REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTIOON DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL





MEMOIRE DE MASTER PROFESSIONNEL Spécialité : Génie Civil Option : Constructions Hydrauliques & Aménagements

Thème

Analyse fiabiliste de la stabilité d'un canal revêtu en matelas Reno

<u> Réalisé par :</u>

M^r: Lyes IMERZOUKENE M^r: Meziane OUHAROUN

Membres du jury:

Président : P_r Mohammed KHATTAOUI Promoteur : D_r Hocine HAMMOUM Examinateur : D_r Hocine DEHMOUS

Promotion 2015-2016



Nous adressons en premier lieu nos remerciements a Monsieur Hammoum Hocine, maitre conference au departement de genie civil pour nous avoir encadre et suivi tout au long de la realisation de ce memoire. Qu'il trouve ici toute notre reconnaissance et notre profonde gratitude.

NOUS ADRESSONS NOS REMERCIEMENTS EGALEMENT A MADAME BOUZELHA KARIMA, PROFESSEUR AU DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL POUR NOUS AVOIR FAIT BENEFICIER DE SES COMPETENCES, POUR SA DISPONIBILITE ET SON AIDE PRECIEUSE.

Nos remerciments vont egalement a Mr Aliche Amar, et Mr Dehmous hocine respectivement docteur et maitre conference au departement de genie civil qui nous ont beaucoup aide et qui ont toujours repondus presents.

NOUS REMERCIONS LES MEMBRES DU JURY POUR AVOIR ACCEPTER DE JUGER CE TRAVAIL.

ENFIN, NOUS REMERCIONS TOUS CEUX QUI ONT CONTRIBUE DE PRES OU DE LOIN A LA REALISATION DE CE MEMOIRE.



Dédicaces	

On dit souvent que le trajet est aussi important que la destination. Les cinq années de maîtrise m'ont permis de bien comprendre la signification de cette phrase toute simple. Ce parcours, en effet, ne s'est pas réalisé sans défis et sans soulever de nombreuses questions pour lesquelles les réponses nécessitent de longues heures de travail.

Après tous ces sacrifices je tiens à dédicacer ce modeste travail :

Aux êtres les plus chers à mon cœur, Mes parents, qui ont toujours cru en moi et encouragés.

A mes sœurs et leurs maris et leurs enfants : Lila et Aziz et leur adorable fille Yasmine, Kenza , Fadhela et Kamel et leurs enfants Sara, Elias et Yacine, Zahia et Boukhalfa et leurs deux princes Massyl et Aris, Nabi, et Sarah Idres.

A ma grand mère Messad à qui je souhaite une longue vie.

A toute ma famille et surtout mes cousins et cousines

A tout mes amis et a toute la section Construction hydraulique et Aménagement,

Et enfin, à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin à la réalisation de ce modeste projet.

Lyes.

	Dédicaces	
¥		ě.

On dit souvent que le trajet est aussi important que la destination. Les cinq années de maîtrise m'ont permis de bien comprendre la signification de cette phrase toute simple. Ce parcours, en effet, ne s'est pas réalisé sans défis et sans soulever de nombreuses questions pour lesquelles les réponses nécessitent de longues heures de travail.

Après tous ces sacrifices je tiens à dédicacer ce modeste travail :

Aux êtres les plus chers à mon cœur, Ma mere, qui ont toujours cru en moi et encouragés.

A ma sœur : Ania

A mes freres : Mokrane, Kaci et Mastene A mes grands parents Thassadith et Ouiza a qui je souhaite une longue vie.

A toute ma famille et surtout mes cousins et cousines et ma tante Nadia

Et enfin, à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin à la réalisation de ce modeste projet.

Meziane.



SOMMAIRE

Introduction générale Erreur ! Signet non défini.

Chapitre1 : présentation des canaux a ciel ouvert en matelas Reno

1.1 Introduction :	Erreur ! Signet non défini.
1.2 Présentation des canaux en matelas Reno :	Erreur ! Signet non défini.
1.3 Caractéristiques et fonctionnement des canaux en Matelas Reno	Erreur ! Signet non défini.
1.4 Mise en œuvre des matelas Reno	Erreur ! Signet non défini.
1.5 Catégories de revêtements	Erreur ! Signet non défini.
1.5.1 Revêtement effectué à sec	Erreur ! Signet non défini.
1.5.2 Revêtements effectués en présence d'eau	Erreur ! Signet non défini.
1.5.3 Revêtements consolidés ou imperméabilisés hydraulique	au mastic bitumineux Erreur ! Signet non défini.
1.5.4 Revêtement consolidés ou imperméabiliser au mastic de bitu	me, montés sur pontons et mis
a l'eau avec équipements spéciaux	Erreur ! Signet non défini.
1.5.5 Resistance des revêtements matelas Reno et en gabions traités	s au mastic de bitume Erreur !
Signet non défini.	
1.6 Comparaison du revâtement en matelas Reno avec d'autres revâte	E
1.0 Comparaison du revelement en materias Reno avec d'autres revele	ments Erreur ! Signet non
défini.	ments Erreur : Signet non
1.6 Comparaison du revetement en materias keno avec d'autres revete défini. 1.6.1 Comparaison entre le revêtement Reno et les revêtemen	ts en enrochements (rip-rap)
1.6 Comparaison du revetement en materias keno avec d'autres revete défini. 1.6.1 Comparaison entre le revêtement Reno et les revêtemen	ts en enrochements (rip-rap)
1.6.1 Comparaison entre le revêtement Reno et les revêtemen 1.6.2 Comparaison entre les revêtements en matelas Reno et les rev	ts en enrochements (rip-rap) Erreur ! Signet non défini. vêtements en béton Erreur !
1.6.1 Comparaison entre le revêtement Reno et les revêtemen 1.6.2 Comparaison entre les revêtements en matelas Reno et les rev Signet non défini.	tts en enrochements (rip-rap) Erreur ! Signet non défini. vêtements en béton Erreur !
1.6 Comparaison du revetement en materias Reno avec d'adres revete défini. 1.6.1 Comparaison entre le revêtement Reno et les revêtemen 1.6.2 Comparaison entre les revêtements en materias Reno et les rev Signet non défini. 1.7 Conclusion	ments Erreur ! Signet non its en enrochements (rip-rap) Erreur ! Signet non défini. vêtements en béton Erreur ! Erreur ! Signet non défini.
1.6 Comparaison du revetement en materias Reno avec d'adres revete défini. 1.6.1 Comparaison entre le revêtement Reno et les revêtemen 1.6.2 Comparaison entre les revêtements en materias Reno et les rev Signet non défini. 1.7 Conclusion Chapitre2 : Etude déterministe	ments Erreur ! Signet non ts en enrochements (rip-rap) Erreur ! Signet non défini. vêtements en béton Erreur ! Erreur ! Signet non défini.
 1.6 Comparaison du revetement en materias Reno avec d'adres revete défini. 1.6.1 Comparaison entre le revêtement Reno et les revêtemen 1.6.2 Comparaison entre les revêtements en materias Reno et les rev Signet non défini. 1.7 Conclusion. Chapitre2 : Etude déterministe 2.1 Introduction 	ments Erreur ! Signet non its en enrochements (rip-rap) Erreur ! Signet non défini. vêtements en béton Erreur ! Erreur ! Signet non défini. Erreur ! Signet non défini.
1.6 Comparaison du revetement en materias Reno avec d'adres revete défini. 1.6.1 Comparaison entre le revêtement Reno et les revêtemen 1.6.2 Comparaison entre les revêtements en materias Reno et les rev Signet non défini. 1.7 Conclusion. Chapitre2 : Etude déterministe 2.1 Introduction 2.2 Calcul hydraulique des cours d'eau à surface libre.	ments Erreur ! Signet non Erreur ! Signet non défini. /êtements en béton Erreur ! Erreur ! Signet non défini. Erreur ! Signet non défini. Erreur ! Signet non défini.
1.6 Comparaison du revetement en materias Reno avec d'adres revete défini. 1.6.1 Comparaison entre le revêtement Reno et les revêtemen 1.6.2 Comparaison entre les revêtements en matelas Reno et les rev Signet non défini. 1.7 Conclusion. Chapitre2 : Etude déterministe 2.1 Introduction 2.2 Calcul hydraulique des cours d'eau à surface libre. 2.3 Dimensionnement des revêtements en matelas Reno.	ments Erreur ! Signet non its en enrochements (rip-rap) Erreur ! Signet non défini. vêtements en béton Erreur ! Erreur ! Signet non défini. Erreur ! Signet non défini. Erreur ! Signet non défini. Erreur ! Signet non défini.
1.6 Comparaison du revetement en materias Reno avec d'adres revete défini. 1.6.1 Comparaison entre le revêtement Reno et les revêtemen 1.6.2 Comparaison entre les revêtements en matelas Reno et les rev Signet non défini. 1.7 Conclusion. Chapitre2 : Etude déterministe 2.1 Introduction 2.2 Calcul hydraulique des cours d'eau à surface libre. 2.3 Dimensionnement des revêtements en matelas Reno. 2.3.1 Vérification en termes de vitesse.	ments Erreur ! Signet non its en enrochements (rip-rap) Erreur ! Signet non défini. vêtements en béton Erreur ! Erreur ! Signet non défini. Erreur ! Signet non défini. Erreur ! Signet non défini. Erreur ! Signet non défini. Erreur ! Signet non défini.
1.6 Comparaison du revelement en materias keno avec d'adres revele défini. 1.6.1 Comparaison entre le revêtement Reno et les revêtemen 1.6.2 Comparaison entre les revêtements en materias Reno et les rev Signet non défini. 1.7 Conclusion. Chapitre2 : Etude déterministe 2.1 Introduction 2.2 Calcul hydraulique des cours d'eau à surface libre. 2.3 Dimensionnement des revêtements en materias Reno. 2.3.1 Vérification en termes de vitesse. 2.3.2 Vérifications en termes de tension d'entrainement	ments Erreur ! Signet non its en enrochements (rip-rap) Erreur ! Signet non défini. vêtements en béton Erreur ! Erreur ! Signet non défini. Erreur ! Signet non défini.

2.3.4 Vérification vis a vis de l'érosion du matériau de base	Erreur ! Signet non défini.
2.4 Application de la méthode déterministe à une étude de cas	Erreur ! Signet non défini.
2.4.1 Calcul hydraulique	Erreur ! Signet non défini.
2.4.2 Vérification en terme de vitesse	Erreur ! Signet non défini.
2.4.3 Vérification en terme de tension d'entrainement	Erreur ! Signet non défini.
2.4.4 Effet de déformation	Erreur ! Signet non défini.
2.4.5 Vérification de vis a vis de l'érosion du matériau de base	Erreur ! Signet non défini.
2.5 Résultat et discussion	Erreur ! Signet non défini.
2.6 Conclusion	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre 3: Etude fiabiliste

3.1 Introduction	Erreur ! Signet non défini.
3.2 Contexte fiabiliste	Erreur ! Signet non défini.
3.3 Notions de probabilité	Erreur ! Signet non défini.
3.3.1 Qu'est-ce qu'une approche probabiliste ?	Erreur ! Signet non défini.
3.3.2 Variable aléatoire et caractéristiques	Erreur ! Signet non défini.
3.3.3 Lois de probabilités	Erreur ! Signet non défini.
3.3.4 Contexte probabiliste [14]	Erreur ! Signet non défini.
3.3.5 définition de la simulation de Monte Carlos	Erreur ! Signet non défini.
3.3.6 Méthode de simulation Monte Carlos [15]	Erreur ! Signet non défini.
3.3.7 Les étapes de la simulation de Monte Carlo[9]	Erreur ! Signet non défini.
3.4 Analyse fiabiliste d'un canal en matelas Reno	Erreur ! Signet non défini.
3.4.1 Fonction d'état limite	Erreur ! Signet non défini.
3.4.2 Identification des variables aléatoire	Erreur ! Signet non défini.
3.4.3 Génération de variable aléatoire	Erreur ! Signet non défini.
3.4.4 Fonction de densité :	Erreur ! Signet non défini.
3.5 Organigramme de calcul	Erreur ! Signet non défini.
3.6 Evaluation de la probabilité de défaillance	Erreur ! Signet non défini.
3.7 Interprétation des résultats	Erreur ! Signet non défini.
3.7 Conclusion	Erreur ! Signet non défini.

onclusion Générale65

Symbole	Désignation	Unité
d ₅₀	diamètre permettant le passage de 50% de la pierre qui constitue le revêtement	m
d ₁₅	diamètre permettant le passage de 15% de la pierre qui constitue le revêtement	m
d ₆₅	diamètre permettant le passage de 65% de la pierre qui constitue le revêtement	m
d ₈₀	diamètre permettant le passage de 80% de la pierre qui constitue le revêtement	m
d ₆₀	diamètre permettant le passage de 90% de la pierre qui constitue le revêtement	m
d ₉₀	Diamètre de 90% des pierres "d90"	m
d _m	diamètre moyen de la pierre du fond	m
Y	la profondeur de l'eau	m
V	Vitesse moyenne d'écoulement	m/s
Rh	Rayon hydraulique	m
Ι	pente du canal	
С	Coefficient de Chezy	$m^{1/2}s^{-1}$
η	Coefficient d'écoulement	s/m ^{1/3}
C *	coefficient de Shields	
γw	Masse volumique de l'eau	kg/m ³
γs	Masse volumique des pierres	kg/m ³
Ι	l'inclinaison du fond/horizontale	0
τ _b	tension tangentielle d'entrainement qui s'exerce sur le fond du canal	kg/m²
τ _c	tension tangentielle critique d'entrainement des berges	kg/m²
$\tau_{\rm m}$	tension tangentielle d'entrainement qui s'exerce sur les berges	kg/m²
τ _s	tension tangentielle critique d'entrainement des berges	kg/m²

θ	angle d'inclinaison de la berge	0
φ	angle de frottement interne de la pierre qui constitue le revêtement pour les matelas Reno	O
V	Vitesse critique du mouvement des roches en fonction de leurs tailles	m/s
	la différence de hauteur entre la surface de la roche maximale et minimale dans un compartiment de matelas	m
t	épaisseur du matelas non déformé	m
b	Largeur de la base du canal	m
В	Largeur a la surface du canal	m
L	coefficient de rugosité du fond.	m
C*'	Coefficient de shields pour le fond du canal	
C*''	Coefficient de shields pour les berges	
	le diamètre permettant le passage de 65% de la pierre qui constitue le revêtement	
	le diamètre permettant le passage de 80% de la pierre qui constitue le revêtement	
V _b	vitesse à l'interface du matelas Reno fond sous jacent	m/s
V _e	vitesse d'érosion	m/s
d _v	diamètre équivalent des interstices	
f	coefficient de Darcy-Weisbach	
\mathbf{n}_{ζ}	Rugosité du filtre entre Matelas Reno et le sol	
g	accélération de la pesanteur	m/s ²
Cv	Coefficient de variation	
σ	Ecart type	
λ	Débit fréquentiel utilisé	m ³ /s

Liste des Tableau

Tableau 1.1: Caractéristiques de construction des matelas Reno et des gabions [1]. **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 1.2 : Epaisseurs approximatives des revêtements en matelas Reno et en gabions en fonction de la vitesse du courant
Tableau 1.3 : Caractéristique fondamental du mastic bitumineux [1] Erreur ! Signet non défini.
Tableau 1.4 Quantité unitaire minimum de mastic bitumineux coulable pour une pénétration partielle et/ou totale des matelas Reno et des gabions [1] Erreur ! Signet non défini.
Tableau 1.5 Epaisseur approximatives en fonction de la vitesse du courant, des revêtements en matelas Reno et en gabions traités au mastic du bitume [1] Erreur ! Signet non défini.
Tableau 1.6 épaisseurs indicatives du matelas Reno et gabions traités avec du sable asphalte coulé, en fonction de la vitesse de l'eau [2] Erreur ! Signet non défini.
Tableau 2.1 : Coefficients de rugosité [1] Erreur ! Signet non défini.
Tableau 2.2 Vérification de la stabilité du Matelas Reno pour un débit vingtennale Erreur ! Signet non défini.
Tableau 2.3 Vérification de la stabilité du Matelas Reno pour un débit cinquantennale Erreur ! Signet non défini.
Tableau 2.4 Vérification de la stabilité du Matelas Reno pour un débit centennale Erreur ! Signet non défini.
Tableau 2.5 Vérification de la stabilité du Matelas Reno pour un débit centennaleSignetnon défini.
Tableau 3.1 : Identification des variables intervenant dans le calcul du matelas Reno Erreur ! Signet non défini.
Tableau 3.2: Résultats de calculs des débits de crues fréquentiels (m3/s).Erreur !Signetnondéfini.
Tableau 3.3 Extrait du résultat de génération de la loi log normale de l'accélération "A" sur Microsoft Excel [©]
Tableau 3.4 : Niveaux de probabilité de défaillance acceptés par secteurs industriels Erreur ! Signet non défini.
Tableau 3.5 : probabilité de défaillance du test de vitesse pour différentes valeurs de débit. Erreur ! Signet non défini.
Tableau 3.6 : Pf de la stabilité du fond du canal pour différentes valeurs de "Q". Erreur ! Signet non défini.
Tableau 3.7 : probabilité de défaillance vis a vis du test de vitesse pour différentes valeurs de débit de crue Erreur ! Signet non défini.
Tableau 3.8 : Probabilité de défaillance vis a vis la déformation fond du canal pour différentes valeurs de débits Erreur ! Signet non défini.
Tableau 3.9 : Probabilité de défaillance vis a vis de l'effet de déformation des berges pour différentes valeurs de débits
Tableau 3.10 : Probabilité de défaillance vis a vis de la stabilité du matelas Reno et le sol pour différentes valeurs de débits

Liste de figure

Figure 1.1 : Revêtement en matelas Reno de la rivière de Rio Compobasso, Molise, Italie, 1981 [1]
Figure 1.2 : Revêtement en matelas Reno de la rivière de Maroglio a Caltanisseta, Sicily, Italie 1982, [1] Erreur ! Signet non défini.
Figure 1.3 : Revêtement en matelas Reno du canal Pedra Do Cavalo(Brésil-Bahia), Phase de pose et mise en œuvre [1]
Figure 1.4 Caractéristique de construction des matelas Reno Erreur ! Signet non défini.
Figure 1.5 (a;b) mise en œuvre d'un matelas Reno et ligature de plusieurs éléments Erreur ! Signet non défini.
figure 1.6 (a ;b) mise en place et assemblage des éléments Erreur ! Signet non défini.
Figure 1.7 remplissage des éléments avec des galets ou des enrochements Erreur ! Signet non défini.
Figure 1.8 Fermeture des éléments a l'aide de leurs couvercles et de grillage . Erreur ! Signet non défini.
Figure 1.9 FRANCE- Revêtement en gabions boites de 0,50 m –Rivière du largue. Erreur ! Signet non défini.
Figure 1.10 Iraq- Protection des berges de l'ile Tajlat du Tigri a l'aide de matelas Reno galvanisés et plastifiés
Figure 1.11 ITALIE- Canalisation des en matelas Reno galvanisés et plastifiés du Cervaro, prés de son embouchure
Figure 1.12 (a,b,c) Italie : Lombardie Revêtement en matelas Reno galvanisés et plastifiés en présence d'eau du canal adducteur de la centrale Thermoélectrique de Tavazzano a Mentenase [1]. Erreur ! Signet non défini.
Figure 1.13 Emilie Romagne préparation des matelas Reno sur ponton et largage des revêtement sur le Chiavanna et le canal d'évacuation de la central nucléaire de Caorso. Erreur ! Signet non défini.
Figure 1.14 Approfondissement du revêtement vu la profondeur d'érosion prévue[2] Erreur ! Signet non défini.
Figure 1.15 Extension horizontal du revêtement vu la profondeur d'érosion prévue[2] Erreur ! Signet non défini.
Figure 1.16 Epaisseur du matelas Reno en fonction de la vitesse du courant Erreur ! Signet non défini.
Figure 2.1 Vitesse critique <i>VC</i> du mouvement des roches en fonction de leurs tailles[2] Erreur ! Signet non défini.
Figure 2.2 Vitesse critique qui initie le mouvement de roche en fonction de Reno épaisseur du matelas [2] Erreur ! Signet non défini.
Figure 2.3 schéma du mouvement des pierres dans les poches [2] Erreur ! Signet non défini.
Figure2.4 Tension tangentielle critique en fonction de la taille des cailloux[2]. Erreur ! Signet non défini.
Figure 2.5 Equation de la tension tangentielle critique en fonction de la taille des cailloux . Erreur ! Signet non défini.
Figure 2.6 Valeurs des vitesses admissibles maximum pour terrains cohérents[2] Erreur ! Signet non défini.

Figure 2.7 matelas reno en maille type 5*7 fil Φ 2.00 et de 0.25 epaisseur Erreur ! Signet non défini.

Figure 2.8 vitesse critique Vc du mouvement des roches en fonction de leurs tailles [2]...... Erreur ! Signet non défini. Figure 3.1 : Illustration de la simulation de Monté Carlo. Erreur ! Signet non défini. Figure 3.2 schéma explicatif de la simulation de Monte Carlos Erreur ! Signet non défini. Figure 3.3 Organigramme général du principe de Monte Carlos (LYNDA BOUSIHEL 2012) Erreur ! Signet non défini. Figure 3.4: Première étape pour générer une loi normal de l'accélération "A" Sur Microsoft Excel[©]. Figure 3.5 : Deuxième étape pour générer une loi normal de l'accélération "A" Sur Microsoft Excel[®]......**Erreur ! Signet non défini.** Figure 3.6 : Courbe de la densité de la loi de poisson pour un $\lambda = 39.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit décennale) Erreur ! Signet non défini. Figure 3.7 courbe de répartition de la loi de poisson. Erreur ! Signet non défini. Figure 3.8 Organigramme des étapes d'évaluation de la probabilité de défaillance en utilisant la méthode de simulation de Monte Carlo..... Erreur ! Signet non défini. Figure 3.9 : Courbe de l'évolution de probabilité de défaillance en fonction du nombre de tirage Figure 3.10: Courbe de probabilités de défaillance vis a vis test de vitesse en fonction des fréquences des débits...... Erreur ! Signet non défini. Figure 3.11 Courbe de probabilités de défaillance vis a vis la stabilité du fond canal en fonction des fréquences des débits Erreur ! Signet non défini. Figure 3.13 Courbe de probabilités défaillance de la stabilité de berges en fonction des fréquences des débits...... Erreur ! Signet non défini. Figure 3.14 Courbe de probabilités P_f de l'effet de déformation fond du canal en fonction des fréquences des débits Erreur ! Signet non défini. Figure 3.15 Courbe de probabilité de défaillance vis a vis de l'effet de déformation des berges en fonction des fréquences des débits Erreur ! Signet non défini. Figure 3.16 Courbe de probabilités de défaillance vis à vis de la stabilité du matelas Reno et le sol en fonction des fréquences des débits Erreur ! Signet non défini.

Introduction Générale

L'interaction fluide-structure concerne l'étude du comportement d'un solide en contact avec un fluide, dont la réponse peut être fortement affectée par l'action du fluide. Ces phénomènes sont courants et sont parfois à l'origine du fonctionnement de certains systèmes, ou au contraire manifestent un dysfonctionnement. Le changement du débit du fluide altèrent l'intégrité des structures et doivent pouvoir être prédit afin d'éviter l'usure accélérée du système par fatigue du matériau, voire sa destruction lorsque les débits dépassent un certain seuil. On comprend bien alors l'importance d'établir au préalable de toute réalisation des modèles fiabilistes permettant de prédire de tels comportements.

Traditionnellement, l'optimisation des structures en génie civil et en particulier les revêtement de canaux a ciel ouvert en matelas Reno, consiste en une démarche déterministe qui s'appuie sur les coefficients partiels de sécurité recommandés dans les codes de dimensionnement, ces coefficients sont appliqués pour tenir compte des incertitudes et pour se prémunir des écarts imprévisible des performance mécanique des ouvrages, d'une part. D'autre part, l'utilisation de ces coefficients de sécurité dans le processus d'optimisation n'assure pas une solution optimale et fiable car ils sont calibrés pour de larges classe de structures et sans lien direct avec les exigence de fiabilité. Autrement dit ; ces coefficients peuvent parfois mener à un manque de robustesse de la structure optimisée lorsqu'elles ne mènent pas leurs surdimensionnement.

La théorie de la fiabilité qui repose sur une formulation probabiliste de la sécurité des constructions peut y répondre de façon adaptée, néanmoins, elle soulève des difficultés sur le plan théorique, numérique et applicatif puisqu'elle requiert en particulier une modélisation des incertitudes par des lois et paramètres statistiques ainsi que le recours à la définition d'un niveau de sécurité minimal admissible.

Dans le même contexte, et dans le cadre de cette recherche, nous nous intéressons à l'analyse de la fiabilité d'un revêtement d'un canal a ciel ouvert en matelas Reno. Pour ce faire, notre travail est réparti en trois chapitre

Dans le premier chapitre, un bref aperçu est donné sur les revêtements des canaux a ciel ouvert en matelas Reno, à savoir ses différentes caractéristiques , fonctionnalités et mises en œuvre, ainsi que ses différentes catégories.

Le deuxième chapitre, est consacré a la présentation de la méthode de calcul déterministe de stabilité du revêtement en matelas Reno . suivi du traitement d'un exemple pratique tiré de la réalité .

Le troisième chapitre est dédié à la présentation de l'analyse de la fiabilité du revêtement en matelas Reno, en utilisant la simulation de Monté Carlo classique, ainsi la

définition des fonctions d'états limites, l'identification des variables et la génération de la variable aléatoire (débit de crue) . Les résultats de la probabilité de défaillance de la structure vis-à-vis des modes de défaillances envisagés sont présentés, pour différentes fréquences de débit.

Les résultats de l'étude mécano-fiabiliste fera l'objet d'une conclusion générale.

Chapitre 1 : Présentation des canaux a ciel ouvert en matelas Reno

1.1 Introduction :

Les écoulements à surface libre sont des écoulements qui s'écoulent sous l'effet de la gravité en étant en contact partiellement avec un contenant (canal, rivière, conduite..) et avec l'air dont la pression est généralement atmospherique. Contrairement aux écoulements en charge, la section d'écoulement devient une caractéristique de l'écoulement et non plus seulement de la géométrie du contenant.

Des structures flexibles ont été utilisées pendant un certain temps et avec beaucoup de succès pour le cheminement de l'eau dans les canaux a ciel ouvert. Dans le présent chapitre nous présentons le revêtement en matelas Reno, avec ses caractéristiques et fonctionnalités dans les canaux et les cours d'eau, ses différentes mise en œuvre, et enfin les catégories de revêtements en matelas Reno.

1.2 Présentation des canaux en matelas Reno :

On entend par la canalisation d'un cours d'eau la régularisation de la section du lit réalisée et maintenue avec un revêtement de protection sur les deux berges, et si besoin est , même sur le fond du lit

Les matelas Reno sont depuis plus d'un siècle utilisées pour les canalisations des cours d'eau naturels et artificiels, la ou est requis le control de débit des eaux pour la protection des ressources hydriques dans l'intérêt de la sauvegarde du milieu environnant comme l'illustre la figure 1.1 et la figure 1.2.



Figure 1.1 : Revêtement en matelas Reno de la rivière de Rio Compobasso, Molise, Italie, 1981 [1].



Figure 1.2 : Revêtement en matelas Reno de la rivière de Maroglio a Caltanisseta, Sicily, Italie 1982, [1].

📥 But du revêtement d'un canal en matelas Reno

La réalisation du revêtement des berges et du fond d'un cours d'eau canalisé permet d'obtenir de nombreux résultat comme :

- a) la réduction des fuites d'eau vers la compagne et parfois de l'infiltration dans le sens contraire.
- b) l'amélioration de la stabilité des berges.
- c) la protection des berges et du fond contre l'érosion.
- d) la réalisation de parois ayant une rugosité prédéterminée et la diminution des frais d'entretien.

1.3 Caractéristiques et fonctionnement des canaux en Matelas Reno

Pour établir un revêtement d'un canal, le technicien doit effectuer un choix entre les nombreux types de revêtements, a chaque fois qu'un cas ce présente, il faut enquêté sur le type de revêtement ayant les caractéristiques requises de perméabilité ou étanchéité, de robustesse, de flexibilité, rugosité, de durée, d'économie, puis effectuer son choix pour adopté la solution qui offre les meilleurs garanties.

Sans aucun doute, les revêtements souples offre une série d'avantages qui, dans la plupart des cas, les rendent préférables aux revêtements rigides et semi-rigides et c'est justement dans cette catégories que se placent les matelas Reno, la figure 1.3 montre un exemple réel d'un revêtement en matelas Reno.



Figure 1.3 : Revêtement en matelas Reno du canal Pedra Do Cavalo(Brésil-Bahia), Phase de pose et mise en œuvre [1].

Pour le choix d'un revêtement en matelas Reno, on s'appuie sur ses critères suivant :

- ➢ la robustesse,
- la souplesse (ou flexibilité),
- long durée de vie,
- ➢ économique,
- perméabilité (ou imperméabilité),
- rugosité prédéterminée,
- parfaite intégration a l'environnement,
- Resistance au batillage

Nous illustrons les caractéristiques de construction d'un revêtement en matelas Reno dans la Tableau 1.1 a savoir l'épaisseur et dimension des mailles et fils.

Materias Keno garvanises					2.5	
Maille	Fil	Epaisseur		Fil		
		□mm	Maille	Intérieur	Extérieur	Epaisseur
type			type	🗆 mm	□mm	m
	□mm					
	2.00	0.17		2.00	3.00	0.17
6*8	2.20	0.23	6*8	2.20	3.20	0.23
		0.30				0.30
		0.15				
5*7	2.00	0.20				
		0.25				
Largeur 2	2.00-3.00m	l-longueur 3	.00-4.00-5.00)-6.00 m		
Matelas Reno galvanisés Matelas Reno gal			Reno galv	vanisés et		
				plastifiés		
	Fil	Epaisseur		Fil		
Maille			Maille	Intérieur	Extérieur	Epaisseur
type			type	🗆 mm	□mm	m
10*12	2.70			2.40	3.40	0.50
	3.00		10*12	2.70	3.70	
8*10	2.70	0.50	8*10	2.40	3.40	
	3.00			2.70	3.70	1.00
6*8	2.20					
	2.70					
5*7	2.00					
	2.40	1.00				
Largeur 1.00-2.00 m- longueur 2.00-3.00-4.00 m pour gabions larges 1.00-3.00-						
4.00-5.00 m pour gabions larges 2.00m						

Tableau 1.1: Caractéristiques de construction des matelas Reno et des gabions [1]. Matelas Reno galvanisés Matelas Reno galvanisés et plastifiés

Les matelas Reno et les gabions sont en maille hexagonale a double torsion et en fil d'acier doux, avec une galvanisations conforme aux normes de la circulaire du cons, Sup.LL.PP.n.2078 du 27/08/1962 de la British Standard 443/1982 et de U.S-Federal Specification QQ-W-461.H.Finish 5-classs 3.le fil plastifié est revêtu par extrusion avec un matériel spécial en P.V.C ayant haute résistance a la corrosion, Les types indiqués a la table sont ceux standards, comme le montre la figure 1.4.



Figure 1.4 Caractéristique de construction des matelas Reno.

1.4 Mise en œuvre des matelas Reno

Les opérations de ligature et de remplissage des matelas Reno peuvent être ainsi résumées (Agostini et al., 1999) :

- a) montage des éléments de grillage hors des lieux (figure 1.5a, 1.5b).
- b) mise en place et assemblage des éléments (figure 1.6a, 1.6b).
- c) remplissage des éléments avec des galets ou des enrochements (figure 1.7).
- d) fermetures des éléments en ligaturant les couvercles. (figure 1.8).



Figure 1.5 (a;b) mise en œuvre d'un matelas Reno et ligature de plusieurs éléments.



figure 1.6 (a ;b) mise en place et assemblage des éléments



Figure 1.7 remplissage des éléments avec des galets ou des enrochements



Figure 1.8 Fermeture des éléments a l'aide de leurs couvercles et de grillage

1.5 Catégories de revêtements

En ce qui concerne l'emploi des matelas Reno pour la protection et le revêtement des canaux et de cours d'au canalisés et les divers applications possibles, nous avons considéré, pour simplifier, les catégories de travail suivantes :

- a) Revêtement réalisés a sec
- b) Revêtements réalisés en présence d'eau
- c) Revêtement consolidés et/ou imperméabilisés au mastic de bitume et exécutés sur ponton puis mis a l'eau en utilisant des équipements particuliers

1.5.1 Revêtement effectué à sec

Les revêtements en matelas Reno et en gabions se posent directement sur le terrain qu'ils doivent protéger, par conséquent, le terrain ne doit pas être incliné afin d'éliminer tout risque de glissement de l'ouvrage. Ces deux conditions ne sont cependant pas catégoriques, comme dans le cas des revêtements rigides. Du point de vu économique, le matelas Reno, est l'un des revêtements les plus avantageux, il pose généralement sur la berge transversalement par rapport au cours d'eau et donc suivant l'inclinaison maximum de la berge.

Il a été démontré que le revêtement en matelas Reno est stable en présence de charriage de fond dont les tensions sont doubles par rapport aux tensions acceptables pour un revêtement en enrochement de mêmes dimensions

Il a aussi été démontré qu'à vitesse du courant égale, le matelas Reno stable à une épaisseur de 3 à 4 fois inferieur a l'épaisseur nécessaire dans les mêmes conditions en adoptant le revêtement en enrochement, comme c'est démontré au tableau 1.2

	Epaisseur	Pierraille de remp	lissage	Vitesse critique m/s	Vitesse
Туре	(m)	Granulométrie	d ₅₀		limite m/s
	0 15-0 17	70-100	0.085	3.5	4.2
Matelas Reno	0.13-0.17	70-150	0.110	4.2	Vitesse limite m/s 4.2 4.5 5.5 6.1 5.5 6.1 5.5 6.4 7.6 8.0
	0.23-0.25	70-100	0.085	3.6	5.5
	0.23 0.23	70-150	0.120	4.5	6.1
	0.30	70-120	0.100	4.2	5.5
	0.50	100-150	0.125	5.0	6.4
Gabions	0.50	100-200	0.150	5.8	7.6
	0.50	120-250	0.190	6.4	8.0

Tableau 1.2 : Epaisseurs approximatives des revêtements en matelas Reno et en
gabions en fonction de la vitesse du courant [1].

Si les berges ont tendance a s'ébouler, il peut être suffisant d'adopter pour les parties éboulées, un revêtement plus robuste et plus lourd en gabions-boites de 0.50 a 1.00 mettre d'épaisseur, et si, au contraire, la nature ébouleuse du terrain est profonde et s'il faut procéder a une véritable consolidation de la berge, on choisira un revêtement de matelas Reno et gabions-boites.(figure 1.9)

En présence d'eaux industrielles ou saumâtres, particulièrement corrosives, il est préférable d'adapter des matelas Reno et des gabions galvanisés et plastifié. (figure 1.10), et (figure 1.11)



Figure 1.9 FRANCE- Revêtement en gabions boites de 0,50 m –Rivière du largue.



Figure 1.10 Iraq- Protection des berges de l'ile Tajlat du Tigri a l'aide de matelas Reno galvanisés et plastifiés.



Figure 1.11 ITALIE- Canalisation en matelas Reno galvanisés et plastifiés du Cervaro, prés de son embouchure.

1.5.2 Revêtements effectués en présence d'eau

Dans ce cas, les ouvrages pour la protection des berges sont souvent réalisés à l'aide d'enrochement (rip-rap) ou, quelques fois, a l'aide de pierres enveloppées dans des branchages et placées directement sur les berges immergées. La pose présente dés lors d'importantes incertitudes car, il est difficile d'obtenir une distribution uniforme du matériau sur tout risque de carence de défense d'une partie de la berge, il faut augmenter la quantité de matériau déversé. Il faut aussi considérer que les enrochements déversés le long d'une berge inclinée, par action du courant et par le poids même de la pierre, tendent à glisser vers le fond, ce qui dégarnit la partie supérieure de la berge. En outre, si le fond est vaseux, la base du revêtement n'a pas d'appui valable, le revêtement glisse et on en arrive à devoir répéter fréquemment l'opération de rééquilibrage des enrochements, avec les frais qui suivent. Notons que l'épaisseur du revêtement en matelas Reno, grâce aux systèmes de largage contrôlé, ne subit aucune augmentation dépendant de la pose sous l'eau. Pour les revêtements en enrochements, il faut habituellement, au contraire procéder a une augmentation de 50% a l'acte de la mise en œuvre.

Les difficultés et les obstacles qui se présentaient pour la réalisation de revêtements de berges sous l'eau sont maintenant éliminés grâce aux systèmes de pose des matelas Reno à l'aide de pontons ou d'équipements spéciaux.

Dans ce cas, le montage des éléments s'effectue sur la plate-forme mobile du ponton, en position horizontale, cela aide le remplissage des matelas Reno avec des moyens mécaniques, et les opérations de fermeture et de ligature sont plus régulières que celles qui sont effectuées sur les berges inclinées(1.12).



Figure 1.12 (a,b,c) Italie : Lombardie Revêtement en matelas Reno galvanisés et plastifiés en présence d'eau du canal adducteur de la centrale Thermoélectrique de Tavazzano a Mentenase [1].

1.5.3 Revêtements consolidés ou imperméabilisés au mastic bitumineux hydraulique

La pénétration du mastic bitumineux hydraulique donne lieu à une structure ayant les caractéristiques des deux matériaux. Avec le mastic de bitume, le matelas Reno conserve en effet sa flexibilité tandis que la compacité du remplissage est accrue tout en augmentant l'efficacité protectrice de la structure. Le traitement du mastic de bitume permet également de protéger la structure métallique conte l'action corrosive des eaux salées ou polluées et contre l'abrasion provoquée par le transport solide. A titre informatif, nous illustrons ci-dessous les caractéristiques fondamentales du mastic de bitume, dans tableau 1.3

Mastic de bitume hydraulique			Hors de l'eau	Sous l'eau
Composition	Sable (0-3 mm)		66-73 %	65-75 %
(pourcentage en	Filler		12-16 %	10-15 %
poids)	Bitume		15-18 %	15-20 %
Température pour		B40/50	160-180°C	-
la confection et		B60/70	155-175°C	-
l'application	Bitume	B80/100	150-170°C	140-160°C
		B180/200	-	130-150°C

 Tableau 1.3 : Caractéristique fondamental du mastic bitumineux [1].

La quantité de mastic a utilisé varie en fonction du résultat que l'on désire obtenir pour une simple consolidation, il faut lier la base de remplissage sans l'éliminer la perméabilité de la structure de façon a conserver les caractéristiques fonctionnelles des matelas Reno, pour l'imperméabilisation, le mastic doit recouvrir hermétiquement l'ensemble des pierres et former une couche de 20 à 30 mm sur la structure métallique de façon a ce qu'elle ne soit plus au contact direct de l'eau et des agents atmosphériques, les quantités minimum de mastic de bitume à appliquer dans les deux cas mentionnés sont indiquées dans la tableau 1.4

Туре	Epaisseur	Pierrage de	Mastic de	Vitesse du
	m	remplissage	bitume	courant
		mm	kg/m ²	m/s
	0.15 - 0.17	70 - 90	80 - 120	5.5
Matelas	0.23 - 0.25	70 - 120	120 - 160	6.3
Reno	0.30	100 - 150	160 - 200	7.0
Gabions	0.50	100 - 200	240 - 280	8.5

Tableau 1.4 Quantité unitaire minimum de mastic bitumineux coulable pour une pénétration partielle et/ou totale des matelas Reno et des gabions [1].

. Nous indiquons dans le tableau 1.5,les valeurs approximatives de l'épaisseur à adopter pour les revêtements en matelas Reno et en gabions, traités au mastic de bitume, en fonction de la vitesse du courant.

Tableau 1.5 Epaisseur approximatives en fonction de la vitesse du courant, desrevêtements en matelas Reno et en gabions traités au mastic du bitume [1].

Туре	Epaisseur	Pierrage de	Mastic de	Vitesse du
	m	remplissage	bitume	courant
		mm	kg/m ²	m/s
	0.15 - 0.17	70 - 90	80 - 120	5.5
Matelas	0.23 - 0.25	70 - 120	120 - 160	6.3
Reno	0.30	100 - 150	160 - 200	7.0
Gabions	0.50	100 - 200	240 - 280	8.5

Le montage et la mise en place de ces revêtements s'effectuent fondamentalement comme pour les revêtements non bitumés.

La préparation du mastic s'effectue dans une installation de mélange normal du genre de celles utilisées pour les routes, le mastic est transporté sur le chantier à l'aide de camions spécialement équipés de réservoirs agitateurs a palettes et ,le cas échéant, de brulure.

La pose à sec peut être exécutée par coulée directe sur la berge a l'aide de l'équipement cité

Si le camion ne peut atteindre le sommet du talus, le mastic est coulé à l'aide d'une grue a partir d'un réservoir isolé.

Sous l'eau, l'application du mastic peut être effectuée jusqu'à 2 mètre de profondeur en le laissant couler de l'extérieur sous l'effet de la pesanteur. Si la profondeur est supérieur et, de toute façon, si l'on désire imperméabiliser le revêtement en coulant du mastic du bitume jusqu'à saturation et formation d'une couche extérieure, il faut utiliser un équipement spécial.

1.5.4 Revêtement consolidés ou imperméabiliser au mastic de bitume, montés sur pontons et mis a l'eau avec équipements spéciaux

Comme nous l'avons vu pour les revêtements imperméabilisés effectués en présence d'eau, et a chaque fois que le revêtement doit être étanche, l'adoption des matelas Reno n'est pas seulement une possibilité mais une grande garantie pour un parfait succès technique et peut même résulter plus économique si l'on doit poser de grande quantités de matelas Reno et si l'on peut employer des épaisseurs réduites.

En général, l'exécution s'effectue sur des pontons expressément équipés, sur ces structures, les matériaux de remplissage du matelas Reno et le mastic bitumineux sont mise en œuvre avec plus de facilitée et de régularité, par rapport aux résultats que l'on pourrait obtenir a partir d'un plan incliné. La pénétration du mastic est également plus sure et uniforme.

Une fois encore, la mise a l'eau s'effectue facilement en faisant glisser les éléments sur la plate-forme du ponton qui a été inclinée pour cette opération.

L'installation des éléments s'effectue par superposition des bords (0.40 à 0.60 m), ce qui évite d'effectuer les joints sous l'eau, travaux longs et difficiles.

Les revêtements bitumés peuvent également être réalisés hors de l'eau à l'aide de grue, dans ce cas, les Operations relatives a l'exécution, au remplissage et au bitumage sont les mêmes que celles que nous avons examinées plus haut sauf qu'elles s'effectuent sur la berge et non sur le ponton (figure1.13).



Figure 1.13 Emilie Romagne préparation des matelas Reno sur ponton et largage des revêtement sur le Chiavanna et le canal d'évacuation de la central nucléaire de Caorso.

1.5.5 Resistance des revêtements matelas Reno et en gabions traités au mastic de bitume

Les revêtements traités au mastic de bitume (renforcement et joints) acquièrent un caractère monolithique ainsi qu'un poids total plus élevé, ce qui augmente la résistance au mouvement de l'eau.

De même, le mastic prévient les mouvements des pierres à l'intérieur de la structure, donc on ne parlera plus de «premier mouvement» en terme de paramètre de stabilité.

Pour ce type de revêtement, les déformations se produisent de façon différentes et dans des conditions beaucoup plus difficiles que pour les revêtements non traités au mastic de bitume.

Le tableau 1.6 donne les valeurs de la vitesse moyenne du courant à la quelle des matelas Reno et les gabions bitumés peuvent résister, en fonction de leur épaisseur.

Туре	Epaisseur	Pierraille de	Mastic de	Vitesse du
	(m)	remplissage	bitume	courant
		(mm)	(Kg/m ²)	(m/s)
Matelas	0.15-0.17	70-90	80-120	5.5
Reno	0.23-0.25	70-120	120-160	6.3
	0.3	100-150	160-200	7.0
Gabions	0.5	100-200	240-280	8.5

Tableau 1.6 épaisseurs indicatives du matelas Reno et gabions traités avec du sable asphalte coulé, en fonction de la vitesse de l'eau [2]

1.6 Comparaison du revêtement en matelas Reno avec d'autres revêtements

1.6.1 Comparaison entre le revêtement Reno et les revêtements en enrochements (rip-rap)

Les revêtements en enrochement (rip-rap) et les revêtements en matelas Reno et en gabions, se ressemblent par quelques caractéristiques et se différencient par d'autre.

Du fait que la masse du revêtement composée de pierre est un point commun, les calculs de stabilité se baseront sur la théorie de la force d'entrainement. Le revêtement en rip-rap n'est constitué que d'enrochement, alors que le matelas Reno et les gabions ont en plus, un grillage métallique, d'où :

- a) Le coefficient de Shields des matelas Reno et des gabions sera le double de celui du rip-rap : ainsi, à conditions hydrauliques égales, on utilisera pour les matelas Reno et les gabions, de la pierre de dimensions inferieures (1/2) à celles du rip-rap. Vice versa, la vitesse supportable par les matelas Reno et les gabions est plus que double par rapport au rip-rap (même 3 à 4 fois supérieur si la pierre utilisée est équivalente).
- b) Le «premier mouvement» de la pierre pour le revêtement en rip-rap détermine la condition limite de résistance du revêtement ; au-delà, le courant disperse les éléments et devient destructeur. Apres le premier mouvement des pierres, les matelas Reno et les gabions offrent, eux, une meilleure rétention, grâce au grillage ; on atteint une nouvelle position d'équilibre, le matelas Reno est déformé mais peut supporter des conditions encore plus difficiles sans compromettre sa résistance, et sans autre déformations.

- c) Les pierres des matelas Reno et des gabions sont de dimensions inférieures a celle du rip-rap ; la vitesse résiduelle au fond est donc inférieure, ce qui augmente la sécurité et donc la possibilité de réduire les filtres en gravier ou en géotextile.
- d) La réduction des dimensions des pierres entraine une légère diminution de la rugosité du revêtement, et une augmentation du débit des cours d'eau.
- e) Les règles pour les dimensionnement du rip-rap prévoient une épaisseur de revêtement minimum a 0,30 m, avec un rapport entre l'épaisseur et la dimension moyenne de la pierre variant de 1,5 à 2. Il faut augmenter l'épaisseur de 50% lorsqu'on effectue les travaux sous l'eau et il convient que l'inclinaison maximum des berges soit de 1 : 2.

Les revêtements des berges en enrochements (rip-rap) nécessitent d'une augmentation considérable au pied, ainsi que de précautions lors du projet et de la mise en œuvre.

Les matelas Reno et les gabions, qui ne présente pas ces inconvénients peuvent avoir une épaisseur réduite a (0,15 m); la mise en œuvre et le plongement en présences de l'eau ne nécessitent ni d'une augmentation d'épaisseur ni d'une réduction d'inclinaison des berges (inclinaison admissible 1 : 1,5), ni même d'une augmentation d'épaisseur au pied des berges. On garantit la stabilité au pied d'un revêtement en matelas Reno ou en enrochement par approfondissement de la pose du revêtement (figure 1.14). Ou par étalement horizontal Δx (figure 1.15).

Si on utilise des enrochements, il faut pousser la pose du revêtement jusqu'à un niveau inferieur à la profondeur d'érosion prévue Δz . Si on utilise le matelas Reno, il suffit d'atteindre le niveau d'érosion ; il faut toutefois, dans le second cas, augmenter la structure des enrochements, sans pourtant augmenter l'épaisseur du matelas Reno.

En se reportant au dimensionnement des revêtements en matelas Reno et à l'étude de projet de revêtements en enrochements, on a établie un diagramme de comparaison des épaisseurs en fonction de la vitesse du courant (Figure 1.16).

On observe que l'épaisseur d'un revêtement en enrochement est, en moyenne de 3 à 4 fois supérieur a celle d'un revêtement en matelas Reno et en gabions.



Figure 1.14 Approfondissement du revêtement vu la profondeur d'érosion prévue[2]



Figure 1.15 Extension horizontal du revêtement vu la profondeur d'érosion prévue[2]



Figure 1.16 Epaisseur du matelas Reno en fonction de la vitesse du courant

1.6.2 Comparaison entre les revêtements en matelas Reno et les revêtements en béton

Les essais précédents montrent que, si l'on compare un revêtement en béton à un revêtement en matelas Reno, ce dernier permet :

- a) De réduire un run-up de 30%, d'amener le run-down à un niveau voisin du niveau stable de l'eau, de réduire le facteur de réflexion de 50% ceci pour une inclinaison des berges de 1 :3 et une épaisseur du matelas Reno de 0,15 m ;
- b) De réduire de 40% le run-up et le run-down, et de 50-80% le facteur de réflexion, avec une inclinaison des berges de 1 :1,5 et une épaisseur du matelas Reno de 0,15 à 0,25 m ;
- c) De réduire le run-up et le run-down de 40%, et le coefficient de réflexion de 10%, avec une inclinaison des berges de 1 :1,5 et des matelas Reno de 0,15 m renforcés au mastic de bitume.

Il est possible de confronter la protection des berges en matelas Reno, contre le mouvement des vagues, aux revêtements en enrochements.
On compare, pour cela, les résultats des essais et ainsi, par exemple, un matelas Reno de 0,15 d'épaisseur est stable pour des hauteurs de vagues de 0,75 m, avec une inclinaison de la berge de 1 :1,5, et une épaisseur du revêtement en enrochement de 60 à 70 cm.

De même, un matelas Reno de 0,25 m d'épaisseur est stable pour des hauteurs de vague de 1,25 m, avec inclinaison de 1 :1,5 ; alors qu'il faudrait une épaisseur de revêtement en enrochement de 0,95 à 1,15 m.

1.7 Conclusion

En guise de conclusion, nous avons illustré a travers cette courte parabole les différentes caractéristiques, fonctionnalités et les mises en œuvre d'un revêtement en matelas Reno, ainsi que ses différentes catégories. et des comparaison avec différents revêtements de canaux a ciel ouvert (revêtement en béton, et en enrochement), pour distinguer les ressemblances et les différences, le chapitre suivant objet d'une étude déterministe de ces différentes stabilités.

Chapitre 2 : Calcul déterministe des canaux a ciel ouvert en matelas Reno

2.1 Introduction

Apres avoir présenté brièvement les revêtements en matelas Reno, nous passons dans ce chapitre à la méthode de dimensionnement, et aussi un calcul déterministe est effectué sur un canal trapézoïdale en matelas Reno, qui tient compte des différentes vérification de stabilité du matelas Reno en passant par le calcul hydraulique.

2.2 Calcul hydraulique des cours d'eau à surface libre

Pour les cours d'eau naturels comme pour les canaux artificiels (canaux industriels, d'irrigation, d'assainissement des terrains navigables, etc.), il est souvent possible, en phase de projet, d'envisager les conditions de mouvement uniforme, c'est-à-dire de mouvement permanent avec débit constant dans chaque section, pour un cours d'eau qui coule dans un lit prismatique incliné dans le sens du mouvement et dont la pente est constante, avec surface libre parallèle au fond, ainsi la vitesse de l'écoulement est exprimée par la relation de Chézy

$$\mathbf{V} = \mathbf{C}\sqrt{\mathbf{R}_{\mathbf{h}}.\,\mathbf{I}} \tag{2.1}$$

Avec

V : Vitesse moyenne d'écoulement (m/s)

R_h: Rayon hydraulique(m)

I : pente du canal

Le coefficient de Chezy peut être donné par la formule de Manning :

$$C = \frac{1}{\eta} \cdot R_h^{1/6} \qquad (m^{1/2} s^{-1})$$
 (2.2)

Où η est un coefficient de rugosité , dont la valeur dépend de la nature des parois (tableau 2.1)

Et aussi donnée par les relations suivantes [3]

• Formule de strickler
$$\eta = \frac{d_{50}^{1/6}}{21}$$
 (2.3)

• Formule de Meyer-Peter et Muller $\eta = \frac{d\overline{6}_{90}}{26}$

Dans ces formules η est exprimé en $s/m^{1/3}$, toute fois nous recommandons l'utilisation de la l'équation (2.3) lorsque la granulométrie est étroite et l'équation (2.4) lorsque elle est étalée. Ils ne faut pas employer ces formules pour le sable, elles conduiraient a des résultats nettement trop élevé.

(2.4)

Туре	Nature des berges	$\eta(s/m^{1/3})$
1	Canaux revêtus en matelas Reno	0.0158
	parfaitement colmatés à l'aide du mastic	
	de bitume hydraulique afin d'obtenir	
	une surface plane et lisse	
2	Canaux revêtus en matelas Reno et	0.0172
	en gabions parfaitement colmatés à	
	reflux à laide du mastic de bitume	
	hydraulique par coulée direct	
3	Canaux revêtus en matelas Reno et	0.0200
	en gabions renforcés a l'aide de mastic	
	de bitume hydraulique qui se distribue	
4	autour de pierraille superficielle	0.0015
4	Canaux revetus en matelas Reno et	0.0215
	en gabions renforces a l'aide du mastic	
	de bitume qui s'infiltre en profondeur	0.0222
5	Canaux revetus en mateias Reno	0.0222
	rempils avec materiaux de selection et	
(Concurre soluție en motolog. Dono	0.0250
0	canaux revetus en materias Reno	0.0230
	mise en œuvre non soignée	
7	Canaux revêtus en matelas Reno	0.0270
/	remplis avec des matériaux de carrière	0.0270
	non sélectionnés et mise en œuvre non	
	soignée	
8	Canaux revêtus en gabions remplis	0.0260
	avec un matériel bien sélectionné et	
	mise en œuvre soignée	
9	Canaux revêtus en gabions remplis	0.0285
	avec matériel non sélectionné et mise en	
	œuvre soignée	
10	Canaux en terre en mauvaises	0.0303
	conditions d'entretien; végétation au	
	fond et sur les berges ou dépôts	
	irréguliers de pierres et gravier ou	
	profondes érosions. Même canaux en	
	terre creusés avec engins mécaniques et	
	entretien négligé !	

Tableau 2.1	:	Coefficients	de	rugosité	[1]	L

La forme trapézoïdale de la section transversale des canaux à surface libre est de plus en plus couramment utilisée.

Ses principaux éléments géométriques et hydrauliques sont indiqués à l'annexe1.

2.3 Dimensionnement des revêtements en matelas Reno

Le dimensionnement d'un revêtement en matelas Reno consiste a la vérification de la stabilité du fond du canal, et des berges, en passant par les différents termes de vitesses, tension d'entrainement, effet de déformation, et enfin par la stabilité du fond du canal et le sol.

2.3.1 Vérification en termes de vitesse

On évalue habituellement la stabilité du revêtement en se basant sur la vitesse (vitesse moyenne V du courant dans la section).

Etant donné le revêtement, contrairement à la tension tangentielle qui permet a elle seule de définir le stade de stabilité, la vitesse critique, dépend aussi de le profondeur de l'eau Y. En effet la vitesse et la profondeur de l'eau sont liées entre elles et à la tension tangentielle par :

$$\tau_{\rm b} = \gamma_{\rm w} \eta^2 \frac{{\rm v}^2}{{\rm R}^{1/3}} \tag{2.5}$$

L'équation (2.5) s'obtient en tirant la valeur de l'inclinaison de la formule de Manning et en exprimant la tension d'entrainement τ moyenne comme suit :

$$\tau_{\rm b} = \gamma_{\rm w} R \ {\rm I} \tag{2.6}$$

La figure 2.1 compare la résistance à la vitesse V_c d'un revêtement en fonction du nombre de Froude et des dimensions de la pierre.

La comparaison avec un revêtement en rip-rap montre qu'à dimensions égales de la pierre, la résistance à la vitesse du matelas Reno est de loin supérieure à celle du matériau en vrac. A vitesses égales, la taille de la pierre stable pour un revêtement en matelas Reno est de loin inférieure à celle du matériau en vrac.

Ce qui explique la valeur deux fois plus élevée du coefficient de Shields pour les matelas Reno, par rapport à l'enrochement (rip-rap).

La figure 2.2 montre la résistance à la vitesse des matelas Reno soumis aux essais, en fonction de l'épaisseur du revêtement utilisé.



Figure 2.1 Vitesse critique V_C du mouvement des roches en fonction de leurs tailles [2].



Figure2.2 Vitesse critique qui initie le mouvement de roche en fonction de Reno épaisseur du matelas [2].

2.3.2 Vérifications en termes de tension d'entrainement

🖊 Fond du canal

Lorsque la pierre ne se déplace pas, on dit que le revêtement est stable ; qu'il s'agisse d'un revêtement en matelas Reno et en gabions avec grillage métallique ou d'enrochement (rip-rap).

Le premier mouvement de ces éléments correspond à la limite de stabilité de revêtement.

La tension tangentielle qui s'exerce sur le revêtement est :

$$\tau_{\rm b} = \gamma_{\rm w.} Y. I \tag{2.7}$$

Ou γ_w représente le poids spécifique de l'eau, Y la profondeur de l'eau, I l'inclinaison du fond/horizontale.

Considérons un caillou d'un diamètre égal au diamètre moyen d_m de la pierre du fond (c'est-à-dire le diamètre permettant le passage de 50% de la pierre qui constitue le revêtement) ; le coefficient de Shields sera représenté par la valeur adimensionnelle :

$$\mathbf{C}_* = \frac{\mathbf{\tau}_c}{(\mathbf{\gamma}_s - \mathbf{\gamma}_w) \, \mathbf{d}_m} \tag{2.8}$$

Ou τ_c représente la tension tangentielle d'entrainement lors de la situation critique du premier mouvement, et γ_s le poids spécifique du matériau inerte.

Le dénominateur est proportionnel à la tension normale que le poids du caillou exerce sur le fond. Le coefficient de Shields est donc analogue à un coefficient de frottement.

La valeur de la tension tangentielle au fond, qui peut se vérifier sans mouvement de la pierre (tension tangentielle critique) est :

$$\tau_{c} = C_{*}(\gamma_{s} - \gamma_{w})d_{m}$$
(2.9)

Si l'inégalité entre l'équation (2.7) et (2.9) est vérifiée le revêtement est dit stable :

$$\tau_{\rm b} \le \tau_{\rm c} \tag{2.10}$$

On admet par contrôle de déformations que :

$$\tau_b \leq 1, 2\tau_c \tag{2.11}$$

📥 Les berges

Le coefficient de Shields pour l'enrochement (rip-rap) est d'environ 0,047 ; pour la pierre emprisonnée par grillage métallique (matelas Reno et gabions) le coefficient est de :

$$C_* \cong 0, 10 \tag{2.12}$$

Donc, grâce à l'emprisonnement par grillage métallique, la pierre de remplissage des matelas Reno et des gabions, à dimensions égales, résiste à une tension tangentielle plus que double par rapport au rip-rap (figure 2.2).

Les équations précédentes concernant la tension tangentielle τ_b et la tension tangentielle critique τ_c concernant le revetement du fond du canal ; pour le revêtement des berges d'un canal à section trapézoïdale, la tension tangentielle est :

$$\tau_{\rm m} = 0.75. \gamma_{\rm W}. Y. I$$
 (2.13)

Et la tension tangentielle critique :

$$\tau_{\rm s} = \tau_{\rm c} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \varphi}} \qquad 2.(14)$$

Ou θ represente l'inclinaison de la berge et φ l'angle de frottement interne de la pierre qui constitue le revêtement pour les matelas Reno, on accepte

$$\tau_{\rm m} \le \tau_{\rm s}$$
 (2.15)

On admet par contrôle des déformations, que :

$$\tau_{\rm m} \le 1, 2\tau_{\rm s} \tag{2.16}$$

2.3.3 Estimation des effets de déformation

Lorsque la contrainte de cisaillement atteint la valeur critique de la condition de «mouvement initial», une partie de la pierre de remplissage se déplace en aval du compartiment du matelas Reno Figure 2.3



Figure2.3 schéma du mouvement des pierres dans les poches [2]

Si les contraintes de cisaillement augmentent de nouveau, l'une des deux choses peuvent se produire:

 soit le revêtement perdra de son efficacité (si le sol de base sous le matelas Reno est exposé).

• ou soit un nouvel équilibre sera atteint dans lequel la force du treillis métallique en acier permet de remplir sa fonction de confinement.

Le degré de protection offert par le matelas Reno au sol de base sous-jacent reste inchangé même après cette déformation (fournissant les matériaux de base non exposés) puisque la vitesse de l'eau sous le matelas Reno ne change pas de façon significative.

Pour évaluer le degré de déformation, le paramètre $\frac{\Delta z}{d_m}$ est utilisé, où Δz est la différence de hauteur entre la surface de la roche maximale et minimale dans un compartiment de matelas Figure2.4

Il peut être défini comme «paramètre de Shields efficace»

$$C'_* = \frac{\tau_b - \tau_c}{(\gamma_s - \gamma_w)d_m}$$
(2.17)

Avec une augmentation de la résistance d'emprisonnement du grillage métallique. La vitesse de l'eau sous le matelas restant inchangée, le degré de protection du fond sous-jacent ne varie pas, même après déformation, si, bien entendu, le fond n'est pas ouvert. La protection est efficace si :

$$\mathbf{t} - \Delta \mathbf{t} \ge \mathbf{d}_{\mathbf{m}} \tag{2.18}$$

Où 't' est l'épaisseur du matelas non déformé et Δt la diminution max de l'épaisseur de remplissage.

Les essais montrent que : $\Delta t \simeq \Delta z/2$ où Δz est la distance verticale entre le point le plus haut et le point le plus bas de la surface recouverte par la pierraille ; l'équation (2.18) devient :

$$\frac{\Delta z}{d_{\rm m}} \le 2(\frac{t}{d_{\rm m}} - 1) \tag{2.19}$$

Pour le contrôle de l'effet de déformation, le revêtement est dit stable si

$$\mathbf{t} - \mathbf{d}\mathbf{m} \ge \Delta \mathbf{z}/2 \tag{2.20}$$

La même procédure d'évaluation de l'acceptabilité des déformations est suivie également pour le matelas Reno sur les berges

La figure 2.4 montre que le paramètre $\frac{\Delta z}{d_m}$ reste inferieur a 1.6 équivalent à t = 1.8d_m, un matelas Reno d'une épaisseur de 1.8 à 2 fois d_m peut supporter des conditions hydrauliques

difficiles, sans que le fond ne se découvre. D'ou nous adopterons comme règle de dimensionnement des matelas Reno, des épaisseurs au moins égales de 1.8 à 2 fois d_m , avec ainsi de bonne marges de résistance.



Figure2.4 Rapport entre le paramètre de déformation et le coefficient d'efficacité de shields [2].

Afin de trouver l'équation du graphe de la figure 2.4, de la courbe nous l'avons reproduit sur Excel, et elle nous donne le schéma montré sur la figure 2.5, dont sont équation est :

$$F(x) = 0,306\ln(x) + 2,328$$
 (2.21)





2.3.4 Vérification vis a vis de l'érosion du matériau de base

L'épaisseur du revêtement et la dimension de la pierre doivent permettre aux revêtements en matelas Reno, de résister aux mouvements du courant et d'éviter l'érosion du matériau de base.

Il faut donc que la vitesse de l'eau entre la couche de la pierre soit minimum afin d'éviter tout mouvement des particules qui composent le terrain.

On peut déterminer la vitesse sous le matelas Reno (à l'interface avec le fond sous-jacent et le filtre), en utilisant la formule de Manning :

$$V_{\rm b} = \frac{1}{n_{\zeta}} \left(\frac{d_{\rm m}}{2}\right)^{2/3} . I^{1/2}$$
(2.22)

Où :

 V_b Représente la vitesse à l'interface du matelas Reno –fond sous –jacent et

 n_{ζ} Le coefficient de rugosité du fond.

On peut poser $\mathbf{n}_{\zeta} = \mathbf{0}, \mathbf{02}$ s'il y a filtre en géotextile sous le matelas ou s'il n'y en a pas ; par contre, on aura $\mathbf{n}_{\zeta} = \mathbf{0}, \mathbf{025}$ si le filtre est en gravier,

Il faudra comparer la vitesse V_b et la vitesse V_e (vitesse acceptable à l'interface avec le matériau de base).

La vitesse d'érosion V_e est la vitesse que le sol peut supporter sans subir d'érosion, on peut obtenir sa valeur de la figure2.6 pour les terrains cohérents, et on a pour les terrains incohérents,

$$V_{\rm e} = 16, 1. d_{50}^{1/2} \tag{2.23}$$

Où V_e est exprimée en (m/s) et d_{50} est exprimé en (m) et represente la dimension des particules du sol auxquelles on veut éviter l'érosion.

L'utilisation d'un filtre géotextile implique une réduction de la vitesse de l'eau qui le traverse de haut en bas, à l'interface avec le sol ; sa valeur est 1/4 - 1/2 de la valeur de V_b (donnée par l'éq. (2.22), même si le filtre est colmaté).

Si la vitesse de l'eau à l'interface avec le matériau de base, est supérieure à la vitesse compatible avec le terrain, même en utilisant un filtre géotextile, il faudra prévoir un filtre en gravier d'une épaisseur d'au moins 0,15 à 0,20 m, et de toute façon supérieur à la quantité :

$$\mathbf{S} = \frac{\mathbf{d}_{\mathrm{v}}}{\mathrm{f}} \left[\mathbf{1} - (\frac{\mathbf{V}_{\mathrm{e}}}{\mathrm{V}_{\mathrm{b}}})^2 \right]$$
(2.24)

Où f est le coefficient de Darcy-Weisbach (ici f = 0,05) et d_v est le diametre équivalent des interstices (on peut le poser égal à 1/5 de la dimension moyenne du gravier qui constitue le filtre) :

$$\mathbf{d}_{\mathbf{v}} = \frac{\mathbf{d}_{50}^{(\text{filtre})}}{5} \tag{2.25}$$

On détermine la granulométrie du filtre grâce aux équations suivantes :

$$\frac{d_{50}^{(\text{filtre})}}{d_{50}^{(\text{sol})}} \le 40 \tag{2.26}$$

$$5 \le \frac{d_{15}^{(\text{filtre})}}{d_{15}^{(\text{sol})}} \le 40 \tag{2.25}$$

$$\frac{d_{15}^{(\text{filtre})}}{d_{85}^{(\text{sol})}} \le 5 \tag{2.26}$$



Figure 2.6 Valeurs des vitesses admissibles maximum pour terrains cohérents [2]

2.4 Application de la méthode déterministe à une étude de cas

Bref rappel historique:

L'étude est intitulée «Etude de réhabilitation et d'aménagement du lit de l'oued Allaghane» entre dans le cadre d'une convention passée entre l'Assemblée Populaire Communale de Tazmalt et AFRICAN GEOSYSTEM COMPANY (AGC). Le bon de commande portant le numéro 07/04 a été émis en date du 17/02/2004.

Elle a pour objectif de remettre l'oued Allaghane dans son thalweg initial (historique) et le recalibrer afin d'enrayer définitivement les inondations qui surviennent au niveau de la RN26 et les nuisances sur les habitations et terrains agricoles.

Le ruissèlement de l'oued Allaghane coulait dans l'axe central du cône de déjection, les extraits des plans, des lots ruraux datés de 1878 peuvent témoigner de cette situation.

L'étude vise à aménager un canal pour le drainage du ruissellement dans son itinéraire initial.

∔ Présentation du canal

Dans le cadre de l'aménagement d'un cours d'eau naturel, il s'agit de réaliser un canal de drainage pour un débit Q_{10} = 39.3 m³/s qui correspond a une période de retour de dix ans, et d'inclinaison du fond I=0,038. La section du canal est représentée à la (figure2.7). Le canal traverse un sol sablonneux (d₅₀ = 0,5mm) Il y a lieux de déterminer les caractéristiques d'un revêtement en matelas Reno.



Figure 2.7 matelas reno en maille type 5*7 fil Φ 2.00 et de 0.25 epaisseur

Le revêtement en matelas Reno aura une épaisseur de 0,25 m, avec maille type 5x7, diamètre du fil : 2,00 mm, et dimensions des pierres de remplissage 100-180 mm (d_m = 140mm et d₉₀ = 170mm).

2.4.1 Calcul hydraulique

• Calcul du coefficient de rugosité n

$$\eta = \frac{d_{90}^{1/6}}{26} = \frac{0,170^{1/6}}{26} = 0,0286$$

Les valeurs de la surface de la section coulante S_m , du contour mouillé P_m , du rayon hydraulique R_h et de la largeur B de la surface de l'eau sont :

$$S_{m} = by + Y^{2} \cot g\theta = 20 \times 0.47 + 0.47^{2} \times 2 = 9.88 \text{ m}^{2}$$

$$P_{m} = b + 2 \times Y / \sin \theta = 20 + 2 \times \frac{0.47}{0.447} = 22.11 \text{ m}$$

$$R_{h} = \frac{Sm}{Pm} = 0.447 \text{ m}$$

$$B = b + 2v \cot g\theta = 20 + 2 \times 0.47 \times 2 = 21.89 \text{ m}$$

2.4.2 Vérification en terme de vitesse

On détermine la vitesse V, le débit Q, la tension d'entrainement τ_b et le numero de Froude comme suit :

$$V = \frac{1}{n} R_{h}^{\frac{2}{3}} \times I^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{0.0286} \times 0.447^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{0.038} = 3.98 \frac{m}{s}$$
$$Q = V \times S_{m} = 3.98 \times 9.98 = 39.3 \text{ m}^{3}/\text{s}$$
$$F = \frac{V}{\sqrt{gA/B}} = 3.98/\sqrt{9.81 \times \frac{9.88}{21.89}} = 1.89$$

D'âpres la figure 2.8 on a $\,V_c \simeq$ 5,18 m/s donc $\,V < V_c$



Figure 2.8 vitesse critique Vc du mouvement des roches en fonction de leurs tailles [2]

Vérification :

Les résultats démontrent que $V < V_c$ Donc le test de vitesse est vérifiée

2.4.3 Vérification en terme de tension d'entrainement 4 Stabilité du fond du canal

Pour $\gamma_s = 2500 \text{ kg/m}^3$, la tension d'entrainement critique est de

•
$$\tau_{\rm b} = \gamma_{\rm w} Y I = 1000 \times 0.47 \times 0.038 = 17.92 \frac{\rm kg}{\rm m^2}$$

•
$$\tau_c = 0.10(\gamma_s - \gamma_w)d_m = 0.10(2500 - 1000)0.140 = 21 \text{ kg/m}^2$$

• Donc τ_b est inferieur à τ_c , mais moins de 20%, la matelas de 0,25 m suffit donc à protéger le fond et les berges. Même si il faut s'attendre a certaine adaptation.

4 Stabilité des berges

•
$$\tau_{\rm m} = 0.75 \gamma_{\rm w} y_{\rm i} = 0.75 \times 1000 \times 0.47 \times 0.038 = 13.44 \text{ kg/m}^3$$

• $\tau_s = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 41^\circ}} \tau_c = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 26.5^\circ}{\sin^2 41^\circ}} \times 21 = 15.4 \text{ kg/m}^2$

• Donc τ_s est inferieur à τ_m ; mais moins du 20%; le matelas de 0,25 m suffit donc à protéger les berges. Même si il faut s'attendre a certaine adaptation.

2.4.4 Effet de déformation

📥 Fond du canal

Pour évaluer les déformations du revêtement du fond, on calcule le coefficient :

$$C'_{*} = \frac{\tau_{b} - \tau_{c}}{(\gamma_{s} - \gamma_{w})d_{m}} = \frac{17.92 - 21}{(2500 - 1000)0,140} = -0.015$$

D'âpres la figure2.5, pour le fond du canal $C'_* = -0.015$, on a : $\frac{\Delta z}{d_m} = 0$. Et pour les berges $C''_* = -0.049$, on a : $\frac{\Delta z}{d_m} = 0$.

Donc $\Delta z = 0 \times (-0.015) = 0$ m, ce qui signifie que la partie en amont de la poche subira une réduction de $\frac{\Delta z}{2} = 0$ m avec un reste de 0,25 – 0 = 0,25m.

L'épaisseur est donc suffisante à ne pas exposer le matériau de base à l'action érosive du courant.

📥 Berges

On procède de la même façon pour les berges :

$$C_*'' = \frac{\tau_m - \tau_s}{(\gamma_s - \gamma_w)d_m} = \frac{13.44 - 15.4}{(2500 - 1000)0.140} = -0.009$$

D'âpres la figure 2.13, pour les berges $C'_* = -0.009$, on a : $\frac{\Delta z}{d_m} = 0$. et pour les berges $C''_* = -0.009$, on a : $\frac{\Delta z}{d_m} = 0$.

Donc $\Delta z = 0 \times (-0.009) = 0$ m, ce qui signifie que la partie en amont de la poche subira une réduction de $\frac{\Delta z}{2} = 0$ m avec un reste de 0,25 – 0 = 0,25m.

L'épaisseur est donc suffisante à ne pas exposer le matériau de base à l'action érosive du courant.

2.4.5 Vérification de vis a vis de l'érosion du matériau de base

On calcule la vitesse à l'interface matelas-filtre :

$$V_{b} = \frac{1}{n_{\zeta}} \left(\frac{d_{m}}{2}\right)^{2/3} . I^{1/2}$$
$$V_{b} = \frac{1}{0.02} \left(\frac{d_{m}}{2}\right)^{2/3} i^{1/2} = \frac{1}{0.02} \left(\frac{0.140}{2}\right)^{2/3} \sqrt{0.038} = 1.65 \text{ m/s}$$

La valeur de la vitesse d'érosion pour un sol sablonneux est :

$$V_{e} = 16.1d_{50}^{\frac{1}{2}} = 16.1 \times \sqrt{0.0005} = 0.36 \text{ m/s}$$

La vitesse V_b est supérieur a la vitesse d'érosion V_e .

2.5 Résultat et discussion

En procédant de la même manière que précédemment nous donnons ci-après les résultats de calcul sous différents débits a savoir un débit vingtennale, cinquantennale, centennale et enfin milléniale

Ce calcul est ainsi automatisé sous un programme Excel[©] présenter dans le tableau 2.2, que nous avons élaboré pour un calcul déterministe des paramètres du matelas Reno conforme a l'organigramme citer en annexe 2.

Tablaan 2.2	Várification	do la stabilitá	du Matalas Dana	nour un dáhi	t vingtonnolo
Tabicau 2.2	v ci incation	ut la stabilite	uu Matchas Keno	pour un ucon	i vinguinaic

	Vitesse d'écroûtement de l'eau	4,276
test de vitesse	Vitesse critique V _c	4,866
	Vérification	vérifiée
	Tension d'entrainement τ_b	20,09
Stabilité du fond du canal	Tension critique τ_c	21,00
	Contrôle de stabilité du fond du canal	admise
	Tension d'entrainement τ_m	15,06
Stabilité des Berges	Tension critique τ_s	15,40
	Contrôle de stabilité des berges	admise
	Coefficient de Shields Pour le fond du canal C*'	-0,004
	$\Delta Z/dm$	0.000
Effet de déformations	Contrôle de déformation du fond du canal	vérifiée
	Coefficient de shields pour les berges C*'	- 0,002
	$\Delta Z/dm$	-0,000
	Contrôle de déformation des berges	vérifiée
	Vitesse a l'interface filtre-matelas Reno V_b	1,655
stadilite entre le mateias Keno et le sol	Vitesse d'érosion V _e	0,360
	Vérification	non vérifiée

	Vitesse d'écoulement de l'eau	4,586
test de vitesse	Vitesse critique V _c	4,866
	Vérification	vérifiée
	Tension d'entrainement τ_b	22,45
Stabilité du fond du canal	Tension critique τ_c	21,00
	Contrôle de stabilité du fond du canal	admise
	Tension d'entrainement τ_m	16,84
Stabilité des Berges	Tension critique τ_s	15,40
	Contrôle de stabilité des berges	admise
	Coefficient de Shields Pour le fond du canal C*'	0,007
	$\Delta Z/dm$	0,806
Effet de déformations	Contrôle de déformation du fond du canal	vérifiée
	Coefficient de shields pour les berges C*'	0,007
	$\Delta Z/dm$	0,804
	Contrôle de déformation des berges	vérifiée
Stabilité entre le matelas Reno et le sol	Vitesse a l'interface filtre-matelas Reno V_b	1,655
	Vitesse d'érosion V _e	0,360
	Vérification	non vérifiée

Tableau 2.3 Vérification de la stabilité du Matelas Reno pour un débit cinquantennale

Tableau 2.4 Vérification de la stabilité du Matelas Reno pour un débit centennale

	Vitesse d'écoulement de l'eau	4,816
test de vitesse	Vitesse critique V _c	4,866
	Verification	vérifiée
	Tension d'entrainement τ_b	24,28
Stabilité du fond du canal	Tension critique τ_c	21,00
	Contrôle de stabilité du fond du canal	admise
	Tension d'entrainement τ_m	18,21
Stabilité des Berges	Tension critique τ_s	15,40
	Contrôle de stabilité des berges	admise
	Coefficient de Shields Pour le fond du canal C [*]	0,016
	$\Delta Z/dm$	1,056
Effet de déformations	Contrôle de déformation du fond du canal	vérifiée
	Coefficient de shields pour les berges C*'	0,013
	$\Delta Z/dm$	1,009
	Contrôle de déformation des berges	vérifiée
Stability and a large states Dama state	Vitesse a l'interface filtre-matelas Reno V_b	1,655
stadilite entre le mateias Keno et le sol	Vitesse d'érosion V _e	0,360
501	Vérification	non vérifiée

	Vitesse d'écoulement de l'eau	5,424
test de vitesse	Vitesse critique V _c	4,866
	Vérification	non vérifiée
	Tension d'entrainement τ_b	29,42
Stabilité du fond du canal	Tension critique τ_c	21,00
	Contrôle de stabilité du fond du canal	non admise
	Tension d'entrainement τ_m	22,06
Stabilité des Berges	Tension critique τ_s	15,40
	Contrôle de stabilité des berges	non admise
	Coefficient de Shields Pour le fond du canal C*'	0,040
	$\Delta Z/dm$	1,344
Effet de déformations	Contrôle de déformation du fond du canal	vérifiée
	Coefficient de shields pour les berges C*'	0,032
	$\Delta Z/dm$	1,272
	Contrôle de déformation des berges	vérifiée
	Vitesse a l'interface filtre-matelas Reno V_b	1,655
stabilite entre le mateias Keno et le sol	Vitesse d'érosion V _e	0,360
	Vérification	non vérifiée

Tableau 2.5 Vérification de la stabilité du Matelas Reno pour un débit centennale

Nous remarquons que tous les débit de crue sauf pour le milléniale (Q_{100}) , les stabilité (vitesse, fond du canal, berges, effet déformation) sont vérifiées, donc notre matelas Reno est stable. Alors que pour un débit de crue milléniale, le matelas Reno n'est pas stables.

La vitesse entre le matelas Reno et le sol est non vérifiée nous jugerons utile d'adopter un filtre en géotextile, pouvant réduire la vitesse a l'interface matelas-filtre de 2 a 4 fois .

2.6 Conclusion

Lors de la réalisation du revêtement d'un canal a ciel ouvert, les ingénieurs calculent la stabilité du matelas Reno en s'appuyant sur un débit fréquentiels, pour diminuer le cout de la réalisation, ils se basent par exemple sur une fréquence décennale, sans tenir compte qu'il y a risque que les revêtements en matelas Reno pourra faire face a une crue de mille ans lors de sa période de vie.

Dans la pratique, le dimensionnement du revêtement d'un canal en matelas Reno est taché d'incertitudes générer par des coefficients de sécurité, C'est pour cela que dans le chapitre 3, nous aurons à analyser le matelas Reno par la méthode fiabiliste tenant compte de différentes fréquences de débits.

Figure 2.1 Vitesse critique <i>VC</i> du mouvement des roches en fonction de leurs tailles[2]	. 27
Figure2.2 Vitesse critique qui initie le mouvement de roche en fonction de Reno épaisseur matelas[2].	r du . 27
Figure2.3 schéma du mouvement des pierres dans les poches [2]	. 29
Figure2.4 Tension tangentielle critique en fonction de la taille des cailloux[2].	. 31
Figure 2.5 Equation de la tension tangentielle critique en fonction de la taille des cailloux	. 32
Figure2.6 Valeurs des vitesses admissibles maximum pour terrains cohérents[2]	. 34
Figure 2.7 matelas reno en maille type 5*7 fil Φ 2.00 et de 0.25 epaisseur	. 35
Figure 2.8 vitesse critique Vc du mouvement des roches en fonction de leurs tailles [2]	. 36

Chapitre 3 : Analyse fiabiliste des canaux a ciel ouvert en matelas Reno

3.1 Introduction

Apres avoir mené un calcul déterministe du canal trapézoïdales en matelas Reno, nous nous intéressons dans ce chapitre à l'analyse fiabiliste, en utilisant l'approche probabiliste basée sur la simulation de Monte-Carlo classique. La variable aléatoire utilisée cette analyse est le débit de crue obéissant a une loi de distribution de type poisson.

3.2 Contexte fiabiliste

Pour permettre une meilleure construction, il est nécessaire de faire un bon dimensionnement des différents paramètres pour assurer un rapport adéquat entre le poids et la résistance. En dimensionnement, les calculs analytiques et les simulations numériques ne fournissent généralement qu'un seul résultat, or de petites variations affectent les paramètres d'un élément à l'autre, et les conditions réelles de changement sont rarement parfaitement connues. Assurer la sécurité du dimensionnement exige d'intégrer la notion d'incertitude. C'est dans ce contexte que plusieurs travaux sont lancés dans le domaine du calcul fiabiliste des structures en vue de prolonger leurs durée de vie et de rationaliser leurs exploitations. D'après la littérature, plusieurs méthodes probabiliste ont été utilisées dans le calcul fiabiliste. António et Hoffbauer [4] ont proposé une approche qui considère simultanément la fiabilité et la robustesse d'un matériau composite en se basant sur deux méthodes ; la fiabilité basée sur l'optimisation de la conception (RBDO) et l'optimisation de conception robuste (RDO). DansHang-Zhou Li et Bak Kong Low [5] ont présenté une méthode fiabiliste du premier ordre (FORM). Cette méthode est utilisée pour le calcul de l'indice de fiabilité d'un tube circulaire soumis à un champ de contraintes hydrostatiques. tant dis que Frangopol et Recek [6] ont développé une méthode fiabiliste focalisée sur les stratifiés soumis à des chargements aléatoires en définissant le critère de défaillance par l'utilisation de la méthode de Monte Carlo, avec la quelle nous effectuerons notre calcul probabiliste.

3.3 Notions de probabilité

3.3.1 Qu'est-ce qu'une approche probabiliste ?

On appelle approche probabiliste la méthode qui s'appuie sur la théorie de la fiabilité pour évaluer la probabilité de défaillance ou l'indice de fiabilité de la structure. Le mode de fonctionnement de la structure est décrit par un état limite mais les incertitudes liées aux paramètres d'entrée sont introduites sous forme de loi de probabilité affectée à chaque variable. Ces lois de probabilité sont établies à partir d'études statistiques sur les paramètres concernés. La théorie des probabilités est dite discrète ou continue. Dans le cas discret, c'està-dire pour un nombre au plus dénombrable d'états possibles, la théorie des probabilités se rapproche de la théorie du dénombrement ; alors que dans le cas continu, la théorie de l'intégration et la théorie de la mesure donnent les outils nécessaires.

Cette approche nous permette de calculer la probabilité de dépassement du critère d'état limite, appelée probabilité de défaillance Pf, que l'on compare à une probabilité de défaillance acceptable Pf limite.

 $P_{(succès)} = \frac{nombre \ de \ succés}{nombre \ total \ d'experiances}$ $P_{(échec)} = \frac{nombre \ de \ d'échecs}{nombre \ total \ d'experiances}$

La démarche probabiliste permet la modélisation réaliste et la quantification des effets des incertitudes sur la performance du système à travers le concept de la probabilité de défaillance ou de dysfonctionnement, notée Pf (c'est le complément par rapport à 1 de la probabilité de bon fonctionnement). Ainsi, elle permet d'orienter les opérations de maintenance, en fonction de l'influence des incertitudes sur les paramètres du système.

Une démarche probabiliste dans le processus de conception de produit nouveau est une méthodologie composée d'un ensemble d'outils mécaniques et statistiques très puissants, permettant principalement:

• Le calcul et l'optimisation de la fiabilité d'une structure afin d'améliorer la qualité de ses composants,

• L'étude de l'effet des variations des caractéristiques matériaux, des variations des dimensions et des variations de l'environnement, sur la durée de vie d'une structure,

• Le dimensionnement d'une structure par rapport à un objectif de fiabilité donné en calculant sa probabilité de défaillance[10].

3.3.2 Variable aléatoire et caractéristiques

a. Variable aléatoire

Définis comme aléatoires pour tenir compte des incertitudes (tels que l'amplitude des séismes) qui planent sur leur valeur. On les appelle alors variables aléatoires et on leur affecte une loi de probabilité qui décrit leur variabilité. On caractérise généralement les lois de probabilité par leur valeur moyenne, leur écart-type et le coefficient de variation.

b. Variance

En théorie des probabilités, la variance est une mesure servant à caractériser la dispersion d'un échantillon ou d'une distribution. Elle indique de quelle manière la variable aléatoire se disperse autour de sa moyenne. Elle est définie comme l'espérance du carré de la distance de X à sa moyenne μ [11], [12]

$$V \operatorname{ar}(X) = E\left[(X - \mu)^2\right]$$
(3.1)

c. Ecart-types

L'écart type (équation (1.26)) est une mesure de la dispersion d'une variable aléatoire ; en statistique, il est une mesure de dispersion de données. Il est défini comme la racine carrée de la variance [11], [12].

$$\sigma(X) = \sqrt{Var(X)}$$
(3.2)

d. Moyenne

La moyenne est le quotient de la somme de toutes les valeurs de cette série par l'effectif total.

e. Coefficient de variation

Le coefficient de variation est défini comme le rapport de l'écart type sur la moyenne

$$C_{\rm V} = \frac{\sigma(X)}{X} \tag{3.3}$$

Ce facteur adimensionnel caractérise la dispersion intrinsèque de la variable aléatoire.

3.3.3 Lois de probabilités

• Loi normale (Laplace-Gauss) [10]

La loi normale est très répandue parmi les lois de probabilité car elle s'applique à de nombreux phénomènes. En fiabilité, la distribution normale est utilisée pour représenter la distribution des durées de vie de dispositifs en fin de vie, car le taux de défaillance est toujours croissant. On ne l'utilisera que si la moyenne des durées de vie est supérieure à trois fois l'écart type. En effet, t est toujours positif, alors que la variable normale est définie de $-\infty$ à $+\infty$; la restriction imposée réduit la probabilité théorique de trouver une durée de vie négative à environ 0.1 %.

La densité f de probabilité d'une loi normale de moyenne μ et d'écart-type σ s'écrit :

$$f_{(t)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}}e^{\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$$
(3.4)

La fonction de répartition s'écrit :

$$F_{(t)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad e^{\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \tag{3.5}$$

La fiabilité est donnée par: $R(t)=1-\varphi((t-\mu)/\sigma)$; Où φ est la fonction de répartition de la loi normale centrée ($\mu =0$) réduite ($\sigma =1$):

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{\mu^2}{2}} dx$$
(3.6)

• Loi log normale (ou de Galton)[10]

Une variable aléatoire continue et positive T est distribué selon une loi log-normale si son logarithme népérien est distribué suivant une loi normale. Cette distribution est largement utilisée pour modéliser des données de vie, en particulier les défaillances par fatigue en mécanique.

La densité f de probabilité d'une loi log-normale de paramètres positifs, moyenne μ et d'écart-type $\sigma \mu$ et σ est :

$$f_{(t)} = \frac{1}{\sigma . t . \sqrt{2\pi}} e^{\frac{-1}{2} \left(\frac{\log (t) - \mu}{\sigma}\right)^2}; t > 0$$
(3.7)

La fonction fiabilité:

$$R(t) = 1 - \varphi \left(\frac{\log(t) - \mu}{\sigma}\right)$$
(3.8)

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \Box \frac{1}{x} e^{\left(\frac{-1}{2}\right)\left(\frac{\log(x) - \mu}{\sigma}\right)^2}$$
(3.9)

 φ : Fonction de répartition de la loi normale centrée réduite.

Le domaine de définition n'étant jamais négatif, il n'y a aucune limitation à l'emploi de la distribution log-normale en fiabilité. Le taux de défaillance est croissant dans le début de vie puis décroissant en tendant vers zéro et la distribution est très dissymétrique.

• Lois de valeurs extrêmes (La loi de Weibull) [10]

C'est la plus populaire des lois utilisée dans plusieurs domaines (électronique, mécanique,...etc.). Elle permet de modéliser en particulier de nombreuses situations d'usure de matériel. Elle caractérise le comportement du système dans les trois phases de vie : période de jeunesse, période de vie utile et période d'usure ou vieillissement. Dans sa forme la plus générale, la distribution de Weibull dépend des trois paramètres suivants : β , η et γ . La densité de probabilité d'une loi de Weibull a pour expression :

Analyse fiabiliste des canaux a ciel ouvert en Matelas Reno

$$f_{(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)}; \quad t \ge \gamma$$
(3.10)

avec : β est le paramètre de forme (β >0).

 η est le paramètre d'échelle (η >0).

 γ est le paramètre de position ($\gamma \ge 0$).

La fonction fiabilité s'écrit:

$$R(t) = e^{-(\frac{t-\gamma}{\eta})^{\beta}}$$
(3.11)

Le taux de défaillance est donnée par:

$$\lambda(\mathbf{x}) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \tag{3.12}$$

Suivant les valeurs de β , le taux de défaillance est soit décroissant ($\beta < 1$), soit constant ($\beta=1$), soit croissant ($\beta > 1$).

Le cas $\gamma > 0$ correspond à des dispositifs dont la probabilité de défaillance est nulle jusqu'à un certain âge γ .

• Loi de poisson [13]

La loi de Poisson a été introduite en 1838 par Siméon Denis Poisson (1781–1840), dans son ouvrage Recherches sur la probabilité des jugements en matière criminelle et en matière civile. Le sujet principal de cet ouvrage consiste en certaines variables aléatoires N qui dénombrent, entre autres choses, le nombre d'occurrences (parfois appelées « arrivées ») qui prennent place pendant un laps de temps donné.

Si le nombre moyen d'occurrences dans cet intervalle est λ , alors la probabilité qu'il existe exactement k occurrences (k étant un entier naturel, k = 0, 1, 2, ...) est

$$\mathbf{P}(\mathbf{k}) = \mathbf{P}(\mathbf{X} = \mathbf{k}) = \frac{\lambda}{\mathbf{k}!} \mathbf{e}^{-\lambda}$$
(3.13)

où

- e : est la base de l'exponentielle (2,718...)
- k! est la factorielle de k
- λ est un nombre réel strictement positif

3.3.4 Contexte probabiliste [14]

Pour une durée de vie bien définie, la fiabilité est l'aptitude d'un système à garantir sa fonction pour laquelle il est conçu. Ainsi on peut déduire le critère de défaillance G(x) par la fonction performance donnée par l'équation (1):

G(x)=R(x)-S(x)

(3.14)

G(x) : Fonction qui définie la marge de sûreté de la structure,

- x: Variables aléatoires de base,
- R : La résistance
- S: La sollicitation.

Représente l'état de sécurité du système, tandis que traduit la condition de défaillance. G(x) > 0 Représente l'état de sécurité du système, tandis que G(x) < 0 traduit la condition de défaillance;

L'état de défaillance est mesuré par la probabilité de défaillance, qui représente simplement la probabilité d'avoir une marge de sûreté négative:

$$P_{f}=P_{r}([G(x)]<0)$$
 (3.15)

Dans le présent papier, la probabilité de défaillance et la fonction de densité sont évaluées en s'appuyant sur la méthode de Monte Carlo. Le principe de base de cette évaluation, consiste à faire des tirages aléatoires d'un paramètres d'entrée qui est le débit de crue.

Les valeurs des variables de base (le vecteur{X}) sont échantillonnées aléatoirement en fonction des distributions de probabilité de{X}. Le nombre de tirage N f tombant dans le domaine de défaillance .D f, c'est-à-dire le nombre de tirage satisfaisant la condition de $G(X) \leq 0$, est identifié. La probabilité de défaillance Pf est alors évaluée par :

$P_{f} = \Box f\{x\}(x_{1}, \dots, x_{n})d_{x1}, \dots, d_{xn}$ (3.16)

 $Ou : \Box f\{x\}(x_1, \ldots, x_n)$ est la densité de probabilité conjointe du vecteur aléatoire.

Pour la résolution de cette équation nous faisons appel à des méthodes de simulation dont Monté Carlo classique

3.3.5 définition de la simulation de Monte Carlos

Le nom "Monte Carlos a été popularisé en 1944, par les chercheurs en physique <<Stanislow Utam>>, <<Enrico Fermi>>, "<<John von Neumann>>, et a << Nicolas Metropolis>> en référence a un célèbre casino de Monaco. En effet l'utilisation de l'aléatoire et le caractère répétitif du processus sont analogues a ceux menées dans un casino [9]

Le véritable développement des méthodes de Monte Carlos s'est produit lors de la seconde guerre mondiale, lors des recherches sur la fabrication de la bombe atomique ainsi ces méthodes probabilistes on été utilisées pour résoudre des équations aux dérivées partielles [9] De même la construction des ordinateurs électrique a partir de 1945 était un facteur qui a contribué de même au développement de ces méthodes, un développement qui a permis leur expansion et leur utilisation dans plusieurs domaines.

La methode de simulation de Monte Carlos est une technique numerique pour selectionner des problemes mathematique en simulant des variables aleatoires. Il n'y a un conscensus absolu sur une definition precise de ce qu'est la technique de Monte Carlos, mais la description la plus habituelle consiste a dire que les methodes de ce type ce caracterisent par l'utilisation du hasard pour resoudre des problemes centrés sur un calcul, elle seront en general applicables a des problemes de types numerique, ou bien a des problemes de natures elle méme probabiliste.

3.3.6 Méthode de simulation Monte Carlos [15]

Cette méthode, consiste à déterminer un estimateur P_f par succession de tirages aléatoires indépendants. On réalise ainsi un nombre Nt important de tirages des variables aléatoires en accord avec leur loi de distribution conjointe (loi Log Normal, loi Normal, poisson ...etc.).

La figure 3.1 illustre le principe de la méthode de Monte-Carlo.



Figure 3.1 : Illustration de la simulation de Monté Carlo.

Les valeurs des variables de base (le vecteur{X} qui représente le vecteur {A}, accélération de zone sismique) sont échantillonnées aléatoirement en fonction des distributions de probabilité de {A}. Le nombre de tirage N sortant dans le domaine de défaillance D_f, c'est-à- dire le nombre de tirage satisfaisant la condition de $G(x) \leq 0$, est identifié. La probabilité de défaillance P_f est alors :

$$P_{f} = \left[\int_{G(x) \le 0} f_{x}(x) dx_{1,...,dx_{n}} dx_{n} = \int_{Df} f_{x}(x) I_{G(x) \le 0}(x) dx_{1,...,dx_{n}} dx_{n} \right]$$
(3.17)

Où $f_x(x)$ est la densité conjointe de probabilité du vecteur aléatoire X et D_f le domaine d'intégration. La fonction I_d est une fonction d'indicateur identifiant le domaine de défaillance Avec :

$$\label{eq:Identity} \begin{split} I_d = & 1 \ \mbox{ si } G(x) \leq 0 \\ I_d = & 0 \ \mbox{ si } G(x) > 0 \end{split}$$

Pour N_t simulations des vecteurs aléatoires X, la probabilité de défaillance P_f est approchée par la moyenne des $P_i = I_{G(x)} \leq 0$ (x_i).

On en déduit alors la probabilité de défaillance par un traitement statistique direct:

$$\mathbf{P}_f = \frac{\sum_{i=1}^{Ni} \mathrm{Id}}{\mathrm{Nt}}$$
(3.18)

Nt: nombre de tirage effectué.

3.3.7 Les étapes de la simulation de Monte Carlo[9]

La simulation de Monte Carlo est une méthode habituellement utilisée pour l'évaluation d'un modèle déterministe utilisant un ensemble de nombre aléatoire comme entrant, cette méthode est souvent utilisée lorsque le modèle est complexe, non linéaire ou implique quelques paramètres incertains. Elle peut généralement faire intervenir plus de 30000 évaluations du modèle, tache qui dans le passé, était possible qu'en utilisant un super calculateur

Les étapes de cette approche sont explicitées sur le figure 3.2



Figure 3.2 schéma explicatif de la simulation de Monte Carlos

L'organigramme d'évaluation de la probabilité de défaillance en utilisant la méthode de simulation de Monte Carlo est décrit dans la figure 3.3



Figure 3.3 Organigramme général du principe de Monte Carlos ()

3.4 Analyse fiabiliste d'un canal en matelas Reno

Après avoir effectué une analyse déterministe de la stabilité d'un canal revêtue en matelas Reno présentée dans le chapitre2, nous proposons dans ce qui suit une analyse fiabiliste, en appliquent la méthode de Monte Carlo classique qui est conforme à l'organigramme élaboré figure (3.3).

3.4.1 Fonction d'état limite

La fonction d'état limite G doit être dictée par la cause physique de la défaillance de façon à en obtenir une représentation réaliste [16]. Pour le cas de la stabilité d'un matelas Reno, les fonctions d'états limites données par les relations suivantes :

a) Fonction d'état limite de dépassement de la vitesse critique

$$\mathbf{G}_1 = \mathbf{V} \cdot \mathbf{V} \mathbf{c} \tag{3.19}$$

V : désigne la vitesse de l'écoulement

Vc : la vitesse critique

Pour un état stable :	V-Vc>0
Pour un état de défaillance :	V-Vc < 0

b) Fonction d'état limite de dépassement de la stabilité du fond du canal

$$\mathbf{G}_2 = \mathbf{\tau}_{\mathbf{b}} - \mathbf{\tau}_{\mathbf{c}} \tag{3.20}$$

 τ_b : Tension d'entrainement du fond du canal

 τ_c Tension critique du fond du canal

Pour un état stable :	$\tau_b-\tau_c<0$
Pour un état de défaillance :	$\tau_b-\tau_c>0$

c) Fonction d'état limite de dépassement de la stabilité des berges

$$G_{3}=\tau_{m}-\tau_{s} \tag{3.21}$$

 τ_m : Tension d'entrainement du fond du canal

 τ_s Tension critique du fond du canal

Chapitre 3 :	Analyse fiabiliste des canaux a ciel ouvert en Matelas Reno
Pour un état stable :	$\tau_m-\tau_s<0$
Pour un état de défaillance :	$\tau_{\rm m} - \tau_{\rm s} > 0$

d) Fonction d'état limite de dépassement de l'effet de déformation

🖶 Fond du canal

$$\mathbf{G}_{4} = (\mathbf{t} \cdot \mathbf{d}_{\mathrm{m}}) \cdot \left(\frac{\Delta z}{2}\right) \tag{3.22}$$

t : Epaisseur du matelas Reno

d_m: Diamètre moyen de pierre

 Δz : Distance verticale entre le point le plus haut et le point de plus bas de la

surface du fond du canal recouverte par la pierraille

Pour un état stable : $(\mathbf{t}-\mathbf{d}_{\mathbf{m}}) - (\frac{\Delta z}{2}) < \mathbf{0}$ Pour un état de défaillance : $(\mathbf{t}-\mathbf{d}_{\mathbf{m}}) - (\frac{\Delta z}{2}) > 0$

4 Berges

$$\mathbf{G}_{5} = (\mathbf{t} \cdot \mathbf{d}_{\mathrm{m}}) \cdot \left(\frac{\Delta \mathbf{z}'}{2}\right) \tag{3.23}$$

t : Epaisseur du matelas Reno

d_m : Diamètre moyen de pierre

 $\Delta z'$: Distance verticale entre le point le plus haut et le point de plus bas de la surface des berges recouverte par la pierraille.

Pour un état stable : $(\mathbf{t}-\mathbf{d}_m) - (\frac{\Delta z'}{2}) < 0$ Pour un état de défaillance : $(\mathbf{t}-\mathbf{d}_m) - (\frac{\Delta z'}{2}) > 0$

e) Fonction d'état limite de dépassement de vitesse entre le fond du canal et le sol

$$\mathbf{G}_{6} = \mathbf{V}_{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{V}_{\mathbf{e}} \tag{3.24}$$

 V_b Représente la vitesse à l'interface et fond du matelas Reno

 V_e La vitesse que le sol peut supporter sans subir d'érosion

Pour un état stable : $V_b - V_e < 0$ Pour un état de défaillance : $V_b - V_e > 0$

3.4.2 Identification des variables aléatoire

Beaucoup de variables interviennent dans le calcul de la stabilité d'une digue en terre. Elles sont représentées dans le tableau 3.1

Symbole	Variable	Unité	Observation
b	Largeur du canal	m	Déterministe
Q	Débit de crue	m ³ /s	Aléatoire
θ	angle des berges	0	Déterministe
I	Pente du canal	/	Déterministe
d _{min}	Diamètre minimum des pierres	m	Déterministe
d _{max}	Diamètre maximum des pierres	m	Déterministe
d _m	Diamètre moyen des pierres	m	Déterministe
d ₉₀	Diamètre de 90% des pierres	m	Déterministe
d ₅₀	dimension des particules du sol	m	Déterministe
n	Coefficient de rugosité	$m^{1/2}s^{-1}$	Déterministe
С	Coefficient de shields	/	Déterministe
	angle de frottement interne des pierres	0	Déterministe
γw	Masse volumique de l'eau	kg/m ³	Déterministe
γs	Masse volumique des pierres	kg/m ³	Déterministe
t	Epaisseur du matelas Reno	m	Déterministe
ηζ	Rugosité du filtre entre Matelas Reno et le sol	$m^{1/2}s^{-1}$	Déterministe

Tableau 3.1 : Identification des variables intervenant dans le calcul du matelas Reno.

La variable aléatoire considérée est le débit de crue

3.4.3 Génération de variable aléatoire

Nous utilisons pour la génération des la variable aléatoires, la loi de poisson qui est une loi utilisée pour les événements rare. Le paramètre la caractérisant est le paramètre λ qui est le débit de crue fréquentiel comme c'est représenté dans la tableau 3.2

Période de retour (année)	Débit (m ³ /s)
10	39,3
20	47,6
50	57,5
100	65,5
1000	90,5
10000	116

Tableau 3.2: Résultats de calculs des débits de crues fréquentiels (m3/s).

• Etapes de génération de la variable aléatoire sous Excel[©]

Etape 1 : Commande sur $\text{Excel}^{\mathbb{G}} \rightarrow \text{données} \rightarrow \text{Utilitaire d'analyse}$

Une boite de dialogue (figure 3.4) apparait : sélectionné Génération de nombres aléatoires.

Dutils d'analyse		ОК
Analyse de variance: deux facteurs sans répétition d'expérience Analyse de corrélation Analyse de covariance Statistiques descriptives Lissage exponentiel	Ш	Annuler <u>A</u> ide
Test d'égalité des variances (F-Test) Transformation de Fourier Rapide (FFT) Histogramme Moyenne mobile		

Figure 3.4: Première étape pour générer une loi normal de l'accélération "A" Sur Microsoft Excel[©].

Etape 2 : Introduire le paramètre Lambda (débit de crue) suivant les équations le tableau, le nombre de variables aléatoires et le nombre de tirage.

Nombre de <u>v</u> ariables:	1	ОК
Nombre d'éc <u>h</u> antillons générés:	32000	Annuler
Distribution:	Poisson	- <u>A</u> ide
Lambda = 39,3		
Lambda = 39,3		
Lambda = 39,3 Entier générateur: Options de sortie		
Lambda = 39,3 Entier générateur: Options de sortie Plage de <u>s</u> ortie:	\$A\$1	
Lambda = 39,3 Entier générateur: Options de sortie Plage de gortie: Insérer une nouvelle <u>f</u> euille:	\$A\$1	

Figure 3.5 : Deuxième étape pour générer une loi normal de l'accélération ''A'' Sur Microsoft Excel[©].

Etape 3 : Les résultats obtenus pour la génération d'une loi de poisson sont représentés dans le tableau (3.3).

Tableau 3.3 Extrait du résultat de génération de la loi log normale de l'accélération "A" sur Microsoft Excel[®].

Generation de debit Q (m³/s)
39
 29
 40
35
45
39
32
38
 43
 40
 37
47
 37
35
 38
27
51
34
41
49
 32
 34
 32
40
 35
 48
 47
 29
34
36

3.4.4 Fonction de densité

La variable aléatoire A est générée par une loi de poisson. Les figures (3.7) et (3.8) montre respectivement l'évolution de la fonction de densité et la fonction de répartition pour le coefficient lambda $\lambda = 39.3 \text{ m}^3/\text{s}$ qui correspond a un débit fréquentiels d'une période de retour décennale.



Figure 3.6 : Courbe de la densité de la loi de poisson pour un $\lambda = 39.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit décennale)



Figure 3.7 Courbe de répartition de la loi de poisson.


Figure 3.8 Organigramme des étapes d'évaluation de la probabilité de défaillance en utilisant la méthode de simulation de Monte Carlo.

3.6 Evaluation de la probabilité de défaillance

La probabilité de défaillance P_f est évaluée par la méthode de Monte Carlo par la relation (3.18) et conformément à l'organigramme élaboré.

Le nombre de tirage est fixé à 32 000 après le test de convergence effectué et présenté sur la figure (3.9) pour une fréquence décennale



Figure 3.9 : Courbe de l'évolution de probabilité de défaillance en fonction du nombre de tirage

3.7 Interprétation des résultats

Les résultats de calcul des fonctions d'état limite G (X), ainsi que du test sur l'indicateur I_d est présenté en annexe 2.

Nous présentons ci dessous, l'évaluation de la probabilité de défaillance P_f obtenus pour les différents débits de crue et pour toutes les différentes vérifications de stabilité du matelas Reno.

• Défaillance vis à vis du test de vitesse

Chapitre 3 :

Nous remarquons d'après le tableau 3.4 et la figure 3.10 citée ci dessous, que la probabilité de défaillance P_f augmente à chaque augmentation de la fréquence du débit. Il est à noter que la probabilité de défaillance en terme de vitesse n'est admise que pour le débit décennale.

Les probabilités de défaillance admissible pour les structures de génie civil sont données en tableau 3.5

Tableau 3.4 : probabilité de défaillance du test de vitesse pour différentes valeurs de débit.

Période de retour Du débit de crue (Ans)	P _f de la vitesse
10	0,00003
20	0,03559
50	0,09250
100	0,72994
1000	0,99356

Tableau 3.5 : Niveaux de probabilité de défaillance acceptés par secteurs industriels.

Secteur industriel	P _f
Structure marines	10 ⁻² _10 ⁻⁴
Génie civil	10 ⁻³ _10 ⁻⁸
Aérospatial	10 ⁻⁴ _10 ⁻¹⁰
Composant nucléaires	10 ⁻⁶ _10 ⁻¹²



Figure 3.10: Courbe de probabilités de défaillance vis a vis test de vitesse en fonction des fréquences des débits

• Défaillance vis à vis des termes de tensions d'entrainements

Nous remarquons que le matelas Reno n'est pas stable en termes de tensions d'entrainement (Fond du canal et berges). Aucune valeur de la probabilité de défaillance n'est admise pour les différents débit fréquentiels, comme c'est montré dans les tableaux 3.6, 3.7 et les figures 3.11, 3.12 suivants :

Tableau 3.6 : Probabilité de défaillance vis à v	s de la stabilité d	lu fond du canal	pour différentes
valeu	s du débit		

Période de retour du débit de crue (Ans)	P _f de la stabilité du fond du canal
10	0,029156
20	0,559031
50	0,781250
100	0,961813
1000	1,000000



Figure 3.11 Courbe de probabilités de défaillance vis a vis la stabilité du fond canal en fonction des fréquences des débits.

Tableau 3.7 : probabilité de défaillance vis a vis du test de vitesse pour différentes valeurs de débit de crue

Période de retour du débit de crue	P _f de la
(Ans)	stabilité des berges
10	0,055219
20	0,559031
50	0,851375
100	0,979344
1000	1,000000



Figure 3.13 Courbe de probabilités défaillance de la stabilité de berges en fonction des fréquences des débits.

• Défaillance vis à vis de l'effet de déformation

A partir des tableau 3.8 ,3.9 et les figure 3.14, 3.15, nous concluons que le matelas Reno est stable vis à vis de l'effet de déformation (Fond du canal et berges), toutes les valeurs de P_f pour les différentes fréquences de débit de crue sont inferieurs aux P_f admissibles.

Période de retour du débit de crue (Ans)	P _f de l'effet de déformation fond du canal
10	0,00000
20	0,00000
50	0,00000
100	0,00000
1000	0,00003

Tableau 3.8 : Probabilité de défaillance vis a vis la déformation fond du canal pour différentesvaleurs de débits



Figure 3.14 Courbe de probabilités P_f de l'effet de déformation fond du canal en fonction des fréquences des débits .

Tableau 3.9 : Probabilité de défaillance vis a vis de l'effet de déformation des berges pourdifférentes valeurs de débits

Période de retour du débit de crue (Ans)	P _f de l'effet de déformation des berges
10	0,000000
20	0,000000
50	0,000000
100	0,000000
1000	0,0000313



Figure 3.15 Courbe de probabilité de défaillance vis a vis de l'effet de déformation des berges en fonction des fréquences des débits.

• Défaillance vis à vis de l'érosion du matériau de base

Chapitre 3 :

D'après les résultats obtenus et illustrer dans le tableau 3.10 et la figure 3.16, la valeur de la probabilité de défaillance vis-à-vis de la stabilité entre le matelas Reno et le sol n'est pas admise donc y a risque d'érosion de la couche de base sous le matelas Reno. Il serait recommandé d'opter pour la mise en place d'un filtre en géotextile.

Tableau 3.10 : Probabilité de défaillance vis a vis de la stabilité du matelas Reno et le sol pou	ır
différentes valeurs de débits	

Période de retour	
du	P _f défaillance
	de la stabilité
débit de crue	entre
(Année)	le matelas Reno et le sol
10	1,000000
20	1,000000
50	1,000000
100	1,000000
1000	1,000000



Figure 3.16 Courbe de probabilités de défaillance vis à vis de la stabilité du matelas Reno et le sol en fonction des fréquences des débits.

3.7 Conclusion

Lors du dimensionnement du revêtement d'un canal à ciel ouvert en matelas Reno, les ingénieurs dans les bureaux d'études techniques mènent un calcul déterministe de stabilité, en ayant des résultats admissibles.

Dans ce chapitre, nous avons établis un calcul fiabiliste, qui s'y prête très bien a la programmation. Nous l'avons établi sur un classeur Excel[©] selon l'organigramme 2 élaboré et un extrait des classeurs sont donnés en Annexe 3, 4, 5, 6, 7. Nous avons concluons que pour n'importe quel débit fréquentiel, les différentes fonctions d'états sont pas vérifiées, sauf la fonction d'état du test de vitesse pour un débit décennale.

En conséquence, il est important d'intégrer les calculs fiabilistes dans les bureaux d'études techniques au stade de conception des ouvrages.

Conclusion Générale

L'approche déterministe d'un revêtement d'un canal a ciel ouvert, en matelas Reno, que nous avons mené, a conduit a des résultats très satisfaisants sur le plan de la stabilité vis à vis de la vitesse, des tensions d'entrainement, des effets de déformations, et l'érosion du matériau de base. Une analyse fiabiliste a était menée après cela en considérant six fonctions d'état en modes de défaillance à savoir :

- Test de vitesse
- Stabilité du fond du canal en terme de tension d'entrainement
- > Stabilité des berges en terme de tension d'entrainement
- Estimation de l'effet de déformation pour le fond du canal
- Estimation de l'effet de déformation pour les berges
- Stabilité entre le matelas Reno et le sol

Cette étude nous a permis de mettre sur pied un programme sur un classeur Excel[®] facile d'utilisation par les ingénieurs et qui constitue un outil d'aide à la décision.

Pour une meilleure estimation de la fiabilité de défaillance. Le calcul de la probabilité de défaillance a été mené par la simulation de monte Carlo classique. La variable aléatoire considérée dans notre cas est le débit d'écoulement dans le canal. Celle ci est générée par une loi de distribution de type poisson, le nombre de tirage à été arrêté à 32000, après le test de convergence.

Les résultats du calcul de la probabilité de défaillance obtenue pour le revêtement du canal a ciel ouvert en matelas Reno, ont montré que les différentes valeurs dépassent les limites admissibles et que les défaillances sont avérées pour les différentes fonctions d'état et différents débit fréquentiels, à l'exception des fonction d'états de la l'effet déformation, et le teste de vitesse pour un débit décennale.

La variation de la fréquence du débit du revêtement d'un canal à ciel ouvert en matelas Reno ont une influence sur la probabilité de défaillance. Alors qu'on déterministe le matelas est stable.

En conclusion, les méthodes fiabilistes restent complémentaires et indispensable aux méthodes déterministes pour une plus grande sureté et fiabilité des ouvrages.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] Hydraulics Laboratory Engineering Research Center Colorado State University-Fort Collins – USA.

[2] R.AGOSTINI, A.CONTE, G.MALAGUTI, A.PAPETTI, "Flexible Linings in Reno matress and Gabions for canals and canalized water courses", 1985

[3] G.DEGOUTE, "aide mémoire d'hydraulique a surface libre"

[4] C. C. ANTONIO ET, L. N. HOFFBAUER, "An approach for reliabilitybased robust design optimization of angle-ply composites", Composite Structures 90 (2009).

[5] HANG-ZHOU LI, BAK KONG LOW, "Reliability analysis of circular tunnel under hydrostatic stress field", Computers and Geotechnics 37 (2010).

[6] D. M. FRANGOPOL, S. RECEK, "Reliability of fiber-reinforced composite laminate plates", Probabilistic Engineering Mechanics 18 (2003).

[7] C.BENEVENT, " la simulation Monte Carlos, appliqué pour l'évaluation des options financière"

[8]M. SANNA,R. POUILLOT,B. TOMA, "principe de l'appréciation quantitative probabiliste des risques", AFSSA(agence française d'automatique de mécanique et d'informatique industrielle et humains, Université de Valencienne, France, 2004.

[9] L. BOUHIDEL, "La méthode de Monte Carlos pour l'analyse d'un système de production (Aspect dysfonctionnel)" 2012.

[10] O. TEBBI . "Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélères". Université d'Angers, 2005.

[11] R. IGOR, & R. JESPER, "Probability and Risk Analysis, An Introduction for Engineers" (Springer ed.). Germany, 2006.

[12] M. A. CARLTON, & J. L. DEVORE, "Probability with Applications in Engineering, Science, and Technology" (Springer ed.), USA, 2014.

[13] R. ABADOU, Elément d'hydrologie statistique, Département de Formation "Hydraulique & mécanique des fluides" Toulouse, 2006

[14] M. LEMAIRE, A. CHATEAU NEUF, & J. C. MITTEAU, "Fiabilité des structures" (Lavoisier ed.). France.2005.

[15] M. LEMAIRE, "Approche probabiliste du dimensionnement - Modélisation de l'incertain et méthodes d'approximation". Techniques de l'ingénieur, France, 2009.

[16] H. DEHMOUS, "Fiabilité et micromécanique des matériaux composites Application à la passerelle de Laroin", thèse de Doctorat, à l'Institut National Polytechnique de Toulouse, **2007**.

Annexe 1

Eléments géométriques hydrauliques de quelques sections de canaux.

Section	Area (A)	Wetted perimeter (C)	Hydraulic radius (R)
y b θ Trapezoidal	$y(b+y \cot \theta)$	$b + \frac{2y}{\sin \theta}$	$\frac{y(b+y \cot \theta)}{b+\frac{2y}{\sin \theta}}$
B H_{1}^{B} B H_{1}^{B} B	$(b+2a)\cdot y+y^2 \cot \theta - 2aH$	$b + 2a + \frac{2y}{\sin \theta}$	$\frac{(b+2a)\cdot y + y^2 \cot \theta - 2aH}{b+2a + \frac{2y}{\sin \theta}}$
$B \equiv b$			
y	b y	b + 2 y	$\frac{b y}{b+2 y}$ (²)
<i>B</i> <i>y</i> Parabolic	$\frac{2}{3}By$	$B + \frac{8}{3} \frac{y^2}{B}$	$\frac{2 B^2 y}{3 B^2 + 8 y^2}$ (3)
B y Triangular with rounded invert	$\frac{B^2 \tan \theta}{4} - r^2 \tan \theta + r^2 \theta$ (4)	$\frac{B}{\cos\theta} - 2r\tan\theta + 2r\theta$ (4)	$\frac{\frac{B^{2}\tan\theta}{4} - r^{2}\tan\theta + r^{2}\theta}{\frac{B}{\cos\theta} - 2r\tan\theta + 2r\theta}$ (4)
<i>y</i> <i>B</i> <i>Triangular</i>	$y^2 \cdot \cot \theta$	$\frac{2y}{\sin \theta}$	$\frac{y}{2}\cos\theta$





Annexe 3

Exemple du programme de calcul fiabiliste pour un débit fréquentiel de dix ans 39.7 m³/s

											Probabi lité de défailla nce	0,000 031		Probabilité de 0,02915 P défaillance 6 d		Probabilité de défaillance 0,055219		Probabilité de 0,055219 défaillance 0,00000000			Probabilité de) défaillance 0,0000000				Probabilité de défaillance	1,0000000		
											,	Test de vitesseStabilité du fond du canalStab		Stabilité des berges		Estimation des e			s effets de deformations			Stabilit matelas F		ité entre le Reno et le sol				
Generat ion de debit Q (m ³ /s)	Profond eur y (m)	Section mouillé (m ²)	Perimet re mouillé (m)	Rayon hydrauli que (m)	Coefficie i nt de Chezy	В	Vitesse d'ecoule ment V (m²/s)	Nom bre de Frou de	Debit calculé Q _{cal} (m ³ /s)	ΔQ (m3 /s)	v	Vc	Verificat ion	Tension d'entraine ment τb	Tensi on critiq ue τc	Verifica tion	Tension d'entraine ment τm	Tension critique τs	erifica tion	Coef de Shields Pour le fond du canal c*'	ΔZ/dm	Verifica tion	Coef de shields pour les berges c*'	ΔZ/dm	Verifica tion	Vitesse a l'interfa ce filtre- matelas Reno Vb	Vitesse critique Ve	Verifica tion
39	0,469402 847	9,829988 674	22,10401 232	0,444715 128	5 30,51960 054	21,88295 292	3,967451 214	1,89	39,00000 05	0,00	3,97	4,87	0	17,8373081 9	21	0	13,3779811 4	15,39514 813	0	0,000000010 0000	- 3,308728 308	0	0,000000010 0000	- 3,308728 31	0	1,655492 291	0,360006 944	1
29	0,393395 297	8,178306 206	21,76332 239	0,375783 902	3 29,67482 886	21,57805 78	3,546084 719	1,84	29,00096 666	0,00	3,55	4,87	0	14,9490213	21	0	11,2117659 7	15,39514 813	0	0,000000010 0000	- 3,308728 308	0	0,000000010 0000	- 3,308728 31	0	1,655492 291	0,360006 944	1
40	0,476537 886	9,986226 507	22,13599 382	0,451130 705) 30,59254 393	21,91157 427	4,005517 047	1,89	40,00000 051	0,00	4,01	4,87	0	18,1084396 8	21	0	13,5813297 6	15,39514 813	0	0,000000010 0000	- 3,308728 308	0	0,000000010 0000	- 3,308728 31	0	1,655492 291	0,360006 944	1
35	0,440081 52	9,190075 817	21,97258 483	0,418251 921	30,20912 771	21,76533 395	3,808456 115	1,87	35,00000 044	0,00	3,81	4,87	0	16,7230977 5	21	0	12,5423233 1	15,39514 813	0	0,000000010 0000	- 3,308728 308	0	0,000000010 0000	- 3,308728 31	0	1,655492 291	0,360006 944	1
45	0,511170 472	10,74748 664	22,29122 805	0,482139 729	0 30,93337 793	22,05049 871	4,187025 496	1,91	45,00000 057	0,00	4,19	4,87	0	19,4244779 4	21	0	14,5683584 6	15,39514 813	0	0,000000010 0000	- 3,308728 308	0	0,000000010 0000	- 3,308728 31	0	1,655492 291	0,360006 944	1
39	0,469402 847	9,829988 674	22,10401 232	0,444715 128	5 30,51960 054	21,88295 292	3,967451 214	1,89	39,00000 05	0,00	3,97	4,87	0	17,8373081 9	21	0	13,3779811 4	15,39514 813	0	0,000000010 0000	- 3,308728 308	0	0,000000010 0000	- 3,308728 31	0	1,655492 291	0,360006 944	1
32	0,417181 581	8,692702 804	21,86994 005	0,397472 64	2 29,95364	21,67347 361	3,681248 644	1,86	32,00000 041	0,00	3,68	4,87	0	15,8529000 8	21	0	11,8896750 6	15,39514 813	0	0,000000010 0000	- 3,308728 308	0	0,000000010 0000	- 3,308728 31	0	1,655492 291	0,360006 944	1
38	0,462192 555	9,672310 468	22,07169 35	0,438222 399	2 30,44488	21,85402 97	3,928740 771	1,89	38,00000 048	0,00	3,93	4,87	0	17,5633171	21	0	13,1724878 2	15,39514 813	0	0,000000010 0000	- 3,308728 308	0	0,000000010 0000	- 3,308728 31	0	1,655492 291	0,360006 944	1
43	0,497516 81	10,44679 049	22,23002 801	0,469940 501) 30,80153 359	21,99572 869	4,116096 766	1,91	43,00000 055	0,00	4,12	4,87	0	18,9056387 8	21	0	14,1792290 9	15,39514 813	0	0,000000010 0000	- 3,308728 308	0	0,000000010 0000	- 3,308728 31	0	1,655492 291	0,360006 944	1
40	0,476537 886	9,986226 507	22,13599 382	0,451130 705) 30,59254 393	21,91157 427	4,005517 047	1,89	40,00000 051	0,00	4,01	4,87	0	18,1084396 8	21	0	13,5813297 6	15,39514 813	0	0,000000010 0000	- 3,308728 308	0	0,000000010 0000	- 3,308728 31	0	1,655492 291	0,360006 944	1
37	0,454904 238	9,513137 913	22,03902 496	0,431649 673	0 30,36829 646	21,82479 35	3,889358 15	1,88	37,00000 047	0,00	3,89	4,87	0	17,2863610 5	21	0	12,9647707 9	15,39514 813	0	0,000000010 0000	- 3,308728 308	0	0,000000010 0000	- 3,308728 31	0	1,655492 291	0,360006 944	1
47	0,524577 393	11,04347 645	22,35132 212	0,494086 05	5 31,05982 18	22,10427 896	4,255906 263	1,92	47,00000 06	0,00	4,26	4,87	0	19,9339409 5	21	0	14,9504557 1	15,39514 813	0	0,000000010 0000	- 3,308728 308	0	0,000000010 0000	- 3,308728 31	0	1,655492 291	0,360006 944	1
37	0,454904 238	9,513137 913	22,03902 496	0,431649 673	0 30,36829 646	21,82479 35	3,889358 15	1,88	37,00000 047	0,00	3,89	4,87	0	17,2863610 5	21	0	12,9647707 9	15,39514 813	0	0,000000010 0000	- 3,308728 308	0	0,000000010 0000	- 3,308728 31	0	1,655492 291	0,360006 944	1
35	0,440081 52	9,190075 817	21,97258 483	0,418251 921	30,20912 771	21,76533 395	3,808456 115	1,87	35,00000 044	0,00	3,81	4,87	0	16,7230977 5	21	0	12,5423233 1	15,39514 813	0	0,000000010 0000	- 3,308728 308	0	0,000000010 0000	- 3,308728 31	0	1,655492 291	0,360006 944	1
38	0,462192 555	9,672310 468	22,07169 35	0,438222 399	2 30,44488	21,85402 97	3,928740 771	1,89	38,00000 048	0,00	3,93	4,87	0	17,5633171	21	0	13,1724878 2	15,39514 813	0	0,000000010 0000	- 3,308728 308	0	0,000000010 0000	- 3,308728 31	0	1,655492 291	0,360006 944	1
27	0,376971 668	7,824457 198	21,68970 648	0,360745 186	5 29,47351 629	21,51217 639	3,450833 633	1,83	27,00090 006	0,00	3,45	4,87	0	14,3249234	21	0	10,7436925 5	15,39514 813	0	0,000000010 0000	- 3,308728 308	0	0,000000010 0000	3,308728 31	0	1,655492 291	0,360006 944	1
51	0,550707 588	11,62243 503	22,46844 593	0,517278 1	3 31,29818 907	22,20909 708	4,388065 023	1,94	51,00000 065	0,00	4,39	4,87	0	20,9268883 6	21	0	15,6951662 7	15,39514 813	1	0,000000010 0000	- 3,308728 308	0	0,001428657 8232	0,323387 923	0	1,655492 291	0,360006 944	1

Annexe 4

Exemple du programme de calcul fiabiliste pour un débit fréquentiel de vingt ans de 47.6 m³/s

Normal Normal<	
k-r k-r <th>to at lowel</th>	to at lowel
bit Scrip Ray Unfine Unfine No No Scrip Scrip<	
bit bit <th>no of logal</th>	no of logal
Dobit demands (x) Right by (m) Right by (m) Righ by (m) Righ by (m) </th <th>ao et le sol</th>	ao et le sol
beller beller<	
Photom Photom Photom Photom <th></th>	
(n) (n) <th(n)< th=""> <th(n)< th=""> <th(n)< th=""></th(n)<></th(n)<></th(n)<>	Verificatio
45 3 2 4 7 5 4 4331483 10 2 4.9 <t< th=""><th></th></t<>	
51 Nor 8 Nor 6 Nor 1 Nor 1 Nor 4 Nor 1 Nor 4 No	1
138 0.4107163 3.51716 2.224118 0.407248 0.40724228 0.400000000 0.2142288 0.0010000000 0.2142288 0.0010000000 0.2142288 0.0010000000 0.2142288 0.0010000000 0.2142288 0.0010000000 0.2142288 0.0010000000 0.2142288 0.0010000000 0.2142288 0.0010000000 0.2142288 0.0010000000 0.2142288 0.0010000000 0.2142288 0.0010000000 0.2142288 0.0010000000 0.2142288 0.0010000000 0.2142288 0.0010000	1
52 55<	1
12 0.022214 0.319716 2.2011180 0.4676566 0.747.29 217520 0.9917663 1.6 1.01000100 1.01 1.01000000 0.122268 0.010000000 0.1242268 0.0100000000 0.1242268	1
38 0.49/17633 3 6 2 8 9 4.08/28243 1.0 8 4.1 4.0 4.7 0 1.68/58963 1.3 0 0 5 0 0.01000000 0.2142288 0.010000000 0.2142288 0.0100000000 0.2142288 0 1.659141 0.000000000 0.2142288 0.0100000000 0.2142288 0 1.659148 0.0000000000 0.2142288 0 1.659148 0.0000000000 0.2142288 0 1.659207 0.010 1.659207 0.011 4 5 5 2 2 4 4 4.0279498 4.87 0 2.071999 2.1 1.0 1.5951481 0.000000000 0.2142288 0 1.6554929 0.600094 4.4391403 9.7352152 1.9897633 2.971999 2.1 0 1.2051481 0.0010000000 0.2142288 0.00000000 2.14229 0.600094 5 9 8 0.2171990 1.5951481 0.00100000000 0.2142268 <t< th=""><th></th></t<>	
43 3 2 8 2 5 4,29766027 1,92 8 4,71 4,82 4,87 0 1,08377698 3 0 0 5 0 0 5 0 0 0 5 0 0 <th< th=""><th>1</th></th<>	1
0.599 0.599 <th< th=""><th>1</th></th<>	1
32 0,4391403 9,2735215 21,9897633 0,2171992 6 21,0897633 0,2171992 6 21,0897633 0,0100000000 0,21422688 0,00100000000 0,21422688 0,00100000000 0,21422688 0,00100000000 0,21422688 0,00100000000 0,21422688 0 0 0 <th< th=""><th>1</th></th<>	1
12 3 3 3 3 3 3 4 6 12010000000000000000000000000000000000	1
52 0,5925214 9 7 6 5 4 4,5945982 1,69 5,8 4,87 0 22,519733 21 1 16,88693799 3 1 6 6 0 8 1 0.0 1 4 0,52189870 10,984284 10 0,917074 31,0347900 22,0935337 1 46,5975523 4 46,5975523 4 46,5975523 4 4,87 0 16,88693799 3 1 66 66 0 8 1 0.010000000 0,2142268 0 1,6554922 0,3600694 4 42 7 1 22,089327 7 2 3 4.87 0 9 0 14871131 3 0 0,01000000 0,2142268 0 0,2142268 0 1,6554922 0,3600694 4	
42 7 1 22,3393154 7 2 3 4,42203459 1,92 6 4,60 4,87 0 14,87411315 3 0 0 5 0 5 0 1 4 42 7 1 22,3393154 7 2 3 4,92203459 1,92 6 4,60 4,87 0 14,87411315 3 0 0 5 0 5 0 1 4 6 9,55090428 1,6268035 8 3 2 2,093861 1,9306182 2,1939467 1,94 8 5,0306182 2,1 1,93315086 2,1 0 1,63591843 0 0,0010000000 0,21422688 0 0,001455351983 0,32905270 1,65549229 0,36000694 4 7 0 2 2,093814 2 2 2 4,87 0 2,0719995 21 1 1,070792943 1 0 0,00145351983 0,32905270 1 1,65549229 0,3600694 4 4 4 4 4 4 6 <th< th=""><th>1</th></th<>	1
60,5090428 60,5090428 60,514522 61,745222 61,745222 61,745222 61,745222 61,745222 61,745222 61,745222 61,745222 61,7055481 61,7055481 60,0145551983 63,2905270 61,76554929 63,600694 61,76554929 63,600694 61,76554929 <th>1</th>	1
5 0,59926314 22,6860873 0,56005862 31,7154425 22,4038718 4 58,7857961 4 59,7857961 4 59,7857961 4 59,7857961 4 59,7857961 59,7857961 4 59,7857961 4 59,7857961 50,7857961 50,7857961 4 6 6,79 4,63 6 6,79 4,63 6 6,79 4,63 6 6,79 4,63 6 6,79 4,63 6 2,7719995 21 1 1 3 9 0 35 7 0 1 4 53 5 12,7055388 2 2 4 4 4,626784985 1,96 4,87 0 22,7719995 3 1 3 9 0 3 1 3 9 0 3 1 4	1
	1
0,55090428 22,4693275 0,51745222 31,2999447 0 0 51,0306182 0,32905270 0,51745222 31,2999447 0,0010000000 0,21422688 0,001455351983 0,32905270 0,5600694	
46 2 11,6268035 8 3 2 22,2098861 4,389049687 1,94 8 5,03 4,39 4,87 0 15,70077204 3 1 0 5 0 6 7 0 1 4 0,55799003 11,7842779 22,5010881 0,52372035 31,3628198 22,2383097 C 52,1386289 C C 15,3951481 0,000969625137 0,20478808 0,002416989671 C 1,65549229 0,36000694	1
47 4 6 8 7 4 4,424422883 1,94 6 5,14 4,42 4,87 0 21,20362128 21 1 10 9 0 5 0,8427887 0 1 4	1
45 3 2 4 7 3 4 4,353161463 1,93 2 4,92 4,85 0 0,00100000000 0,21422688 6 0,000485028924 - 6 1,65549229 0,56000694 45 3 2 4 7 3 4 4,353161463 1,93 2 4,92 4,35 4,87 0 20,66267227 21 0 15,4970042 3 1 0 5 0 0 0,00717842 0 1 4	1
0,46023411 9,62951825 22,0629151 0,43645720 30,4244081 21,8461736 0 37,7302194 1 0 0,00100000000 0,21422688 0 0,00100000000 0,21422688 1,65549229 0,36000694 34 1 9 3 4 7 4 3918183491 1.88 7 3.73 3.92 4.87 0 1311667216 3 0 0 0 0 0 1 4	1
0,52925533 11,1469228 22,3722901 0,49824683 31,1032630 22,1230439 12777702215 471 C C C C C C C C C C C C C C C C C C C	
43 5 2 2 8 2 5 4,1 4,8 0 20,117/264 21 0 15,0857/698 3 0 0 0 5 0 1 4.4 0,64503702 13,7352533 22,8912603 0,60002171 32,0818710 22,5874882 0 66,5382919 0 0 0,016720985644 1,07612623 0,014230510052 1,02677569 0,36000694 0,36000694	
60 6 8 9 5 4,84343977 1,98 8 6,54 4,84 4,87 0 24,51140699 21 1 18,3835524 3 1 8 9 0 4 1 0 1 4 0.50026314 22,6860873 0.56005862 31,7154425 22,4038718 1 58,7857061 1 15,3951481 0.008438002870 0.86685031 0.008018340478 0.85123671 1 1,65540220 0.36000694	1
53 5 12,7055388 2 2 4 4 4,626784985 1,96 4 5,79 4,63 4,87 0 22,7719995 21 1 17,0789963 3 1 3 9 0 3 7 0 1 4	1
39 5 10,4880781 22,2384402 0,47161932 30,8198456 22,0032570 41,25893881 1,91 3 4,27 4,13 4,87 0 18,97695547 21 0 14,2327166 3 0 0 0 5 0 0 1 4,2327166 3 0 0 0 14,2327166 3 0 0 0 5 0 0 1 4 4	1
0,57888297 22,5947369 0,54215179 31,5441389 22,3221192 1,65549229 0,36000694 1,65549229 0,36000694 1,65549229 0,36000694	1
50 60 1 40 60 0 1 40 60 0 1 40 60 0 1 40 60 0 1 40 60 0 1 40 10	1
33 8 1 22,025564 5 4 1 3,874270958 1,88 9 3,62 3,87 0 12,8855531 3 0 0 5 0 1 4,87 0,49939356 10,4880781 22,238402 0,47161932 30,8198456 22,0032570 0 4,87 0 17,1807401 21 0 12,8855531 3 0 0 0 1 4	1
39 5 4 2 4 7 4,125893881 1,91 3 4,27 4,13 4,87 0 18,9769554 3 0 0,0010000000 0,21422088 0 0,00100000000 0,21422088 0 1,00349229 0,00000004 0,00100000000 0,21422088 0 1,00349229 0,0000004 0,00100000000 0,21422088 0 1,00349229 0,0000004 0,00100000000 0,21422088 0 0,00100000000 0,21422088 0 0,00100000000 0,21422088 0 0,001000000000 0,21422088 0 0,001000000000 0,21422088 0 0,001000000000 0,21422088 0 0,001000000000 0,21422088 0 0,001000000000 0,21422088 0 0,001000000000 0,21422088 0 0,001000000000 0,21422088 0 0,001000000000 0,21422088 0 0,0010000000000 0,21422088 0 0,0010000000000 0,21422088 0 0,0010000000000 0,21422088 0 0,001000000000000000000000000000000000	1
38 0,49173633 3 6 2 8 9 4,085824253 1,90 8 4,16 4,09 4,87 0 18,68598054 21 0 14,01448541 3 0 0 0 5 0 0 5 0 1 4,0100000000 0,21422688 0,00100000000 0,21422688 0,00100000000 0,21422688 0,0000094 0,00100000000 0,00000000 0,0000000 0,0000000 0,000000	1
48 0,56501169 11,9405267 22,5325614 0,52992318 31,4244255 22,2664762 0,00 53,2462579 0,00 0,000240211729 0,46103742 0 0,003369929616 0,58598379 0 1,65549229 0,36000694 48 6 3 8 5 8 9 4,459288869 1,94 6 5,55 4,46 4,87 0 21,47044446 21 1 16,10283335 3 1 7 2 0 1 3 0 1 4	1