

# MODÉLISATION DE L'ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DE LA VULNÉRABILITÉ D'UN RÉSERVOIR D'EAU EN BÉTON

## MODELLING OF EVOLUTION IN TIME OF CONCRETE WATER TANK VULNERABILITY

---

**Amar ALICHE, Hocine HAMMOUM, Karima BOUZELHA, Naceur Eddine HANNACHI**  
Département de génie civil, Université Mouloud Mammeri, 15000 Tizi Ouzou, Algeria  
hammoum\_hoc@yahoo.fr

---

### CONTEXTE

L'article qui est proposé ici s'intéresse à la modélisation numérique de l'évolution dans le temps de l'indice de vulnérabilité ( $I_v$ ) d'un réservoir, qui désigne le niveau de dégradation et de vieillissement, connu en certains points correspondant à des âges ( $t$ ) différents de son expertise. L'objectif est la construction d'une fonction approchée  $I_v(t)$  qui va traduire l'évolution de la vulnérabilité au cours de son cycle de vie. Deux méthodes numériques sont utilisées, l'approximation par éléments finis et l'approche exponentielle. Le travail qui est présenté dans cet article, à l'instar des précédents articles publiés dans les Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, s'inscrit clairement dans un environnement pratique de la profession d'expert par le fait que la contribution a un caractère applicatif. Cet article est donc une continuité des précédents.

### 1. INTRODUCTION

De nombreuses méthodes ont été développées par plusieurs auteurs destinées à des gestionnaires de parcs d'ouvrages pour évaluer leur état et leur performance structurale, pour faire des analyses des risques ou des programmation d'actions de maintenance aussi bien pour les barrages, les digues de protection contre les inondations, les retenues collinaires, les ouvrages portuaires et les bâtiments. Peyras et al. [21,22] dans leurs travaux de recherche, se sont intéressés au développement des méthodes de diagnostic et d'analyse des risques liés au vieillissement des barrages, en se basant sur une approche par expertise. Le premier résultat de ces études concerne la modélisation des scénarios de vieillissement pour l'application de l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité). Les travaux de Curt et



al. [5] ont portés sur le développement de méthodes et d'outils d'aide à l'évaluation des performances des barrages avec prise en compte des incertitudes liées aux différentes variables impliquées dans l'étude de ces systèmes complexes. L'approche développée est basée sur la théorie des possibilités qui permet l'agrégation de données hétéro-

gènes issues des inspections visuelles, de l'auscultation de l'ouvrage (évaluation par des capteurs, mesures physiques), des données de conception et de réalisation (modèles mathématiques, etc.). Ces différentes informations incertaines utilisées par les experts pour caractériser un ouvrage, sont traitées et agrégées pour l'évaluation glo-

bale des barrages. Dans l'étude du comportement des digues de protection contre les inondations Serre et al. [26,27,28,29] se sont intéressés au développement d'outils d'aide à la gestion des digues, permettant d'établir des priorités dans les actions d'entretien et de maintenance à réaliser sur l'ensemble d'un parc donné. Ainsi, ils ont proposé des méthodes d'évaluation de la performance de ce parc à travers des indicateurs de performance. Cette démarche leur a permis d'établir une synthèse des mécanismes de rupture des digues en remblais, qui représente la majorité du parc de digues en France. Pour les structures portuaires, Boero et al. [3] ont mis en œuvre une méthodologie d'analyse des risques afin d'optimiser la gestion de ce genre d'ouvrage. Les gestionnaires des installations portuaires sont tenus de planifier les opérations de maintenance et d'entretien sur un patrimoine hétérogène, comprenant un grand nombre de structures avec différentes fonctions, afin de garantir l'exploitation de ces ouvrages de plus en plus vieillissants (quais, formes de radoub, digues...) dans des conditions de sécurité, de disponibilité et avec des coûts maîtrisés. L'approche consiste à identifier et à hiérarchiser les modes de défaillance en fonction de leur criticité. Cette analyse quantitative des risques détermine, d'une manière plus fine, la probabilité des modes de défaillance les plus critiques. Dans le domaine du bâtiment, Boukri et al. [4] ont développé une méthode d'évaluation de l'index de vulnérabilité sismique  $I_v$ . L'évaluation de cet index permet la classification de ces ouvrages en trois classes de vulnérabilité sismique : bonne, moyenne et mauvaise. Sur cette base, Belheouane [2] a ensuite développé un code de calcul en langage Delphi pour le diagnostic des bâtiments existants en béton armé, par une analyse de leur vulnérabilité sismique. Le développement de cette méthode est basé sur l'influence des éléments structuraux et non structuraux sur la réponse sismique de la construction. Parmi les méthodes expertes, nous pouvons également citer la méthode italienne GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti) utilisée pour évaluer un parc de bâtiments en Italie. Elle a aussi été modifiée et adaptée pour évaluer la vulnérabilité sismique des bâtiments avec ossature en béton au nord du Maroc [1]. Quant aux bâtiments en béton anciens, pour lequel il y a lieu de s'assurer de leur performance structurale et de qualifier leur niveau de dégradation, plusieurs guides ont été établis par des institutions scientifiques et professionnelles. On peut citer notamment l'Organisation Internationale ISO sur la maintenance et les réparations des structures en béton et sur l'évaluation des structures existantes, l'American Concrete Institute (ACI) avec plusieurs guides sur la surveillance, l'évaluation des résistances et la prévision des travaux, l'American Society of Civil Engineering (ASCE), l'European Standards and project manuals of Building Assessment avec les normes EN-1504, CONTECVET et SAMCO (Structural Assessment Monitoring and Control Network) et le Handbook sur la réparation et la réhabilitation des bâtiments en béton armé du gouvernement Indien (CPWD, 2002). Enfin, dans le domaine des réservoirs de stockage, Mathieu [19,20] au Cemagref (Aix-en-Provence) a mené des recherches depuis les années 90 et a proposé des méthodes

ayant pour but d'indiquer les ouvrages qui ont un environnement sensible, un caractère stratégique important et ceux qui présentent ou non des désordres structuraux visuels de gravité variable. En s'inspirant des travaux de Mathieu, Hammoum et al. [14] ont proposé une nouvelle méthodologie de diagnostic et d'analyse de la vulnérabilité des réservoirs de stockage en béton à certains aléas naturels (neige, vent, séisme...), par la détermination d'un indice de vulnérabilité  $I_v$ . Cette méthode sera exposée dans la section 2. L'application de cette méthode à l'échelle d'un parc a montré qu'un réservoir peut avoir plusieurs indices de vulnérabilité  $I_v$  durant son cycle de vie. Il serait alors intéressant de modéliser cette loi de comportement de vulnérabilité liée au vieillissement dans le temps.

Si ce réservoir est expertisé chaque année, ce n'est qu'au bout d'une trentaine d'années d'expertise, que l'analyse sera représentative, et que nous pourrions avoir suffisamment de données dans la base de connaissances. Or, le problème d'ordre pratique qui risque de surgir pour un gestionnaire, à l'échelle d'une vie professionnelle, est que nous ne pouvons attendre une aussi longue période (trente ans) pour enfin avoir la loi de comportement de vulnérabilité liée au vieillissement de ce réservoir. Cette démarche est alors à écarter. La solution de remplacement, qui nous semble intéressante à prospector, et qui fait l'objet de cet article, est la suivante. Considérant que l'analyse par expertise est faite sur treize paramètres, nous pourrions prendre à l'échelle d'un parc une trentaine d'individus pour que l'analyse soit représentative et qui partageraient plus de la moitié des paramètres en commun (même notes partielles) mais qui seraient d'âges différents, afin de simuler les différents âges sur un cycle de vie. Puis, en section 3, en nous appuyant sur une méthode d'analyse numérique et en considérant que la fonction de vulnérabilité liée au vieillissement est connue en certains points, c'est-à-dire à des âges différents, nous procédons à la construction de la fonction approchée  $I_v(t)$ .

## 2. MÉTHODE D'ÉVALUATION DE L'INDICE DE VULNÉRABILITÉ $I_v$

Hammoum et al. [13] se sont intéressés à l'évaluation de la vulnérabilité des réservoirs en béton aux aléas naturels (séisme, etc.) par la détermination d'un indice  $I_v$ , dont le calcul fait intervenir treize (13) paramètres influents pour trois types d'analyses (environnementale, structurale et fonctionnelle). Le détail de cette méthode appliquée à un exemple pratique a déjà fait l'objet d'une publication dans un précédent numéro des annales [14].

Cette méthode a été expérimentée avec succès à l'échelle réelle sur un parc de 42 réservoirs circulaires en béton, que nous avons expertisé dans la wilaya de Tizi-Ouzou (Nord de l'Algérie). Cette région est classée zone de moyenne sismicité (zone IIa) par le Règlement Parasismique Algérien (RPA 2003) [9]. Selon le Règlement Neige et Vent (RNV 1999) [10], la région est classée zone neige A et zone de vent I. L'indice de vulnérabilité  $I_v$  est déterminé, pour chaque réservoir, à partir des fiches technique que



nous avons élaboré et renseigné lors de notre expertise. Nous donnons au tableau 1, à titre d'exemple, l'évaluation de l'indice de vulnérabilité  $I_v$  du réservoir Touares mis en service en 1965, implanté au chef-lieu de Draa Ben Kheda (Algérie).

Par un procédé analogue, nous avons calculé pour chaque réservoir du parc l'indice de vulnérabilité obtenu au jour de l'expertise, ainsi que l'indice simulé au jour de sa mise en service. Les résultats de ces calculs sont consignés dans le tableau 2. A travers ces résultats, on montre que l'indice de vulnérabilité  $I_v$  évolue durant le cycle de vie du réservoir. Ainsi, si nous considérons que  $I_{v0}$  est l'indice de vulnérabilité à la mise en service, au jour de l'expertise à un instant  $t_i$  de son cycle de vie, cet indice devient  $I_{vi}$  tel que  $I_{vi} > I_{v0}$ . Si bien que son état de dégradation et/ou de vieillissement, atteint dans le temps, va le rendre plus vulnérable aux aléas naturels.

### 3. MODÉLISATION DANS LE TEMPS DE L'INDICE DE VULNÉRABILITÉ $I_v(t)$

Nous avons vu, à la section précédente, qu'un réservoir aura plusieurs indices de vulnérabilité  $I_v$ , durant son cycle de vie, avec  $I_v$  croissant. Ceci nous amène à proposer une fonction approchée  $I_v(t)$ , qui traduit l'évolution de l'indice de vulnérabilité lié au vieillissement de ces ouvrages dans le temps.

En nous appuyant sur une méthode d'analyse numérique (approximation par les éléments finis), nous considérerons que la fonction de vieillissement est connue en certains points à des âges différents.

Comme chaque réservoir a un indice de vulnérabilité  $I_{v0}$  différent d'un autre à sa mise en service (annexe), il convient alors de construire une fonction approchée  $\Delta I_v(t)$ , sur le parc de réservoirs considéré, qui représente la varia-

Évaluation	Critère de notation	Note élémentaire	Nei	Coefficient de pondération		Pi	Nei.Pi
Environnementale	Implantation de l'ouvrage	Montagne	1.00	Paramètre hydraulique	Bande nord centre	3.00	3.00
	Zone sismique	Zone IIa	2.00	Site d'implantation	Milieu urbain	4.00	8.00
	Type de sol	sol meuble	3.00	Effet du site	Risque de glissement	4.00	12.00
	Zone de neige	Zone A	4.00	Forme de toiture	Toiture en forme de voute	1.00	4.00
	Zone du vent	Zone I	2.00	Hauteur	$P_h = 0,75,$	2.75	5.50
				Catégorie du terrain	$P_c = 0,50,$		
				Site topographique	$P_t = 0,75,$		
				État de surface	$P_s = 0,75.$		
Structurelle	Type de réservoir	Posé au sol	3.00	Matériaux	Béton armé	3.00	9.00
	Type de fondation	Radier	2.00	État de tassement	Pas de tassement	1.00	2.00
	Mode de l'étanchéité de la paroi	Classe B	2.00	État de l'étanchéité	Étanchéité Moyennement satisfaisante.	3.00	6.00
	Type de couverture	Revêtement par Enduit	2.00	État de l'étanchéité	Peu de désordres visibles, assez satisfaisante	2.00	4.00
	Indice de gravité	Niveau 3	3.00	Âge de l'ouvrage	Age de l'ouvrage : 49 ans	4.00	12.00
Fonctionnelle	Rôle du réservoir	Distribution	2.00	État d'accessibilité de l'ouvrage	Accessibilité par route revêtue	1.00	2.00
	Importance de l'ouvrage	Pour bâtiments du groupe 1B	3.00	Capacité de l'ouvrage	Capacité : 1000 m <sup>3</sup>	2.00	6.00
	Fréquence de l'entretien	Annuelle	4.00			4.00	4.00
				Indice de vulnérabilité $I_v$			77.50

Tableau 1 : Évaluation de l'indice de vulnérabilité  $I_v$  du réservoir Touares.

tion de l'indice de vulnérabilité entre l'instant de mise en service du réservoir et un instant  $t$  de son cycle de vie ( $I_{vi} - I_{v0}$ ).

La modélisation de la loi d'évolution de la vulnérabilité des réservoirs en béton a pour objectif de prédire le niveau de vulnérabilité lié au vieillissement pouvant survenir à grande échelle dans ces ouvrages durant leur cycle de vie. Dans une première étape, nous procéderons à une modélisation par éléments finis sur le domaine (intervalle de temps) où cet indice de vulnérabilité a été quantifié par la méthode exposée en section 2, et qui a donné lieu à des valeurs connues issues de l'expertise. Dans une deuxième étape, nous chercherons à modéliser l'évolution de l'indice de vulnérabilité dans le domaine où cet indice de vulnérabilité est inconnu en faisant appel à un modèle d'extrapolation.

Parmi les réservoirs du parc expertisé (Annexe), nous avons trié et choisi les ouvrages qui partageaient en commun plus de la moitié des 13 paramètres d'analyse présentés dans le tableau 1, mais ayant des âges différents, ceci afin de simuler l'évolution de la vulnérabilité lié au vieillissement dans le cycle de vie d'un réservoir type du parc expertisé.

L'idée est de calculer pour chaque réservoir sélectionné du parc, la variation de son indice de vulnérabilité  $\Delta I_{vi}$  à un instant  $t_i$ , considéré entre le niveau de vulnérabilité  $I_{v0}$  à la date de sa mise en service  $t_0$  et le niveau de vulnérabilité  $I_{vi}$  au jour de l'expertise à un instant  $t_i$ , qui se traduit par cette relation :

$$\Delta I_{vi} = I_{vi} - I_{v0} \quad (2)$$

Les résultats de l'évolution de la variation de l'indice de vulnérabilité dans le temps pour un réservoir type du parc de Tizi Ouzou sont présentés dans le tableau 2.

### 3.1. Évolution de $I_v(t)$ dans le domaine connu

#### 3.1.1. Approche par approximation nodale

Dans cette section, nous verrons que nous pouvons approximer cette fonction inconnue de l'indice de vulnérabilité lié au vieillissement par une fonction approchée  $\Delta I_v(t)$ , sur tout le domaine d'étude  $t \in [0, 49]$ , construite sur la base des fonctions polynomiales linéairement indépendantes.

$$\Delta I_v(t) = \alpha_1 + \alpha_2 t + \alpha_3 t^2 + \dots + \alpha_n t^{n-1} \quad (3)$$

Nous définissons dans le tableau 3, la géométrie du domaine d'étude.

Domaine complet	Nœuds	Coordonnées nodales (ans)	$I_{vi}$
$0 < t < 49$	1	0	0.00
	2	2	1.00
	3	4	2.00
	4	6	2.50
	5	10	5.50
	6	15	6.00
	7	18	7.00
	8	26	9.00
	9	29	10.00
	10	30	10.50
	11	34	11.00
	12	38	13.00
	13	39	13.50
	14	42	15.00
	15	49	17.00

Tableau 3 : Identification du domaine.

N°	Lieu-Dit	Année de mise en service	Année d'expertise	Age de l'ouvrage ( $t_i$ )	$I_{v0}$	$I_{vi}$	$I_{vi}$
01	Taghanimth	2014	2014	0	47.50	47.50	0.00
02	Sidi Namane (SR2)	2012	2014	2	53.50	54.50	1.00
03	Mouldiouane Zone	2010	2014	4	49.50	51.50	2.00
04	Megdoule 1	2008	2014	6	54.00	56.50	2.50
05	Taksebt	2000	2010	10	43.00	48.50	5.50
06	Sidi Namane (SR1)	1999	2014	15	53.50	59.50	6.00
07	Behalil 1	1996	2014	18	46.00	53.00	7.00
08	Kaf Laagab	1988	2014	26	56.00	65.00	9.00
09	Tighilt Tiguerfiouine	1985	2014	29	56.00	66.00	10.00
10	Herrouka 2	1984	2014	30	46.00	56.50	10.50
11	Touares 2	1980	2014	34	61.00	72.00	11.00
12	Taghanimth	1972	2010	38	47.50	60.50	13.00
13	Mekla Chef-Lieu (SR2)	1975	2014	39	50.50	64.00	13.50
14	Herrouka 1	1972	2014	42	48.50	63.50	15.00
15	Touares 1	1965	2014	49	60.50	77.50	17.00

Tableau 2 : Évolution de la variation de l'indice de vulnérabilité d'un réservoir type en fonction du temps.

L'approximation nodale sur le domaine  $t \in [0,49]$  fait intervenir toutes les variables nodales attachées aux nœuds situés sur le domaine en question et sur sa frontière, soit un total de 15 nœuds. Ceci nous amène à écrire un polynôme de degré 14 sous la forme suivante [17] :

$$\Delta I_v(t) = \alpha_1 + \alpha_2 t + \alpha_3 t^2 + \dots + \alpha_{13} t^{12} + \alpha_{14} t^{13} + \alpha_{15} t^{14} \quad (4)$$

que nous pouvons écrire sous forme matricielle comme suit :

$$\Delta I_v(t) = \langle 1, t, t^2, \dots, t^{12}, t^{13}, t^{14} \rangle \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \vdots \\ \alpha_{14} \\ \alpha_{15} \end{Bmatrix} = \langle P(t) \rangle \{ \alpha \} \quad (5)$$

où :

$\langle \rangle$  et  $\{ \}$  désignent respectivement un vecteur ligne et un vecteur colonne.

Les coefficients  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{15}$  sont les paramètres de l'approximation. La fonction approchée  $\Delta I_v(t)$  coïncide avec les valeurs exactes  $\Delta I_i$  aux 15 points  $t_i$  appelés nœuds.

Nous pouvons décrire  $\Omega \in [0,49]$  le domaine sous forme matricielle de la manière suivante (voir formule 6 ci-dessous).

ou d'une manière plus compacte :

$$[A] \cdot \{ \alpha \} = \{ \Delta I_v \} \quad (7)$$

Nous déduisons alors :

$$\{ \alpha \} = [A]^{-1} \cdot \{ \Delta I_v \} \quad (8)$$

Enfin, nous représentons dans la figure 1, l'évolution de l'indice de vulnérabilité du réservoir Touares, implanté dans la Daïra de Draa Ben Kheda (Tizi-Ouzou, Algérie) en fonction de son âge, évalué en utilisant l'approche par approximation nodale. À sa mise en service en 1965, cet ouvrage possédait un indice de vulnérabilité  $I_{v0} = 60.50$ . L'ouvrage a fait l'objet d'une expertise en 2014, soit 49 ans après sa mise en service, et a été classé  $I_v = 77.50$ . L'évolution de l'indice  $I_v(t)$  à l'intérieur de cet intervalle est donnée dans la figure 1.

Nous constatons une croissance brusque survenue vers la fin du domaine d'étude. Ce phénomène d'instabilité, qui n'a aucun sens physique, est lié au nombre très important de points  $t_i$  (points expertisés) qui ont aboutis à un polynôme de degré très élevé [17]. Pour éviter ce genre de phénomène, nous allons construire la fonction  $I_v(t)$  par morceaux (en sous domaines) dans la section qui va suivre.

### 3.1.2. Approche par approximation par éléments finis linéaire

Le principe d'utilisation de la méthode d'approximation repose sur la possibilité de maîtriser le domaine d'étude, à partir de sa discrétisation en un nombre fini de sous domaines (figure 2), sur lesquels la construction de la fonction  $\Delta I_v(t)$  est simplifiée. Dans une première étape nous procédons à la construction de la fonction approchée  $\Delta I_v(t)$ , qui est connue en certains points (nœuds) [16]. Nous définissons dans le tableau 5, la géométrie des éléments ainsi que les sous domaines d'étude :

$$\begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & \cdot & \cdot & \cdot & t_1^{14} \\ 1 & t_2 & t_2^2 & \cdot & \cdot & \cdot & t_2^{14} \\ 1 & t_3 & t_3^2 & \cdot & \cdot & \cdot & t_3^{14} \\ 1 & t_4 & t_4^2 & \cdot & \cdot & \cdot & t_4^{14} \\ 1 & t_5 & t_5^2 & \cdot & \cdot & \cdot & t_5^{14} \\ 1 & t_6 & t_6^2 & \cdot & \cdot & \cdot & t_6^{14} \\ 1 & t_7 & t_7^2 & \cdot & \cdot & \cdot & t_7^{14} \\ 1 & t_8 & t_8^2 & \cdot & \cdot & \cdot & t_8^{14} \\ 1 & t_9 & t_9^2 & \cdot & \cdot & \cdot & t_9^{14} \\ 1 & t_{10} & t_{10}^2 & \cdot & \cdot & \cdot & t_{10}^{14} \\ 1 & t_{11} & t_{11}^2 & \cdot & \cdot & \cdot & t_{11}^{14} \\ 1 & t_{12} & t_{12}^2 & \cdot & \cdot & \cdot & t_{12}^{14} \\ 1 & t_{13} & t_{13}^2 & \cdot & \cdot & \cdot & t_{13}^{14} \\ 1 & t_{14} & t_{14}^2 & \cdot & \cdot & \cdot & t_{14}^{14} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \\ \alpha_7 \\ \alpha_8 \\ \alpha_9 \\ \alpha_{10} \\ \alpha_{11} \\ \alpha_{12} \\ \alpha_{13} \\ \alpha_{14} \\ \alpha_{15} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta I_{v1} \\ \Delta I_{v2} \\ \Delta I_{v3} \\ \Delta I_{v4} \\ \Delta I_{v5} \\ \Delta I_{v6} \\ \Delta I_{v7} \\ \Delta I_{v8} \\ \Delta I_{v9} \\ \Delta I_{v10} \\ \Delta I_{v11} \\ \Delta I_{v12} \\ \Delta I_{v13} \\ \Delta I_{v14} \\ \Delta I_{v15} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Paramètre de l'approximation	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$	$\alpha_8$	$\alpha_9$	$\alpha_{10}$	$\alpha_{11}$	$\alpha_{12}$	$\alpha_{13}$	$\alpha_{14}$	$\alpha_{15}$
Valeur	0	-4.7 $10^{-1}$	-4.6 $10^{-1}$	5.6 $10^{-1}$	-2.6 $10^{-1}$	6.2 $10^{-2}$	-8.9 $10^{-3}$	-8.1 $10^{-4}$	-5 $10^{-5}$	2.1 $10^{-6}$	-6.2 $10^{-8}$	1.2 $10^{-9}$	-1.5 $10^{-11}$	1.1 $10^{-13}$	3.9 $10^{-16}$

**Tableau 4 : Valeurs des paramètres  $\alpha_i$  de l'approximation nodale.**

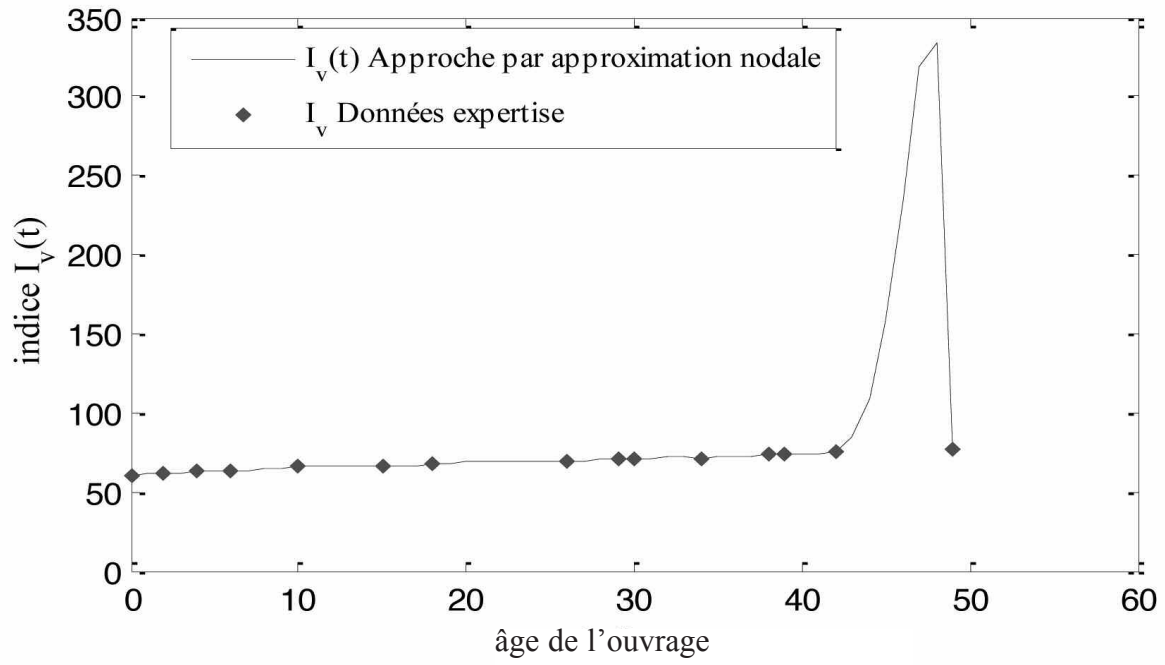


Figure 1 : Évolution de l'indice de vulnérabilité du réservoir Touares.

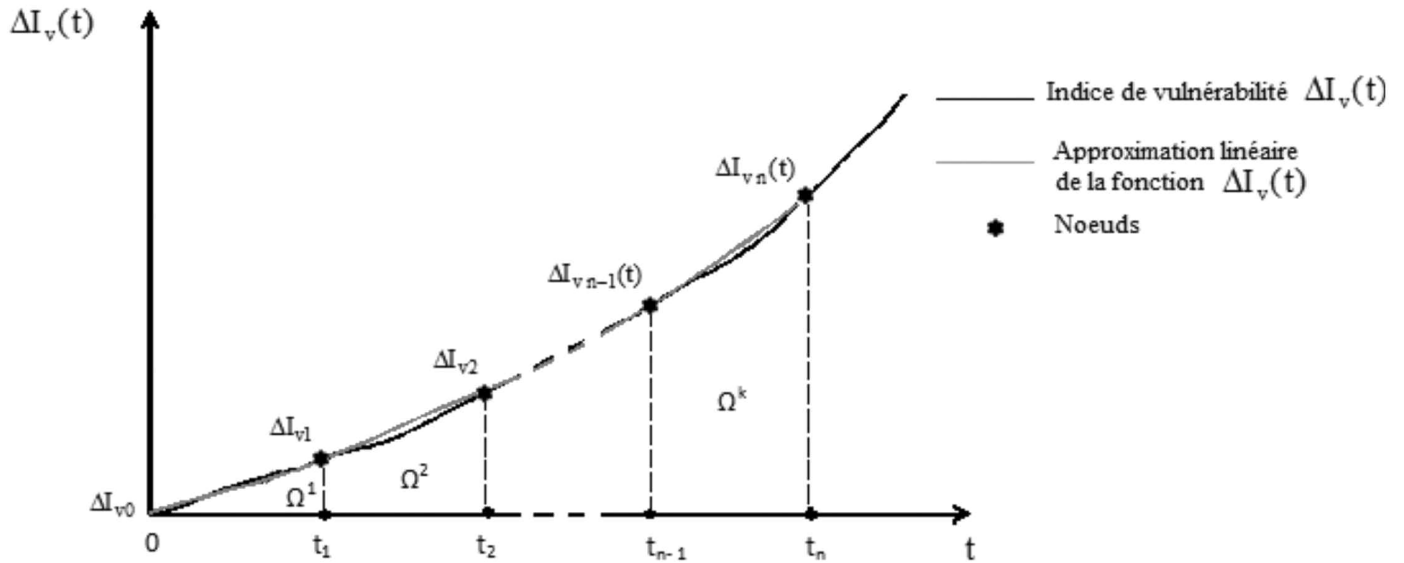


Figure 2 : Discretisation en éléments finis de la fonction dans les sous domaines.

Pour le sous domaine  $\Omega^1$ , la fonction approchée peut être approximée par une fonction polynomiale du premier degré, qui peut s'écrire [16]:

$$\Delta I_v^1(t) = \alpha_1 + \alpha_2 t \quad (9)$$

que nous pouvons écrire sous forme matricielle :

$$\Delta I_v^1(t) = \langle 1, t \rangle \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{Bmatrix} = \langle P(t) \rangle \{ \alpha \} \quad (10)$$

Les coefficients  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  sont les paramètres de l'approximation. La fonction approchée  $\Delta I_v^1(t)$  coïncide avec

la fonction exacte  $\Delta I_v(t)$  aux 2 points  $t_1$  et  $t_2$  appelés nœuds.

Nous pouvons écrire pour le premier sous domaine  $\Omega^1$ :

$$\Delta I_v^1(t_1) = \alpha_1 + \alpha_2 t_1 = \Delta I_{v1} \quad (11)$$

$$\Delta I_v^1(t_2) = \alpha_1 + \alpha_2 t_2 = \Delta I_{v2}$$

que nous pouvons réécrire sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} 1 & t_1 \\ 1 & t_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta I_{v1} \\ \Delta I_{v2} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

Domaine complet	éléments	Sous domaine	Nœuds	Coordonnées nodales (ans)	$I_{vi}$
<b>0 &lt; t &lt; 49</b>	1	$\Omega^1$	1	0	0.0
			2	2	1.0
	2	$\Omega^2$	2	2	1.0
			3	4	2.0
	3	$\Omega^3$	3	4	2.0
			4	6	2.5
	4	$\Omega^4$	4	6	2.5
			5	10	5.5
	5	$\Omega^5$	5	10	5.5
			6	15	6.0
	6	$\Omega^6$	6	15	6.0
			7	18	7.0
	7	$\Omega^7$	7	18	7.0
			8	26	9.0
	8	$\Omega^8$	8	26	9.0
			9	29	10.0
	9	$\Omega^9$	9	29	10.0
			10	30	10.5
	10	$\Omega^{10}$	10	30	10.5
			11	34	11.0
	11	$\Omega^{11}$	11	34	11.0
			12	38	13.0
	12	$\Omega^{12}$	12	38	13.0
			13	39	13.5
	13	$\Omega^{13}$	13	39	13.5
			14	42	15.0
	14	$\Omega^{14}$	14	42	15.0
			15	49	17.0

Tableau 5 : Identification des sous-domaines.

ou d'une manière plus compacte

$$[A] \cdot \{\alpha\} = \{\Delta I_v\} \quad (13)$$

Nous déduisons alors :

$$\{\alpha\} = [A]^{-1} \cdot \{\Delta I_v\} \quad (14)$$

ou encore pour le sous domaine  $\Omega^1$

$$\begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 \\ -0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

La fonction approchée  $\Delta I_v(t)$  pour le sous domaine  $\Omega^1$  s'écrit alors :

$$\Delta I_v^1(t) = 0.50 t \quad (16)$$

En procédant de la même manière que pour le sous domaine  $\Omega^1$ , nous pouvons facilement déduire les fonctions approchées pour les sous domaines  $\Omega^2, \Omega^3, \dots$  et  $\Omega^{14}$ .

Il vient alors :



$$\Delta I_v(t) = \begin{cases} \Delta I_v^1(t) = 0.50 t & \text{Pour } 0 < t < 2 \\ \Delta I_v^2(t) = 0.50 t & \text{Pour } 2 < t < 4 \\ \Delta I_v^3(t) = 0.25 t + 1 & \text{Pour } 4 < t < 6 \\ \Delta I_v^4(t) = 0.75 t - 2 & \text{Pour } 6 < t < 10 \\ \Delta I_v^5(t) = 0.10 t + 4.5 & \text{Pour } 10 < t < 15 \\ \Delta I_v^6(t) = 0.33 t + 1 & \text{Pour } 15 < t < 18 \\ \Delta I_v^7(t) = 0.25 t + 2.5 & \text{Pour } 18 < t < 26 \\ \Delta I_v^8(t) = 0.33 t + 0.33 & \text{Pour } 26 < t < 29 \\ \Delta I_v^9(t) = 0.50 t - 4.5 & \text{Pour } 29 < t < 30 \\ \Delta I_v^{10}(t) = 0.125 t + 6.75 & \text{Pour } 30 < t < 34 \\ \Delta I_v^{11}(t) = 0.5 t - 6 & \text{Pour } 34 < t < 38 \\ \Delta I_v^{12}(t) = 0.5 t - 6 & \text{Pour } 38 < t < 39 \\ \Delta I_v^{13}(t) = 0.5 t - 6 & \text{Pour } 39 < t < 42 \\ \Delta I_v^{14}(t) = 0.28 t + 3 & \text{Pour } 42 < t < 49 \end{cases} \quad (17)$$

Dans la figure 3, nous présentons sous forme graphique l'évolution de la variation du niveau de vulnérabilité d'un réservoir type du parc de Tizi-Ouzou. Dans l'approche par approximation par éléments finis, nous forçons la fonction approchée  $I_v(t)$  à avoir les mêmes valeurs que  $I_{vi}$  et  $I_{vi+1}$ , correspondants respectivement à la fonction exacte aux 2 points  $t_i$  et  $t_{i+1}$  appelés nœuds du sous domaine considéré  $[t_i, t_{i+1}]$ . Pour cette raison la courbe relie effectivement les points de l'expertise.

Nous procédons à la construction de la fonction  $I_v(t)$  de chaque réservoir, qui s'exprime comme étant la somme de la fonction approchée  $\Delta I_v(t)$  et de l'indice de vulnérabilité du réservoir considéré au jour de sa mise en service  $I_{v0}$  et qui s'écrit alors :

$$I_v(t) = I_{v0} + \Delta I_v(t) \quad (18)$$

Nous donnons à la figure 4, l'allure graphique de la fonction  $I_v(t)$  du réservoir Touares qui possédait un indice de vulnérabilité  $I_{v0}=60.50$  à sa mise en service en 1965. Ce réservoir a fait l'objet d'une expertise en 2014, soit 49 ans après sa mise en service, et a été classé  $I_v=77.50$  (Tab. 4).

### 3.2. Modèle d'extrapolation dans le domaine inconnu

#### 3.2.1. Choix du modèle d'extrapolation

Lorsque nous procédons à l'extrapolation des données observées d'un phénomène dans le futur, nous sommes en droit de s'interroger sur le choix du modèle à utiliser. Allons nous nous orienter vers un modèle avec un taux

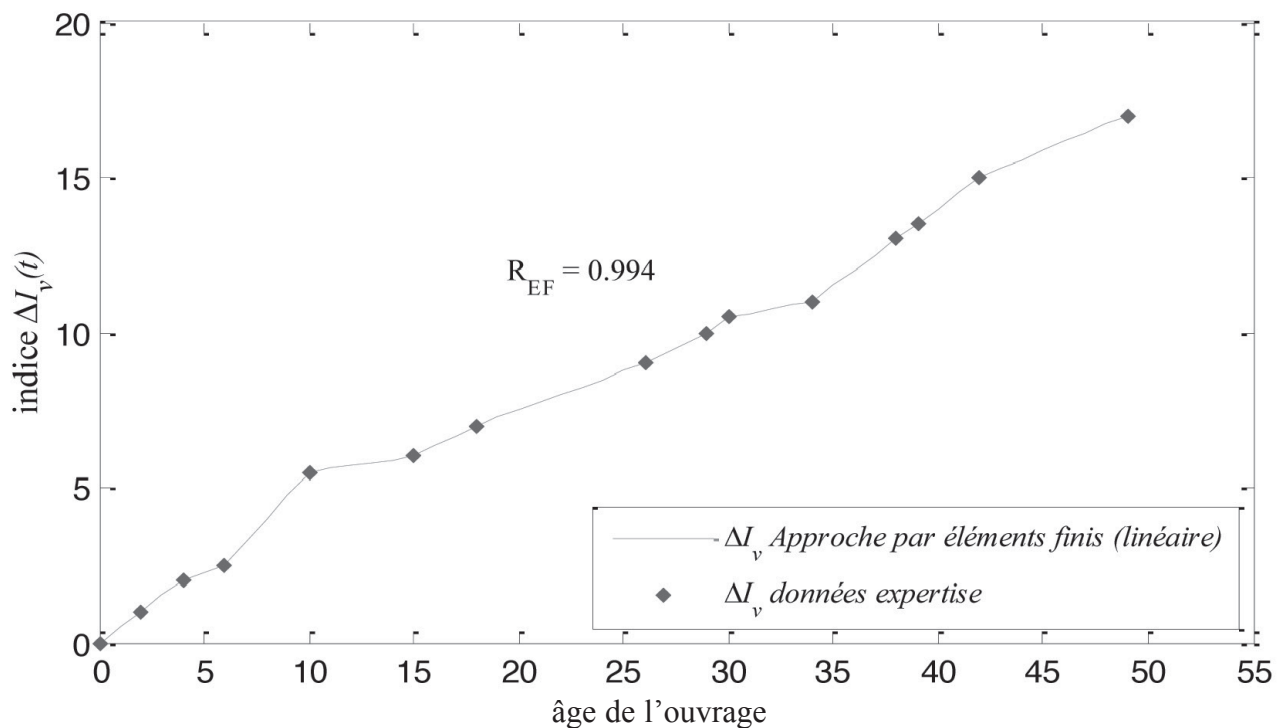


Figure 3 : Évolution de la variation de la vulnérabilité  $I_v(t)$  d'un réservoir type du parc de la wilaya de Tizi-Ouzou.

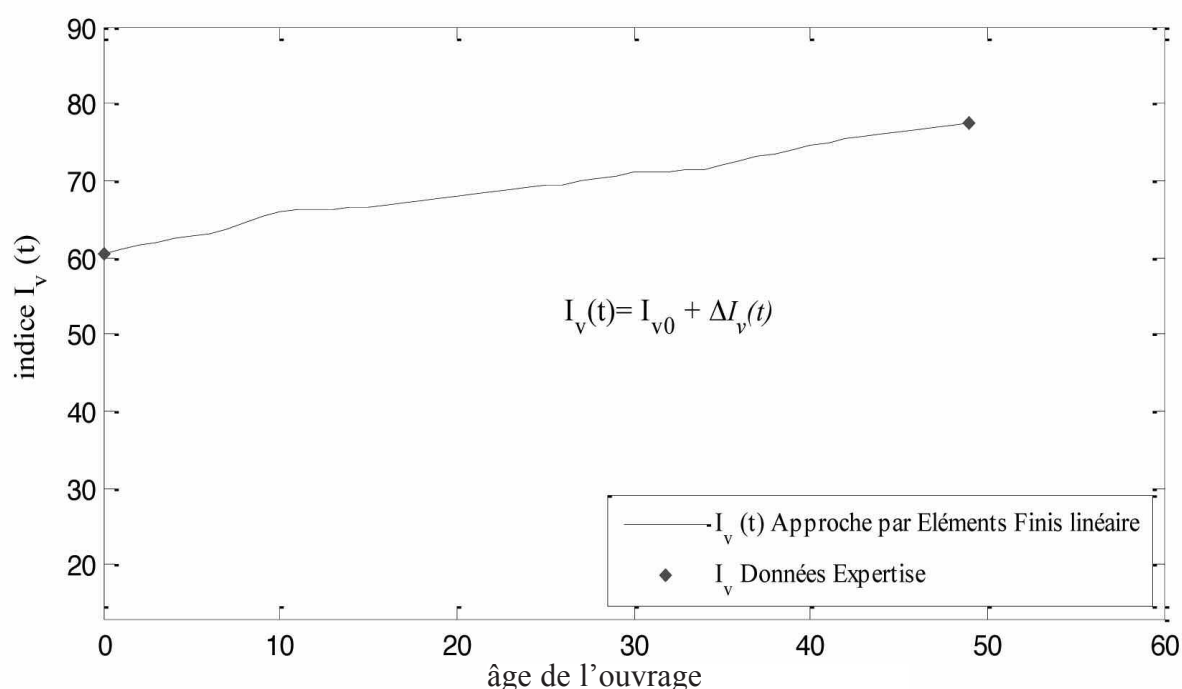


Figure 4 : Évolution de l'indice de vulnérabilité  $I_v(t)$  du réservoir Touares.

moyen annuel de croissance constant, appelé modèle exponentiel ou plutôt vers un modèle qui décrit une progression moyenne annuelle constante en valeur absolue appelé modèle polynomial qui se traduit par un ralentissement progressif du taux annuel ?

Toute tentative de détermination de la fonction en dehors du domaine d'étude (domaine d'interpolation) constitue une dangereuse extrapolation qui peut nous conduire à des estimations erronées et aberrantes, dus à l'instabilité des polynômes [7], car en dehors du domaine, la fonction est inconnue, donc non maîtrisée. L'utilisation d'un modèle polynomial, pour l'extrapolation des données, ne fournit des prévisions acceptables de l'évolution du phénomène observé que dans le domaine où il est établi, donc connu. Sans compter que si l'on augmentait l'ordre de l'interpolation, le polynôme risquerait de présenter un comportement fortement oscillatoire (appelé phénomène de Runge) qui n'est absolument pas admissible par rapport à la nature des variables et du problème traité dans notre cas [8,18] (voir figure 1).

Crémone [6] décrit certaines lois de dégradation dans le cycle de vie des structures de génie civil sur la base du phénomène étudié. Par exemple, cette dégradation peut être linéaire pour le phénomène de corrosion et propose une allure exponentielle pour décrire le phénomène de fatigue pendant le chargement répété, comme c'est le cas pour les réservoirs. 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 de service, en fonction des besoins de consommation des populations desservies.

Par ailleurs, dans le cas où les valeurs connues permettent d'imaginer que les rythmes de croissance passé (dans le domaine connu) peuvent se prolonger durablement, comme c'est le cas pour l'évolution de la vulnérabilité dans le cycle de vie d'un réservoir, il serait plus raisonnable d'opter pour un modèle exponentiel pour l'extrapolation du phénomène au-delà du domaine connu.

### 3.2.2. Approche par modèle exponentiel

Les fonctions exponentielles dans leurs principes ont permis de modéliser plusieurs phénomènes tels que l'évaluation des précipitations dans le domaine de l'hydrologie [23], de la biologie [24,7], de l'économie et de la démographie [30], dans lesquels la vitesse de croissance est proportionnelle à la taille de la population étudiée.

Le choix de faire une extrapolation des données pour représenter l'évolution de l'indice de vulnérabilité  $I_v(t)$  dans le temps par une loi exponentielle repose sur l'hypothèse selon laquelle la distribution des couples observés ( $I_v(t)$ ,  $t$ ) peut se prolonger durablement au vu de leur rythme de croissance dans le domaine connu.

En s'inspirant du modèle de l'accroissement démographique développé par Yusuf et al. [30], le modèle exponentiel suppose que la variation d'une fonction  $y(t)$  donnée est décrite par l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dy}{dt} = \mu \cdot y(t) \quad (19)$$

où  $y(t)$  représente l'effectif considéré à un instant  $t$  et  $dy$  la variation de la densité de l'effectif dans un laps de temps  $dt$ . Quant à  $\mu$ , il désigne la vitesse de croissance de  $y(t)$ .

Cette dernière équation différentielle admet une solution unique qui peut se mettre sous la forme.

$$y(t) = y_0 e^{\mu t} \quad (20)$$

La constante  $\mu$  peut être déterminée en supposant la condition initiale  $y(t=0)=y_0$ .

L'expression  $e^{\mu t}$  est croissante avec l'évolution du taux de croissance du phénomène étudié à chaque instant ( $t$ ). Elle est inférieure à 1 pour des taux de croissance négatifs, supérieure à 1 pour des taux positifs et égale 1 pour un taux nul.

L'équation (20) peut s'écrire aussi sous la forme :

$$\ln[y(t)] = \ln[y_0] + \mu \cdot t \quad (21)$$

Il vient :

$$\mu = \frac{\ln[y(t)] - \ln[y_0]}{t} \quad (22)$$

### 3.2.3. Extrapolation de la fonction $I_v(t)$

L'étude de l'indice de vulnérabilité lié au phénomène de vieillissement étudié dans notre travail, suppose que les réservoirs à leur mise en service ont déjà une certaine vulnérabilité  $I_{v0}$  [13] et tend à augmenter en fonction de l'âge des réservoirs. Le choix du modèle adopté en section (3.2.1) paraît pertinent pour la description de l'évolution du comportement au vieillissement de nos ouvrages. Ce modèle suppose que le démarrage de la croissance exponentielle se fait brutalement sans phase de transition [25] après la fin du dernier sous domaine (voir Tab. 8) étudié lors de l'interpolation par éléments finis.

La loi qui représente le comportement au vieillissement d'un réservoir en béton peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{d\Delta I_v(t)}{dt} = \mu \cdot \Delta I_v(t) \quad (23)$$

où  $\mu$  représente la vitesse de croissance de l'indice de vulnérabilité du réservoir.

Pour adapter les caractéristiques du modèle exponentiel au problème traité, nous procédons à un changement de variable en se basant sur l'évolution de l'indice  $I_v$  au niveau du dernier domaine  $\Omega^7$  où  $\in [39,49]$  adopté dans l'approximation par éléments finis en section (3.1.2). Pour cela, nous posons  $T = t - 39$ .

La relation (23) devient :

$$\frac{d\Delta I_v(T)}{dT} = \mu \cdot \Delta I_v(T) \quad (24)$$

La solution est de la forme :

$$\Delta I_v(T) = \Delta I_{v39} \cdot e^{\mu T} \quad (25)$$

Nous déduisons alors :

$$\mu = \frac{\ln[\Delta I_v(T)] - \ln[\Delta I_{v39}]}{T} \quad (26)$$

Le calcul du coefficient  $\mu$  est résumé dans le tableau 9.

t (Années)	T (Années)	$I_v$	
39	0	13.5	0.0231
49	10	17	

Tableau 6 : Évaluation du coefficient  $\mu$

La variation de l'indice de vulnérabilité des réservoirs du parc étudié en dehors du domaine connu s'écrit sous la forme :

$$\Delta I_v(T) = \Delta I_{v39} e^{0.0231 \cdot T} \quad (27)$$

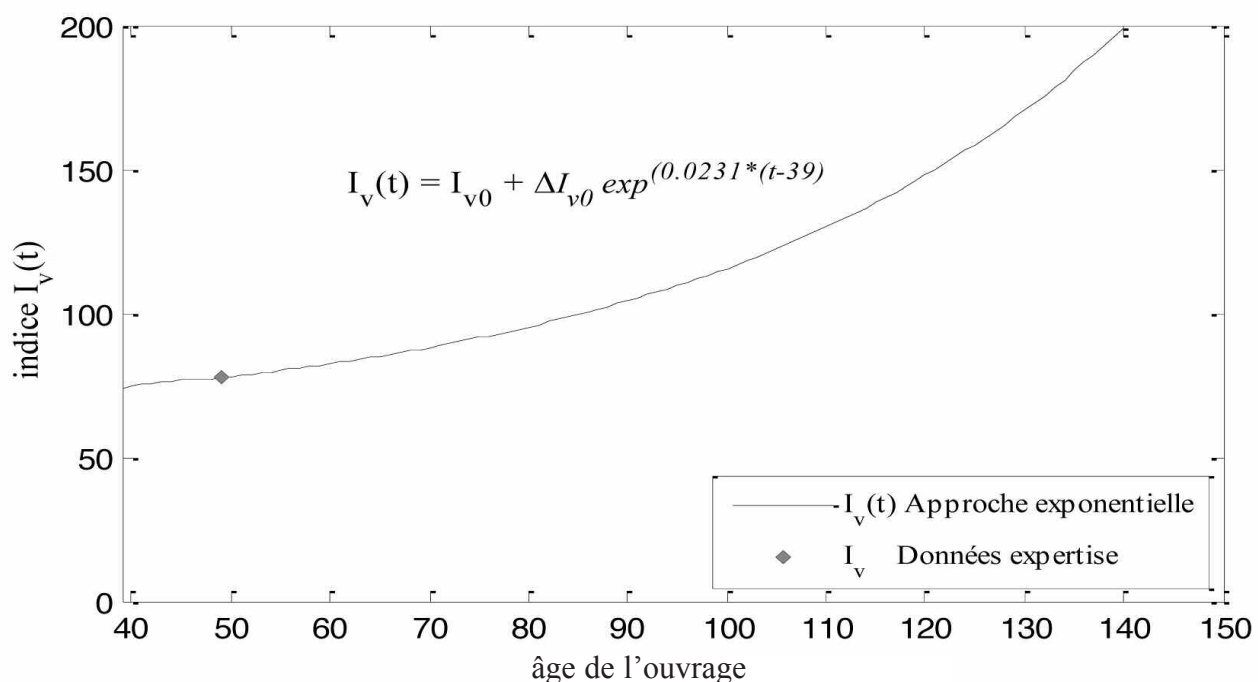


Figure 5 : Évolution de l'accroissement de l'indice  $I_v(t)$  d'un réservoir type par modèle exponentiel.

L'évolution de l'indice de vulnérabilité d'un réservoir du parc de la wilaya de Tizi-Ouzou dans son cycle de vie dans le domaine inconnu, est donnée par la formule suivante :

$$I_v(t) = I_{v0} + \Delta I_{v39} e^{0,0231 * (t-39)} \quad \text{Pour } t > 49 \quad (28)$$

Nous reprenons dans ce qui suit l'exemple du réservoir Touares, dont la loi d'évolution de l'indice de vulnérabilité est approximée dans le domaine connu par éléments finis (fig. 4). L'évolution de son indice de vulnérabilité dans le domaine inconnu (ie, au delà de l'année 2014), a été approchée par le modèle exponentiel, comme présenté plus haut. Dans l'illustration graphique (Fig. 6), nous superposons la courbe d'évolution de l'indice  $I_v(t)$  du réservoir Touares avec les différents niveaux de vulnérabilité que le réservoir peut atteindre durant son cycle de vie. Nous constatons qu'à la mise en service de cet ouvrage, il était au niveau orange 1, il atteint le niveau orange 2 à 68 ans et puis le niveau rouge à l'âge de 114 ans où il devra être mis hors service ou à défaut en situation de restriction d'utilisation immédiatement. Il atteindra le niveau extrême de ruine à l'âge de 139 ans.

#### 4. VALIDATION DES FONCTIONS APPROCHÉES

Une des étapes importantes dans le développement et l'utilisation d'un modèle de prévisions est de s'assurer que celui-ci est applicable en situation réelle. L'évaluation de sa performance se mesure en comparant les valeurs prédites par le modèle avec les valeurs observées et indépen-

dantes de celles qui ont servi à sa construction. Cette comparaison sera faite par le calcul de l'indicateur de mesure du Pourcentage d'Erreur Moyenne Absolue (MAPE : Mean Absolute Percentage Error) qui est la moyenne des différences absolues entre la valeur observée et sa prévision. Cette mesure considère l'importance plutôt que le sens des erreurs de prévision. Elle est donnée par la relation qui suit :

$$MAPE = \left( \frac{100}{n} \right) \sum_{i=1}^n |I_{Vi}^{\text{modele}} - I_{Vi}^{\text{mesure}}| \quad (29)$$

La démarche générale de validation du modèle construit pour la prévision du comportement au vieillissement d'un réservoir de stockage en béton adopté peut se faire en deux étapes [12]. Dans un premier temps, nous procédons à l'expertise sur site de certains réservoirs qui ont déjà fait l'objet d'une expertise en 2010 par Hammoum et al. [15], tout en choisissant les ouvrages qui remplissent les mêmes critères et caractéristiques que ceux qui ont servi dans la construction du modèle. Dans un deuxième temps, nous procédons à l'évaluation du MAPE. Les résultats du calcul sont illustrés dans le tableau 7.

Le test de validation effectué sur les ouvrages du parc expertisé a montré que le pourcentage d'erreur moyenne absolu de l'indice de vulnérabilité est de l'ordre de 2.95 %. Cette erreur reste admissible.

Nous en déduisons que le modèle construit montre une capacité satisfaisante à prédire l'évolution de l'indice de vulnérabilité aux aléas naturels des réservoirs de stockage d'eau en béton du parc du département de Tizi-Ouzou dans leur cycle de vie, comme présentés dans la figure 7.

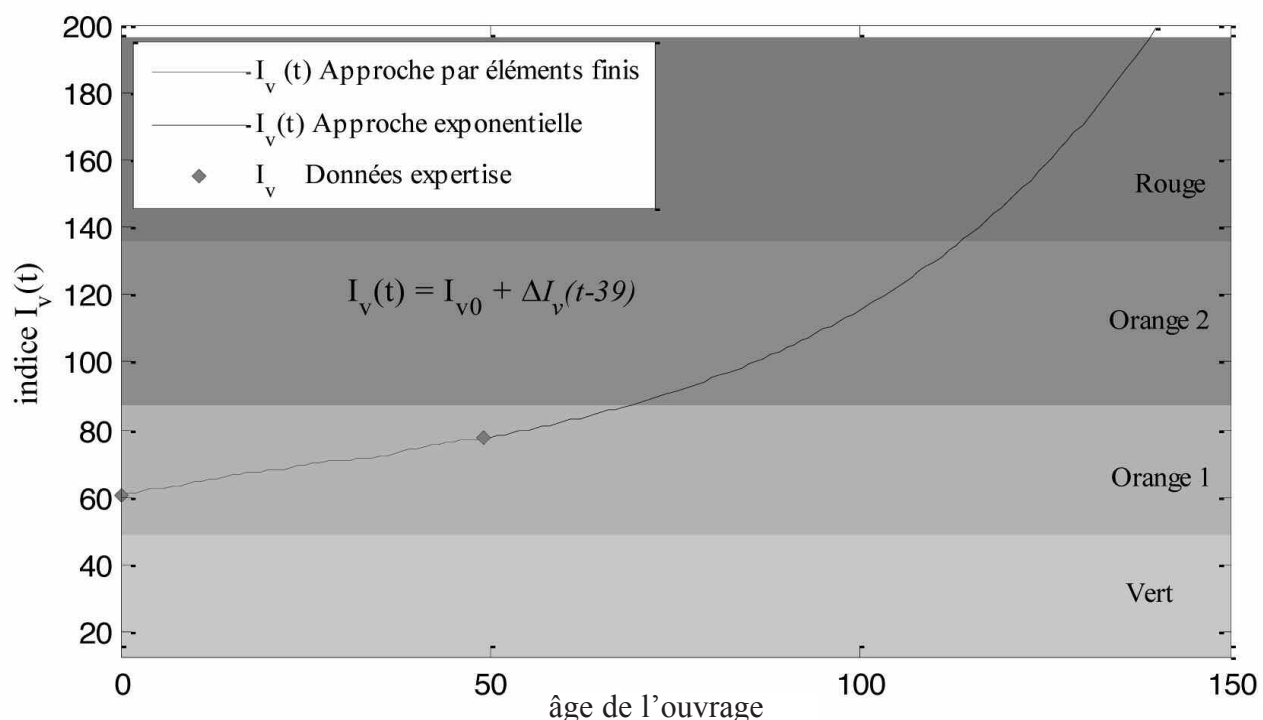
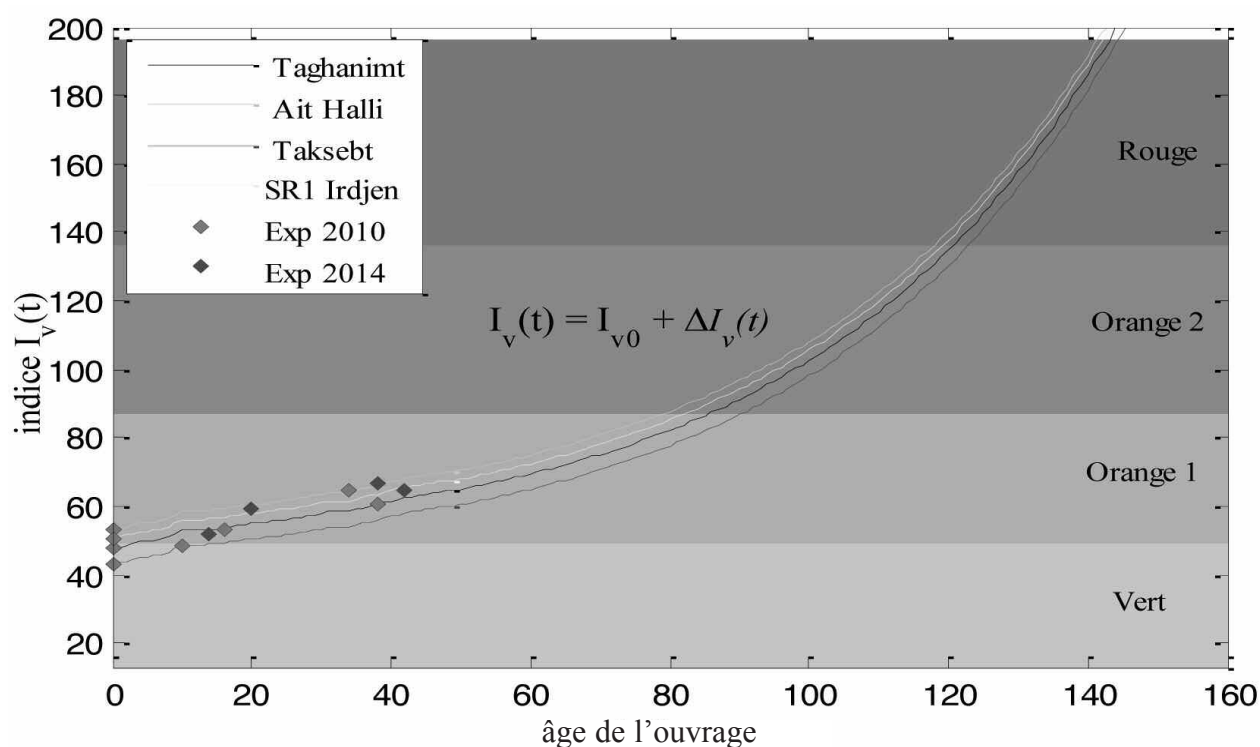


Figure 6 : Évolution de l'indice  $I_v(t)$  à travers les différents niveaux de vulnérabilité du réservoir Touares.

Ouvrages	$I_{v_i}^{\text{modele}}$	$I_{v_i}^{\text{mesure}}$	Erreur (%)
Taghanimt	62.50	64.50	3.1007
Taksebt	48.78	51.50	5.2815
Ait Halli	66.00	66.50	0.7518
SR1 Irdjen	57.91	59.50	2.6722
	MAPE		2.9516

**Tableau 7 : Évaluation du Mean Absolute Percentage Error.**



**Figure 7 : Validation des fonctions approchées.**

## CONCLUSION

Dans cet article, en nous aidant de la méthode des éléments finis, basée sur les fonctions polynomiales, nous avons modélisé l'évolution du niveau de vulnérabilité lié au vieillissement des réservoirs du parc de la wilaya de Tizi Ouzou (Algérie), en s'appuyant sur la connaissance de certaines mesures ponctuelles. L'intérêt de l'application de cette méthode dans le contexte de notre travail de recherche réside dans la précision de ses résultats, une précision liée fortement au nombre d'éléments selon lesquels le domaine a été décomposé. Cette méthode d'approximation nous permet de discrétiser le domaine complet en un nombre fini de sous-domaines, afin de maîtriser le domaine d'étude avec une précision satisfaisante.

Les relations mises au point permettent une évaluation simplifiée et rapide de la vulnérabilité liée au vieillissement des réservoirs en béton à n'importe quel instant de leur cycle de vie. Entre les mains des gestionnaires, elles permettent de fixer un planning des priorités d'intervention dans leur programme de réhabilitation ou de réparation.

En s'aidant de ces relations, ils seront en mesure de prédire à l'avance l'instant où l'état critique du réservoir sera atteint dans son cycle de vie et de décider de l'instant de la restriction de service ou éventuellement de sa démolition. Cette façon de faire permet d'optimiser la gestion d'un parc d'ouvrages et de planifier dans le temps les investissements financiers suffisamment à l'avance surtout sous des contraintes budgétaires significatives.



Par ailleurs, entre les mains des ingénieurs de bureau d'études, ces relations peuvent être utilisées au stade de conception de l'ouvrage. L'indice de vulnérabilité peut être connu et simulé à différents temps et donc prédire la politique de gestion du réservoir durant son exploitation et la fréquence de surveillance de l'ouvrage. Autrement dit, elles nous renseignent sur sa durée de vie ainsi que l'attention à accorder à l'ouvrage.

Les relations développées pour le parc de réservoirs du département de Tizi Ouzou présentent 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 d'un réservoir donné.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les membres de la société ADE (agences de DBK et LNI) pour leur aide et la documentation fournie.

## RÉFÉRENCES

- [1] Bezzazi M, Khamlichi A, Gonzalez J.R.A. Vulnérabilité sismique des constructions de type béton armé aux Nord du Maroc, *Rev. Can. Génie civ.* 2008;35:600–608.
- [2] Belheouane F.I. Détermination de l'indice de vulnérabilité pour les bâtiments en béton armé, thèse de Magister en génie civil, Université de Blida, juin 2006.
- [3] Boéro J, Capra B, Schoefs F, Bernard O, Lasne M. Analyse de risques pour la maintenance des structures portuaires : exemple de quais gabions soumis à de la corrosion, *IX<sup>es</sup> Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil*, Brest, 12-14 septembre 2006.
- [4] Boukri M, Bensaïbi M. Indice de vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie de la ville d'Alger. *Actes du congrès AFPS*, France, 2007
- [5] Curt C, Talon A, Mauris G. A dam assessment support system based on physical measurements, sensory evaluations and expert judgements, *Measurement*. 2011; 44:192–201.
- [6] Cremona C. Surveillance de santé des ouvrages, *Annales du BTP*, 2006 ; volume 4.
- [7] Delhalle L, Daube G, Adolphe Y, Crevecoeur S, Clinquart A. Les modèles de croissance en microbiologie prévisionnelle pour la maîtrise de la sécurité des aliments - synthèse bibliographique, *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2012 ; 16(3) : 369-381.
- [8] Delhez J.M. Méthodes mathématiques d'analyse et de modélisation appliquées à l'environnement, 2008.
- [9] DTR B-C 2-48. Règles parasismiques algériennes (addenda 2003), CGS, Alger, juin 2003.
- [10] DTR C 2-4.7. Règlement neige et vent 1999, Ministère de l'habitat, Alger, juillet 1999.
- [11] Fascicule 74, texte officiel. Construction des réservoirs en béton – cahier des clauses techniques générales, Ministère de l'équipement des transports et du logement, Paris, 1998.
- [12] Giffel M.C, Zwietering M.H. Validation of predictive models describing the growth of *Listeria monocytogenes*. *Int. J. Food Microbiol.* 1999 ; 46(2):135-149.
- [13] Hammoum H, Bouzelha K, Analyse de risques liés au vieillissement des réservoirs en béton. Proposition de méthodes d'aide à l'expertise, In : Presses Académiques Francophones editor. Saarbrücken, Germany, 2014. pp. 297.
- [14] Bouzelha. K, Hammoum. H, Hannachi. N.E, Les réservoirs d'eau en béton en Algérie. Du constat d'une situation à l'expression d'un besoin, *Annales du BTP*, N° 1, 2013, Editions ESKA, Paris. pp. 18-27.
- [15] 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. *Proceedings of the Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering* 2011. In: Curran Associates Editor, New York, USA, 2011; 1: 271-281.
- [16] Khenane A. Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus. In: Taylor and Francis Group Editor, London, 2013.
- [17] Khenane A. Méthode des éléments finis – Enoncé des principes de base. In : OPU Editor, Alger, 1997.
- [18] Manet V. La Méthode des Éléments Finis. In : PNL editor, 2012.
- [19] Mathieu G. Méthodologie d'évaluation des ouvrages hydrauliques en béton appliquée un patrimoine. *Annales du BTP*, 2003 ; 5-6 :39-61.
- [20] Mathieu G et al. Pathologie et réparation des ouvrages en béton de stockage et de transport des liquide, *Annales du BTP*, 1996. p. 3–108. [special issue].
- [21] Peyras L, Royet P, Boissier D. Development of a Scenario-based DSS for Dam Ageing Diagnosis, *Journal of Decision Systems*, 2002; 11:445-458.
- [22] Peyras L, Royet P, Boissier D. Dam ageing diagnosis and risk analysis: Development of methods to support expert judgement, *Canadian Geotechnical Journal*, 2006;43:169-186.
- [23] Peng S, Xueyuan Q, Xi C, Mi Z, Simin Q, Xinxin M, Zhicai Z. Spatial distribution and temporal trends in daily and monthly precipitation concentration indices in the upper reaches of the Huai River, China. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 2013 ; 28 : 201-212.
- [24] Plenet D, Lubet E, Juste C. Évolution à long terme du statut carboné du sol en monoculture non irriguée du maïs. *Agronomie*, 1993 ; 13 : 673-683.
- [25] Sanna M. Microbiologie prévisionnelle : principaux modèles de croissance utilisés en appréciation quantitative des risques. *Epidémiol. et santé anim*, 2002 ; 41 :169-177.
- [26] Serre D, Peyras L, Tourment R, Diab Y. Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations, *revue française de géotechnique*, 2006 ; 115 : 57-70.
- [27] Serre D, Maurel P, Peyras L, Tourment R, Diab Y, Modèles de rupture de digues couplés à un SIG, *revue internationale de géomatique*, 2006 ; 16(3-4):479-498.
- [28] Serre D, Peyras L, Curt R.C., Boissier D, Diab Y. Evaluation des ouvrages hydrauliques de génie civil, *revue canadienne de géotechnique*, 2007; 44: 1298–1313.
- [29] Serre D, Peyras L, Tourment R, Diab Y. Levee performance assessment: development of a GIS tool to support planning maintenance actions, *Journal of Infrastructure System*, ASCE, 2008; 14(3):201-213.
- [30] Yusuf F, Martins J.M, Swanson D.A. Methods of Demographic Analysis. In : Springer Dordrecht Heidelberg editor, London, 2014, pp. 310.

## ANNEXE : ÉVALUATION DE L'INDICE DE VULNÉRABILITÉ DES RÉSERVOIRS DU PARC DE LA WILAYA DE TIZI-OUZOU

N°	Lieu-dit	Capacité (m³)	Date mise en service	Date expertise	Age de l'ouvrage	I <sub>vo</sub>	I <sub>vi</sub>	Type de sol	Type de réservoir
1	SR3 Irdjen	1000	1994	2010	16	49	52,5	Ferme	Au sol
2	Tamazirth 1	500	1976	2010	34	44	57	Rocheux	Semi enterré
3	Tamazirth 2	200	2003	2010	7	44,5	49,5	Rocheux	Au sol
4	Taghanimt	100	1972	2010	38	47,5	60,5	Ferme	Au sol
5	Ait Halli	100	1976	2010	34	53	64,5	Meuble	Au sol
6	Adeni	150	1976	2010	34	50	60,5	Ferme	Semi enterré
7	Ait Yacoub	150	1976	2010	34	42	53	Rocheux	Semi enterré
8	Ait Hague	100	1976	2010	34	45,5	53	Ferme	Semi enterré
9	Mestiga	50	1974	2010	36	46,5	57,5	Ferme	Semi enterré
10	Boudjellil	500	1993	2010	17	44,5	52	Rocheux	Au sol
11	Ibahlal	500	1993	2010	17	47	58,5	Ferme	Au sol
12	Mehriz	100	2002	2010	8	46,5	51,5	Rocheux	Au sol
13	SR1 Irdjen	1000	1994	2010	16	50,5	53,5	Ferme	Au sol
14	SR2 Irdjen	1000	1994	2010	16	51	52	Ferme	Au sol
15	Taksebt	500	2000	2010	10	43	48,5	Rocheux	Au sol
16	Monobloc 1	500	2001	2010	9	52	52	Meuble	Au sol
17	Monobloc 2	500	2001	2010	9	51	52	Meuble	Au sol
18	Tansaout	500	1992	2010	18	45,5	48,5	Rocheux	Au sol
19	Zone Industrielle	2X1500	1972	2010	38	58	79	Meuble	Au sol
20	Behalil 2	200	2010	2014	4	48	48	ferme	Au sol
21	Behalil 1	100	1996	2014	18	46	53	ferme	Au sol
22	Touares	1000	1965	2014	49	60,5	77,5	meuble	Au sol
23	Touares	1000	1980	2014	34	61	72	meuble	Au sol
24	Megdoule 2	500	2008	2014	6	45	49,5	rocheux	Au sol
25	Mouldiouane Village	100	1988	2014	26	52	75,5	meuble	Au sol
26	Herrouka 1	500	1972	2014	42	48,5	63,5	rocheux	Au sol
27	Herrouka 2	100	1984	2014	30	46	56,5	rocheux	Au sol
28	Megdoule1	500	2008	2014	6	54	56,5	ferme	Au sol
29	Mennacera	100	2008	2014	6	44,5	47,5	rocheux	Au sol
30	Adjaba	250	1973	2014	41	44,5	63,5	rocheux	Au sol
31	Avarrane 1	500	1972	2014	42	56,5	75,5	meuble	Au sol
32	Avarrane 2	1500	2011	2014	3	55	61	meuble	Semi enterré
33	Mouldiouane Zone	1000	2010	2014	4	49,5	51,5	ferme	Semi enterré
34	Sidi Namane Maassal	1000	1999	2014	15	52,5	64	ferme	Au sol
35	Sidi Namane SR1	1000	1999	2014	15	53,5	59,5	meuble	Au sol
36	Sidi Namane SR2	1000	2012	2014	2	53,5	54,5	meuble	Au sol
37	Kaf Laagab	200	1988	2014	26	56	65	meuble	Au sol
38	Tighilt Tigarfiouine	1000	1985	2014	29	56	66	meuble	Au sol
39	Djemaa Saharidj	1000	2008	2014	6	49,5	65,5	ferme	Au sol
40	Djemaa Saharidj	500	1975	2014	39	47	62	ferme	Semi enterré
41	Mekla (Chaib) SR1	500	1975	2014	39	54,5	71,5	meuble	Au sol
42	Mekla Chef-Lieu SR2	500	1975	2014	39	50,5	64	meuble	semi enterré