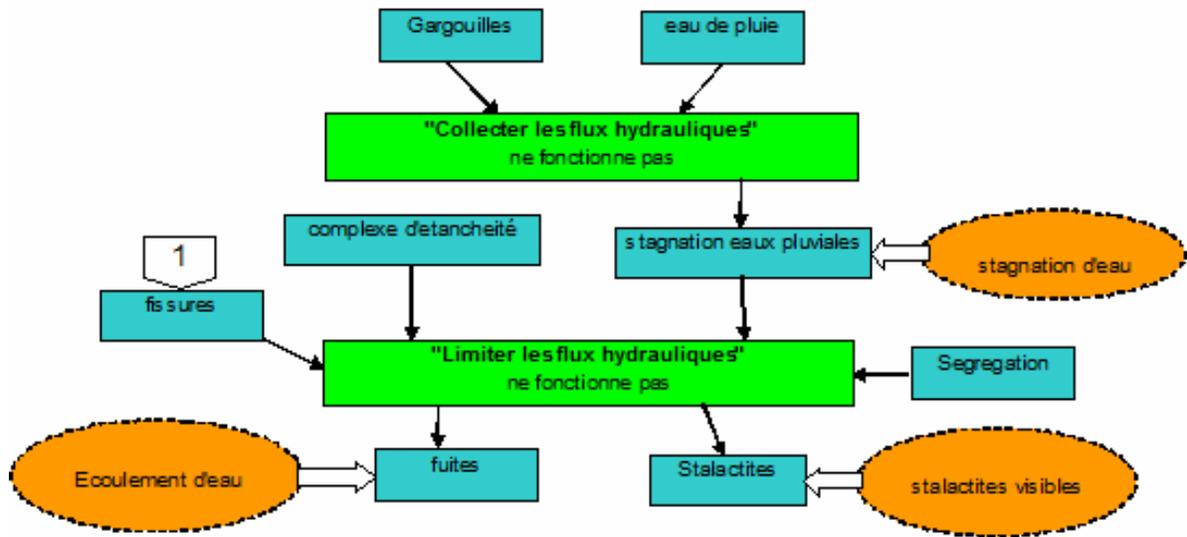


Figure 73: Mécanisme de vieillissement « **dégradation du revêtement d'étanchéité de couverture** »

## 5.5. Modélisation des mécanismes de vieillissement des réservoirs

---

En partant de l'AMDE construite au paragraphe précédent, nous définirons les classifications des fonctions, des phénomènes et des symptômes sur la base de la connaissance experte et le retour d'expérience.

### 5.5.1. Classification des fonctions

En partant de l'analyse fonctionnelle et en vue d'une utilisation dans le modèle de vieillissement, nous proposons la classification des fonctions dans des familles que nous appelons « fonctions génériques ». Cette classification permet d'obtenir l'ensemble des fonctions de conception, réparties selon leur origine apparaissant sur les Blocs diagrammes Fonctionnels : les flux hydrauliques, les flux de charges et les flux de contacts.

Nous rappelons la liste des fonctions génériques arrêtée après l'analyse fonctionnelle :

- Résister aux sollicitations mécaniques
- Transmettre les sollicitations mécaniques
- Limiter le flux hydraulique
- Collecter les flux hydrauliques
- Préparer la surface de contact

Dans chaque fonction générique, nous regroupons les fonctions de conception accomplies par les composants que nous appelons les *fonctions de précision*. Ces fonctions de précision indiquent les détails de l'action accomplie par ce composant. Sur la base de cette classification, nous regroupons dans le Tableau d'Analyse Fonctionnelle l'ensemble des fonctions de conception accomplies par les composants, en considérant l'ensemble des interactions. Le détail de ce tableau d'analyse fonctionnel est donné en annexe 3. Nous vous présentons en tableau 59 un extrait de cette analyse.

Comme cité plus haut, nous avons aboutis à la définition de cinq (05) fonctions génériques et quelques 110 fonctions de précision. Parmi les fonctions de conception des composants, certaines vont contribuer directement à assurer la stabilité du réservoir. En effet, la fonction de *résistance aux sollicitations mécaniques* du réservoir est assurée au sein du système par les composants qui vont supporter les efforts des poussées hydrostatiques et les actions sismiques. Il s'agit des composants qui forment la cuve de stockage et qui sont : *la paroi cylindrique, ceinture intermédiaire, cône de réduction, coupole inférieure, ceinture inférieure, cheminée intérieure, le support et enfin la fondation*.

Nous remarquerons que la coupole de couverture et la ceinture supérieure ne font pas partie des composants assurant la stabilité. Effectivement, la défaillance de la fonction de conception « Résister aux sollicitations mécaniques » de ces deux composants, n'entraînerait pas systématiquement la ruine de la cuve et par voie de conséquence elle continuerait à remplir sa fonction principale de « stocker l'eau ».

Nous reviendrons plus loin sur ce passage, au niveau de la section traitant de l'analyse de la gravité globale du réservoir à partir de l'analyse de la gravité des composants.

Tableau 59 : Extrait du tableau d'analyse fonctionnel

N°	Composant	Fonctions génériques et de précision
1	Coupole de couverture	<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b> résister aux surcharges d'exploitation d'entretien Q résister aux surcharges climatiques de neige N résister aux charges permanentes G</p> <p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b> transmettre la composante verticale vers la paroi</p> <p><b>Limiter les flux hydrauliques</b> limiter l'infiltration de l'eau de pluie</p> <p><b>Collecter les flux hydrauliques</b> évacuer l'eau de ruissellement de la pluie et de la neige</p>
2	Ceinture supérieure	<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b> résister à l'effort de traction généré par la coupole</p> <p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b> transmettre la composante verticale vers la paroi</p> <p><b>Préparer la surface de contact</b> préparer la surface de contact de la coupole</p>

### 5.5.2. Classification des phénomènes

Après l'AMDE, nous avons identifié les phénomènes (c'est-à-dire les causes et les effets des modes de défaillance) intervenant dans les mécanismes de vieillissement des réservoirs. Les phénomènes utilisés dans l'AMDE sont des pathologies rencontrées et répertoriées par les experts sur le terrain depuis des années. Nous proposons ci-après une classification de ces phénomènes en vue d'une utilisation dans le modèle de vieillissement selon leur origine. Nous distinguons les familles suivantes :

- **état intrinsèque du composant**

Cette famille regroupe les phénomènes se produisant au sein du composant étudié, tels que :

*aciers dénudés, affouillements de fondations, basculement, cassure, corrosion des aciers, défauts d'enrobage des armatures, déformations, écaillage, efflorescence, épaufrure, fers non adhérents, fissures, gonflement, ségrégation, stalactite, tassement, traces de rouilles, usure.*

- **flux hydraulique**

Cette famille contient les phénomènes liés aux flux mis en évidence dans les BdF tels que :

*Stagnation des eaux de pluies, fuites d'eau à travers la masse, suintement, percolation.*

- **processus de conception et de réalisation**

Cette famille est destinée à prendre en compte les phénomènes liés au processus de conception et de réalisation des réservoirs :

*Capacité de chargement, vérification du flambement, qualité de coffrage, conformité des aciers, Bonne exécution des normes de ferrailage, composition du béton, vibration du béton, décoffrage selon les*

*normes, vérification en FTP, vérification de la condition de non fragilité, conformité de la longueur de recouvrement,*

- **flux de charges**

*Charges permanentes, surcharges d'exploitation, poussée hydrostatique, sollicitation sismique, poussée hydrodynamique.*

Pour la description physique précise de ces phénomènes, nous avons fait appel au recueil d'expertise basé sur le retour d'expérience qui fait état de pathologies répertoriées suite à l'enquête effectuée en 1990/1991 par le Cemagref, qui a mis en évidence les principales pathologies rencontrées sur les réservoirs. Ces phénomènes sont définis, décrits et classés dans le chapitre 1.

### **5.5.3. Classification des symptômes**

Les symptômes sont les manifestations externes des défauts, ils nous renseignent sur l'état visuel du phénomène. L'observation visuelle est à l'origine de la détection de la majeure partie des anomalies des ouvrages de génie civil. L'exploitant ou l'expert est dans un premier temps alerté par un symptôme externe détecté visuellement avant de prendre la décision d'approfondir son investigation par des essais mesurés plus objectifs. Nous nous sommes limités dans cette étude aux symptômes visuels. Ces anomalies constatées visuellement sur les réservoirs par l'expert en génie civil renseignent directement sur la manifestation des phénomènes. Nous distinguons les principaux symptômes visuels des réservoirs et une classification selon leur origine :

- **état intrinsèque du composant**

Cette famille regroupe les phénomènes se produisant au sein du composant étudié, tels que :

*Fissures, absence d'enrobage, aciers visibles, présence de rouille, taches blanches, affouillements de fondations, basculement, cassure, aciers corrodés, déformations, graviers visibles, stalactite, tassement.*

- **flux hydraulique**

Cette famille contient les phénomènes liés aux flux mis en évidence dans les BdF.

*Stagnation des eaux de pluies, fuites d'eau à travers la masse, taches d'humidité*

### **5.5.4. Les scénarios de vieillissement**

Nous avons dans un premier temps réalisé une AMDE très complète et très détaillée sur les réservoirs surélevés, qui envisageait des causes et effets des modes de défaillance très nombreux et divers. Nous nous sommes rendu compte que les tableaux obtenus étaient très lourds (voir annexe 2), car ils faisaient références à des causes et effets qui avaient une faible probabilité de se produire en réalité. Aussi, pour des besoins d'efficacité du fait que le parc qui a fait l'objet de notre expertise (voir chapitre 6) est composé uniquement de réservoirs posés au sol, nous ne présenterons plus loin dans le cas d'étude une AMDEC des quatre composants (coupole, ceinture, paroi, radier) concernés par le mécanisme de vieillissement dans ce type de réservoirs au sol. Dans cette analyse, nous avons trié les informations obtenues pour ne retenir au final que les causes et les effets prépondérants, ceux qui sont susceptibles d'apparaître dans les mécanismes de vieillissement appliqués aux réservoirs posés au sol.

## 5.6. Analyse de la criticité

---

### 5.6.1. Concept de la criticité

Lorsque l'AMDE globale de tous les composants est terminée, une analyse d'évaluation des risques est effectuée pour toutes les défaillances précédemment identifiées. L'évaluation des risques potentiels se traduit par le calcul de la criticité, à partir de l'estimation du couple *indice de gravité* et de *fréquence* (probabilité).

Cette criticité permet de :

- Noter l'importance du risque engendré par chaque cause de défaillance,
- Hiérarchiser les causes entre elles afin de déterminer celles qui doivent faire l'objet d'une action corrective.

L'indice de *Criticité* est calculé pour chaque cause de défaillance, en effectuant le produit de deux indices

$$: C = F. G$$

Où :

- F désigne *l'indice de fréquence* : Il représente la probabilité que la cause de défaillance apparaisse et qu'elle entraîne le mode potentiel de défaillance considéré.
- G désigne *l'indice de gravité* : Il représente le niveau de conséquences provoquées par l'apparition du mode de défaillance.

Il est bon de noter que plus la probabilité est grande et plus les effets sont jugés graves, plus la criticité d'un mode de défaillance est alors plus importante et plus il devient nécessaire de prendre des mesures correctives. **La criticité est définie comme le risque de dégradation ou défaillance d'un composant.**

### 5.6.2. Proposition pour l'analyse de la criticité

Comme mentionné au chapitre 1<sup>er</sup>, nos réservoirs sont des ouvrages non documentés, les données sont insuffisantes pour déterminer les fréquences de défaillances, nous sommes alors contraints de faire appel au jugement de l'expert pour estimer les niveaux de probabilité. On s'oriente de ce fait vers une analyse qualitative des fréquences de défaillance. Pour l'analyse de la criticité de la dégradation des composants du réservoir puis du réservoir dans sa globalité, nous proposons la méthodologie suivante sur deux étapes, qui peut se résumer comme suit :

**Etape 1** : Analyse qualitative des dégradations

Nous proposons une méthode qualitative d'analyse de l'état de gravité de la défaillance des fonctions de composants des réservoirs et de l'évolution de cette gravité au cours du temps.

**Etape 2** : Analyse qualitative de la criticité

Nous proposons une méthode qualitative pour évaluer la criticité de granularité intermédiaire (du composant) correspond à la dégradation d'une fonction de ce composant, mais aussi au niveau global du réservoir.

### 5.6.3. Analyse qualitative des dégradations

La démarche adoptée par (Peyras, 2003) sur les barrages, consistait à faire une analyse qualitative sur les trois variables (symptôme, phénomène et fonction). Il propose une grille d'analyse qualitative de l'état de chacune des variables de chaque composant du barrage.

Il détermine les attributs de la **normalité** de la variable symptôme conformément au tableau suivant :

Tableau 60 : Grille d'analyse qualitative des symptômes

Attributs d'état du symptôme	Qualification
0	symptôme normal
1	symptôme légèrement en écart par rapport à l'état normal
2	symptôme en écart sensible par rapport à la normalité
3	symptôme alarmant

Puis donne les attributs d'état de **l'ampleur** de la variable phénomène selon la grille suivante :

Tableau 61 : Grille d'analyse qualitative des phénomènes

Attributs d'état du phénomène	Qualification
0	phénomène absent ou normal
1	phénomène faible ou légèrement en écart par rapport à l'état normal
2	phénomène important
3	phénomène très important

Et enfin, donne les attributs d'état de la **performance** de la fonction selon la grille suivante :

Tableau 62 : Grille d'analyse qualitative des fonctions

Attributs d'état de la fonction	Qualification
0	Fonction optimale
1	Fonction correcte
2	Fonction partielle
3	Fonction défailante

Or, l'attribut d'état de la fonction ne peut être obtenu directement par des symptômes car ces derniers renseignent les phénomènes (et non pas les fonctions). Il est alors nécessaire de revenir aux causes de pertes de performance (c'est à dire les phénomènes) qui sont à l'origine de la perte de performance de la fonction. Dans cette démarche l'analyse qualitative d'une fonction à un instant d'observation T est établie en considérant :

- L'historique des « n » phénomènes à l'origine de la dégradation de la fonction, c'est-à-dire les lois d'évolution des attributs d'état des phénomènes entre l'instant initial (lors de la mise en service de l'ouvrage) et l'instant d'observation T.
- Attribut de la performance de la fonction à l'instant initiale  $t_0$ .

Sauf que cette manière de faire présente l'inconvénient lié à la difficulté d'apprécier cette loi d'évolution en fonction du temps. Pour palier à cette difficulté, et dans le but de déterminer plus tard la criticité des conséquences de la défaillance d'un composant par la méthode de l'AMDEC, il est important de définir l'indice de gravité des effets de défaillance de la fonction d'un composant. Cet indice de gravité renseigne sur la sévérité relative à l'effet de défaillance.

Pour apprécier cet indice de gravité, nous proposons ainsi, les attributs d'état de la gravité de la défaillance de la fonction du composant dans le tableau qui suit :

Tableau 63 : Grille d'analyse qualitative de la gravité de la défaillance de la fonction

Attributs d'état de la gravité de défaillance de la fonction	Indice de gravité	Qualification
0	Niveau 1	Pas de désordres visibles
1	Niveau 2	Quelques défauts, composant à surveiller
2	Niveau 3	Défauts spécifiques de gravité variable
3	Niveau 4	Défauts très important et risque de ruine

#### 5.6.4. Analyse de l'évolution de la gravité à l'échelle du composant

Dans cette section, nous nous intéressons à la dynamique de la dégradation de la fonction du composant. Et dans le modèle de vieillissement, nous faisons correspondre à la variable gravité de défaillance de la fonction, un attribut du 2<sup>nd</sup> ordre renseignant sur l'évolution de la gravité de sa dégradation. Notre objectif est de proposer une méthodologie d'analyse qualitative de l'évolution de la gravité de la dégradation d'une fonction d'un composant.

Si nous notons  $F(t)$  l'attribut de l'état de la gravité de défaillance de la fonction à un instant  $(t)$  elle sera  $F(t') = F(t) + \frac{\partial F}{\partial t} \cdot \Delta t$  à l'instant  $t'$ .

Comment apprécier le terme du second ordre  $\frac{\partial^2 F}{\partial t^2} \cdot \Delta t^2$  ?

La fonction  $F(t)$  n'est connue qu'en des points bien précis à  $t$  et à  $t_0$ , mais nous ne pouvons apprécier sa loi de variation (polynomiale, logarithmique, exponentielle, ...etc).

Une alternative à cette difficulté est proposée par (Peyras, 2003), elle consiste à rechercher, non pas les dérivées temporelles de l'état de la fonction mathématique de gravité de la dégradation de la fonction du composant, mais les intervalles de temps qui vont séparer les niveaux successifs de dégradation.

Il définit alors :

- Un premier intervalle de temps  $\Delta t_1 = t_1 - t_0$ , avec  $t_0$  et  $t_1$  tel que  $F(t_0)=i$  et  $F(t_1)=i+1$  (où  $i=0,1,2$ )
- Un second intervalle de temps  $\Delta t_2 = t_2 - t_0$ , séparant un état de  $F$  pour lequel l'attribut de gravité vaut  $(i)$  et l'état correspondant à la défaillance, avec  $t_0$  et  $t_2$  tel que  $F(t_0)=i$  et  $F(t_2)=3$  (où  $i=0,1,2$ )

Au final, nous retenons pour l'analyse de l'évolution des gravités de défaillance des fonctions, l'approche basée sur l'évaluation des intervalles de temps  $\Delta t_1$  et  $\Delta t_2$  entre les différents niveaux de gravité, qui sont choisis en fonction des fréquences de visites d'opérations d'inspection des réservoirs.

Conformément au fascicule 74, l'entretien des réservoirs devant contenir l'eau potable est prévu une fois par an. Cet entretien comprend les opérations de nettoyage complété par une visite technique d'inspection. Une autre visite importante est celle de l'assurance décennale qui intervient dix ans après la réception définitive de l'ouvrage qui suit sa mise en service, elle correspond à auscultation complexe avec une éventuelle grosse réparation. Et enfin, vient la visite mensuelle de routine qui concerne l'inspection des installations et équipements de robinetterie de la chambre des vannes.

Pour chaque intervalle de temps  $\Delta t_1$  et  $\Delta t_2$  séparant les deux niveaux de gravité de la défaillance, nous faisons correspondre un attribut qualitatif, selon la grille définie de façon à prendre en compte les fréquences des opérations d'inspection du réservoir.

Tableau 64 : Grille d'analyse qualitative de l'évolution de la gravité de la défaillance

Intervalle de temps $\Delta t_1$ et $\Delta t_2$	Attribut qualitatif
$\Delta t > 10$ ans	1
1 an $< \Delta t < 10$ ans	2
1 mois $< \Delta t < 1$ an	3
$\Delta t < 1$ mois	4

### 5.6.5. Analyse qualitative de la gravité de la dégradation globale d'un réservoir

En partant de la gravité de la défaillance d'un composant du réservoir, nous tacherons d'analyser la gravité de la défaillance globale du réservoir. Pour cela, nous analyserons les fonctions impliquées dans la stabilité du réservoir.

Lors de l'analyse fonctionnelle effectuée, nous sommes arrivés à une seule fonction principale de l'ouvrage qui est : « **Le réservoir stocke l'eau** ». Soit cette fonction est remplie et donc, le réservoir reste intègre, soit elle ne l'est pas et le réservoir est rompu. Pour accomplir cette fonction principale, le réservoir doit assurer des fonctions de contrainte comme détaillées lors de l'analyse fonctionnelle et qui se résument en une seule fonction de résistance : « **Le réservoir résiste aux sollicitations** ».

Comme nous l'avons vu dans l'analyse fonctionnelle, la fonction globale de *résistance aux sollicitations mécaniques* du réservoir est assurée au sein du système par les composants qui doivent supporter les efforts des poussées hydrostatiques et les actions sismiques. Il s'agit des composants suivants : *la paroi cylindrique, ceinture intermédiaire, cône de réduction, coupole inférieure, ceinture inférieure, cheminée intérieure, le support et enfin la fondation.*

La fonction globale de résistance aux sollicitations mécaniques intervenant dans la stabilité de l'ouvrage est évaluée à partir des indices de gravité de la défaillance des fonctions des différents composants à granularité intermédiaire intervenant dans la stabilité de notre réservoir.

- $F_1$  : La paroi cylindrique résiste aux sollicitations mécaniques
- $F_2$  : La ceinture intermédiaire résiste aux sollicitations mécaniques
- $F_3$  : Le tronc de cône résiste aux sollicitations mécaniques
- $F_4$  : La ceinture inférieure résiste aux sollicitations mécaniques
- $F_5$  : La coupole inférieure résiste aux sollicitations mécaniques
- $F_6$  : La cheminée intérieure résiste aux sollicitations mécaniques
- $F_7$  : Le support résiste aux sollicitations mécaniques
- $F_8$  : La fondation résiste aux sollicitations mécaniques

La défaillance d'une fonction de résistance ( $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_8$ ) des composants entraîne la défaillance de la résistance globale du réservoir et donc la ruine du système. Les fonctions de résistance ( $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_8$ ) sont totalement indépendantes. Alors pour évaluer la gravité de la défaillance de la résistance globale du réservoir  $F_S$ , nous considérons le maximum des attributs d'état des fonctions de résistance des composants :  $F_S = \max (F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_8)$

Nous adopterons la même grille qualitative de la gravité de la défaillance de la fonction à l'échelle du système (tableau 65).

Tableau 65 : Grille d'analyse qualitative de la gravité de la défaillance de la fonction

Attributs d'état de la gravité de défaillance de la fonction	Qualification
0	Fonction de résistance globale intacte
1	Fonction de résistance globale légèrement défaillante
2	Fonction de résistance globale partiellement défaillante
3	Fonction de résistance globale défaillante et risque de ruine

### 5.6.6. Analyse de la criticité à l'échelle du composant

A ce stade de l'étude nous nous intéressons à la criticité de granularité intermédiaire (du composant) correspond à la dégradation d'une fonction de ce composant. Ceci revient à chercher l'indice de gravité de la dégradation de cette fonction ainsi que la fréquence de sa dégradation.

- **Mesure de l'occurrence de l'augmentation de la gravité de dégradation d'une fonction**

La démarche consiste à évaluer à partir d'un instant initial  $t_0$ , les mesures de l'occurrence  $\Delta t_1$  et  $\Delta t_2$  de la gravité de dégradation respectivement d'une unité qualitative et à la défaillance de la fonction.

- La mesure de l'occurrence de l'augmentation de la gravité de dégradation d'une unité qualitative :  $\Delta t_1$  tel que  $F(t_0) = i$  et  $F(t_0 + \Delta t_1) = i+1$
- La mesure de l'occurrence de la défaillance totale de la fonction :  $\Delta t_2$  tel que  $F(t_0) = i$  et  $F(t_0 + \Delta t_2) = 3$

Deux attributs qualitatifs, appelés attributs d'occurrence, sont associés à ces mesures comme l'indique le tableau :

- l'attribut d'occurrence de dégradation d'une unité qualitative, correspondant à  $\Delta t_1$
- l'attribut d'occurrence de défaillance, correspondant à  $\Delta t_2$ .

Tableau 66 : Grille d'analyse qualitative de la gravité de la mesure d'occurrences

Intervalle de temps $\Delta t_1$ et $\Delta t_2$	Attribut d'occurrence
$\Delta t_1$ ou $\Delta t_2 > 10$ ans	1
$1 \text{ an} < \Delta t_1$ ou $\Delta t_2 < 10$ ans	2
$1 \text{ mois} < \Delta t_1$ ou $\Delta t_2 < 1$ an	3
$\Delta t_1$ ou $\Delta t_2 < 1$ mois	4

L'estimation des mesures d'occurrence  $\Delta t_1$  et  $\Delta t_2$  relèvent des compétences des experts spécialisés en ouvrages hydrauliques. Avec leur longue expérience, ils peuvent apprécier d'une manière juste le temps nécessaire à une fonction  $F(t)$  à se dégrader et perdre un niveau de gravité pour  $\Delta t_1$  ou alors atteindre la défaillance totale pour  $\Delta t_2$ .

- **Mesure des conséquences de la dégradation de la fonction**

L'analyse des conséquences de la dégradation de la fonction d'un composant consiste à estimer l'indice de gravité de (F) à échéance des mesures de l'occurrence  $\Delta t_1$  et  $\Delta t_2$ .

Ainsi à partir d'un instant initial  $t_0$  d'observation, les conséquences de la dégradation de la fonction (F) sont estimées à partir de deux attributs

- l'attribut de conséquences F ( $t_0 + \Delta t_1$ ) : C'est la prévision de l'indice de gravité de la défaillance de la fonction à l'instant ( $t_0 + \Delta t_1$ );
- l'attribut de conséquences F ( $t_0 + \Delta t_2$ ) : C'est la prévision de l'indice de gravité de la défaillance de la fonction à l'instant ( $t_0 + \Delta t_2$ );

Nous proposons la grille d'analyse qualitative des conséquences :

Tableau 67 : Grille d'analyse qualitative des conséquences

Attribut de conséquences F ( $t_0 + \Delta t_1$ ) et F ( $t_0 + \Delta t_2$ )	Indice de gravité de la défaillance de la fonction F aux instants ( $t_0 + \Delta t_1$ ) et ( $t_0 + \Delta t_2$ )
1	Gravité faible
2	Gravité moyenne
3	Gravité alarmante

- **Analyse qualitative de la criticité**

Comme nous l'avons précisé précédemment, la criticité sera évaluée par le produit de l'indice de gravité et de l'occurrence conformément à la méthode de l'AMDEC.

Pour l'analyse qualitative de la criticité de la dégradation de la fonction, nous multiplions les attributs de conséquences par les attributs d'occurrence.

Pour une fonction (F) considérée à partir de l'instant initial  $t_0$ , pour laquelle nous avons estimé :

- Les mesures de l'occurrence et leurs attributs :  $\Delta t_1, \Delta t_2$ , attribut  $\Delta t_1$  et attribut  $\Delta t_2$
- Les indices de gravité de (F) à échéance de ces délais : F ( $t_0 + \Delta t_1$ ) et F ( $t_0 + \Delta t_2$ )

Nous obtenons ainsi deux mesures de criticité  $C_{\Delta t_1}$  et  $C_{\Delta t_2}$  pour la fonction (F) :

- La criticité de dégradation d'une unité de la fonction :  $C_{\Delta t_1} = \text{attribut}(\Delta t_1) \cdot F(t_0 + \Delta t_1)$
- La criticité de la défaillance de la fonction :  $C_{\Delta t_2} = \text{attribut}(\Delta t_2) \cdot 3$

Tableau 68 : Grille qualitative d'analyse de la criticité

Attribut de conséquence	Attribut d'occurrence			
	1	2	3	4
1	1	2	3	4
2	2	4	6	8
3	3	6	9	12

- **Définition des classes de criticité**

En fonction des fréquences d'intervention de l'exploitation sur les réservoirs comme vues précédemment, nous pouvons définir quatre niveaux de criticité aux quels vont correspondre des travaux et des mesures à prendre. Ces travaux doivent s'entreprendre d'une manière plus ou moins urgente en fonction de la criticité de la fonction. Nous proposons à cet effet quatre classes de criticité « C » en fonction des délais d'intervention.

Tableau 69 : Définition des classes de criticité

Criticité	$0 < C < 2$	$3 < C < 4$	$6 < C < 8$	$9 < C < 12$
Définition	Criticité faible	Criticité moyenne	Criticité importante	Criticité alarmante
Délai d'intervention	Rien à prévoir d'ici la prochaine évaluation <b>décennale</b>	Rien à prévoir d'ici la prochaine inspection <b>annuelle</b>	Travaux à prévoir dans les <b>mois</b> à venir	Travaux à prévoir dans les <b>jours</b> à venir

### 5.6.7. Analyse de la criticité globale d'un réservoir

Nous déterminons la gravité de la défaillance de la fonction globale de résistance aux sollicitations mécaniques intervenant dans la stabilité globale de l'ouvrage à partir des fonctions de résistance assurées par les différents composants :

- $F_1$  : La paroi cylindrique résiste aux sollicitations mécaniques
- $F_2$  : La ceinture intermédiaire résiste aux sollicitations mécaniques
- $F_3$  : Le tronc de cône résiste aux sollicitations mécaniques
- $F_4$  : La ceinture inférieure résiste aux sollicitations mécaniques
- $F_5$  : La coupole inférieure résiste aux sollicitations mécaniques
- $F_6$  : La cheminée intérieure résiste aux sollicitations mécaniques
- $F_7$  : Le support résiste aux sollicitations mécaniques
- $F_8$  : La fondation résiste aux sollicitations mécaniques

Pour évaluer, à un instant initial  $t_0$ , la criticité globale d'un réservoir vis-à-vis de la stabilité, nous estimons les mesures de l'occurrence  $\Delta t_1$  de l'augmentation de la gravité de dégradation d'une unité qualitative de la fonction globale de résistance et  $\Delta t_2$  de la défaillance totale de la fonction « **Le réservoir résiste aux sollicitations** ».

Nous obtenons ainsi deux mesures de criticité globale vis-à-vis de la stabilité :

- la criticité globale de la dégradation d'une unité qualitative = attribut ( $\Delta t_1$ ) × indice de gravité globale du réservoir à ( $t_0 + \Delta t_1$ )
- la criticité globale de la dégradation du réservoir vis-à-vis de la défaillance totale = attribut ( $\Delta t_2$ ) × indice de gravité globale du réservoir à ( $t_0 + \Delta t_2$ ) = attribut ( $\Delta t_2$ ) × 3

C'est ainsi que nous obtenons une grille d'analyse de la criticité globale d'un réservoir, en définissant comme dans le cas le l'analyse de la criticité d'un composant quatre classes de criticité.

Tableau 70 : Grille qualitative d'analyse de la criticité globale d'un réservoir

Attribut de conséquence	Attribut d'occurrence			
	1	2	3	4
1	1	2	3	4
2	2	4	6	8
3	3	6	9	12

En fonction des fréquences d'intervention de l'exploitation sur les réservoirs, nous pouvons définir quatre niveaux de criticité aux quels vont correspondre des travaux et des mesures à prendre. Ces travaux doivent s'entreprendre d'une manière plus ou moins urgente en fonction de la criticité de la fonction. Nous proposons à cet effet quatre classes de criticité « C » en fonction des délais d'intervention.

Tableau 71 : Définition des classes de criticité globale d'un réservoir

<b>Criticité</b>	$0 < C < 2$	$3 < C < 4$	$6 < C < 8$	$9 < C < 12$
<b>Définition</b>	Criticité faible	Criticité moyenne	Criticité importante	Criticité alarmante
<b>Délai d'intervention</b>	Rien à prévoir d'ici la prochaine évaluation <b>décennale</b>	Rien à prévoir d'ici la prochaine inspection <b>annuelle</b>	Travaux à prévoir dans les <b>mois</b> à venir	Travaux à prévoir dans les <b>jours</b> à venir

## 5.7. Etude de cas

### 5.7.1. Présentation du réservoir

Comme application pratique pour bien illustrer la méthode de sureté de fonctionnement, nous reprendrons le réservoir de stockage étudié avec la méthode par approche par expertise au chapitre 4. Pour rappel, ce réservoir posé au sol de capacité 2000 m<sup>3</sup>, implanté dans la ville côtière de Jijel est réalisé en 1987. Il a fait l'objet d'un diagnostic par nos soins en septembre 2007.

### 5.7.2. Identification des scénarios de vieillissement recensés au niveau du réservoir expertisé

Quatre scénarios de vieillissement ont été observés sur le réservoir. Il s'agit :

- **Scénario 3 : 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. Cette pathologie est observée sur environ six endroits de la paroi.

- **Scénario 4 : Dégradation des composants par réactions avec le milieu (vent, gel, neige)**

Le béton du parement est complètement délavé en surface, laissant apparents les agrégats par endroit. Nous constatons de nombreux éclatements du béton et parfois de longues fissures longitudinales. Un enduit a été réalisé, peut être pour éviter la pénétration progressive de l'eau de pluie et des brouillards marins. Mais ce n'est qu'un trompe l'œil : il n'a aucune tenue et ne fait que masquer l'état du béton. Par endroit, cet enduit a complètement explosé et laisse voir de grosses cavités. Plusieurs sont le siège de suintements, confirmant si besoin était le vieillissement progressif du béton.

- **Scénario 5 : Dégradation des enduits étanches**

L'étanchéité de notre réservoir est assurée par la structure, complétée par un revêtement d'imperméabilisation. Ce revêtement d'imperméabilisation est un écran intérieur adhérent à son support, pouvant assurer l'étanchéité mais ne résistant pas à une fissuration appréciable du support. C'est le cas des enduits à base de mortiers hydrauliques épais ou minces. La dégradation de l'élément étanche est du principalement à l'insuffisance ponctuelle ou localisée d'étanchéité dans la masse ou de l'imprégnation d'origine. La perte d'étanchéité a pour origine le manque d'adhérence de l'enduit de mortier sur la paroi, le décollement ou encore le cloquage. Ce manque d'adhérence du à la pression de l'eau résulte d'une application sur support humide ou saturé, ou d'une préparation insuffisante de préparation du support ou de l'action de sous pression. La dégradation de l'étanchéité résulte de la fissuration de l'enduit ayant pour origine la fissuration du support.

- **Scénario 6 : Dégradation des revêtements d'étanchéité**

Ce réservoir est muni d'une étanchéité artificielle composé d'un complexe d'étanchéité type papier Kraft. Ce dispositif d'étanchéité s'est dégradé sous l'effet des gradients thermiques (températures élevées, gel-dégel) et les rayons ultra violets. Ce complexe s'est totalement décollé de la chape de ciment.

- **Scénario 7 : Faiblesse du réservoir vis-à-vis de l'effet hydrodynamique**

Le mécanisme de vieillissement rencontré lors de notre enquête est un ensemble de fissures obliques sur

la paroi du réservoir, non parallèle aux axes principaux de la paroi. Ces fissures localisées à la liaison paroi-radier traversantes dans le béton armé évoluent dans le temps, compromettant ainsi l'étanchéité de l'ouvrage. Lors du chapitre 3 consacré à la méthode physique, nous avons montré que ces fissures étaient dues à la sollicitation hydrodynamique. La négligence de l'effet hydrodynamique, lors de la conception du réservoir, sous estimait considérablement les contraintes de traction (horizontales et verticales) agissant dans la paroi, causant ainsi l'apparition des fissures obliques localisées à la liaison paroi-radier ; compromettant ainsi l'étanchéité de l'ouvrage. Ces fissures inclinées, laissent paraître des suintements qui se manifestent par la présence d'humidité parfois chargée en sels après percolation à travers le béton.

### 5.7.3. Mise en œuvre de la méthode AMDEC

Fonctions	Mode de défaillance	Cause possible de défaillance	Effet possible de la défaillance	Symptôme de la défaillance	Moyen de la détection	F(to)	Dt1	F(t1)	Criticité
3	4	5	6	7	8	F(to)	Dt2	F(t2)	C=F(t).Dt
<b>Mécanisme de vieillissement « dégradation du revêtement d'étanchéité de couverture</b>									
<b>Résister aux sollicitations mécaniques</b>	La fonction "résister aux sollicitations mécaniques" est dégradée ou défaillante	<b>Flux de charge</b>	<b>Etat intrinsèque du composant</b>						
résister aux surcharges d'exploitation d'entretien Q		Charges & surcharges sur la coupole	<i>Fissures dans la masse</i>	<i>Constat de fissures</i>	Observation visuelle	2	2	3	6
résister aux surcharges climatiques de neige N		<b>Processus de conception - réalisation</b>				2	2	3	6
résister aux charges permanentes G		Absence de contreventement des étais							
<b>Collecter les flux hydrauliques</b>	La fonction "collecter les flux hydrauliques" est dégradée ou défaillante	<b>Flux hydraulique</b>	<b>Flux hydraulique</b>						
évacuer l'eau de ruissellement de la pluie et de la neige		Eaux de pluie	Stagnation de l'eau sur la coupole	Constat de stagnation de l'eau	Observation visuelle	1	2	2	4
		<b>Processus de conception - réalisation</b>	<b>Etat intrinsèque du composant</b>			1	1	3	3
		Gargouilles en nombre insuffisant	Complexe d'étanchéité dégradé	Constat de dégradation du complexe	Observation visuelle				
		Gargouilles dégradées							
<b>Limiter les flux hydrauliques</b>	La fonction "limiter les flux hydrauliques" est dégradée ou défaillante	<b>Flux hydraulique</b>	<b>Flux hydraulique</b>						
limiter l'infiltration de l'eau de pluie		Stagnation des eaux sur la coupole	fuites d'eau à travers la masse de la coupole	Fuites à travers la coupole	Observation visuelle	2	2	3	6
		<b>Etat intrinsèque du composant</b>				2	2	3	6
		fissure dans la masse							
		Complexe d'étanchéité dégradé							
<b>Mécanisme de vieillissement « faiblesse de la paroi sous l'effet hydrodynamique</b>									
<b>Résister aux sollicitations mécaniques</b>	La fonction "résister aux sollicitations mécaniques" est dégradée ou défaillante	<b>Flux de charge</b>	<b>Etat intrinsèque du composant</b>						
résister à la poussée hydrostatique transmise par l'eau de la cuve		Poussée hydrostatique	épaufrement	aciers dénudés	Observation visuelle	2	2	3	6
résister à la poussée hydrodynamique transmise par l'eau de la cuve		Poussée hydrodynamique	fissures	Apparition des fissures	Observation visuelle	2	2	3	6
		<b>Processus de conception - réalisation</b>							
		Négligence de la vérification en FTP de la paroi travaillant en traction							

		Omission de la modélisation de la masse de l'eau oscillante Enrobage insuffisant							
<b>Mécanisme de vieillissement « Corrosion des aciers de la paroi</b>									
<b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b>	La fonction "transmettre les sollicitations mécaniques" est dégradée ou défaillante	<b>Processus de conception - réalisation</b> <i>Longueur de recouvrement insuffisante</i> <b>Etat intrinsèque du composant</b> <i>épaufrure</i> <i>fissures</i>	<b>Etat intrinsèque du composant</b> <i>Déformation</i> <i>Aciers dénudés</i> <i>Fers non adhérents</i>	<i>Constat des déformations</i> <i>aciers visibles</i>	Observation visuelle Observation visuelle	2 2	3 3	3 3	9 9
<b>Limiter les flux hydrauliques</b>	La fonction "limiter les flux hydrauliques" est dégradée ou défaillante	<b>Flux hydraulique</b> <i>Eau de la cuve</i> <b>Processus de conception - réalisation</b> <i>épaisseur de la paroi</i> <i>ségrégation</i> <b>Etat intrinsèque du composant</b> <i>Déformation</i> <i>Aciers dénudés</i> <i>Fers non adhérents</i>	<b>Flux hydraulique</b> <i>Suintement</i> <b>Etat intrinsèque du composant</b> <i>corrosion des aciers</i> <i>Efflorescence</i>	<i>Tache d'humidité</i> <i>Présence de rouille</i> <i>Tache blanchâtres</i>	Observation visuelle Observation visuelle Observation visuelle	2 2	3 3	3 3	9 9
<b>Mécanisme de vieillissement « Dégradation des revêtements d'étanchéité de la paroi</b>									
<b>Préparer la surface de contact</b>	La fonction "préparer la surface de contact" est dégradée ou défaillante	<b>Flux de charge</b> <i>poussée hydrostatique</i> <b>Processus de conception - réalisation</b> <i>Manque d'adhérence de l'enduit étanche</i>	<i>Décollement de l'enduit étanche</i>	<i>Agrégats visibles</i>	Observation visuelle	2 2	3 3	3 3	9 9
<b>Mécanisme de vieillissement « Dégradation de la paroi par réactions avec le milieu</b>									
<b>Préparer la surface de contact</b>	La fonction "préparer la surface de contact" est dégradée ou défaillante	<b>Etat intrinsèque du composant</b> <i>Aciers dénudés</i> <i>Agression du milieu extérieur</i>	<b>Surface de contact</b> <i>Dégradation des enduits externes</i> <i>Corrosion des aciers</i>	<i>agrégats visibles</i> <i>Traces de rouille</i>	Observation visuelle Observation visuelle	2 2	3 3	3 3	9 9

### 5.7.4. Représentation des scénarios de vieillissement sous forme de graphe causal

Après l'AMDE, nous pouvons modéliser les cinq (5) scénarios de vieillissement s'opérant dans notre réservoir, en enchaînant les séquences chronologiques de défaillance, représentant les mécanismes physiques se produisant au sein du réservoir et conduisant à des pertes ou dégradations de fonctions.

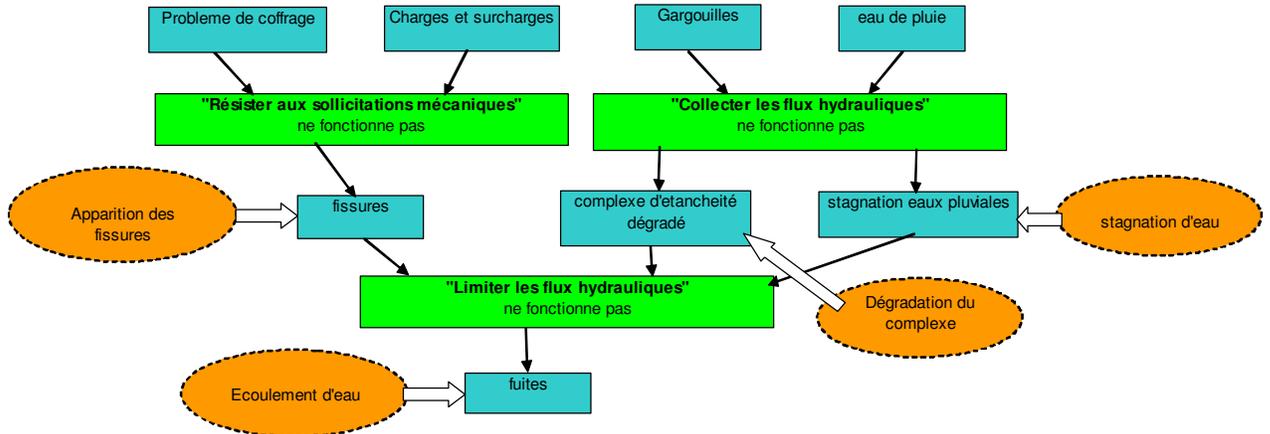


Figure 74: Mécanisme de vieillissement « **dégradation du revêtement d'étanchéité de couverture** »

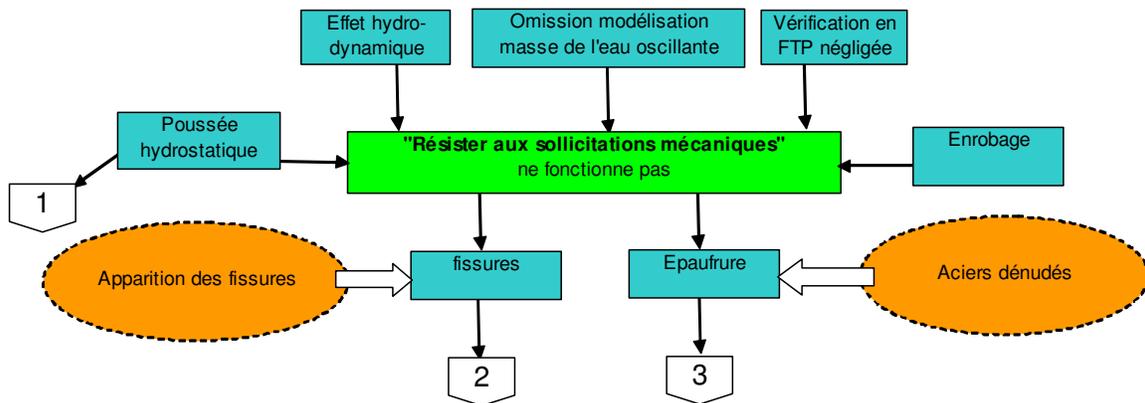


Figure 75: Mécanisme de vieillissement « **faiblesse de la paroi sous l'effet hydrodynamique** »

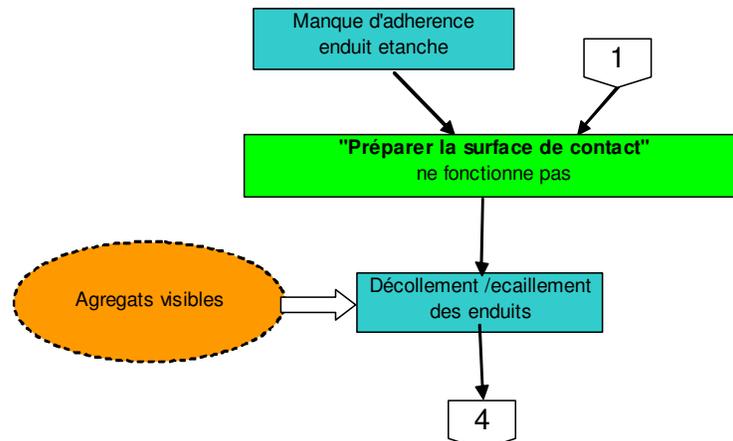


Figure 76: Mécanisme de vieillissement « **Dégradation des revêtements d'étanchéité de la paroi** »

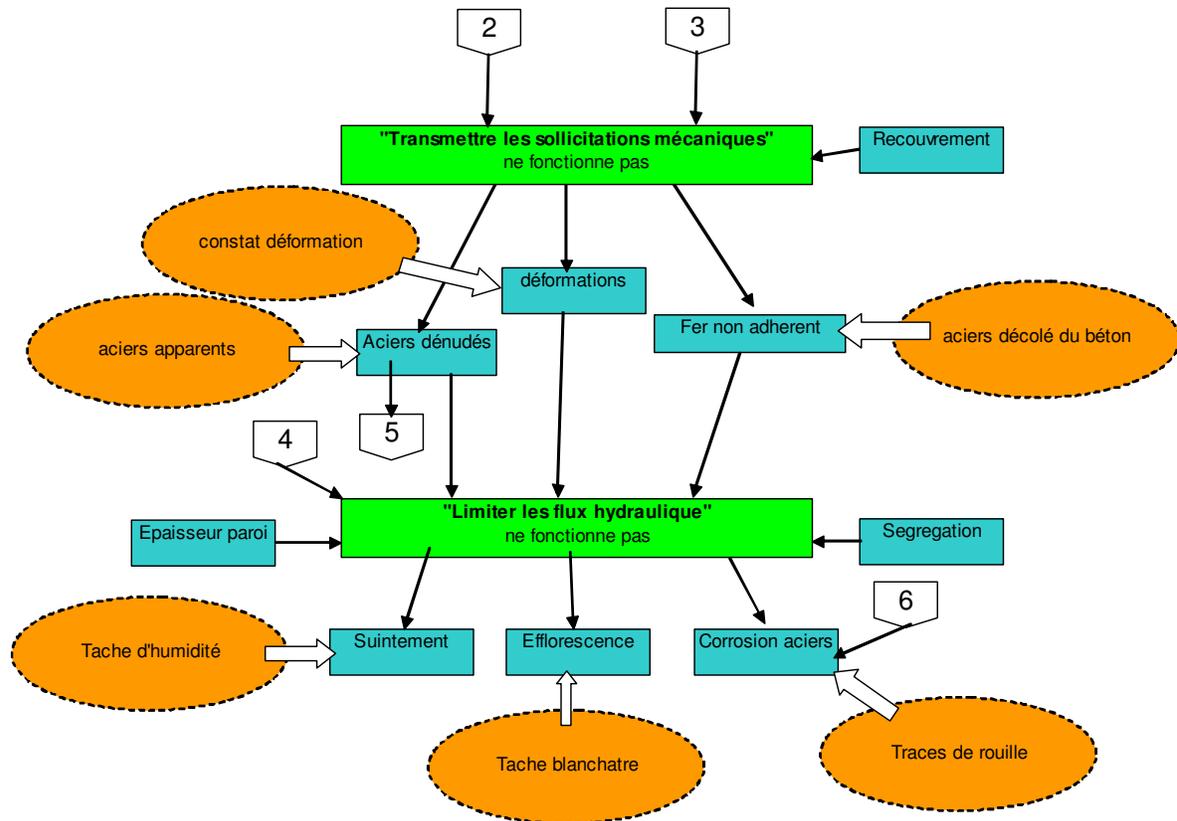


Figure 77: Mécanisme de vieillissement « Corrosion des aciers de la paroi »

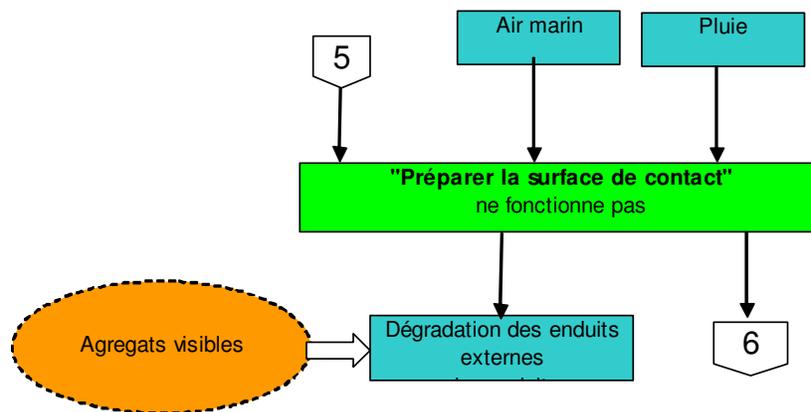


Figure 78 : Mécanisme de vieillissement «Dégradation de la paroi par réactions avec le milieu»

### 5.7.5. Liste de fonctions critiques

A l'aide du tableau de l'AMDE qui nous donne la criticité des composants pour chaque mécanisme de vieillissement, nous allons pouvoir tirer des conclusions en matière de sureté de fonctionnement. Cet outil permet de détecter des modes de défaillance critiques voir catastrophiques. L'entreprise de gestion pourra par la suite prendre en compte ces défaillances et mettre en place des actions de correction. Les fonctions analysées sont les suivantes conformément aux diagrammes causaux :

Tableau 72 : Tableau des niveaux de criticité des composants du réservoir

Mécanismes de vieillissement / Fonctions	F(t <sub>0</sub> )	Dt1	F(t1)	Criticité	Niveau de criticité
	F(t <sub>0</sub> )	Dt2	F(t2)	C=F(t).Dt	
Mécanisme de vieillissement : <b>dégradation du revêtement d'étanchéité de couverture</b>					
Fonction : Résister aux sollicitations mécaniques					
La criticité de dégradation d'une unité de la fonction	2	2	3	6	Criticité importante
La criticité de la dégradation de la fonction	2	2	3	6	Criticité importante
Fonction : Collecter les flux hydrauliques					
La criticité de dégradation d'une unité de la fonction	1	2	2	4	Criticité moyenne
La criticité de la dégradation de la fonction	1	1	3	3	Criticité moyenne
Fonction : Limiter les flux hydrauliques					
La criticité de dégradation d'une unité de la fonction	2	2	3	6	Criticité importante
La criticité de la dégradation de la fonction	2	2	3	6	Criticité importante
Mécanisme de vieillissement : <b>Faiblesse de la paroi sous l'effet hydrodynamique</b>					
Fonction : Résister aux sollicitations mécaniques					
La criticité de dégradation d'une unité de la fonction	2	2	3	6	Criticité importante
La criticité de la dégradation de la fonction	2	2	3	6	Criticité importante
Mécanisme de vieillissement : <b>Corrosion des aciers de la paroi</b>					
Fonction : Transmettre les sollicitations mécaniques					
La criticité de dégradation d'une unité de la fonction	2	3	3	9	Criticité alarmante
La criticité de la dégradation de la fonction	2	3	3	9	Criticité alarmante
Fonction : Limiter les flux hydrauliques					
La criticité de dégradation d'une unité de la fonction	2	3	3	9	Criticité alarmante
La criticité de la dégradation de la fonction	2	3	3	9	Criticité alarmante
Mécanisme de vieillissement : <b>Dégradation des revêtements d'étanchéité de la paroi</b>					
Fonction : Préparer la surface de contact					
La criticité de dégradation d'une unité de la fonction	2	3	3	9	Criticité alarmante
La criticité de la dégradation de la fonction	2	3	3	9	Criticité alarmante
Mécanisme de vieillissement : <b>Dégradation de la paroi par réactions avec le milieu</b>					
Fonction : Préparer la surface de contact					
La criticité de dégradation d'une unité de la fonction	2	3	3	9	Criticité alarmante
La criticité de la dégradation de la fonction	2	3	3	9	Criticité alarmante

Trois niveaux de criticité ont été rencontrés sur ce réservoir : Criticité moyenne, importante et alarmante. La criticité alarmante a été observée sur quatre fonctions du composant « paroi cylindrique ». Quant au composant « coupole de couverture » deux de ses fonctions ont atteint la criticité importante.

Quelle est la criticité globale du réservoir ?

Dans le cas de notre réservoir, la gravité de la défaillance de la fonction globale de résistance aux sollicitations mécaniques intervenant dans la stabilité globale de l'ouvrage est déterminée à partir de la gravité de la défaillance de la fonction de résistance aux sollicitations mécaniques de la paroi cylindrique. La défaillance de cette fonction de résistance entraîne la défaillance de la résistance globale du réservoir et donc sa ruine. Alors pour évaluer la gravité de la défaillance de la résistance globale du réservoir  $F_S$ , nous considérons l'attribut d'état de la fonction de résistance du composant qui dans notre cas vaut  $F(t_0)=2$ .

Nous estimons les mesures de l'occurrence  $\Delta t_1$  de l'augmentation de la gravité de dégradation d'une unité qualitative de la fonction globale de résistance et  $\Delta t_2$  de la dégradation totale de la fonction « **Le réservoir résiste aux sollicitations** », comme suit : attribut ( $\Delta t_1$ )=attribut ( $\Delta t_2$ )=2

Nous obtenons ainsi deux mesures de criticité globale vis-à-vis de la stabilité :

- la criticité globale de la dégradation d'une unité qualitative = attribut ( $\Delta t_1$ ) × indice de gravité globale du réservoir à ( $t_0 + \Delta t_1$ ) =  $2 \times 3 = 6$
- la criticité globale de la dégradation du réservoir vis-à-vis de la défaillance totale = attribut ( $\Delta t_2$ ) × indice de gravité globale du réservoir à ( $t_0 + \Delta t_2$ ) = attribut ( $\Delta t_2$ ) × 3 =  $2 \times 3 = 6$

La criticité globale du réservoir (C=6) est déclarée : **Criticité importante**. Des travaux doivent s'entreprendre d'une manière urgente dans les quelques mois qui suivent.

### 5.7.6. Propositions d'actions correctives

Les actions correctives sont dictées par la criticité globale importante de la défaillance de la fonction de résistance. Le but est ici de réduire la criticité globale par des actions correctives adaptées.

Tableau 73 : Tableau des niveaux de criticité des composants du réservoir après les actions correctives

Fonctions 3	Action corrective	F(t <sub>0</sub> ) F(t <sub>0</sub> )	Dt1 Dt2	F(t1) F(t2)	Criticité C=F(t).Dt	Niveau de criticité
Mécanisme de vieillissement « <b>dégradation du revêtement d'étanchéité de couverture</b>						
<b>Résister aux sollicitations mécaniques</b>						
La criticité de dégradation d'une unité de la fonction	Injection d'une résine de collematage des fissures	1	2	2	4	Criticité moyenne
La criticité de la dégradation de la fonction		1	1	3	3	Criticité moyenne
<b>Collecter les flux hydrauliques</b>						
La criticité de dégradation d'une unité de la fonction	Juste un nettoyage des gargouilles	1	2	2	4	Criticité moyenne
La criticité de la dégradation de la fonction		1	1	3	3	Criticité moyenne
<b>Limiter les flux hydrauliques</b>						
La criticité de dégradation d'une unité de la fonction	Dépose du complexe d'étanchéité dégradé Pose d'un nouveau complexe d'étanchéité	1	2	2	4	Criticité moyenne
La criticité de la dégradation de la fonction		1	1	3	3	Criticité moyenne
Mécanisme de vieillissement « <b>faiblesse de la paroi sous l'effet hydrodynamique</b>						
<b>Résister aux sollicitations mécaniques</b>						
La criticité de dégradation d'une unité de la fonction	Chemisage de la paroi cylindrique	1	2	2	4	Criticité moyenne
La criticité de la dégradation de la fonction		1	1	3	3	Criticité moyenne
Mécanisme de vieillissement « <b>Corrosion des aciers de la paroi</b>						
<b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b>						
La criticité de dégradation d'une unité de la fonction	Chemisage de la paroi cylindrique	1	2	2	4	Criticité moyenne
La criticité de la dégradation de la fonction		1	1	3	3	Criticité moyenne
<b>Limiter les flux hydrauliques</b>						
La criticité de dégradation d'une unité de la fonction	Réfection de l'enduit intérieur étanche	1	2	2	4	Criticité moyenne
La criticité de la dégradation de la fonction		1	1	3	3	Criticité moyenne
Mécanisme de vieillissement « <b>Dégradation des revêtements d'étanchéité de la paroi</b>						
<b>Préparer la surface de contact</b>						
La criticité de dégradation d'une unité de la fonction	Réfection de l'enduit intérieur étanche	1	2	2	4	Criticité moyenne
La criticité de la dégradation de la fonction		1	1	3	3	Criticité moyenne
Mécanisme de vieillissement « <b>Dégradation de la paroi par réactions avec le milieu</b>						
<b>Préparer la surface de contact</b>						
La criticité de dégradation d'une unité de la fonction	Exécution de l'enduit extérieur sur le chemisage	1	2	2	4	Criticité moyenne
La criticité de la dégradation de la fonction		1	1	3	3	Criticité moyenne

Par ces actions de réduction, nous chercherons à réduire le niveau de gravité, ou de fréquence. Pour cela nous mettons en place un programme de réhabilitation. Chaque mode de défaillance a donné lieu à des actions correctives, et nous avons réévalué la criticité de manière à ce qu'elle ne dépasse pas le seuil de **C=4** de la même manière que la première fois, afin de la ramener à une **criticité moyenne**.

### 5.7.7. Synthèse de l'étude de cas

Il ressort de l'étude d'AMDEC que le revêtement étanche est un composant très fragile. La raison qui peut expliquer ces résultats et que les entretiens périodiques n'ont pas été respectés. Le complexe d'étanchéité aurait du être changé bien avant qu'il n'atteigne ce niveau de dégradation. Contrairement à des systèmes complexes, l'étanchéité de couverture est un produit qui s'use et qui doit se refaire périodiquement. La dégradation du complexe d'étanchéité a laissé à l'air libre la masse de la coupole qui à son tour s'est dégradé.

L'analyse de risques a permis aussi de constater que les risques associés à l'apparition des fissures dans la masse du béton de la coupole dépendent principalement de l'erreur d'exécution associée aux sollicitations externes. Et enfin, bien heureusement, cet élément n'affecte pas la stabilité du réservoir.

L'analyse de risques de vieillissement qualitative menée au niveau du réservoir en béton armé a mis en évidence que le mécanisme « faiblesse à l'effet hydrodynamique » est à l'origine du mode de défaillance le plus critique pour le réservoir étudié. L'élément objet de cette défaillance est la paroi. Les fissures engendrées par le séisme ont entraîné la défaillance de la fonction de résistance ce qui peut se traduire par une perte de stabilité du réservoir. Alors que, la paroi a atteint une criticité alarmante sous l'effet des autres mécanismes, mais sans pour autant atteindre la stabilité d'ensemble du réservoir.

Par ailleurs, pour le même élément, les risques associés à la défaillance des aciers par corrosion résultent de la diminution de la section des armatures sous l'effet de l'oxydation, dont la cinétique dépend en grande partie de l'agression de l'air marin. Le mécanisme de corrosion des aciers engendre une criticité alarmante. Ce phénomène, à long terme, peut avoir pour conséquences de réduire, voir même d'annuler totalement la résistance du réservoir et donc engendrer la ruine du réservoir.

Le mécanisme de vieillissement « Dégradation des revêtements d'étanchéité de la paroi » atteint effectivement une criticité alarmante mais ne peut affecter l'intégrité de l'ouvrage donc sa stabilité, la réfection de l'enduit le remet facilement en criticité moyenne.

Il en est de même pour le mécanisme de vieillissement « Dégradation de la paroi par réactions avec le milieu » qui atteint une criticité alarmante.

La complexité du problème montre l'intérêt d'une approche par les risques qui apporte des éléments d'aide à la décision. Les actions correctives entreprises ont pu ramener le réservoir de la criticité importante à la criticité moyenne.

D'autre part, on peut noter que l'étude d'AMDEC ne prend pas en considération la négligence humaine ou la mauvaise gestion du parc, car il est avéré que la plupart des défaillances sont issues d'une

mauvaise gestion de l'exploitant (par exemple, nettoyage des gargouilles pour éviter les stagnations des eaux pluviales). Ces défaillances sont visibles et détectables, elles peuvent de ce fait être facilement déjouées, pour peu que le gestionnaire développe une politique d'entretien efficace. Il est bon de rappeler que ces défaillances ont atteint ce niveau de criticité en 24 années de service, ce qui est révélateur d'une absence totale de politique de gestion.

Le seul mécanisme qui échappe à la politique du gestionnaire est l'hydrodynamique qui est une sollicitation accidentelle non prévisible qui cause des dommages irréversibles. Cette sollicitation a engendré de grandes fissures (voir chapitre 3) qui ont provoqué des fuites considérables dans la paroi.

## **5.8. Conclusion**

---

Dans ce chapitre, nous avons pu répertorier sept principaux mécanismes de vieillissement des réservoirs en béton (Scénario 1, 2, ...,7). Maintenant, nous disposons d'une collection complète de scénarios de vieillissement des réservoirs en béton, à laquelle nous pourrions nous référer. Il constitue une synthèse des pathologies des réservoirs en béton armé, qui peut être extraite pour un usage pratique et même pédagogique.

Nous retiendrons aussi, qu'à l'issue de l'Analyse Fonctionnelle, nous disposons d'une description précise de notre réservoir, de ses composants ainsi que des liens entre les composants entre eux et avec leur environnement, c'est ce que nous avons appelé les blocs diagrammes fonctionnels. Toutes ces informations de l'analyse fonctionnelle nous ont servi de base à l'application de l'AMDE qui à son tour nous a fourni une liste exhaustive des modes de défaillance des composants d'un réservoir et de leurs causes, effets et les symptômes associés. Ces résultats nous ont permis de modéliser les scénarios de vieillissement en utilisant une représentation au moyen de graphes causaux.

L'application de l'AMDEC complète et détaillée sur le réservoir posé au sol de notre cas d'étude, qui envisage la détermination des causes et effets des modes des défaillances ainsi que leur criticité, arrive à la même conclusion que les résultats de la méthode par expertise du chapitre 4.

En effet, à l'issue de l'application du chapitre 4, l'expertise de notre réservoir le classe de niveau de vulnérabilité Orange 2 avec l'approche par expertise, alors qu'avec l'AMDEC, ce même réservoir expertisé est classé à un niveau de criticité importante. Nous remarquons que notre réservoir est classé par les deux méthodes au même niveau de dégradation.

Après des travaux de réhabilitation, le réservoir passe au niveau de vulnérabilité orange 1 par l'approche par expertise, alors qu'avec la méthode de l'AMDEC, il est reclassé à un niveau de criticité moyenne. Nous remarquons encore une autre fois, qu'il est reclassé au même niveau de dégradation dans les deux méthodes en analyse globale du réservoir. A la différence près que dans la méthode de sureté de fonctionnement, en plus de l'analyse global du système réservoir, nous disposons de l'analyse détaillée des composants où nous avons tous les niveaux de criticité précis des différentes défaillances des composants à granularité intermédiaire. Cette analyse détaillée des composants, nous permet d'aboutir à des plans de maintenance priorisés par composant en fonction de ces niveaux de criticité.

A travers l'application pratique que nous avons réalisée, nous nous sommes rendu compte que les tableaux obtenus étaient très lourd et d'autre part, nous avons noté que l'étude d'AMDEC ne prend pas en considération la négligence humaine.

## **6. Chapitre 6 : Développement d'une application de gestion spatiale des ouvrages d'un parc**

---

## 6.1. Introduction

---

Jusque là, nous nous sommes intéressés dans les chapitres précédents (3, 4 et 5) à proposer des méthodologies d'expertise pour un réservoir donné, donc pour un seul individu d'un patrimoine, et ce en passant par la méthode physique, expertise et enfin de sûreté de fonctionnement. Nous avons pu mettre en évidence les avantages et inconvénients de chacune d'elles ainsi que la complexité de leur mise en œuvre pour un seul réservoir du parc. Or dans la réalité, un gestionnaire d'un patrimoine a en charge l'exploitation d'un parc entier composé de plusieurs centaines d'ouvrages à l'échelle d'une wilaya ou plusieurs milliers à l'échelle nationale. A ce niveau de gestion d'un parc, les tâches de diagnostic et d'expertise sont extrêmement délicates, tant le volume d'informations à gérer est important.

Sans compter qu'il devient de plus en plus nécessaire au gestionnaire d'avoir à sa disposition une information précise, validée, cohérente et synthétique sur le parc d'ouvrages qu'il a en charge. Mais cela ne suffit pas car cette information nécessite un minimum de traitement et d'analyse afin d'extraire les éléments essentiels d'aide à la décision. Ces ouvrages sont appelés à évoluer au cours du temps, l'historique de l'évolution de leur état est intéressante et les outils utilisés pour leur gestion n'arrivent plus à répondre aux attentes des décideurs. Il est nécessaire que les outils vus dans les chapitres précédents (méthodes de diagnostic) soient fédérés via un système d'aide à la décision qui centralise l'ensemble des données. Voilà un mot qui revient à chaque fois « **aide à la décision** » c'est justement de cela dont il s'agit dans cette section.

C'est pour cela que nous proposons dans ce chapitre, en appui à la méthode d'évaluation de la vulnérabilité (vu au chapitre 4), le développement d'un outil informatique pour faciliter l'exploitation de la base de connaissances sur l'état de vieillissement des réservoirs d'un parc à un instant « t » de leur cycle de vie. Cette base de connaissances sur l'état de vieillissement repose sur les trois analyses : environnementale, fonctionnelle et structurelle.

## 6.2. L'outil d'aide à la décision

---

La vulnérabilité aux aléas naturels est définie comme étant le niveau moyen de dégradation et donc de vieillissement pouvant survenir à grande échelle dans un réservoir de stockage. Son évaluation représente par conséquent un enjeu fort pour les gestionnaires et les ingénieurs experts chargés du contrôle de ces ouvrages.

Actuellement, l'évaluation de la vulnérabilité est principalement menée lors de contrôles détaillés périodiques conduits par des ingénieurs expérimentés, sans que toutefois la démarche mise en œuvre ne soit entièrement formalisée. Ceci pose des problèmes dans le cas de départ à la retraite, de congés ou de mutation des agents d'exploitation. Nous avons principalement relevé le problème de manque d'archives dont souffrent les gestionnaires de parcs d'ouvrages dans le premier chapitre. Il est donc important de valoriser ces connaissances en les capitalisant et en les transmettant à des ingénieurs débutants amenés à réaliser des expertises, ces connaissances arrivant en complément de leurs connaissances théoriques acquises lors de leur formation.

C'est dans cette logique que nous proposons de construire un outil informatique à même de permettre la capitalisation, l'archivage et la transmission de connaissances.

Ces connaissances portent essentiellement sur deux grands axes :

- La connaissance de l'évaluation de la vulnérabilité à un instant « t » de l'expertise, laquelle est

basée sur la connaissance du retour d'expérience.

- La connaissance du phénomène du vieillissement sur les ouvrages expertisés sur un cycle de vie.

Afin de donner toute leur valeur à ces connaissances, il est nécessaire de rajouter les outils d'analyse et d'édition qui permettront de visualiser les résultats. Les fonctionnalités d'analyse thématique, associées à un module cartographique puissant permettent l'édition des cartes thématiques. Il s'agit donc d'un SIG qui est un ensemble interactif de données géographiques, alphanumériques organisées et traitées par un logiciel de cartographie numérique implanté sur une plate forme informatique.

Dans le cas des réservoirs hydrauliques, il s'agit d'affecter des données attributaires alphanumériques à des données graphiques géo-référencées, représentant le parc de réservoir au moyen d'éléments ponctuels qui vont représenter les ouvrages. Plus précisément, il s'agit d'associer, grâce au logiciel des informations telles que l'âge de l'ouvrage, sa capacité, l'entreprise qui a fait les travaux, date de mise en service ...etc. Cet ensemble est complété d'un fond cartographique qui dans notre cas est une carte d'état major.

L'objectif de cette section est de proposer le développement d'une application constituée d'une base de données couplée avec des données cartographiques comme outil d'aide à la décision. Cette application **SIG Réservoirs** développée dans le cadre de cette thèse fournit les fonctionnalités suivantes :

- Enregistrer l'information recueillie sur le territoire. C'est pour cela, que la structuration logique des données en tables relationnelles est nécessaire.
- Questionner l'information en exécutant des requêtes.
- Produire des cartographies thématiques. Ceci permettra au gestionnaire d'avoir une réaction rapide pour la maintenance ou la réparation des ouvrages de stockage grâce à une analyse thématique faisant intervenir un ou plusieurs critères.
- Analyser l'historique de l'information du parc. Ceci permettra d'apporter une réponse aux évolutions de l'état des ouvrages grâce aux prévisions qu'il permet de réaliser avec les historiques d'information.
- Effectuer des simulations, afin d'augmenter la réactivité des décisions du gestionnaire face aux événements particuliers de crise.

### **6.3. Les composants de l'application**

---

Cette application d'analyse spatiale d'ouvrage a été pensée de telle manière à avoir un caractère évolutif. Du fait qu'elle est destinée à un large public d'utilisateur, nous avons opté pour des logiciels qui existent dans le commerce du logiciel et qui sont les plus populaires et les plus reconnus sur le marché. Il s'agit de Microsoft Access et Mapinfo Professional. Ces outils sont directement utilisables par les agents de terrain sans formations informatiques préalables en raison de leur ergonomie simplifiée.

#### **6.3.1. Le logiciel de la base de données « Microsoft Access »**

Access<sup>®</sup> est un système de gestion de base de données (SGBD) développé par la société Microsoft<sup>®</sup>. Il est fourni en même temps que le système d'exploitation Windows. Il fournit tous les outils nécessaires à la création d'une base de données efficace et fonctionnelle. L'application **SIG Réservoirs** utilise une

base de données Access pour saisir, stocker et restituer les données relatives aux réservoirs. Cette base de données peut-être interrogée par n'importe quel programme au moyen de requêtes SQL (System Query Language). Nous utilisons le logiciel Access<sup>®</sup> ainsi que le langage SQL pour récupérer, dans la base de données du **SIG Réservoirs**, les données nécessaires au calcul des indices de vulnérabilité conformément à la méthode par approche experte vue au chapitre 4.

### 6.3.2. Le logiciel du SIG « Mapinfo Professional<sup>®</sup>»

Le logiciel utilisé pour la construction de notre SIG est le **Mapinfo<sup>®</sup> Professional**. C'est un Système d'Information Géographique à l'origine Bureautique développé par la société Pitney Bowes Business Insight (PBBI). Il permet la création, la mise à jour, l'affichage, l'édition, l'interrogation et l'analyse de toutes les données cartographiques ou géographiques. Il présente à l'aide d'un système de couches des informations géo-localisées : points, polygones, images raster. Il incorpore un grand nombre de formats de données, de fonctions cartographiques et de gestion de données. Un système de requêtes cartographiques adapté permet la conception des cartes et bases de données cartographiques

C'est un logiciel convivial doté d'une interface graphique conviviale de type « pointer-cliquer », il fournit un ensemble d'outils pour visualiser, explorer, interroger, modifier et analyser des informations géographiques et présenter les résultats sur des documents cartographiques de qualité. Une application intégrant un ensemble de données prêtes à l'emploi. **Mapinfo<sup>®</sup>** permet de charger facilement des données localisées et tabulaires (littérales) et de les afficher sous forme de cartes, de tables ou de diagrammes.

Les menus déroulants, les boutons et les outils de l'interface utilisateur de MapInfo<sup>®</sup> permettent de travailler rapidement et efficacement.

## 6.4. Architecture informatique de l'application

---

L'application se compose d'une application principale sous le logiciel Microsoft Access<sup>®</sup> relié au logiciel SIG Mapinfo<sup>®</sup>, doté de l'ensemble des fonctionnalités cartographiques et alphanumériques, ainsi que d'un lien hypertexte qui nous permet de positionner les ouvrages sur le logiciel Google earth. La structuration multi-logiciels donne accès aux fonctions suivantes :

- La saisie, le stockage et la gestion de données sont gérés dans le logiciel Access<sup>®</sup>.
- Le traitement, l'analyse, la sélection et l'affichage de données sont gérés dans Access<sup>®</sup>.
- La production de cartes, rapports, tableaux et autres synthèses d'information sont gérés à la fois dans le logiciel Mapinfo<sup>®</sup> et le logiciel Access<sup>®</sup>.

Cette application est schématisée dans cet organigramme qui présente les différentes étapes de l'information en partant de la mission de terrain jusqu'à la prise de décision par le gestionnaire.

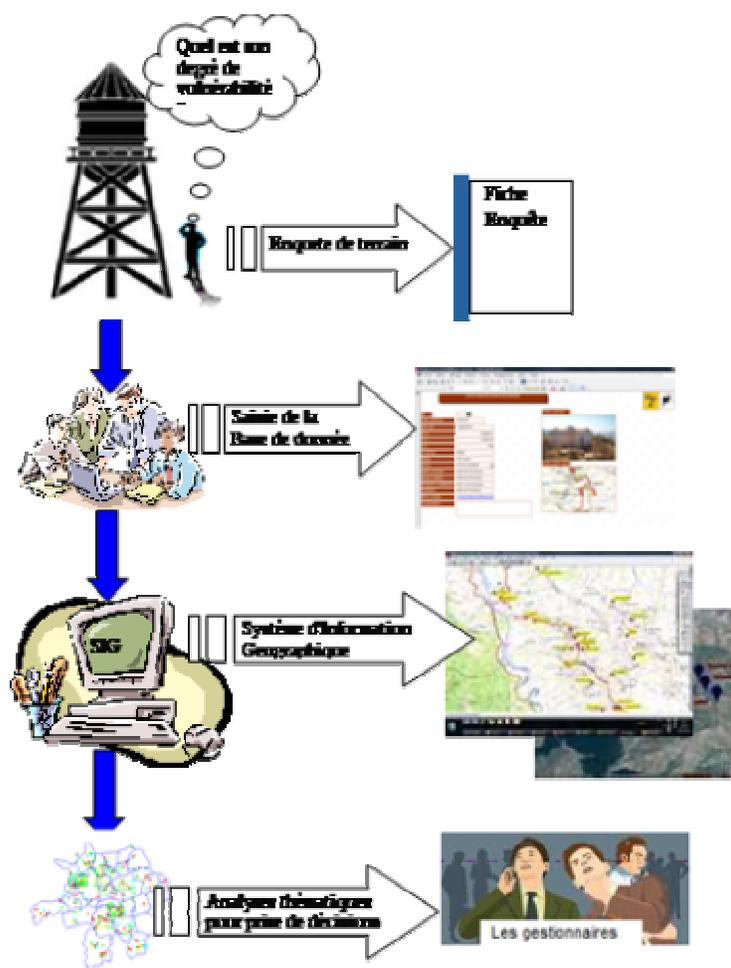


Figure 79 : Architecture de l'application SIG Réservoirs

## 6.5. Structure de la base de données sous Acces©

Les données gérées par l'application **SIG Réservoirs** proviennent soit de documents d'archive, soit de relevés sur le terrain, soit de documents en cours d'exploitation chez le gestionnaire. Elles peuvent aussi être fournies par des organismes extérieurs (collectivité locale, bureau d'études ou entreprise de réalisation ou organisme de contrôle CTC...).

Des fiches d'enquête de terrain, basées sur la méthode de diagnostic de réservoirs telles que présentées en chapitre 4, ont été élaborées en cherchant à optimiser leur ergonomie pour un usage opérationnel sur le terrain. Les écrans de saisie des formulaires de la base de données Access© ; dont il faut connaître les rudiments pour être en mesure de maîtriser la saisie des données ; ont ensuite été développés sur la base d'une structuration par thèmes. Ce qui nous a amené à une base de données composée de quatre tables qui sont résumées ci-après

### 6.5.1. La table « Fiche d'identification »

Nous regroupons dans cette table toutes les informations identifiant l'ouvrage dans son espace et qui ne rentrent pas dans les calculs de l'indice de vulnérabilité. Nous retrouvons à cet effet les champs qui suivent.

Tableau 74 : Définition des champs de la table « Fiche d'identification »

Nom du champ	Définition du champ
ID	Etiquette d'identification unique du réservoir (utilisée comme clé primaire)
Code_reservoir	Code d'identification unique du réservoir (à 7 chiffres)
Lieu_dit	Nom du lieu dit d'implantation du réservoir
X_m	Abscisse du réservoir [m]
Y_m	Ordonnée du réservoir [m]
Z_m	Altitude au sol du réservoir [m]
Commune	Commune d'implantation réservoir
Wilaya	Wilaya d'implantation du réservoir
Forme	Forme géométrique du réservoir
Maitre_ouvrage	Maitre d'ouvrage propriétaire et financier de l'ouvrage
Bureau_etudes	Maitre d'œuvre ayant conçu l'ouvrage
Entreprise_realisatrice	Société ayant exécuté les travaux de réalisation
Exploitant	Enterprise de gestion du réservoir
Photo_reservoir	Photo de la vue générale du réservoir
Photo_carte_topo	Extrait de carte d'état major du lieu d'implantation du réservoir
Photo_Google	Lien hypertexte qui donne le positionnement du réservoir sur Google earth
Date_realisation	Date de la mise en service du réservoir
Commentaire	Un espace où l'agent gestionnaire peut insérer un memo pour mémoire

Nous avons enrichi cette *table identification* par une fonctionnalité supplémentaire permettant, en « cliquant » directement sur le lien hypertexte du champ *photo\_google*, d'ouvrir le fichier lien **KMZ** qui nous permet de lancer le logiciel *Google earth* et de positionner la vue directement sur le réservoir expertisé.

ID	Code_reservoir	Lieu_dit	X_m	Y_m	Z_m	Commune	Wilaya	Forme	Maitre_ouvrage	Bureau_etudes	Entreprise_realisatrice
19	1554006	Tachanimt	602608,1	4058546	519	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
23	1554002	SR2 Irdjen	602845	4058055	554	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
24	1554003	SR3 Irdjen	604017	4056133	737	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
25	1554004	Tamazirth 1	603991	4056133	735	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
26	1554005	Tamazirth 2	604125	4056122	719	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
27	1554001	SR1 Irdjen	601212	4058968	200	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
28	1554007	Monobloc 1	599863	4059871	98	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
29	1554008	Monobloc 2	600097	4059718	103	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
30	1554009	Taksebt	600943	4059076	117	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
31	1554010	Ait Hague	603554	4056040	613	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
32	1554011	Ait Halli	602326	4057590	600	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
33	1554012	Ait Yacoub	603220	4056940	625	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
34	1554013	Mestija	602482	4058091	464	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
35	1554014	Mehriz	604342	4058510	224	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
36	1554015	Adeni Bas	602530	4058415	478	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
37	1554016	Boudjellil	603869	4057227	521	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
38	1554017	Ibahlal	604568	4057791	400	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
39	1554018	Tansaout	604450	4059055	409	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
40	1554019	Tala amara	603859	4059643	410	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée
41	1554020	Zone industrielle	601328	4060712	182	Irdjen	Tizi Ouzou	Forme circulaire	DHW de Tizi Ouzou	DHW de Tizi Ouzou	Non Communiquée

Figure 80 : Extrait de la table « Fiche d'identification »

### 6.5.2. La table « Fiche d'analyse environnementale »

Nous regroupons dans cette table toutes les informations identifiant l'environnement de l'ouvrage. Les paramètres inclus dans cette table rentrent dans le calcul de la note partielle de l'analyse environnementale « Ne » (Voir chapitre 4). Nous retrouvons à cet effet les champs qui suivent.

**Tableau 75** : Définition des champs de la table « Fiche d'analyse environnementale »

Nom du champ	Définition du champ
ID	Etiquette d'identification unique du réservoir (utilisée comme clé primaire)
Code_reservoir	Code d'identification unique du réservoir (à 7 chiffres)
Lieu_implantation	Lieu d'implantation du réservoir (Montagne, vallée, région côtière .....)
Situation_geographique	Situation géographique du site d'implantation (Nord, sud .....)
Zone_sismique	Zone sismique de la commune d'implantation du réservoir (Cf. RPA 2003)
Site_ouvrage	Décrit l'espace du site de l'ouvrage (urbain, rural, industriel ....)
Type_sol	Catégorie du sol (rocheux, meuble ..... ) (Cf. RPA 2003)
Effet_site	Décrit le risque du site vis-à-vis du réservoir (éboulement, glissement ....)
Zone_neige	Zone de neige de la commune d'implantation du réservoir (Cf. NV 1999)
Forme_toiture	Décrit la forme géométrique de la toiture de couverture (voute, pentes ....)
Zone_vent	Zone de vent de la commune d'implantation du réservoir (Cf. NV 1999)
Hauteur_reservoir	Type de réservoir (au sol, enterré, surélevé ...)
Categorie_terrain	Type de terrain aux alentours du réservoir (vallée, mer, bâtiments .....)
Facteur_topographique	Décrit la topographie du site par rapport aux effets du vent
Etat_surface	Décrit l'état de la surface du réservoir (lisse, rugueux, ....)

ID	Code_reservoir	Lieu_implantation	Situation_geographique	Zone_sismique	Site_ouvrage	Type_sol	Effet_site	Zone_neige	Forme_toiture	Zone_vent	Hauteur_reservoir
1	1554006	1	3	2	2	1	4	4	1	2	0,
2	1554001	1	3	2	1	1	4	4	1	2	0,
3	1554002	1	3	2	2	2	4	4	1	2	0,
4	1554003	1	3	2	2	2	4	4	1	2	0,
5	1554004	1	3	2	2	1	4	4	1	2	0,
6	1554005	1	3	2	2	1	3	4	1	2	0,
7	1554007	1	3	2	1	3	4	4	1	2	0,
8	1554008	1	3	2	2	3	4	4	1	2	0,
9	1554009	1	3	2	1	1	4	4	1	2	0,
10	1554010	1	3	2	2	2	4	4	1	2	0,
11	1554011	1	3	2	2	3	4	4	1	2	0,
12	1554012	1	3	2	2	1	4	4	1	2	0,
13	1554013	1	3	2	2	2	4	4	1	2	0,
14	1554014	1	3	2	2	2	4	4	1	2	0,
15	1554015	1	3	2	2	2	4	4	1	2	0,
16	1554016	1	3	2	2	1	3	4	1	2	0,
17	1554017	1	3	2	2	2	4	4	1	2	0,
18	1554018	1	3	2	2	1	4	4	1	2	0,
19	1554019	1	3	2	2	1	4	4	1	2	0,
20	1554020	1	3	2	2	3	4	4	1	2	0,

**Figure 81** : Extrait de la table « Fiche d'analyse environnementale »

### 6.5.3. La table « Fiche d'analyse structurale »

Nous regroupons dans cette table toutes les informations relatives à l'analyse structurale de l'ouvrage. Les paramètres inclus dans cette table rentrent dans le calcul de la note partielle de l'analyse structurale « Ns » (Voir chapitre 4). Nous retrouvons à cet effet les champs qui suivent.

**Tableau 76** : Définition des champs de la table « Fiche d'analyse structurelle »

Nom du champ	Définition du champ
ID	Etiquette d'identification unique du réservoir (utilisée comme clé primaire)
Code_reservoir	Code d'identification unique du réservoir (à 7 chiffres)
Type_structure	Décrit le type de réservoir expertisé (enterré, au sol, surélevé ...)
Type_materiaux	Décrit la nature des matériaux du réservoir (béton, acier ...)
Type_fondations	Décrit le type de l'infrastructure du réservoir (radier, semelles, pieux ....)
Etat_tassements	Donne l'état des tassements du réservoir
Mode_etancheite_paro	Décrit le type de la classe d'étanchéité de la paroi (A, B, C ou D)
Etat_etancheite_paro	Décrit l'état de l'étanchéité de la paroi (satisfaisante, moyenne ...)
Type_etancheite_couverture	Décrit le mode d'étanchéité de la couverture (enduit, membranes .....)
Etat_etancheite_couverture	Décrit l'état de l'étanchéité de la couverture (satisfaisante, moyenne ...)
Indice_gravite_defaults	Indice de gravité du niveau de dégradation du réservoir
Date_visite	Date de la journée de visite du réservoir
Age_reservoir	Age du réservoir en années, compté à partir de la date de mise en service

The screenshot shows a table with 11 columns: ID, Code\_reservoir, Type\_structure, Type\_materiaux, Type\_fondations, Etat\_tassements, Mode\_etancheite, Etat\_etancheite, Type\_etancheite, and Etat\_etancheite. The data rows are numbered 1 through 24, with corresponding values for each column. For example, row 1 has ID 1554006, Code\_reservoir 1, Type\_structure 3, Type\_materiaux 3, Type\_fondations 2, Etat\_tassements 1, Mode\_etancheite 2, Etat\_etancheite 1, Type\_etancheite 2, and Etat\_etancheite 1.

**Figure 82** : Extrait de la table « Fiche d'analyse structurelle »

#### 6.5.4. La table « Fiche d'analyse fonctionnelle »

Nous regroupons dans cette table toutes les informations relatives à l'analyse fonctionnelle de l'ouvrage. Les paramètres inclus dans cette table rentrent dans le calcul de la note partielle de l'analyse fonctionnelle « Nf » (Voir chapitre 4). Nous retrouvons à cet effet les champs qui suivent.

**Tableau 77** : Définition des champs de la table « Fiche d'analyse fonctionnelle »

Nom du champ	Définition du champ
ID	Etiquette d'identification unique du réservoir (utilisée comme clé primaire)
Code_reservoir	Code d'identification unique du réservoir (à 7 chiffres)
Role_reservoir	Décrit le rôle qu'occupe le réservoir dans le système d'AEP
Etat_accessibilite	Décrit l'état de la route ou sentier
Importance_reservoir	Donne la nature des bâtiments alimentés par le réservoir
Capacite_reservoir	Donne le volume de stockage
Frequence_entretien	Mode d'entretien de l'exploitant (mensuel, trimestriel ...)
Coupe_autocad	Coupe en travers du réservoir, montrant les différents composants
Photo_acces	Photo de la route d'accès au réservoir
Photo_chambre	Photo de l'intérieur de la chambre des manœuvres montrant les vannes

ID	Code_reservoir	Role_reservoir	Etat_accessibilite	Importance_reservoir	Capacite_reservoir	Frequence_entretien	Photo_acces	Coupe
1	1554006	2	1	1	1	4		
2	1554002	4	1	1	1	4		
3	1554003	3	1	1	2	4		
4	1554004	2	3	1	1	4		
5	1554005	1	4	3	1	4		
6	1554001	4	1	1	2	4		
7	1554007	2	2	1	1	4		
8	1554008	4	2	1	1	4		
9	1554009	1	1	1	1	4		
10	1554010	2	3	1	1	4		
11	1554011	2	1	1	1	4		
12	1554012	2	3	1	1	4		
13	1554013	2	3	1	1	4		
14	1554014	2	3	1	1	4		
15	1554015	2	3	1	1	4		
16	1554016	2	3	1	1	4		
17	1554017	1	3	1	1	4		
18	1554018	3	2	1	1	1		
19	1554019	2	1	1	1	4		
20	1554020	2	2	1	4	4		

Figure 83 : Extrait de la table « Fiche d'analyse fonctionnelle »

### 6.5.5. Les relations entre les tables

C'est grâce aux **relations entre tables** qu'Access® permet d'associer les données contenues dans les quatre différentes tables. Access® est capable de différencier, à l'intérieur d'une table, chaque enregistrement par rapport à un autre. C'est pour cela, qu'il a été nécessaire de définir un identifiant unique composé d'un champ. Sans cela aucune relation n'est possible entre les tables. Il s'agit du champ **clé primaire**. Le champ clé primaire utilisé dans notre application est le champ « **code du réservoir** ».

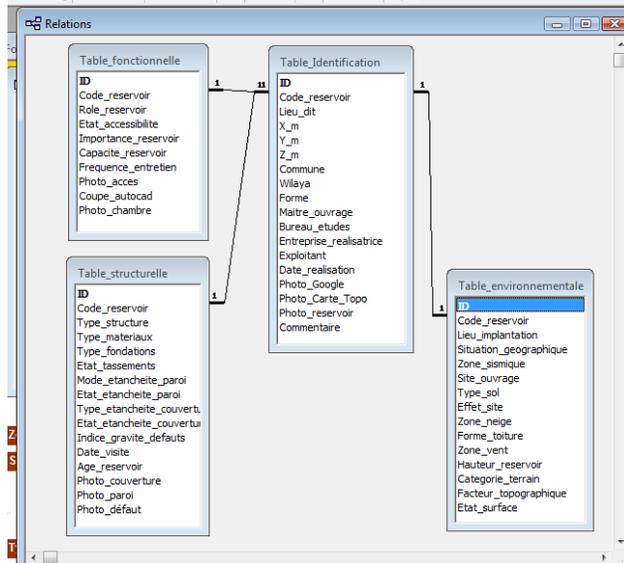


Figure 84 : Structure des relations entre les quatre tables

### 6.5.6. La requête « calcul de l'indice de vulnérabilité Iv »

Le calcul de l'indice de vulnérabilité tel que présenté au chapitre 4 se fait à l'aide d'une requête que nous nommons « **indice de vulnérabilité** ». Cette requête permet de faire des opérations faisant appel aux diverses données contenues dans les quatre tables, comme montré dans la figure 85.

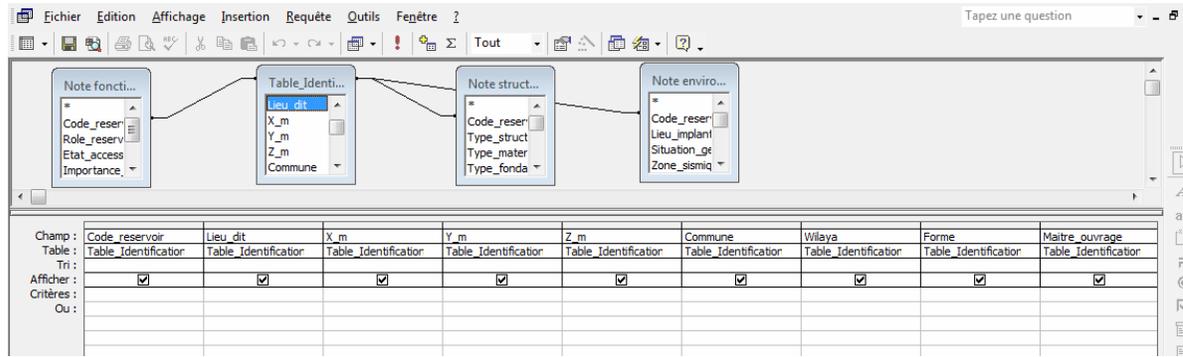


Figure 85 : Vues de l'interface requête « calcul Iv » en mode programmation

Le résultat de cette requête est envoyé vers le fichier Excel « Indice de vulnérabilité » pour qu'il soit lu directement par le logiciel Mapinfo. Ce fichier Excel est structuré comme montré dans le tableau 78.

Tableau 78 : Structure du fichier Excel « Indice de vulnérabilité »

Code du réservoir	Lieu dit	X m	Y_m	Z_m	Commune	Date réalisation	Date De visite	Ne	Nf	Ns	IV
1554020	Zone industrielle	601 328,00	4 060 712,00	182,00	Irdjen	1972	2010	28,00	12,00	39,00	79,00
1554011	Ait Halli	602 326,00	4 057 590,00	600,00	Irdjen	1976	2010	30,00	7,00	29,00	66,00
1554017	Ibahlal	604 568,00	4 057 791,00	400,00	Irdjen	1993	2010	25,50	8,00	27,00	60,50
1554013	Mestiga	602 482,00	4 058 091,00	464,00	Irdjen	1974	2010	25,00	11,00	24,00	60,00
1554015	Adeni Bas	602 580,00	4 058 415,00	478,00	Irdjen	1976	2010	24,50	11,00	24,00	59,50
1554014	Mehriz	604 342,00	4 058 510,00	224,00	Irdjen	2002	2010	26,00	11,00	21,00	58,00
1554008	Monobloc 2	600 097,00	4 059 718,00	103,00	Irdjen	2001	2010	26,50	13,00	18,00	57,50
1554010	Ait Hague	603 554,00	4 056 040,00	613,00	Irdjen	1976	2010	24,50	11,00	20,00	55,50
1554012	Ait Yacoub	603 220,00	4 056 940,00	625,00	Irdjen	1976	2010	20,50	11,00	24,00	55,50
1554004	Tamazirith 1	603 991,00	4 056 133,00	735,00	Irdjen	1976	2010	20,50	11,00	22,00	53,50
1554003	SR3 Irdjen	604 017,00	4 056 133,00	737,00	Irdjen	1994	2010	25,00	9,00	19,00	53,00
1554016	Boudjellil	603 869,00	4 057 227,00	521,00	Irdjen	1993	2010	20,50	11,00	21,00	52,50
1554002	SR2 Irdjen	602 845,00	4 058 055,00	554,00	Irdjen	1994	2010	24,00	10,00	17,00	51,00
1554007	Monobloc 1	599 863,00	4 059 871,00	98,00	Irdjen	2001	2010	24,50	9,00	16,00	49,50
1554019	Tala amara	603 859,00	4 059 643,00	410,00	Irdjen	1983	2010	20,50	7,00	21,00	48,50
1554005	Tamazirith 2	604 125,00	4 056 122,00	719,00	Irdjen	2003	2010	20,00	11,00	16,00	47,00
1554006	Taghanimt	602 608,06	4 058 546,00	519,00	Irdjen	1972	2010	20,00	7,00	19,00	46,00
1554001	SR1 Irdjen	601 212,00	4 058 968,00	200,00	Irdjen	1994	2010	18,00	10,00	17,00	45,00
1554018	Tansaout	604 450,00	4 059 055,00	409,00	Irdjen	1992	2010	20,50	8,00	14,00	42,50
1554009	Taksebt	600 943,00	4 059 076,00	117,00	Irdjen	2000	2010	18,00	6,00	17,00	41,00

### 6.5.7. Les formulaires

L'application est composée de cinq formulaires. Un formulaire pour le menu principal et quatre autres pour les quatre tables. Ils permettent d'afficher, de saisir et de modifier rapidement les informations d'une base de données en les présentant sous une forme simple, attrayante, conviviale et facile à utiliser, comme nous le présentons ci-après en figure 86.

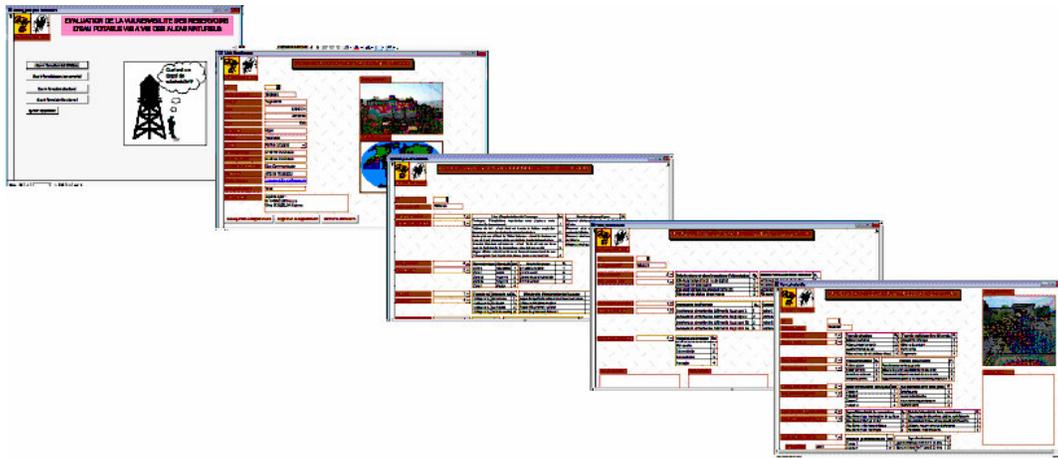


Figure 86 : Vues des formulaires de l'application développée

## 6.6. Le système de projection utilisé

Les systèmes de projections posent un grand problème aux professionnels. Pour les besoins de notre SIG, nous utiliserons le système UTM (Universal Transverse Mercator) créé pour éviter les problèmes de conversion entre degrés et mètre, avec lequel les cartes d'état major de l'INCT (Institut National de Cartographie et de Télédétection) sont établies. Ce système se base sur une décomposition du globe terrestre en 60 fuseaux de 6° chacun, numérotés de 01 à 60 et 20 bandes de 8° chacune, identifiées par des lettres S T R. L'Algérie se trouve dans les fuseaux 29, 30N, 31 et 32, dans les bandes Q, R et S comme le montre la figure ci-après. L'application **SIG Réservoirs** a été conçue pour être utilisée sur un fond de cartes d'état major à l'échelle 1/25 000° avec une précision de positionnement de l'ouvrage sur carte allant de 10 à 20 m. Les réservoirs seront implantés en points (objets ponctuels) géo-référencés à l'aide d'un couple de coordonnées (X, Y), mesurés par GPS ou par levé topographique, en utilisant une projection UTM (Universal Transverse Mercator) (WGS84).

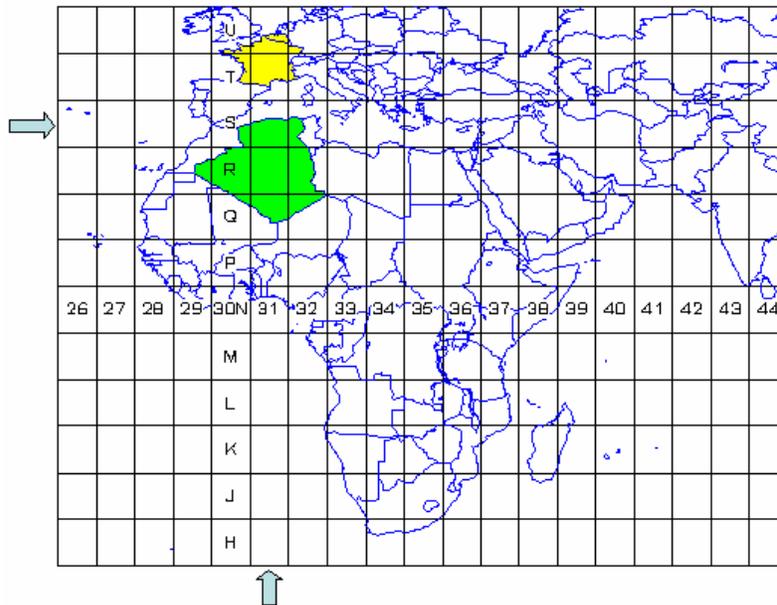


Figure 87 : Aperçu de la décomposition en projection UTM

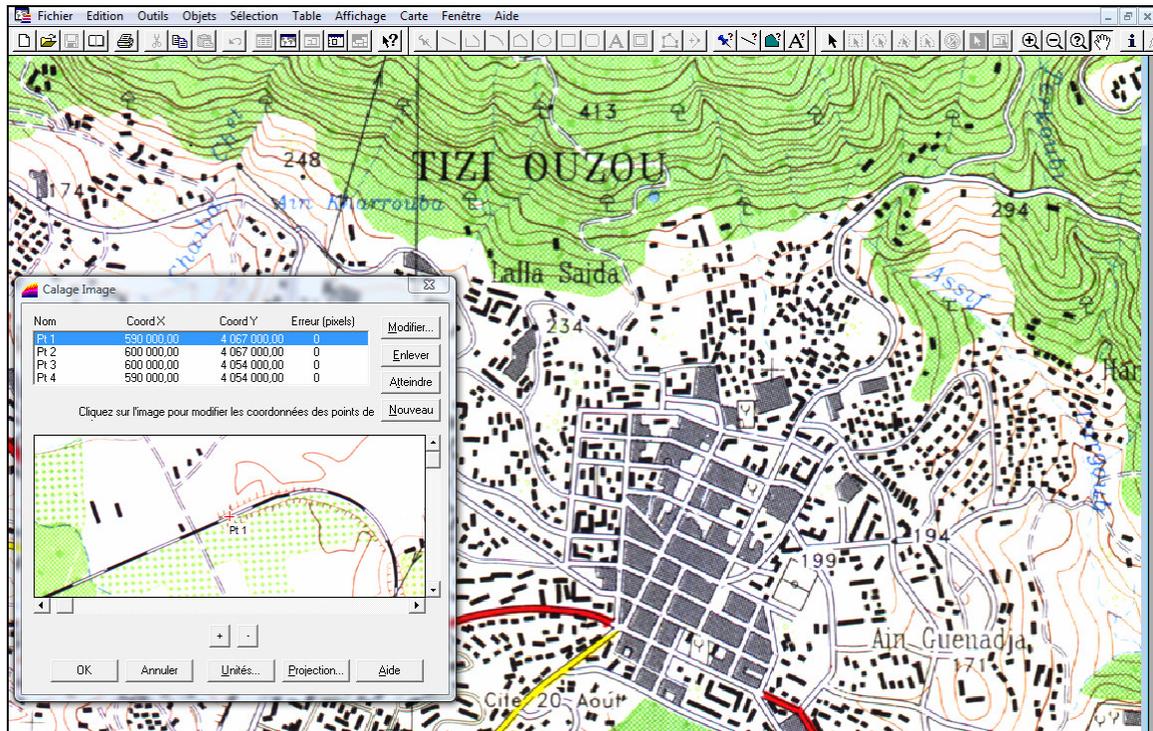


Figure 88 : Calage de la carte d'état major « Tizi Ouzou NJ-31-V-31 Ouest » à l'échelle 1/25000°

## 6.7. Validation de l'application sur un parc de réservoirs

### 6.7.1. Objectif de l'étude de terrain

Une enquête de terrain a été entreprise, afin de tester, d'une part, la capacité de l'application **SIG Réservoirs** à rendre compte d'une situation réelle, d'autre part, son aptitude à évaluer l'état des réservoirs par l'évaluation de la vulnérabilité des réservoirs aux aléas naturels, in fine fournir une aide à la décision aux gestionnaires du parc. Pour ce faire, nous avons, à partir des données collectées sur le terrain, évalué les 13 critères d'analyse de la vulnérabilité des réservoirs d'un parc à l'échelle réelle, conformément à la méthode par approche experte exposée au chapitre 4.

### 6.7.2. Présentation du parc de réservoirs

Le parc de réservoirs qui fait l'objet de notre étude se trouve dans la wilaya de Tizi Ouzou (nord de l'Algérie). Ces réservoirs sont gérés par l'Algérienne Des Eaux (ADE), et sont implantés dans la commune d'Irdjen. Cette région est classée zone de moyenne sismicité (zone IIa) selon le Règlement Parasismique Algérien (RPA99/2003). Selon le Règlement Neige et Vent, la région est classée zone neige A et zone de vent I. Tous les réservoirs expertisés sont en béton armé et sont de forme circulaire. Les informations principales recueillies sont illustrées dans le tableau 79.

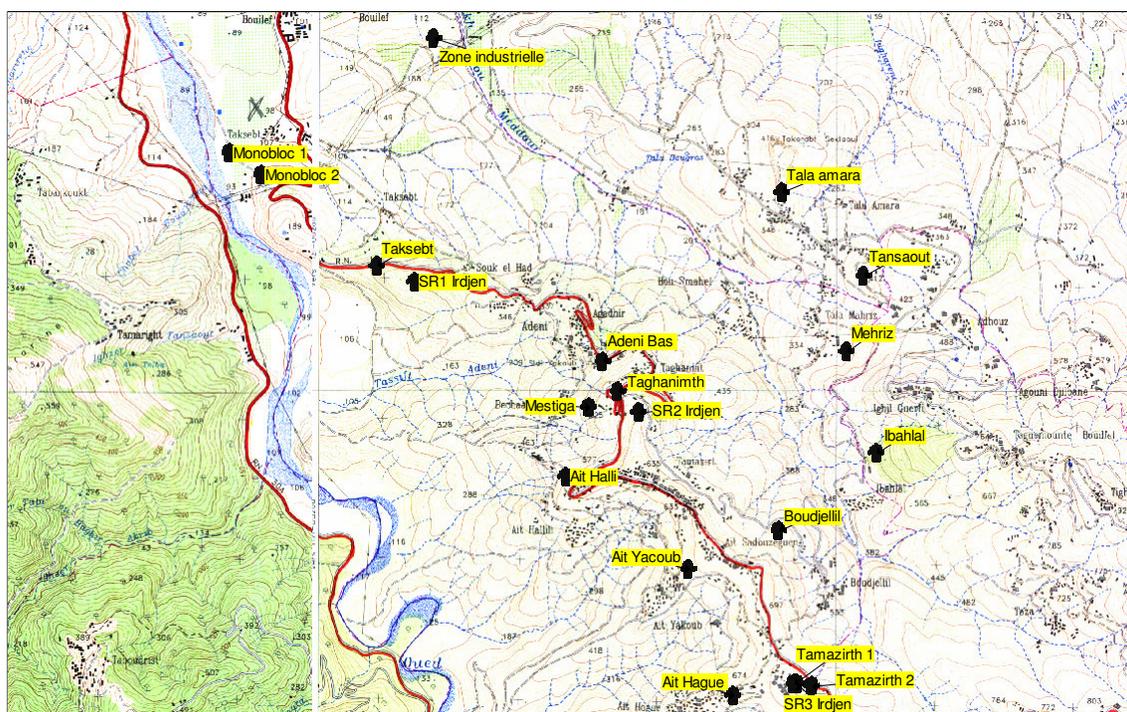


Figure 89 : Répartition spatiale du parc des réservoirs expertisés dans la zone d'étude

Tableau 79 : Présentation des réservoirs du parc d'Irdjen.

N°	Code	Lieu dit	X (m)	Y (m)	Z (m)	Capacité	Type de réservoir
1	1554003	SR3 Irdjen	604 017,00	4 056 133,00	737,00	1000	posé au sol
2	1554004	Tamazirth 1	603 991,00	4 056 133,00	735,00	500	semi enterré
3	1554005	Tamazirth 2	604 125,00	4 056 122,00	719,00	200	Au sol
4	1554006	Taghanimth	602 689,00	4 058 202,00	560,00	100	Au sol
5	1554011	Ait Halli	602 326,00	4 057 590,00	600,00	100	Au sol
6	1554015	Adeni Bas	602 580,00	4 058 415,00	478,00	200	Semi enterré
7	1554012	Ait Yacoub	603 220,00	4 056 940,00	625,00	150	semi enterré
8	1554010	Ait Hague	603 554,00	4 056 040,00	613,00	100	Semi enterré
9	1554013	Mestiga	602 482,00	4 058 091,00	464,00	50	Semi enterré
10	1554016	Boudjellil	603 869,00	4 057 227,00	521,00	500	Au sol
11	1554017	Ibahlal	604 568,00	4 057 791,00	400,00	500	Au sol
12	1554014	Mehriz	604 342,00	4 058 510,00	224,00	100	Au sol
13	1554001	SR1 Irdjen	601 212,00	4 058 968,00	200,00	1000	Au sol
14	1554002	SR2 Irdjen	602 845,00	4 058 055,00	554,00	1000	Au sol
15	1554009	Taksebt	600 943,00	4 059 076,00	117,00	500	Au sol
16	1554007	Monobloc 1	599 863,00	4 059 871,00	98,00	500	Au sol
17	1554008	Monobloc 2	600 097,00	4 059 718,00	103,00	500	Au sol
18	1554018	Tansaout	604 450,00	4 059 055,00	409,00	500	Au sol
19	1554019	Tala amara	603 859,00	4 059 643,00	410,00	200	Au sol
20	1554020	Zone industrielle	601 328,00	4 060 712,00	182,00	2X1500	Au sol

### 6.7.3. La collecte des données sur le terrain

Pour expertiser ces ouvrages, une mission de terrain d'une durée de 5 mois a été nécessaire, elle s'est étalée d'avril 2010 à Aout 2010. Tout au long de notre enquête de terrain, des fiches de terrain ont été renseignées pour chaque réservoir. La fiche d'enquête comprend quatre volets principaux : la fiche descriptive de l'ouvrage, la fiche d'évaluation environnementale, la fiche d'évaluation structurelle et la fiche d'évaluation fonctionnelle.

Le but de l'expertise est de définir l'état réel de ces ouvrages : de localiser et observer des zones critiques, de recueillir des données sur des dommages, à savoir la nature et l'intensité des désordres (fissures, corrosion, épaufrure...) et la localisation des désordres. Le matériel utilisé pour ces relevés a été le suivant :

- un GPS de poche type MAGELAN pour relever les coordonnées géographiques précises des ouvrages,
- les fiches de saisies pour noter les différents phénomènes observés sur les ouvrages,
- un appareil photo numérique. L'intérêt ici était de garder une trace visuelle du terrain, notamment en cas d'oubli lors du remplissage des fiches de saisie.

### 6.7.4. La saisie des données de terrain

La première étape de la saisie des données dans le **SIG Réservoirs** a consisté en l'alimentation de la base de données présentée plus haut construite sous l'environnement Access. Chaque fiche d'analyse a été saisie dans sa table correspondante et toutes les tables sont reliées via le code du réservoir unique (sans doublant). Au final chaque enregistrement qui correspond à un réservoir donné identifié par son code qui est la clé primaire, lui est associé une infinité de champs qui sont des informations soit fonctionnelle, soit structurelles, soit environnementale soit d'identification.

A mesure que les données sont saisies, l'application procède instantanément à l'actualisation du calcul de l'indice de vulnérabilité de chaque réservoir. Une fois que tous les réservoirs sont saisis, l'indice de vulnérabilité de tous les réservoirs du parc vis-à-vis des aléas naturels sont connus.

### 6.7.5. Analyse thématique

L'analyse thématique est une étape principale lors de la construction d'un SIG. Elle reste très recommandée et conseillée car elle donne un sens à une représentation graphique du parc, ce qui est une meilleure manière de la représentation de l'information. Dans le cas de notre étude, et afin d'apprécier l'évolution de la vulnérabilité dans le temps des réservoirs du parc, notre analyse est effectuée en considérant trois périodes de leur cycle de vie. La première période est celle du premier jour de la mise en service du réservoir (figure 92), la seconde période est celle du jour de l'inspection de l'ouvrage en 2010 (figure 93) et enfin la troisième période est celle du jour après la réhabilitation de l'ouvrage (figure 94).

Le fichier Excel « Indice de vulnérabilité » contenant les données géo-référencées est ouvert à partir de Mapinfo pour semer tous les ouvrages sur le fond de carte d'état major comme des objets ponctuels. Nous identifions les colonnes contenant les coordonnées (X et Y) de la base attributaire, puis nous choisissons le système de projection (Universal Transverse Mercator WGS84, zone 31, Northern hemisphere).

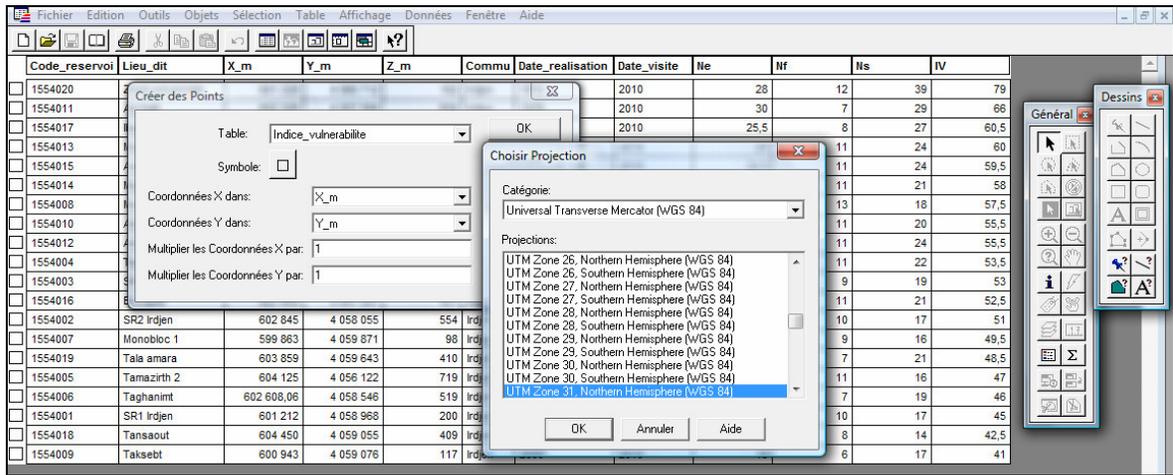


Figure 90 : Ouverture du fichier de données dans le SIG

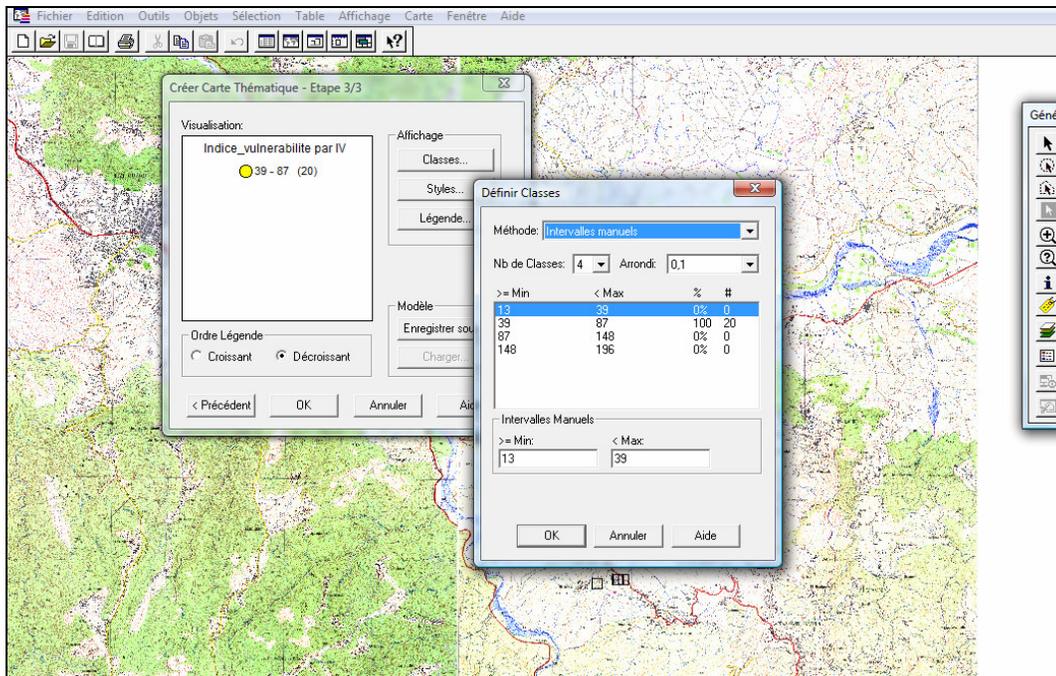


Figure 91 : Interface de l'analyse thématique dans le SIG

Maintenant que le semi est réalisé, nous nous intéresserons à l'analyse thématique du parc de réservoirs. La variable d'analyse des réservoirs du parc est le champ qui véhicule l'indice de vulnérabilité « Iv ». Dans cette analyse, nous définissons quatre classes telles que prévues au chapitre 4. Le niveau vert ( $13 \leq I_v \leq 49$ ), le niveau orange 1 ( $49 \leq I_v \leq 87$ ), le niveau orange 2 ( $87 \leq I_v \leq 136$ ) et le niveau rouge ( $136 \leq I_v \leq 196$ ).

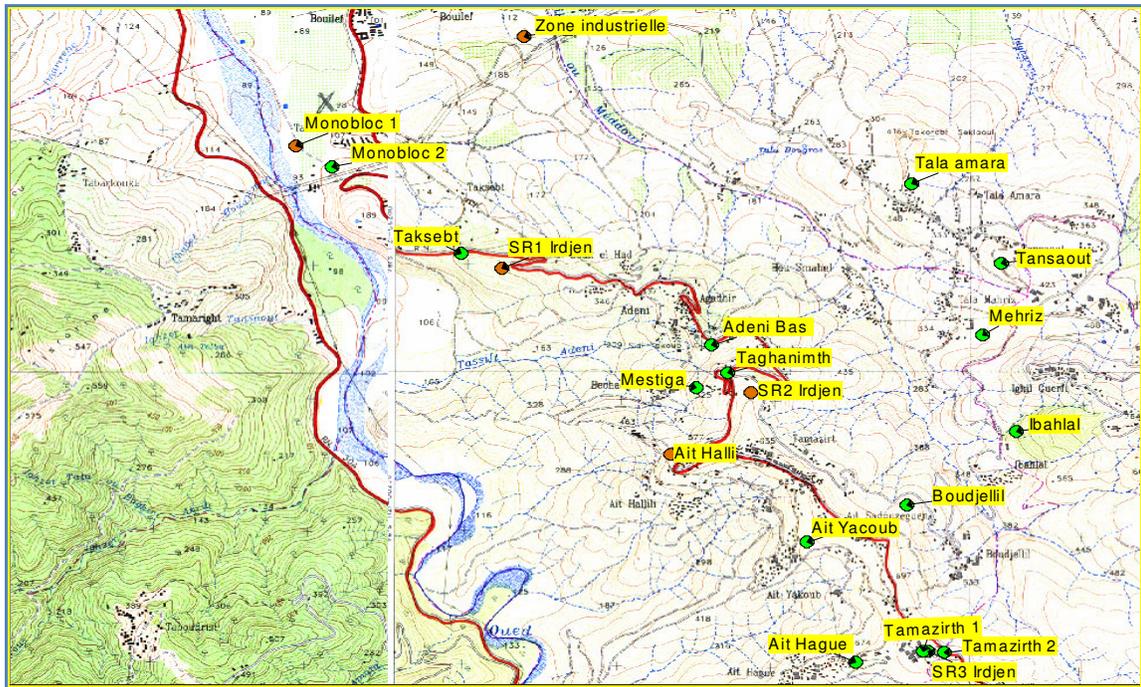


Figure 92 : Analyse thématique pour l'indice de vulnérabilité à la mise en service.

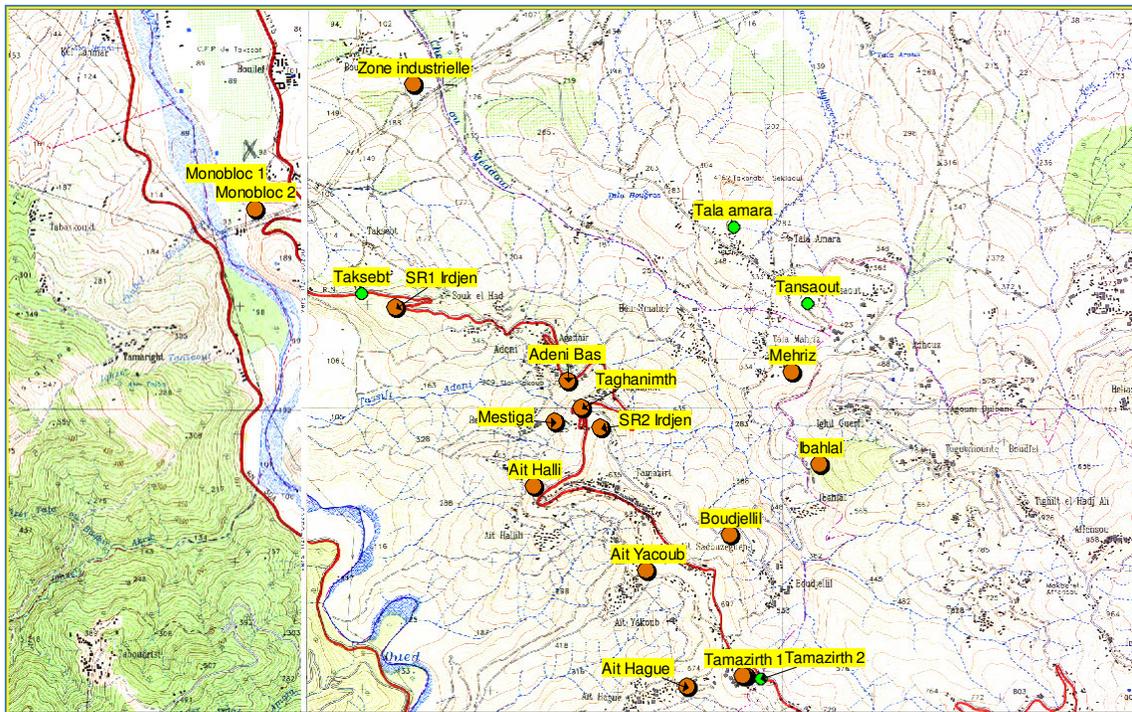


Figure 93 : Analyse thématique pour l'indice de vulnérabilité au jour de l'inspection 2010.

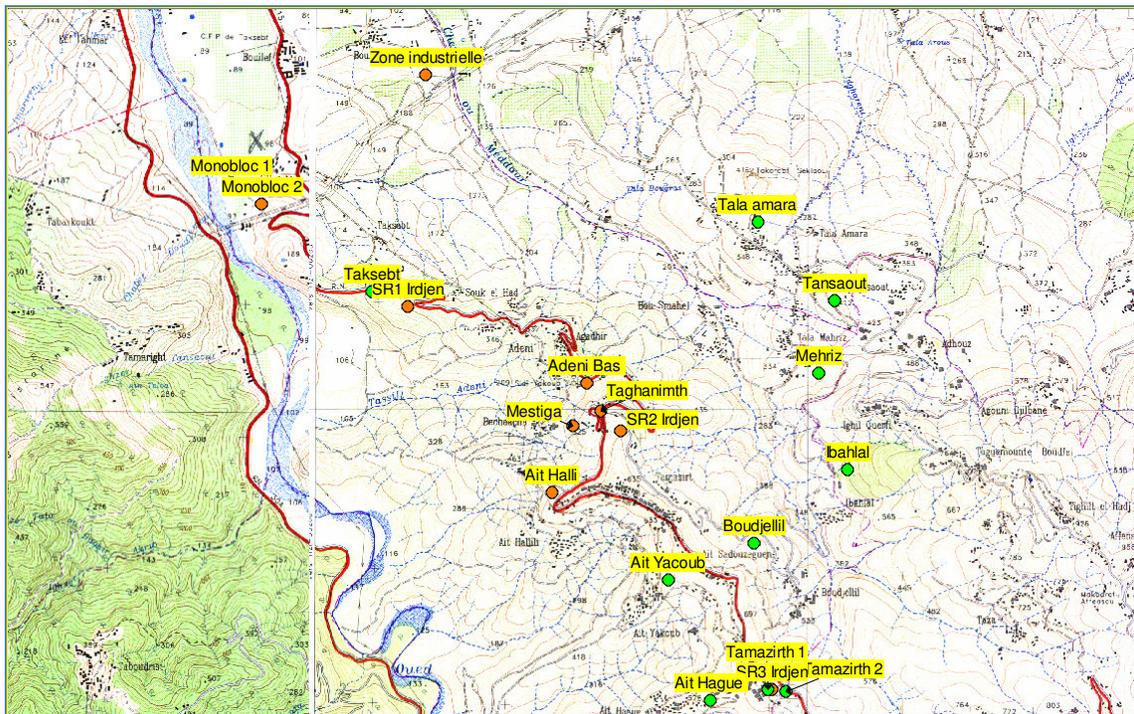


Figure 94 : Analyse thématique pour l'indice de vulnérabilité après réhabilitation.

### 6.7.6. Résultats et interprétation

Les résultats de l'analyse, faite à la mise en service, montrent que 75% des réservoirs sont de classe verte (figure 92). Ils présentent ainsi un bon comportement aux aléas naturels. Par ailleurs, 25% des ouvrages sont classés en orange 1. Ceci s'explique bien sûr par l'influence de certains paramètres environnementaux (lieu d'implantation, type du sol), et fonctionnels (le rôle du réservoir, l'accessibilité). Au jour de l'inspection (en 2010), nous avons constaté que 20% seulement des réservoirs expertisés sont de classe verte (figure 93). En revanche, 80% des réservoirs restants sont de classe orange 1. Ainsi, l'indice de vulnérabilité augmente en fonction de l'âge et du niveau de gravité des ouvrages ; selon les défauts qui sont souvent dus aux aléas naturels et accélérés par le manque d'entretien. Ces ouvrages présentant un comportement moyen nécessitent des travaux de renforcement et de réhabilitation. Après réhabilitation, nous avons noté une diminution de l'indice de vulnérabilité, mais qui ne peut atteindre sa valeur initiale. 37% des réservoirs ayant un comportement moyen (classe orange 1), retrouvent un bon comportement, après les opérations de réhabilitations proposées (figure 93).

## 6.8. Conclusion

La généralisation et l'abaissement des prix des postes de travail (PC) et la disponibilité des logiciels rendent les solutions SIG accessibles. Puis, avec l'arrivée à maturation des SIG appliqués au métier de l'eau, les exploitants disposent désormais d'outils adaptés construits à partir de plates formes SIG. A titre d'exemple, Alger, Oran, Constantine, Jijel, Annaba, El Taref disposent de leur SIG pour gérer les réseaux de distribution des grandes agglomérations. L'application **SIG Réservoirs** ainsi développée dans cette section a été réfléchiée après avoir pris connaissance des outils existants cités plus haut pour pouvoir s'intégrer directement.

Cette application **SIG Réservoirs**, grâce aux nombreuses interfaces qu'elle implémente constitue une

première solution SIG pour la gestion spatiale et l'exploitation d'un parc d'ouvrages hydrauliques. Elle a été expérimentée avec succès à l'échelle réelle sur le parc de la commune d'Irdjen dans la région de Tizi Ouzou, géré par l'ADE. Nous comptons l'expérimenter sur un parc plus vaste avec notre partenaire dans ce projet qui est African Geosystem Company. Ce prototype est maintenant fonctionnel. Toutefois, dans le cadre d'un développement futur pour une utilisation effective de cette fonctionnalité par les gestionnaires, l'application **SIG réservoirs** a été conçue dans un esprit évolutif pour que demain l'on puisse intégrer d'autres applications et implémenter la méthode de sureté de fonctionnement et la méthode par approche physique.

Au cours de cette étude, nous nous sommes servis de plusieurs outils informatiques pour développer cette application qui répond aux besoins des utilisateurs de projets hydrauliques. En particulier, nous avons exploité le modèle Geodatabase de Mapinfo, Logiciels Access et Mapinfo et Excel.

Par ailleurs, le SIG accompagnant la méthode pourrait à la fois être utilisé au stade de conception et de prédiction pour la politique de gestion du réservoir durant son exploitation et la fréquence de surveillance de l'ouvrage. Autrement dit, il nous renseigne sur l'attention à accorder au réservoir et reste aussi une puissante aide pour les gestionnaires afin de visualiser les réservoirs prioritaires à la réhabilitation.

Enfin, une application **SIG Réservoirs** comme celle que nous avons développée reste transportable à d'autres entités d'ouvrages, tels que les retenues collinaires ce qui laisse présager un meilleur avenir pour ce concept de gestion spatiale des ouvrages d'un parc.

## **Conclusion générale**

---

Nous avons vu dans ce travail de recherche, qu'évaluer la sécurité d'un réservoir de stockage d'eau potable en service, expertiser les origines d'une dégradation, prévoir les évolutions futures, décider des mesures appropriées pour sa réhabilitation, sont les missions de diagnostic et d'analyse de risques accomplies par les ingénieurs spécialisés du génie civil au service d'un gestionnaire de patrimoine. Notre recherche a donc consisté à produire des méthodes pour aider les ingénieurs experts à évaluer la vulnérabilité et la criticité des réservoirs. Nous avons aussi construit un outil d'aide à la gestion des réservoirs nommé **SIG Réservoir** dans lequel la méthode par approche experte a été implémentée. Cette application permet de géo-référencer et de visualiser le niveau de vulnérabilité des différents réservoirs d'un parc.

### **D'abord les méthodes développées ...**

Le premier résultat de cette étude est que la recherche doit se poursuivre dans le domaine de la résistance sismique des réservoirs d'eau potable, plus largement, pour les ouvrages hydrauliques du parc Algérien. Nous ne pouvons pas nous satisfaire de l'affirmation selon laquelle un réservoir compte tenu de sa rigidité élevée résiste mieux au séisme que toute autre structure bâtie (pont ou bâtiment). C'est dans cette optique que le troisième chapitre traitant de l'approche par modèle physique ayant fait l'objet d'une publication au niveau de la revue des Annales du BTP (N° 2-3, avril - juin 2010) a été transmis en guise de contribution au Centre du Génie Parasismique (CGS d'Alger) où une équipe travaille sur cette problématique, pour l'élaboration d'un Règlement Parasismique des Ouvrages Hydrauliques (RPOH). Néanmoins, pour rappeler la conclusion du troisième chapitre, cette approche par modèle physique reste réservée au diagnostic et à l'analyse de risques approfondis ou à l'étude d'un mécanisme particulier. Elle ne peut pas être appliquée à l'échelle d'un parc entier et pour l'ensemble des mécanismes de vieillissement.

Quant à la seconde méthodologie à base d'indice par approche experte, présentée dans cette étude, elle permet une évaluation simplifiée et rapide de la vulnérabilité des réservoirs en béton armé. L'établissement des indices de vulnérabilités du réservoir ne constitue qu'une aide à la décision du type de maintenance à adopter pour l'ouvrage. En effet, elle permet d'établir une hiérarchie des réservoirs à risques, à partir de critères de sûreté prédéfinis notamment. La décision du choix de maintenance, qui revient au gestionnaire d'ouvrages, consiste en fait à estimer la vulnérabilité limite, celle qui conduira à choisir une maintenance préventive (réparations à court terme afin d'éviter toute dégradation supplémentaire à venir) ou bien décider un report d'intervention si le réservoir concerné ne présente pas de risque fort en terme de sûreté ou de coût, voire une absence de réparations. Dans ces derniers cas, le premier geste de maintenance sera de ré-analyser la surveillance spécifique de ces réservoirs dont le suivi devra, le moment venu, déclencher un nouvel examen de la situation du réservoir.

Conformément aux principes retenus pour l'évolution de l'indice de vulnérabilité dans le cycle de vie du réservoir pour l'établissement des schémas de maintenance, deux bornes de vulnérabilité méritent d'être définies ( $I_{v_1}$  et  $I_{v_2}$ ), segmentant l'ensemble de l'échelle en trois catégories de maintenance :

- Les réservoirs dont la vulnérabilité est inférieure à  $Iv_1=49$  (niveau vert) : aucune opération de maintenance n'est prévue; seule une surveillance adaptée et périodique (inspections visuelles, auscultation) est envisagée.
- Les réservoirs dont la vulnérabilité est supérieure à  $Iv_2=136$  (niveau rouge) : l'état du réservoir est jugé suffisamment dégradé pour justifier une réparation à court terme.
- Les réservoirs dont la vulnérabilité est comprise entre  $Iv_1$  et  $Iv_2$  : des compléments d'études et une analyse des risques potentiels d'aggravation des défauts doivent être engagés pour décider de la nature et de l'urgence des travaux à réaliser.

C'est là le second résultat de ce travail de recherche qui mérite d'être souligné. Enfin, pour rappeler la conclusion du quatrième chapitre, la méthode à base d'indice présente ainsi un excellent outil décisionnel au stade préliminaire. Toutefois, le diagnostic et l'analyse de risques qui en résultent restent sommaires, l'inconvénient majeur de ce type d'approche réside dans l'analyse globale et sommaire de l'ouvrage et ne permet pas d'analyser le réservoir à partir d'une granularité inférieure, à l'échelle du composant du réservoir.

Enfin la troisième et dernière approche est la méthode de sûreté de fonctionnement. Dans cette approche, nous avons dressé les principaux mécanismes de vieillissement des réservoirs en béton pouvant apparaître dès la mise en service de l'ouvrage. Puis, nous avons établi une analyse fonctionnelle (interne et externe) qui a abouti à une description précise du réservoir de stockage avec ses composants à l'échelle d'une granularité intermédiaire. Des Blocs diagrammes Fonctionnels ont été dressés à partir desquels nous avons tiré les fonctions de conception des composants du système et avons déduit les liens entre composants et environnement extérieur. Puis l'application de l'**AMDE**, nous a fourni une liste exhaustive des modes de défaillance des composants d'un réservoir et de leurs causes, effets et les symptômes associés. Ces résultats nous ont permis de modéliser les scénarios de vieillissement en utilisant une représentation au moyen de graphes causaux. Enfin, sur la base d'analyses qualitatives, nous avons proposé une méthode pour évaluer la **criticité (AMDEC)** de la dégradation à l'échelle des composants puis du réservoir dans sa globalité.

Donc le troisième résultat de cette recherche est que maintenant, nous disposons d'une collection complète de scénarios de vieillissement des réservoirs en béton, à laquelle nous pourrions nous référer à tout moment et qui vient enrichir le recueil d'expertise existant. Cette synthèse des pathologies des réservoirs en béton armé, peut être extraite pour un usage pratique et/ou pédagogique.

### **Puis l'outil d'aide à la décision ...**

Maintenant à l'échelle d'un parc qui peut compter jusqu'à des milliers de réservoirs, une application informatique est indispensable pour stocker et analyser toute la base de connaissance. Cette application **SIG Réservoirs**, grâce aux nombreuses interfaces qu'elle implémente constitue une première solution SIG pour la gestion spatiale et l'exploitation d'un parc de réservoirs de stockage. Elle a été expérimentée avec succès à l'échelle réelle sur le parc de la commune d'Irdjen dans la région de Tizi Ouzou, géré par l'ADE. Le dernier résultat de cette recherche est que ce prototype est maintenant fonctionnel. Toutefois, dans le cadre d'un développement futur pour une utilisation effective de cette fonctionnalité par les gestionnaires, l'application **SIG réservoirs** a été conçue dans un esprit évolutif pour que demain, nous

puissions intégrer d'autres applications, implémenter la méthode de sureté de fonctionnement et la méthode par approche physique. Il est intéressant de signaler que cette application reste transportable à d'autres entités d'ouvrages de génie civil (bâtiments, ponts ....).

### **Enfin, quelques perspectives....**

Afin de valoriser les méthodes développées dans cette recherche, il nous semble important de poursuivre des travaux relevant du développement de l'outil informatique, en les implémentant dans l'application **SIG Réservoirs**. Ainsi, plusieurs réflexions de recherche doivent être engagées à court terme par le lancement d'autres axes de recherches. Nous citerons ci-après ces principales idées.

Il serait intéressant de créer une requête que nous pourrions appeler « **historique** » qui nous permettrait ; pour un individu (réservoir) du parc dont nous disposons de données de vieillissement sur un certain nombre d'années durant son cycle de vie ; l'alimentation de la base de connaissances de l'application développée. Cette requête pourrait générer automatiquement un graphique qui retracerait l'évolution de son indice de vulnérabilité. Nous obtiendrions alors une courbe de tendance de la fonction de vieillissement de cet individu. Le seul investissement resterait la collecte de l'information sur le terrain sur une longue période d'observation. Plus la période serait longue, plus les données de la base de connaissance seraient abondantes et plus la fonction de vieillissement serait affinée.

Nous avons vu (chapitre 4), qu'un réservoir d'un parc peut avoir plusieurs indices de vulnérabilité «  $I_v$  » durant son cycle de vie. Si cet individu est expertisé chaque année, au bout de trente ans d'âge par exemple, nous pourrions avoir une trentaine d'années de données dans la base de connaissances. Il serait intéressant de modéliser la loi de comportement de la vulnérabilité (donc de vieillissement) de cet individu dans le temps. Or le problème qui risque de surgir est que pratiquement nous ne pouvons attendre une aussi longue période (trente ans) pour avoir la loi de comportement de vieillissement de ce réservoir à l'échelle d'une vie professionnelle. Techniquement, cette solution est à écartée. La solution palliative, qui nous semble intéressante à prospecter est la suivante. Considérant que l'analyse par expertise est faite sur treize paramètres d'analyse, nous pourrions prendre à l'échelle d'un parc une trentaine d'individus pour que cela soit représentatif, qui partageraient plus de la moitié des paramètres en commun (même notes partielles) mais qui seraient d'âges différents, pour simuler les âges différents sur un cycle de vie. Puis, en nous appuyant sur une méthode d'analyse numérique, nous considérerions que la fonction de vieillissement est connue en certains points, c'est-à-dire à des âges différents. L'objectif étant de construire une fonction approchée  $I_v(t)$ , et pour résoudre ce problème, il convient de procéder par approximation par les éléments finis.

La méthode de sureté de fonctionnement devrait être implémentée dans l'application **SIG Réservoirs** afin de permettre l'intégration de l'évaluation de la criticité. Il serait intéressant de poursuivre et achever l'évaluation de la criticité des réservoirs en béton pour l'ensemble des scénarios de vieillissement. Sauf qu'à ce niveau, il serait souhaitable d'aller vers la création de plusieurs tables. Nous proposons une table pour chaque composant du réservoir de granularité intermédiaire (coupole, ceinture supérieure ....). Dans chaque table nous pensons créer des champs qui seraient classés en groupes. Chaque groupe de

champs serait consacré à un scénario de vieillissement, ce qui nous ramène à sept groupes de champs. Suite à cela, une autre requête que nous appellerions « évaluation de la criticité » doit être créée pour l'évaluation de la criticité partielle pour chaque composant et pour chaque type de scénarios. Puis la criticité globale serait évaluée automatiquement à partir des criticités partielles de chaque composant.

Les tables environnementales et fonctionnelles seront les mêmes mais au niveau de l'analyse détaillée par la méthode de sureté de fonctionnement, nous devrions la restructurer.

L'application doit être restructurée pour qu'elle soit à des niveaux d'analyse différents. Nous pouvons aller jusqu'à trois niveaux d'analyse, qui peuvent se résumer comme suit :

- *Premier niveau : Analyse préliminaire*

Cette analyse doit se faire au niveau de la granularité supérieure (à l'échelle global de l'ouvrage) par la méthode d'expertise. A ce stade, l'objectif étant de donner un aperçu général du parc pour pouvoir déjà trier à un premier niveau les réservoirs les plus vulnérables qui feraient l'objet d'une attention particulière au second niveau de l'analyse détaillée. C'est finalement, l'application **SIG Réservoirs** telle que développée dans cette étude.

- *Second niveau : Analyse détaillée*

A ce stade, sur les réservoirs vulnérables déjà triés au premier niveau, nous faisons une analyse à granularité intermédiaire, c'est-à-dire à l'échelle du composant, en introduisant la méthode de sureté de fonctionnement, telle qu'elle est suggérée au paragraphe plus haut. Au terme de ce niveau d'analyse, nous pourrions avoir la criticité partielle de chaque composant et pour chaque type de scénarios. A ce stade, l'objectif étant de donner le scénario de vieillissement critique à l'ouvrage et le composant exact qui induit la criticité globale de l'ouvrage. Ce composant pourrait faire l'objet d'une attention particulière au troisième niveau de l'analyse approfondie.

- *Troisième niveau : Analyse approfondie*

A ce stade, nous faisons une analyse à granularité inférieure (à l'échelle des matériaux) en introduisant la méthode d'approche physique (modèle d'états limites et modèles d'analyse du comportement). Les modèles d'états-limites s'attachent à représenter soit les pertes de fonctionnalité d'un ouvrage (ELS), soit les modes de ruine ou les pertes d'équilibre statique (ELU). Ainsi, ils permettent d'apprécier la sécurité de l'ouvrage en déterminant les critères de stabilité liés aux états limites, dans les conditions réelles d'exploitation en se basant sur les lois de comportement des matériaux. C'est au terme de phase que nous aurions à nous prononcer sur la conduite à tenir.

## Références bibliographiques

---

AFGC / CEFACOR. Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion, document scientifique et technique, novembre 2003.

AFGC. Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction état de l'art et guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité, document scientifique et technique, juillet 2004.

S. Ahnouche, A. Bounif. Méthodologie de diagnostic et d'expertise des réservoirs d'eau potable par la détermination de l'indice de vulnérabilité, mémoire d'ingénieur d'état en génie civil, option « ouvrages d'art », Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Oct. 2009.

M. Bezzazi, A. Khamlichi, J.R.A. Gonzalez. Vulnérabilité sismique des constructions de type béton armé aux Nord du Maroc, revue canadienne de génie civil, volume 35, juin 2008.

F.I. Belheouane. Détermination de l'indice de vulnérabilité pour les bâtiments en béton armé, thèse de Magister en génie civil, Université de Blida, juin 2006.

L.P. Brice, Réservoirs et cuves en béton armé, Annales de l'ITBTP, théories et méthodes de calcul, N° 146, Paris, février 1960.

F. Buyle-Bodin, O. Blanpain. Analyse du cycle de vie des ouvrages en béton, annales du BTP N° 6, décembre 2002.

J. Boéro, B. Capra, F. Schoefs, O. Bernard, M. Lasne. Analyse de risques pour la maintenance des structures portuaires : exemple de quais gabions soumis à de la corrosion, IXèmes Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil, Brest, 12-14 septembre 2006.

D. Bouhadoun, F. Belkacem. Evaluation d'un parc de patrimoine de réservoirs par la détermination de l'indice de vulnérabilité dans un Système d'Information Géographique, mémoire de Master 2 recherche en génie civil, option « structure et matériaux », Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2010.

M. Bouhlali. Les risques associés aux barrages, thèse de magister, université de Tlemcen, 2006.

CEN. Conception et dimensionnement des structures pour la résistance aux séismes, Eurocode 8, Partie 4 : Silos, réservoirs et canalisation, Bruxelles, 1998.

J.I. Changa, C. C. Linb, A study of storage tank accidents, Journal of loss prevention in the process industries, Ed. Elsevier, volume 19, 2006, pp 51-59.

CNOMO. Comité de normalisation des moyens de production, Moyens de production méthode AMDEC, juillet 1994.

J.P. Craff. Le dossier technique N° 3 - la méthodologie AMDEC, CRTA, Avignon, France, Novembre 2004.

C. Cremona. Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants. Association Française de Génie Civil, 2002, 451 p.

C. Cremona. Surveillance de santé des ouvrages, annales du BTP, N°4, aout, 2006.

C. Curt, D. Boissier, Pathologie des barrages : développement d'une base de connaissances et application aux ouvrages en remblai, 25<sup>e</sup> rencontres de l'AUGC, du 23 au 25 mai 2007, Bordeaux.

V. Davidovici, A. Haddadi. Calcul pratique de réservoirs en zone sismique, Annales de l'ITBTP N° 409, novembre 1982.

G. Degoutte, P. Royet, Barrages du Goéland et de la Vigie : avis sur leur sécurité, Cemagref, janv. 2007.

DTR B-C 2-48. Règles parasismiques algériennes (addenda 2003), CGS, Alger, juin 2003.

DTR C 2-4.7. Règlement neige et vent 1999, Ministère de l'habitat, Alger, juillet 1999.

DTU. Règles parasismiques 1969 révisées 1982 et annexes, Eyrolles, Paris, 1984.

DTU P18-702. Règles BAEL 91 révisées 99 : Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites CSTB février 2000.

DTU. Règles de construction parasismiques PS 92, applicables aux bâtiments, Eyrolles, Paris, 1998.

B. Ducrot, B. Fargeot, G. Mathieu, L'étanchéité des ouvrages en béton de stockage et de transport de l'eau, partie 1, Annales du BTP, Editions ESKA, N° 02, avril, mai 1999.

B. Ducrot, B. Fargeot, G. Mathieu, L'étanchéité des ouvrages en béton de stockage et de transport de l'eau, partie 2, Annales du BTP, Editions ESKA, N° 04, sept. – oct. 1999.

Fascicule 74, texte officiel, Construction des réservoirs en béton - cahier des clauses techniques générales, Ministère de l'équipement des transports et du logement, Paris, mars 1998.

Geosystem Consult - SEATA, Diagnostic des ouvrages hydrauliques des wilayates Annaba, El Tarf, Fiches signalétiques des réservoirs d'eau potable, 2010.

A. Guerrin, R.C. Lavour. Traité de béton armé tome 6, réservoirs, châteaux d'eau et piscines, Dunod, 1983.

B. Godart, A. Le Roux. Alkali-réaction dans les structures en béton, Mécanisme, pathologie et prévention, techniques de l'ingénieur.

M. Hangan, M. Soare, Calcul rapide des réservoirs cylindriques, Annales de l'ITBTP, théories et méthodes de calcul, N° 135-136, Paris, mars - avril 1959.

Hammoum H., Bouzelha K., Hannachi N.E., Serre D. Vulnerability assessment of the concrete tanks storage at natural hazards, Concrete solutions, Ed. Taylor and Francis Group CRC Press, London, United Kingdom, 2012, ([www.crcpress.com](http://www.crcpress.com)).

Hammoum H., Bouzelha K., Bouhadoun D., Belkacem F. Evaluation de la vulnérabilité aux aléas naturels d'un parc de réservoirs en béton dans un système d'information géographique, Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering 2011, Ed. Curran Associates, Inc., Montreal, Quebec, Canada, décembre 2011, Volume 1, page 271, ([www.proceedings.com](http://www.proceedings.com)).

Hammoum H., Bouzelha K., Hannachi N.E., Zoreik A., Touat M., Les SIG outils d'analyse de la vulnérabilité des réservoirs de stockage d'eau aux aléas naturels, Journées scientifiques sur la gestion du risque sismique, Université Mouloud Mammeri, 20 et 21 novembre 2011, Tizi Ouzou.

Hammoum H., Bouzelha K., Hannachi N.E., Serre D. Vulnerability assessment of the concrete tanks storage at natural hazards, 4th International Conference on Concrete Repair, 26<sup>th</sup>-28<sup>th</sup> september 2011, Dresden, Germany.

Hammoum H., Bouzelha K., Hannachi N.E. Analyse de la pathologie d'un réservoir par une approche physique, 10<sup>e</sup> congrès de mécanique, du 19 au 22 avril 2011, Oujda, Maroc.

Hammoum H., Bouzelha K., Hannachi N.E. Analyse d'un scénario de vieillissement d'un réservoir par une approche physique, 29<sup>e</sup> rencontres de l'AUGC, du 29 au 31 mai 2011, Tlemcen, Algérie.

Hammoum H., Bouzelha K., Bouhadoun D., Belkacem F. Evaluation de la vulnérabilité aux aléas naturels d'un parc de réservoirs en béton dans un système d'information géographique, Congrès général 2011 de la Société canadienne de génie civil, 14 au 17 juin 2011, Ottawa, Ontario, Canada.

Hammoum H., Bouzelha K., Abdesselem M. Expertise d'un réservoir de capacité 2000 m<sup>3</sup> à Jijel par la détermination de l'indice de vulnérabilité, International Symposium of Aircraft Materials, ACMA 2010, du 12 au 14 mai 2010, Marrakech, Maroc.

H. Hammoum, R. Bouzida, Pratique des Systèmes d'Information Géographiques SIG, éditions « les pages bleues internationales », ISBN 978-9947-850-67-1, Alger, 2010.

Hammoum H., Bouzelha K., Hannachi N.E. Analyse hydrodynamique d'un réservoir circulaire en béton arme, posé au sol, Annales du BTP, Edition ESKA, N° 2-3, Paris, avril - juin 2010.

G. W. Housner. Dynamic analysis of fluids in containers subjected to acceleration, in Nuclear Reactors and Earthquakes, Report No. TID 7024, U. S. Atomic Energy Commission, Washington DC, 1963.

O.R. Jaiswal et al. Review of seismic codes on liquid- containing tanks, Earthquake spectra, volume 23, N° 1, February 2007.

A. Lelarge, A. De Guibert, L. Tavano, dirigés par M. Zwingelstein, Sureté de fonctionnement Etude de l'AMDEC d'une clé USB, mémoire ESTACA, France, 2008.

G. Leca. Comment réhabiliter un château d'eau, Pollutec, Lyon, décembre 2004.

L. Lepetit. Etude d'une méthode de diagnostic de digues avec prise en compte du risque de liquéfaction, thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont II, 2003.

R. Livaoglu, A. Dogangun, Simplified seismic analysis procedures for elevated tanks considering fluid–structure–soil interaction, Journal of Fluids and Structures, pp 421–439, 2006.

B. Mahfoudi. Système expert pour le diagnostic des structures bâtiment, Thèse de Magister en génie civil, Ecole National Polytechnique d'Alger, décembre 2006.

M. Mamillan. Restauration des bâtiments en béton armé, techniques de l'ingénieur.

G. Mathieu et al. « Recommandations professionnelles pour le calcul, la réalisation et l'étanchéité de réservoirs, cuves, bassins, châteaux d'eau enterrés, semi-enterrés, aériens, ouverts ou fermés », Annales ITBTP N° 486, 1990.

G. Mathieu, Méthodologie d'évaluation des ouvrages hydrauliques en béton appliquée un patrimoine. Annales du BTP, N° 5-6, novembre, décembre 2003.

G. Mathieu et al, pathologie et réparation des ouvrages en béton de stockage et de transport des liquide, annales BTP, juillet 1996 (Numéro spécial).

Ministère de l'équipement et de l'aménagement du territoire. Nouvelle politique de l'eau, grands axes et principes de base, assises régionales de l'eau, Tizi Ouzou, novembre, 1994.

Ministère de l'équipement et de l'aménagement du territoire. Historique relatif aux aspects juridiques et institutionnel, assises régionales de l'eau, Tizi Ouzou, novembre, 1994.

Ministère de l'équipement et de l'aménagement du territoire. Contribution à la préparation des assises régionales de l'eau, assises régionales de l'eau, Tizi Ouzou, novembre, 1994.

F. Monchy, Maintenance – méthodes et organisation, 2nd édition, Dunod.

Y. Mortureux. La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques, techniques de l'ingénieur.

Norme Algérienne NA 17004. Evaluation de la résistance à la compression sur site des structures et les éléments préfabriqués en béton, IANOR, 2008.

J. Perchat. Béton armé : Règles BAEL, Pathologie et réparation des ouvrages, techniques de l'ingénieur.

L. Peyras, D. Boissier. Du retour d'expérience en génie civil, 13° rencontre universitaires de génie civil, 2005.

L. Peyras. Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages - développement de méthodes d'aide à l'expertise, thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont II, 2003.

B. Reverchon, Une expérience d'analyse de risque simplifiée, appliquée à l'optimisation de la maintenance du canal d'amenée de l'aménagement d'Oraison, EDF H<sup>te</sup> Provence, Rapport interne, 2008,

M. Ridoux. AMDEC-Moyen, techniques de l'ingénieur.

C. Saint Martin. Toitures terrasses : pathologie de l'étanchéité, techniques de l'ingénieur.

C. Sanchez. Spécification et implémentation du système d'aide à la décision multicritère pour la maintenance préventive et la gestion du patrimoine de la société d'autoroute ESCOTA : le projet SINERGIE, thèse de doctorat de l'école des mines de Paris, 2007.

D. Serre. Évaluation de la performance des digues de protection contre les inondations - Modélisation de critères de décision dans un système d'information géographique, thèse de doctorat, Université de marne la vallée, 2005.

D. Serre, C. Curt, L. Peyras, D. Boissier, Y. Diab. Evaluation de la performance des ouvrages hydrauliques de génie civil, 13° rencontre universitaires de génie civil, 2005.

D. Serre, L. Peyras, R. Tourment, Y. Diab. Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations, revue française de géotechnique, N° 115, 2° trimestre 2006.

D. Serre, P. Maurel, L. Peyras, R. Tourment, Y. Diab. Modèles de rupture de digues couplés à un SIG, revue internationale de géomatique, volume 16, N° 3-4, 2006.

D. Serre, L. Peyras, R. C. Curt, D. Boissier, Y. Diab. Evaluation des ouvrages hydrauliques de génie civil, revue canadienne de géotechnique, volume 44, 2007.

D. Serre, L. Peyras, R. Tourment, Y. Diab. Levee performance assessment: development of a GIS tool to support planning maintenance actions, Journal of Infrastructure System, ASCE, Vol. 14, Issue 3, pp. 201-213, 2008.

A. Talon, D. Boissier, L. Peyras, Analyse des risques : Identification et estimation, démarches d'analyses des risques, méthodes qualitatives d'analyse de risque, université numérique ingénierie et technologie, mars 2009.

A. Toumi, B. Chocat. L'assainissement en Algérie : Problématique, la houille blanche, N° 6, 2004.

M. Zacek. Guide d'évaluation de la présomption de vulnérabilité aux séismes des bâtiments existants, collection conception parasismique, mai, 2004.

G. Zwingelstein. La maintenance basée sur la fiabilité. Guide pratique d'application de la RCM. Paris: Hermès Editions, 1996, 666 p.

## Annexe 1 : AMDE Process

N°	Composant	Opération du processus	Mode de défaillance	Effets possibles de la défaillance du processus
1	2	3	4	5
1	Coupole de couverture	<b>Conception</b>		
		Hypothèses concernant les surcharges d'exploitation	Charges et surcharges non conformes au DTR "charges & surcharges"	<i>fissures, épaufrure, déformations</i>
		Hypothèses concernant les surcharges climatiques	Surcharge climatique non conforme au DTR "neige et vent"	<i>fissures, épaufrure, déformations</i>
		Hypothèses sur les effets de liaisons hyperstatiques	Négligence de l'encastrement " coupole - ceinture"	<i>fissures, épaufrure, déformations</i>
		Vérification de la stabilité au flambement de la voute	Négligence de la vérification de la voute au flambement	<i>déformations</i>
		<b>Réalisation</b>		
		Opération de coffrage	Absence de contreventement des étais Absence de soin apporté au coffrage de la liaison coupole - ceinture	<i>déformations, fers non adhérents, fissures</i> <i>déformations, fers non adhérents, fissures</i>
		Opération de ferrailage	Usage des aciers non certifiés Enrobage des aciers insuffisants aux normes de construction Ancrage des barres radiales insuffisants	<i>chute de résistance, cassure, déformations</i> <i>Absence d'enrobage</i> <i>déformations, fers non adhérents, fissures</i>
		Opération de bétonnage	Utilisation d'une composition irrégulière Ségrégation suite à une vibration intense ou à une densité de ferrailage	<i>ségrégation, chute de résistance</i> <i>Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers</i>
		Opération de décoffrage	Décoffrage avant durcissement total du béton	<i>déformations, fers non adhérents, fissures</i>
2	Ceinture supérieure	<b>Conception</b>		
		Hypothèse de la fissuration très préjudiciable	Négligence de la vérification en FTP de la ceinture travaillant en traction	<i>fissures, déformations</i>
		Hypothèse de la condition de non fragilité	Non vérification de la section minimale des armatures	<i>cassure, déformations</i>
		<b>Réalisation</b>		
Opération de coffrage	Absence ou insuffisance de moyens de serrage du coffrage Absence de soin apporté au coffrage de la liaison ceinture - paroi	<i>déformations, fers non adhérents, fissures</i> <i>déformations, fers non adhérents, fissures</i>		

		Opération de ferrailage	Usage des aciers non certifiés Enrobage des aciers insuffisants Insuffisance des armatures en cerces reprenant les efforts de traction Longueur de recouvrement insuffisante	<i>chute de résistance, cassure, déformations</i> <i>Absence d'enrobage, traces rouille, épaufrure</i> <i>déformations, fissures, cassures</i> <i>fers non adhérents</i>
		Opération de bétonnage	Utilisation d'une composition irrégulière Ségrégation suite à une vibration intense ou à un excès de ferrailage	<i>ségrégation, chute de résistance</i> <i>Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers</i>
		Opération de décoffrage	Décoffrage avant durcissement total du béton	<i>déformations, fers non adhérents, fissures</i>
3	Paroi cylindrique	<b>Conception</b>		
		Hypothèse de la hauteur hydrostatique	Niveau du trop plein mal estimé	<i>déformations, fissures, épaufrure, cassure, suintement</i>
		Hypothèse de la fissuration très préjudiciable	Négligence de la vérification en FTP de la paroi travaillant en traction	<i>déformations, fissures, suintement</i>
		Hypothèse de la condition de non fragilité	Non vérification de la section minimale des armatures	<i>déformations, cassure, suintement</i>
		<b>Réalisation</b>		
		Opération de coffrage	Absence ou insuffisance de moyens de serrage du coffrage Absence de soin apporté au coffrage de la liaison paroi - ceinture intermédiaire	<i>déformations, fers non adhérents, fissures</i> <i>déformations, fers non adhérents, fissures</i>
		Opération de ferrailage	Usage des aciers non certifiés Enrobage des aciers insuffisants Insuffisance des armatures en cerces reprenant les efforts de traction Longueur de recouvrement insuffisante Armatures verticales de répartition insuffisantes Armatures cerces disposées face externe des armatures verticales de répartition	<i>chute de résistance, déformations, cassure</i> <i>Absence d'enrobage, traces rouille, épaufrure</i> <i>déformations, fissures, cassures</i> <i>fers non adhérents</i> <i>fissures</i> <i>épaufrure, fissures</i>
		Opération de bétonnage	Utilisation d'une composition irrégulière Ségrégation suite à une vibration intense ou à un excès de ferrailage Bétonnage avec une chute d'une hauteur supérieure à 4 m	<i>chute de résistance</i> <i>Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers, suintement</i> <i>Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers, suintement</i>
		Opération de décoffrage	Décoffrage avant durcissement total du béton	<i>déformations, fers non adhérents, fissures</i>

4	Ceinture intermédiaire	<b>Conception</b>		
		Hypothèse de la hauteur hydrostatique	Niveau du trop plein mal estimé	<i>déformations, fissures, épaufrure, cassure, suintement</i>
		Hypothèse de la fissuration très préjudiciable	Négligence de la vérification en FTP de la paroi travaillant en traction	<i>déformations, fissures, suintement</i>
		Hypothèse de la condition de non fragilité	Non vérification de la section minimale des armatures	<i>déformations, cassure, suintement</i>
		<b>Réalisation</b>		
		Opération de coffrage	Absence ou insuffisance de moyens de serrage du coffrage Absence de soin apporté au coffrage de la liaison ceinture intermédiaire - cône de réduction	<i>déformation, aciers non adhérents, fissures déformations, fers non adhérents, fissures</i>
		Opération de ferrailage	Usage des aciers non certifiés Enrobage des aciers insuffisants Insuffisance des aciers cerces devant reprendre les efforts de traction Longueur de recouvrement insuffisante	<i>chute de résistance, déformations, cassure Absence d'enrobage, traces rouille, épaufrure déformations, fissures, cassures fers non adhérents</i>
Opération de bétonnage	Utilisation d'une composition irrégulière Ségrégation suite à une vibration intense ou à une excès de ferrailage	<i>chute de résistance Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers, suintement</i>		
Opération de décoffrage	Décoffrage avant durcissement total du béton	<i>déformations, fers non adhérents, fissures</i>		
5	Cône de réduction	<b>Conception</b>		
		Hypothèse de la hauteur hydrostatique	Niveau du trop plein mal estimé	<i>déformations, fissures, épaufrure, cassure, suintement</i>
		Hypothèse de la fissuration très préjudiciable	Négligence de la vérification en FTP du cône travaillant en traction	<i>déformations, fissures, suintement</i>
		Hypothèse de la condition de non fragilité	Non vérification de la section minimale des armatures	<i>déformations, cassure, suintement</i>
		<b>Réalisation</b>		
		Opération de coffrage	Absence ou insuffisance de moyens de serrage du coffrage et étais Absence de soin apporté au coffrage de la liaison cône de réduction - ceinture inférieure	<i>déformation, aciers non adhérents, fissures déformations, fers non adhérents, fissures</i>
		Opération de ferrailage	Usage des aciers non certifiés Enrobage des aciers insuffisants Insuffisance des aciers cerces devant reprendre les efforts de traction	<i>chute de résistance, déformations, cassure Absence d'enrobage, traces rouille, épaufrure déformations, fissures, cassures</i>

		Opération de bétonnage	Longueur de recouvrement insuffisante Armatures radiales de répartition insuffisantes	<i>fers non adhérents</i> <i>fissures</i>
		Opération de décoffrage	Utilisation d'une composition irrégulière Ségrégation suite à une vibration intense ou à un excès de ferrailage	<i>chute de résistance</i> <i>Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers, suintement</i>
		Opération de décoffrage	Décoffrage avant durcissement total du béton	<i>déformations, fers non adhérents, fissures</i>
6	Ceinture inférieure	<b>Conception</b>		
		Hypothèse de la hauteur hydrostatique	Niveau du trop plein mal estimé	<i>déformations, fissures, épaufrure, cassure, suintement</i>
		Hypothèse de la fissuration très préjudiciable	Négligence de la vérification en FTP de la paroi travaillant en traction	<i>déformations, fissures, suintement</i>
		Hypothèse de la condition de non fragilité	Non vérification de la section minimale des armatures	<i>déformations, cassure, suintement</i>
		<b>Réalisation</b>		
		Opération de coffrage	Absence ou insuffisance de moyens de serrage du coffrage et étais Absence de soin apporté au coffrage de la liaison cône de réduction - coupole inférieure	<i>déformation, aciers non adhérents, fissures</i> <i>déformations, fers non adhérents, fissures</i>
		Opération de ferrailage	Usage des aciers non certifiés Enrobage des aciers insuffisants aux normes de construction Insuffisance des aciers reprenant les efforts de traction Insuffisance des aciers reprenant les moments de torsion Longueur de recouvrement insuffisante	<i>chute de résistance, déformations, cassure</i> <i>Absence d'enrobage, traces rouille, épaufrure</i> <i>déformations, fissures, cassures</i> <i>déformations, fissures, cassures</i> <i>fers non adhérents</i>
		Opération de bétonnage	Utilisation d'une composition irrégulière Ségrégation suite à une vibration intense ou à un excès de ferrailage	<i>chute de résistance</i> <i>Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers, suintement</i>
		Opération de décoffrage	Décoffrage avant durcissement total du béton	<i>déformations, fers non adhérents, fissures</i>
7	Coupole inférieure	<b>Conception</b>		
		Hypothèses concernant la surcharge hydrostatique	Niveau du trop plein mal estimé	<i>fissures, épaufrure, déformations</i>
		Hypothèses sur les effets de liaisons hyperstatiques	négligence de l'encastrement " coupole inférieure - ceinture inférieure"	<i>fissures, épaufrure, déformations</i>

		Vérification de la stabilité au flambement de la voute	Négligence de la vérification de la voute au flambement	déformations
		<b>Réalisation</b>		
		Opération de coffrage	Absence de contreventement des étais Absence de soin apporté au coffrage de la liaison coupole - ceinture inf	déformations, fers non adhérents, fissures déformations, fers non adhérents, fissures
		Opération de ferrailage	Usage des aciers non certifiés Enrobage des aciers insuffisants aux normes de construction Ancrage des barres radiales insuffisants	chute de résistance, cassure, déformations Absence d'enrobage déformations, fers non adhérents, fissures
		Opération de bétonnage	Utilisation d'une composition irrégulière Ségrégation suite à une vibration intense ou à une excès de ferrailage	chute de résistance Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers, suintement
		Opération de décoffrage	Décoffrage avant durcissement total du béton	déformations, fers non adhérents, fissures
8	Cheminée intérieure	<b>Conception</b>		
		Hypothèse de la hauteur hydrostatique	Niveau du trop plein mal estimé	fissures, épaufrure, déformations
		<b>Réalisation</b>		
		Opération de coffrage	Absence ou insuffisance de moyens de serrage du coffrage Absence de soin apporté au coffrage de la liaison cheminée intérieure - coupole inférieure	déformation, aciers non adhérents, fissures déformations, fers non adhérents, fissures
		Opération de ferrailage	Usage des aciers non certifiés Enrobage des aciers insuffisants aux normes de construction Insuffisance des aciers reprenant les efforts de compression Armatures verticales de répartition insuffisantes	chute de résistance, cassure, déformations Absence d'enrobage déformations, fissures, cassures fissures
		Opération de bétonnage	Utilisation d'une composition irrégulière Ségrégation suite à une vibration intense ou à une excès de ferrailage Bétonnage avec une chute d'une hauteur supérieure à 4 m	chute de résistance Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers, suintement Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers, suintement
		Opération de décoffrage	Décoffrage avant durcissement total du béton	déformations, fers non adhérents, fissures
9	Support	<b>Conception</b>		
		Hypothèse de l'action sismique	Mauvais choix des coefficients sismiques (A, T, R, Q)	déformations, fissures, cassures

		Hypothèse de l'effet hydrodynamique	Omission de la modélisation de la masse de l'eau oscillante	<i>déformations, fissures, cassures</i>
		Hypothèse de la condition de non fragilité	Non vérification de la section minimale des armatures	<i>déformations, fissures, cassures</i>
		Hypothèses de stabilité	Non vérification des contraintes dans le support sous l'action sismique Non vérification de la stabilité de forme (flambement) du support	<i>déformations, fissures, cassures</i> <i>déformations, fissures, cassures</i>
		<b>Réalisation</b>		
		Opération de coffrage	Absence ou insuffisance de moyens de serrage du coffrage Absence de soin apporté au coffrage de la liaison support - fondation	<i>déformation, aciers non adhérents, fissures</i> <i>déformations, fers non adhérents, fissures</i>
		Opération de ferrailage	Usage des aciers non certifiés Enrobage des aciers insuffisants  Insuffisance des aciers verticaux reprennant les efforts de flexion composée  Longueur de recouvrement insuffisante Armatures horizontales (cerces) de répartition insuffisantes	<i>chute de résistance, cassure, déformations</i> <i>Absence d'enrobage</i>  <i>déformations, fissures, cassures</i>  <i>fers non adhérents</i> <i>fissures</i>
		Opération de bétonnage	Utilisation d'une composition irrégulière Ségrégation suite à une vibration intense ou à un excès de ferrailage Bétonnage avec une chute d'une hauteur supérieure à 4 m	<i>chute de résistance</i> <i>Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers</i> <i>Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers</i>
		Opération de décoffrage	Décoffrage avant durcissement total du béton	<i>déformations, fers non adhérents, fissures</i>
10	Fondation	<b>Conception</b>		
		Hypothèse pré dimensionnement à l'ELS	Mauvais choix du type de fondations à l'état limite de service	<i>Tassement, basculement</i>
		Hypothèse de la condition de non fragilité	Non vérification de la section minimale des armatures	<i>déformations, cassure</i>
		Hypothèses de stabilité	Non vérification de la stabilité à l'ELU de renversement Non vérification de la stabilité à l'ELU de glissement	<i>Basculement</i> <i>glissement</i>
		Etude géotechnique	Non vérification des contraintes sous la fondation (soulèvement)	<i>Souèvement, basculement</i>
		<b>Réalisation</b>		
		Opération de coffrage	Appuis défectueux sur le sol	
		Opération de ferrailage	Usage des aciers non certifiés Enrobage des aciers insuffisants	<i>chute de résistance, cassure, déformations</i> <i>Absence d'enrobage</i>

		Opération de bétonnage	Insuffisance des aciers horizontaux reprenant les efforts de flexion Longueur de recouvrement insuffisante Armatures transversales insuffisantes	déformations, fissures, cassures <i>fers non adhérents</i> fissures
		Opération de décoffrage	Utilisation d'une composition irrégulière Ségrégation suite à une vibration intense ou à un excès de ferrailage  Décoffrage avant durcissement total du béton	<i>chute de résistance</i> <i>Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers</i>
11	Système de drainage	<b>Conception</b>	Sous estimation du débit en sous sol à drainer mauvaise disposition du système de drainage Granulométrie mal dimensionnée	stagnation, sous pression, affouillement, tassement stagnation, sous pression, affouillement, tassement stagnation, sous pression, affouillement, tassement
		<b>Réalisation</b>	Pente insuffisante Granulométrie non conforme au dossier d'exécution diamètre de la canalisation inférieur à celui prévu par l'étude	stagnation, sous pression, affouillement, tassement stagnation, sous pression, affouillement, tassement stagnation, sous pression, affouillement, tassement

## Annexe 2 : AMDE Produit

N°	Composant	Fonctions	Mode de défaillance	Cause possible de défaillance	Effet possible de la défaillance	Symptôme de la défaillance	Moyen de la détection
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Coupole de couverture	<b>Résister aux sollicitations mécaniques</b>	La fonction "résister aux sollicitations mécaniques" est dégradée ou défaillante	<b>Flux de charge</b>  <i>Charges &amp; surcharges sur la coupole</i> <b>Processus de conception - réalisation</b>  <i>Voir AMDE processus</i>  <b>Etat intrinsèque du composant</b>  Milieu extérieur (vent, soleil, neige, gel ...)	<b>Etat intrinsèque du composant</b>  <i>fissures, épaufrure, déformations</i>  <i>fissures, épaufrure, déformations</i> <i>fers non adhérents, absence d'enrobage</i> <i>chute de résistance, cassure</i> <i>Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers</i>	Fissures Déplacement vertical (flèche)  aciers visibles aciers visibles traces de rouille	Observation visuelle Mesure topographique  Observation visuelle Observation visuelle Observation visuelle
		<b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b>	La fonction "transmettre les sollicitations mécaniques" est dégradée ou défaillante	<b>Processus de conception - réalisation</b>  <i>Mauvaise disposition du ferrailage</i> <i>Longueur de recouvrement insuffisante</i> <i>Ancrage des aciers insuffisant</i> <i>Aciers non adhérents</i>	<b>Etat intrinsèque du composant</b>  <i>Aciers dénudés</i> <i>Corrosion des aciers</i>	<i>Constat des déformations</i> <i>aciers visibles</i> <i>Présence de rouille</i>	Observation visuelle
		<b>Limiter les flux hydrauliques</b>	La fonction "limiter les flux hydrauliques" est dégradée ou défaillante	<b>Flux hydraulique</b>  <i>Stagnation des eaux sur la coupole</i> <b>Processus de conception - réalisation</b>  <i>Complexe d'étanchéité inadapté</i> <i>Complexe d'étanchéité non prévu</i> <b>Etat intrinsèque du composant</b>  <i>fissure dans la masse</i> <i>Ségrégation</i>	<b>Etat intrinsèque du composant</b>  <i>traces de rouille</i> <b>Flux hydraulique</b>  <i>fuites d'eau à travers la masse de la coupole</i>	Stagnation de l'eau  Fuites à travers la coupole	Observation visuelle
		<b>Collecter les flux hydrauliques</b>	La fonction "collecter les flux hydrauliques" est dégradée ou défaillante	<b>Flux hydraulique</b>  <i>Eaux de pluie</i> <b>Processus de conception - réalisation</b>	<b>Flux hydraulique</b>  <i>Stagnation de l'eau sur la coupole</i> <i>fuites d'eau à travers la masse de la coupole</i>	Stagnation de l'eau sur la coupole	Observation visuelle

Annexe

				<p>Gargouilles non prévues</p> <p>Gargouilles en nombre insuffisant</p> <p>Etat intrinsèque du composant</p> <p>Gargouilles dégradées</p>	<p>Stalactites</p>		
2	Ceinture supérieure	<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b></p> <p>résister à l'effort de traction généré par la coupole</p>	<p>La fonction "résister aux sollicitations mécaniques" est dégradée ou défaillante</p>	<p>Flux de charge</p> <p>Surcharges d'exploitation sur la coupole</p> <p>Processus de conception - réalisation</p> <p>Voir AMDE processus</p> <p>Etat intrinsèque du composant</p> <p>Milieu extérieur (vent, soleil, neige, gel ...)</p> <p>Eclatement du béton</p> <p>Epaufrure</p>	<p>Etat intrinsèque du composant</p> <p>fissures</p> <p>fissures, déformations, cassure</p> <p>chute de résistance</p> <p>Absence d'enrobage, traces rouille, épaufrure</p> <p>ségrégation, fers non adhérents</p> <p>aciers dénudés, corrosion aciers</p>	<p>Fissures</p> <p>Présence de rouille</p> <p>aciers visibles</p>	<p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p>
		<p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b></p> <p>transmettre la composante verticale vers la paroi</p>	<p>La fonction "transmettre les sollicitations mécaniques" est dégradée ou défaillante</p>	<p>Processus de conception - réalisation</p> <p>Mauvaise disposition du ferrailage</p> <p>Longueur de recouvrement insuffisante</p> <p>Ancrage des aciers insuffisant</p> <p>Aciers non adhérents</p>	<p>Etat intrinsèque du composant</p> <p>Aciers dénudés</p> <p>Corrosion des aciers</p>	<p>Constat des déformations</p> <p>aciers visibles</p> <p>Présence de rouille</p>	<p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p>
		<p><b>Préparer la surface de contact</b></p> <p>préparer la surface de contact de la coupole</p>	<p>La fonction "préparer la surface de contact" est dégradée ou défaillante</p>	<p>Processus de conception - réalisation</p> <p>reprise de bétonnage</p> <p>Etat intrinsèque du composant</p> <p>déformation de la ceinture supérieure</p>	<p>Surface de contact</p> <p>Déformation de la coupole</p>	<p>Constat des déformations</p>	<p>Observation visuelle</p>
3	Paroi cylindrique	<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b></p> <p>résister à la poussée hydrostatique transmise par l'eau de la cuve</p> <p>résister à la poussée hydrodynamique transmise par l'eau de la cuve</p>	<p>La fonction "résister aux sollicitation mécaniques" est dégradée ou défaillante</p>	<p>Flux de charge</p> <p>Poussée hydrostatique</p> <p>Poussée hydrodynamique</p> <p>Processus de conception - réalisation</p> <p>Voir AMDE processus</p>	<p>Etat intrinsèque du composant</p> <p>déformations, fissures, épaufrure, cassure, suintement</p> <p>déformations, fissures, épaufrure, cassure, suintement</p> <p>chute de résistance, fers non adhérents, absence d'enrobage</p> <p>Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers</p>	<p>Constat des déformations</p> <p>aciers visibles</p> <p>Présence de rouille</p>	<p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p>

				<b>Etat intrinsèque du composant</b> déformation de la paroi			
		<b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b>	La fonction " <b>transmettre les sollicitations mécaniques</b> " est dégradée ou défaillante	<b>Processus de conception - réalisation</b>	<b>Etat intrinsèque du composant</b>		
		transmettre le poids la coupole vers la ceinture intermédiaire		<i>Mauvaise disposition du ferrailage</i>	<i>Epaufrure</i>	Constat des déformations	Observation visuelle
		transmettre le poids la ceinture supérieure vers la ceinture intermédiaire		<i>Longueur de recouvrement insuffisante</i>	<i>Aciers dénudés</i>	aciers visibles	Observation visuelle
		transmettre la surcharge d'exploitation de la coupole vers la ceinture intermédiaire		Ancrage des aciers insuffisant		Présence de rouille	Observation visuelle
		transmettre la surcharge climatique de la coupole vers la ceinture intermédiaire		<i>Aciers non adhérents</i>			
		<b>Préparer la surface de contact</b>	La fonction " <b>préparer la surface de contact</b> " est dégradée ou défaillante	<b>Processus de conception - réalisation</b>	<b>Surface de contact</b>		
		préparer la surface de contact de la ceinture supérieure		<i>reprise de bétonnage</i>	Déformation de la ceinture	Constat des déformations	Observation visuelle
		préparer la surface de contact de l'enduit externe		<b>Etat intrinsèque du composant</b>			
		préparer la surface de contact de l'enduit interne étanche		déformation de la paroi			
		<b>Limiter les flux hydrauliques</b>	La fonction " <b>limiter les flux hydrauliques</b> " est dégradée ou défaillante	<b>Flux hydraulique</b>	<b>Flux hydraulique</b>		
		limiter les fuites d'eau à travers la paroi de la cuve vers l'extérieur		<i>Eau de la cuve</i>		Fissures	Observation visuelle
				<b>Processus de conception - réalisation</b>	<b>Etat intrinsèque du composant</b>	Constat d'écoulement d'eau	Observation visuelle
				<i>épaisseur de la paroi</i>	<i>corrosion des aciers</i>	Présence de rouille	Observation visuelle
				<i>Enduit étanche</i>	<i>agrandissement des fissures</i>	Présence de taches blanche	Observation visuelle
				<i>Composition du béton (dosage)</i>	<i>Efflorescence</i>		
				ségrégation			
				<b>Etat intrinsèque du composant</b>			
				fissures dans la paroi			
				Enduit dégradé			
4	Ceinture intermédiaire	<b>Résister aux sollicitations mécaniques</b>	La fonction " <b>résister aux sollicitation mécaniques</b> " est dégradée ou défaillante	<b>Flux de charge :</b>	<b>Etat intrinsèque du composant</b>		
		résister à la poussée hydrostatique transmise par l'eau de la cuve		<i>Poussée hydrostatique</i>	<i>déformations, fissures, épaufrure, cassure, suintement</i>	Constat des déformations	Observation visuelle
				<b>Processus de conception - réalisation</b>		aciers visibles	Observation visuelle
				<i>Voir AMDE processus</i>	<i>déformation, aciers non adhérents, fissures</i>	Présence de rouille	Observation visuelle
					<i>chute de résistance, cassure, suintement</i>		
					<i>Absence d'enrobage, traces rouille, épaufrure</i>		

5	Cône de réduction			<p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>déformation de la ceinture intermédiaire</i></p>	<p><i>Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers</i></p>		
		<p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b></p> <p>transmettre le poids de la coupole vers le cône de réduction</p> <p>transmettre le poids de la ceinture supérieure vers le cône de réduction</p> <p>transmettre le poids de la paroi vers le cône de réduction</p> <p>transmettre la surcharge d'exploitation de la coupole vers le cône de réduction</p> <p>transmettre la surcharge climatique de la coupole vers le cône de réduction</p>	<p>La fonction "<b>transmettre les sollicitations mécaniques</b>" est dégradée ou défaillante</p>	<p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>Mauvaise disposition du ferrailage</i></p> <p><i>Longueur de recouvrement insuffisante</i></p> <p><i>Ancrage des aciers insuffisant</i></p> <p><i>Aciers non adhérents</i></p>	<p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>Epaufure</i></p> <p><i>Aciers dénudés</i></p>	<p>Constat des déformations</p> <p>aciers visibles</p> <p>Présence de rouille</p>	<p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p>
		<p><b>Préparer la surface de contact</b></p> <p>préparer la surface de contact avec la paroi cylindrique</p> <p>préparer la surface de contact de l'enduit externe</p> <p>préparer la surface de contact de l'enduit interne étanche</p>	<p>La fonction "<b>préparer la surface de contact</b>" est dégradée ou défaillante</p>	<p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>reprise de bétonnage</i></p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>déformation de la ceinture intermédiaire</i></p>	<p><b>Surface de contact</b></p> <p><i>Déformation de la paroi</i></p>	<p><i>Constat des déformations</i></p>	<p><i>Observation visuelle</i></p>
		<p><b>Limiter les flux hydrauliques</b></p> <p>limiter les fuites d'eau à travers la ceinture intermédiaire de la cuve vers l'extérieur</p>	<p>La fonction "<b>limiter les flux hydrauliques</b>" est dégradée ou défaillante</p>	<p><b>Flux hydraulique</b></p> <p><i>Eau de la cuve</i></p> <p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>segregation</i></p> <p><i>Composition du béton (dosage)</i></p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>fissures dans la masse</i></p> <p><i>fissures dans l'enduit étanche</i></p>	<p><b>Flux hydraulique</b></p> <p>Suintement</p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>corrosion des aciers</i></p> <p><i>agrandissement des fissures</i></p> <p><i>Efflorescence</i></p>	<p><i>Fissures</i></p> <p><i>Constat d'écoulement d'eau</i></p> <p><i>Présence de rouille</i></p> <p><i>Présence de taches blanche</i></p>	<p><i>Observation visuelle</i></p> <p><i>Observation visuelle</i></p> <p><i>Observation visuelle</i></p> <p><i>Observation visuelle</i></p>
		<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b></p> <p>résister à la poussée hydrostatique transmise par l'eau de la cuve</p>	<p>La fonction "<b>résister aux sollicitations mécaniques</b>" est dégradée ou défaillante</p>	<p><b>Flux de charge :</b></p> <p><i>Poussée hydrostatique</i></p>	<p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>déformations, fissures, épaufrure, cassure, suintement</i></p>	<p>Constat des déformations</p> <p>aciers visibles</p>	<p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p>

Annexe

	résister à l'effort de compression provenant de la ceinture intermédiaire		<p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>Voir AMDE processus</i></p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>déformation du cone de réduction</i></p>	<p><i>déformations, fissures, épaufrure, cassure, suintement</i></p> <p><i>chute de résistance, fers non adhérents</i></p> <p><i>Absence d'enrobage, traces rouille, chute de résistance</i></p> <p><i>Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers</i></p>	Présence de rouille	Observation visuelle
	<p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b></p> <p>transmettre le poids de la coupole vers la ceinture inférieure</p> <p>transmettre le poids de la ceinture supérieure vers la ceinture inférieure</p> <p>transmettre le poids de la paroi vers la ceinture inférieure</p> <p>transmettre le poids de la ceinture intermédiaire vers la ceinture inférieure</p> <p>transmettre la surcharge d'exploitation de la coupole vers la ceinture inférieure</p> <p>transmettre la surcharge climatique de la coupole vers la ceinture inférieure</p>	La fonction "transmettre les sollicitations mécaniques" est dégradée ou défaillante	<p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>Mauvaise disposition du ferrailage</i></p> <p><i>Longueur de recouvrement insuffisante</i></p> <p>Ancrage des aciers insuffisant</p> <p><i>Aciers non adhérents</i></p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>déformation du cone de réduction</i></p> <p><i>Usure de la surface du cone de réduction</i></p>	<p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>Epaufrure</i></p> <p><i>Aciers dénudés</i></p> <p><i>aciers dénudés, corrosion aciers, chute de résistance</i></p>	<p>Gonflements le long des aciers</p> <p>aciers dénudés</p> <p>Corrosion</p>	<p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p>
	<p><b>Préparer la surface de contact</b></p> <p>préparer la surface de contact avec la ceinture intermédiaire</p> <p>préparer la surface de contact de l'enduit externe</p> <p>préparer la surface de contact de l'enduit interne étanche</p>	La fonction "préparer la surface de contact" est dégradée ou défaillante	<p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>reprise de bétonnage</i></p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>déformation de la cone de réduction</i></p>	<p><b>Surface de contact</b></p> <p><i>Déformation de la ceinture</i></p>	Constat des déformations	Observation visuelle
	<p><b>Limiter les flux hydrauliques</b></p> <p>limiter les fuites d'eau à travers le cone de réduction</p>	La fonction "limiter les flux hydrauliques" est dégradée ou défaillante	<p><b>Flux hydraulique</b></p> <p><i>Eau de la cuve</i></p> <p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>ségrégation</i></p> <p><i>Composition du béton (dosage)</i></p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>fissures dans la masse</i></p>	<p><b>Flux hydraulique</b></p> <p>Suintement</p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>corrosion des aciers</i></p> <p><i>agrandissement des fissures</i></p> <p><i>Efflorescence</i></p>	<p>Constat d'écoulement d'eau</p> <p>Présence de rouille</p> <p>Fuites d'eau</p> <p>matrice de gravier visible</p> <p>Présence de taches blanche</p>	<p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p>

				fissures dans l'enduit étanche			
6	Ceinture inférieure	<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b></p> <p>résister au poids de l'eau dans la cuve</p> <p>résister à la composante horizontale de l'effort axial provenant du cône de réduction</p> <p>résister à la composante horizontale de l'effort axial provenant de la coupole inférieure</p> <p>résister à l'effort torsion induit par les résultantes provenant de la coupole et du cône</p>	La fonction " <b>résister aux sollicitations mécaniques</b> " est dégradée ou défaillante	<p><b>Flux de charge :</b></p> <p><i>Poussée hydrostatique</i></p> <p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>Voir AMDE processus</i></p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>déformation de la ceinture</i></p>	<p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>déformations, fissures, épaufrure, cassure, suintement</i></p> <p><i>déformations, fissures, épaufrure, cassure, suintement</i></p> <p><i>chute de résistance, aciers non adhérents</i></p> <p><i>Absence d'enrobage, traces rouille, épaufrure</i></p> <p><i>Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers</i></p>	<p>présence de fissures</p> <p>Présence de rouille</p> <p>Constat des déformations</p> <p>aciers visibles</p>	<p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p>
<p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b></p> <p>transmettre le poids de la coupole vers le support</p> <p>transmettre le poids de la ceinture supérieure vers le support</p> <p>transmettre le poids de la paroi vers le support</p> <p>transmettre le poids de la ceinture intermédiaire vers le support</p> <p>transmettre la surcharge d'exploitation de la coupole vers le support</p> <p>transmettre la surcharge climatique de la coupole vers le support</p> <p>transmettre le poids de la coupole inférieure vers le support</p> <p>transmettre le poids de la cheminée intérieure vers le support</p> <p>transmettre le poids de l'eau de la cuve vers le support</p>		La fonction " <b>transmettre les sollicitations mécaniques</b> " est dégradée ou défaillante	<p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>Mauvaise disposition du ferrailage</i></p> <p><i>Longueur de recouvrement insuffisante</i></p> <p>Ancrage des aciers insuffisant</p> <p><i>Aciers non adhérents</i></p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>Usure de la surface de la ceinture</i></p>	<p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>Epaufrure</i></p> <p><i>cassure</i></p> <p><i>Aciers dénudés</i></p> <p><i>aciers dénudés, corrosion aciers, chute de résistance</i></p>	<p>aciers dénudés</p> <p>aciers dénudés</p> <p>aciers visibles</p> <p>aciers visibles</p>	<p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p>	
<p><b>Préparer la surface de contact</b></p> <p>préparer la surface de contact avec le cône de réduction</p> <p>préparer la surface de contact avec la coupole inférieure</p>		La fonction " <b>préparer la surface de contact</b> " est dégradée ou défaillante	<p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>reprise de bétonnage</i></p>	<p><b>Surface de contact</b></p> <p><i>Déformation du cône de réduction</i></p> <p><i>Déformation de la coupole inférieure</i></p>	<p><i>Constat des déformations</i></p> <p><i>Constat des déformations</i></p>	<p><i>Observation visuelle</i></p> <p><i>Observation visuelle</i></p>	

		<p>préparer la surface de contact de l'enduit externe</p> <p>préparer la surface de contact de l'enduit interne étanche</p>		<p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>déformation de la ceinture</i></p>			
		<p><b>Limiter les flux hydrauliques</b></p> <p>limiter les fuites d'eau à travers la ceinture inférieure</p>	<p>La fonction "<b>limiter les flux hydrauliques</b>" est dégradée ou défaillante</p>	<p><b>Flux hydraulique</b></p> <p><i>Eau de la cuve</i></p> <p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>Ségrégation</i></p> <p><i>Composition du béton (dosage)</i></p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>fissures dans la masse</i></p> <p><i>fissures dans l'enduit étanche</i></p>	<p><b>Flux hydraulique</b></p> <p>Suintement</p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>corrosion des aciers</i></p> <p><i>agrandissement des fissures</i></p> <p><i>Efflorescence</i></p>	<p><i>Fissures</i></p> <p><i>Constat d'écoulement d'eau</i></p> <p><i>Présence de rouille</i></p> <p><i>Présence de taches blanche</i></p> <p>Tache blanchâtre</p>	<p><i>Observation visuelle</i></p> <p><i>Observation visuelle</i></p> <p><i>Observation visuelle</i></p> <p><i>Observation visuelle</i></p> <p><i>Observation visuelle</i></p>
7	Coupole inférieure	<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b></p> <p><i>résister à la surcharge de l'eau dans la cuve</i></p> <p><i>résister à la charge de la cheminée intérieure</i></p> <p><i>résister à la charge de son propre poids</i></p>	<p>La fonction "<b>résister aux sollicitation mécaniques</b>" est dégradée ou défaillante</p>	<p><b>Flux de charge :</b></p> <p><i>Surcharge de l'eau sur coupole</i></p> <p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>Voir AMDE processus</i></p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>déformation de la coupole</i></p>	<p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>déformations, fissures, épaufrure, cassure, suintement</i></p> <p><i>fissures, épaufrure, déformations, suintement</i></p> <p><i>chute de résistance, cassure, fers non adhérents</i></p> <p><i>Absence d'enrobage, chute de résistance</i></p> <p><i>Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers</i></p>	<p>présence de fissures</p> <p>Présence de rouille</p> <p>Constat des déformations</p> <p>aciers visibles</p> <p>Fuites d'eau</p> <p>matrice de gravier visible</p>	<p><i>Observation visuelle</i></p> <p><i>Observation visuelle</i></p> <p><i>Observation visuelle</i></p> <p><i>Observation visuelle</i></p> <p><i>Observation visuelle</i></p> <p><i>Observation visuelle</i></p>
		<p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b></p> <p>Transmettre l'effort de compression axial de la coupole vers la ceinture inférieure</p> <p>transmettre le poids de la cheminée intérieure vers la ceinture inférieure</p>	<p>La fonction "<b>transmettre les sollicitations mécaniques</b>" est dégradée ou défaillante</p>	<p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>Mauvaise disposition du ferrailage</i></p> <p>Ancrage des aciers insuffisant</p> <p><i>Aciers non adhérents</i></p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>Usure de la surface de la coupole</i></p>	<p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>Epaufure</i></p> <p><i>cassure</i></p> <p><i>Aciers dénudés</i></p> <p><i>aciers dénudés, corrosion aciers, chute de résistance</i></p>	<p>aciers dénudés</p> <p>aciers dénudés</p> <p>aciers visibles</p> <p>aciers visibles</p>	<p><i>Observation visuelle</i></p> <p><i>Observation visuelle</i></p> <p><i>Observation visuelle</i></p> <p><i>Observation visuelle</i></p>
		<p><b>Préparer la surface de contact</b></p> <p>préparer la surface de contact avec la cheminée intérieure</p>	<p>La fonction "<b>préparer la surface de contact</b>" est dégradée ou défaillante</p>	<p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>reprise de bétonnage</i></p> <p><i>Pass mur des canalisations</i></p>	<p><i>Déformation de la cheminée intérieure</i></p> <p>Suintements</p>	<p>Constat des déformations</p> <p>Fuites d'eau</p>	<p><i>Observation visuelle</i></p> <p><i>Observation visuelle</i></p>

Annexe

		<p>préparer la surface de contact de l'enduit interne étanche</p> <p>préparer la surface de contact des canalisation pass-mur</p>		<p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>déformation de la coupole</i></p>			
		<p><b>Limiter les flux hydrauliques</b></p> <p>limiter les fuites d'eau à travers la coupole inférieure</p>	<p>La fonction "<b>limiter les flux hydrauliques</b>" est dégradée ou défaillante</p>	<p><b>Flux hydraulique</b></p> <p><i>Eau de la cuve</i></p> <p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>épaisseur coupole insuffisante</i></p> <p><i>Composition du béton (dosage)</i></p> <p><i>Ségrégation béton</i></p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p>fissures dans la coupole</p> <p>fissures dans l'enduit étanche</p>	<p><b>Flux hydraulique</b></p> <p>Suintement</p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>corrosion des aciers</i></p> <p><i>agrandissement des fissures</i></p> <p><i>Efflorescence</i></p>	<p>Fuites d'eau</p> <p>aciers visibles</p> <p>présence de fissures</p> <p>Tache blanchâtre</p>	<p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p>
8	Cheminée intérieure	<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b></p> <p>résister à la poussée hydrostatique transmise par l'eau de la cuve</p>	<p>La fonction "<b>résister aux sollicitation mécaniques</b>" est dégradée ou défaillante</p>	<p><b>Flux de charge :</b></p> <p><i>Poussée hydrostatique</i></p> <p><i>Poussée hydrodynamique</i></p> <p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>Voir AMDE processus</i></p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>déformation de la cheminée</i></p> <p><i>dégradation de la cheminée</i></p>	<p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>déformations, fissures, épaufrure, cassure, suintement</i></p> <p><i>déformations, fissures, épaufrure, cassure, suintement</i></p> <p><i>chute de résistance, fers non adhérents, absence d'enrobage</i></p> <p><i>Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers</i></p>	<p>Constat des déformations</p> <p>aciers visibles</p> <p>Présence de rouille</p>	<p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p>
		<p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b></p> <p>transmettre le poids de la cheminée intérieure vers la coupole inférieure</p>	<p>La fonction "<b>transmettre les sollicitations mécaniques</b>" est dégradée ou défaillante</p>	<p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>Mauvaise disposition du ferrailage</i></p> <p><i>Longueur de recouvrement insuffisante</i></p> <p>Ancrage des aciers insuffisant</p> <p><i>Aciers non adhérents</i></p>	<p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p>déformations de la cheminée</p> <p><i>Epaufrure</i></p> <p><i>Aciers dénudés</i></p>	<p>Constat des déformations</p> <p>aciers visibles</p> <p>Présence de rouille</p>	<p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p>
		<p><b>Préparer la surface de contact</b></p>	<p>La fonction "<b>préparer la surface de contact</b>" est dégradée ou défaillante</p>	<p><b>Processus de conception - réalisation</b></p>	<p><b>Surface de contact</b></p>		

		préparer la surface de contact de l'enduit interne étanche		<i>mauvaise qualité de coffrage</i> <b>Etat intrinsèque du composant</b> <i>déformation de la cheminée</i>	Déformation de la ceinture	Constat des déformations	Observation visuelle
		<b>Limiter les flux hydrauliques</b>	La fonction "limiter les flux hydrauliques" est dégradée ou défaillante	<b>Flux hydraulique</b> <i>Eau de la cuve</i> <b>Processus de conception - réalisation</b> <i>épaisseur cheminée insuffisante</i> <i>Enduit étanche</i> <i>Composition du béton (dosage)</i> <i>Opération de bétonnage</i> <b>Etat intrinsèque du composant</b> <i>fissures dans la cheminée</i> <i>fissures dans l'enduit étanche</i>	<b>Flux hydraulique</b>  <i>Suintement</i> <b>Etat intrinsèque du composant</b> <i>corrosion des aciers</i> <i>agrandissement des fissures</i> <i>Efflorescence</i>	Constat d'écoulement d'eau  Présence de rouille Fissures Présence de taches blanche	Observation visuelle  Observation visuelle Observation visuelle Observation visuelle
9	Support	<b>Résister aux sollicitations mécaniques</b>	La fonction "résister aux sollicitations mécaniques" est dégradée ou défaillante	<b>Flux de charge :</b> <i>Effort sismique</i> <i>Effet hydrodynamique</i> <b>Processus de conception - réalisation</b> <i>Voir AMDE processus</i>  <b>Etat intrinsèque du composant</b> <i>déformation du support</i> <i>dégradation du support</i>	<b>Etat intrinsèque du composant</b>  <i>déformations, fissures, cassures</i> <i>chute de résistance, cassure, déformations</i>  <i>Absence d'enrobage</i> <i>déformations, fissures, cassures</i>  <i>fers non adhérents</i> <i>Ségrégation, aciers dénudés, corrosion aciers</i>	présence de fissures Présence de rouille Constat des déformations aciers visibles matrice de gravier visible	Observation visuelle Observation visuelle Observation visuelle Observation visuelle Observation visuelle
		<b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b>	La fonction "transmettre les sollicitations mécaniques" est dégradée ou défaillante	<b>Processus de conception - réalisation</b>  <i>Mauvaise disposition du ferrailage</i>  <i>Longueur de recouvrement insuffisante</i>	<b>Etat intrinsèque du composant</b>  <i>Epaufure</i>  <i>Aciers dénudés</i>	aciers visibles  aciers visibles	Observation visuelle  Observation visuelle

Annexe

		<p>transmettre le poids de la coupole vers la fondation</p> <p>transmettre le poids de la ceinture supérieure vers la fondation</p> <p>transmettre le poids de la paroi vers la fondation</p> <p>transmettre le poids de la ceinture intermédiaire vers la fondation</p> <p>transmettre le poids du cône de réduction vers la fondation</p> <p>transmettre le poids de la coupole inférieure vers la fondation</p> <p>transmettre le poids de la cheminée intérieure vers la fondation</p> <p>transmettre le poids de l'eau de la cuve vers la fondation</p> <p>transmettre l'effort sismique horizontal vers la fondation</p>		<p>Ancrage des aciers insuffisant</p> <p><i>Aciers non adhérents</i></p>	<p>fissures</p>	<p>présence de fissures</p>	<p>Observation visuelle</p>
		<p><b>Préparer la surface de contact</b></p> <p>préparer la surface de contact avec la ceinture inférieure</p> <p>préparer la surface de contact de l'enduit externe</p>	<p>La fonction "<b>préparer la surface de contact</b>" est dégradée ou défaillante</p>	<p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>reprise de bétonnage</i></p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>déformation du support</i></p> <p><i>dégradation du support</i></p>	<p><b>Surface de contact</b></p> <p>Déformation de la ceinture inférieure</p>	<p>Constat des déformations</p>	<p>Observation visuelle</p>
10	Fondation	<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b></p> <p>résister à la sollicitation sismique horizontale</p> <p>résister à la charge verticale transmise par la superstructure y compris l'eau</p>	<p>La fonction "<b>résister aux sollicitations mécaniques</b>" est dégradée ou défaillante</p>	<p><b>Flux de charge</b></p> <p><i>Effort sismique</i></p> <p><i>Effet hydrodynamique</i></p> <p><i>Charge de l'eau</i></p> <p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>Voir AMDE processus</i></p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>Fissure de la fondation</i></p>	<p>cassure</p> <p>déformations</p> <p>fissures</p> <p><i>Absence d'enrobage</i></p> <p><i>chute de résistance</i></p> <p><i>fers non adhérents</i></p> <p><i>Ségrégation</i></p> <p><i>corrosion aciers</i></p> <p><i>aciers dénudés</i></p>	<p>Apparition de fissures</p> <p>Apparition de fissures</p> <p>rupture de canalisations</p> <p>fissures</p> <p>fissures</p> <p>Graviers visibles</p> <p>traces de rouille</p> <p>Aciers visibles</p>	<p>Observation visuelle</p> <p>Déformation mesurée</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p>
		<p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b></p>	<p>La fonction "<b>transmettre les sollicitations mécaniques</b>" est dégradée ou défaillante</p>	<p><b>Flux de charge</b></p>			

Annexe

		Transmettre le poids de toute la structure vers le sol de fondation		<p><i>Charge de l'eau</i></p> <p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>Type de fondation inadapté</i></p> <p>Non vérification de la stabilité au renversement</p> <p>Non vérification de la stabilité au glissement</p> <p>Non vérification des contraintes sous la fondation</p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>Affouillement de la fondation</i></p>	<p><i>Tassement</i></p> <p><i>Basculement</i></p> <p><i>glissement</i></p> <p><i>Soulèvement</i></p> <p><i>fissures</i></p> <p><i>Aciers dénudés</i></p> <p><i>Corrosion des aciers</i></p>	<p>rupture de canalisations</p> <p>rupture de canalisations</p> <p>rupture de canalisations</p> <p>rupture de canalisations</p>	<p>Mesure topographique</p> <p>Mesure topographique</p> <p>Mesure topographique</p> <p>Mesure topographique</p>
		<p><b>Préparer la surface de contact</b></p> <p>préparer le sol de fondation</p>	<p>La fonction "<b>préparer la surface de contact</b>" est dégradée ou défaillante</p>	<p><b>Flux de charge :</b></p> <p><i>Effort sismique</i></p> <p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>Reconnaissance du sol insuffisante</i></p>	<p>Liquéfaction du sol</p> <p>Sol agressif par rapport au béton</p>	<p>rupture de canalisations</p>	<p>Mesure topographique</p>
		<p><b>Collecter les flux hydrauliques</b></p> <p>collecter les eaux de pluie autour de l'ouvrage</p> <p>collecter les eaux de pluie de la coupole</p>	<p>La fonction "<b>Collecter les flux hydrauliques</b>" est dégradée ou défaillante</p>	<p><b>Flux hydraulique</b></p> <p>Eau de pluie et de la neige</p> <p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>Absence de dispositif d'évacuation</i></p> <p><i>Dispositif d'évacuation sous dimensionné</i></p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>Dispositif d'évacuation mal entretenu</i></p>	<p>Stagnation</p> <p>affouillement</p>	<p><i>Inondation des fondation</i></p> <p>Cavité sous la fondation</p>	<p><i>Observation visuelle</i></p> <p><i>Observation visuelle</i></p>
11	Système de drainage	<p><b>Limiter les flux hydrauliques</b></p> <p>empêcher la remontée des eaux du sous sol en contact de la fondation</p>	<p>La fonction "<b>Limiter les flux hydrauliques</b>" est dégradée ou défaillante</p>	<p><b>Flux hydraulique</b></p> <p><i>Eau en sous sol</i></p> <p><b>Processus de conception - réalisation</b></p> <p><i>Absence de drain sous la fondation</i></p> <p><i>Composition du drain</i></p> <p><i>Drain sous dimensionné</i></p> <p><b>Etat intrinsèque du composant</b></p> <p><i>Drain colmaté</i></p>	<p>Sous pression</p> <p>basculement</p> <p>Soulèvement</p>	<p>inclinaison du réservoir</p> <p>ruine de l'ouvrage</p> <p>rupture de canalisations</p>	<p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p> <p>Observation visuelle</p>

## Annexe 3 : Tableau d'analyse fonctionnelle

N°	Composant	Fonctions
1	2	3
1	Coupole de couverture	<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b> résister aux surcharges d'exploitation d'entretien Q résister aux surcharges climatiques de neige N résister aux charges permanentes G</p> <p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b> transmettre la composante verticale vers la paroi</p> <p><b>Limiter les flux hydrauliques</b> limiter l'infiltration de l'eau de pluie</p> <p><b>Collecter les flux hydrauliques</b> évacuer l'eau de ruissellement de la pluie et de la neige</p>
2	Ceinture supérieure	<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b> résister à l'effort de traction généré par la coupole</p> <p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b> transmettre la composante verticale vers la paroi</p> <p><b>Préparer la surface de contact</b> préparer la surface de contact de la coupole</p>
3	Paroi cylindrique	<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b> résister à la poussée hydrostatique transmise par l'eau de la cuve résister à la poussée hydrodynamique transmise par l'eau de la cuve</p> <p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b> transmettre le poids la coupole vers la ceinture intermédiaire transmettre le poids la ceinture supérieure vers la ceinture intermédiaire transmettre la surcharge d'exploitation de la coupole vers la ceinture intermédiaire transmettre la surcharge climatique de la coupole vers la ceinture intermédiaire</p> <p><b>Préparer la surface de contact</b> préparer la surface de contact de la ceinture supérieure préparer la surface de contact de l'enduit externe préparer la surface de contact de l'enduit interne étanche</p> <p><b>Limiter les flux hydrauliques</b> limiter les fuites d'eau à travers la paroi de la cuve vers l'extérieur</p>
4	Ceinture intermédiaire	<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b> résister à la poussée hydrostatique transmise par l'eau de la cuve</p> <p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b> transmettre le poids de la coupole vers le cône de réduction transmettre le poids de la ceinture supérieure vers le cône de réduction transmettre le poids de la paroi vers le cône de réduction transmettre la surcharge d'exploitation de la coupole vers le cône de réduction transmettre la surcharge climatique de la coupole vers le cône de réduction</p>

		<p><b>Préparer la surface de contact</b>  préparer la surface de contact avec la paroi cylindrique  préparer la surface de contact de l'enduit externe  préparer la surface de contact de l'enduit interne étanche</p> <p><b>Limiter les flux hydrauliques</b>  limiter les fuites d'eau à travers la ceinture intermédiaire de la cuve vers l'extérieur</p>
5	Cône de réduction	<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b>  résister à la poussée hydrostatique transmise par l'eau de la cuve  résister à l'effort de compression provenant de la ceinture intermédiaire</p> <p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b>  transmettre le poids de la coupole vers la ceinture inférieure  transmettre le poids de la ceinture supérieure vers la ceinture inférieure  transmettre le poids de la paroi vers la ceinture inférieure  transmettre le poids de la ceinture intermédiaire vers la ceinture inférieure  transmettre la surcharge d'exploitation de la coupole vers la ceinture inférieure  transmettre la surcharge climatique de la coupole vers la ceinture inférieure</p> <p><b>Préparer la surface de contact</b>  préparer la surface de contact avec la ceinture intermédiaire  préparer la surface de contact de l'enduit externe  préparer la surface de contact de l'enduit interne étanche</p> <p><b>Limiter les flux hydrauliques</b>  limiter les fuites d'eau à travers le cône de réduction</p>
6	Ceinture inférieure	<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b>  résister au poids de l'eau dans la cuve  résister à la composante horizontale de l'effort axial provenant du cône de réduction  résister à la composante horizontale de l'effort axial provenant de la coupole inférieure  résister à l'effort torsion induit par les résultantes provenant de la coupole et du cône</p> <p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b>  transmettre le poids de la coupole vers le support  transmettre le poids de la ceinture supérieure vers le support  transmettre le poids de la paroi vers le support  transmettre le poids de la ceinture intermédiaire vers le support  transmettre la surcharge d'exploitation de la coupole vers le support  transmettre la surcharge climatique de la coupole vers le support  transmettre le poids de la coupole inférieure vers le support  transmettre le poids de la cheminée intérieure vers le support  transmettre le poids de l'eau de la cuve vers le support</p> <p><b>Préparer la surface de contact</b>  préparer la surface de contact avec le cône de réduction  préparer la surface de contact avec la coupole inférieure  préparer la surface de contact de l'enduit externe  préparer la surface de contact de l'enduit interne étanche</p>

		<p><b>Limiter les flux hydrauliques</b> limiter les fuites d'eau à travers la ceinture inférieure</p>
7	Coupole inférieure	<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b> résister à la surcharge de l'eau dans la cuve résister à la charge de la cheminée intérieure résister à la charge de son propre poids</p> <p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b> Transmettre l'effort de compression axial de la coupole vers la ceinture inférieure transmettre le poids de la cheminée intérieure vers la ceinture inférieure</p> <p><b>Préparer la surface de contact</b> préparer la surface de contact avec la cheminée intérieure</p> <p>préparer la surface de contact de l'enduit interne étanche préparer la surface de contact des canalisation pass-mur</p> <p><b>Limiter les flux hydrauliques</b> limiter les fuites d'eau à travers la coupole inférieure</p>
8	Cheminée intérieure	<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b> résister à la poussée hydrostatique transmise par l'eau de la cuve</p> <p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b> transmettre le poids de la cheminée intérieure vers la coupole inférieure</p> <p><b>Préparer la surface de contact</b> préparer la surface de contact de l'enduit interne étanche</p> <p><b>Limiter les flux hydrauliques</b> limiter les fuites d'eau à travers la cheminée intérieure</p>
9	Support	<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b> résister à la sollicitation sismique horizontale résister à la surcharge d'exploitation de la coupole résister à la surcharge climatique de la coupole résister au poids de la coupole résister au poids de la ceinture supérieure résister au poids de la paroi résister au poids de la ceinture intermédiaire résister au poids du cône de réduction résister au poids de la coupole inférieure résister au poids de la cheminée intérieure résister au poids de l'eau de la cuve résister au poids de la ceinture inférieure résister au poids du support</p> <p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b> transmettre la surcharge d'exploitation de la coupole vers la fondation transmettre la surcharge climatique de la coupole vers la fondation transmettre le poids de la coupole vers la fondation transmettre le poids de la ceinture supérieure vers la fondation</p>

		<p>transmettre le poids de la paroi vers la fondation  transmettre le poids de la ceinture intermédiaire vers la fondation  transmettre le poids du cône de réduction vers la fondation  transmettre le poids de la coupole inférieure vers la fondation  transmettre le poids de la cheminée intérieure vers la fondation  transmettre le poids de l'eau de la cuve vers la fondation  transmettre l'effort sismique horizontal vers la fondation</p> <p><b>Préparer la surface de contact</b>  préparer la surface de contact avec la ceinture inférieure  préparer la surface de contact de l'enduit externe</p>
10	Fondation	<p><b>Résister aux sollicitations mécaniques</b>  résister à la sollicitation sismique horizontale  résister à la charge verticale transmise par la superstructure y compris l'eau</p> <p><b>Transmettre les sollicitations mécaniques</b>  Transmettre le poids de toute la structure vers le sol de fondation</p> <p><b>Préparer la surface de contact</b>  préparer le sol de fondation</p>
11	Système drainage	<p><b>Collecter les flux hydrauliques</b>  collecter les eaux de pluie autour de l'ouvrage  collecter les eaux de pluie de la coupole</p> <p><b>Limiter les flux hydrauliques</b>  empêcher la remontée des eaux du sous sol en contact de la fondation</p>