

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU  
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

# Mémoire de fin d'études



*Spécialité : Génie civil*  
*Option : Constructions Hydrauliques & Aménagements*

## Thème

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

*Encadrée par :*

*Prof. Hocine HAMMOUM*

*Prof. Karima BOUZELHA*

*Réalisé par :*

*M<sup>elle</sup> Sihem AIT LARBI*

*M<sup>elle</sup> Dehbia REZZIK*



*Promotion : 2021-2022*

## *Remerciement*

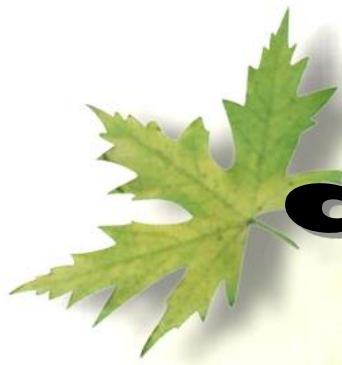
*Nous adressons en premier lieux nos remerciements à monsieur  
Hammoum Hocine, maitre conférence au département de Génie  
Civile*

*Pour nous avoir encadré et suivi tout au long de la réalisation  
Qu'il trouve ici toute notre reconnaissance et notre profonde  
gratitude*

*Nous adressons nos remerciements également à madame  
Bouzelha Karima, professeur au département de Génie Civil pour  
nous avoir fait bénéficier de ses compétences, pour sa disponibilité et  
son aide précieuse*

*Nous remercions le membre de juré pour avoir accepté de juger  
ce travail*

*Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de  
loin à la réalisation de ce mémoire*



# dédicace

Je dédie ce modeste travail

*A mes chers parents qui ont toujours été la pour moi, et qui m'ont donnée un magnifique  
modèle de labeur et de persévérance.*

*A mon chère petit frère Juba*

*A mes chères sœurs Katia, Nima, Linda et à leur époux*

*A mon très cher époux, pour ses encouragements, son soutien, et son Sacrifice, et surtout  
pour son amour*

*A ma chère belle mère Nora*

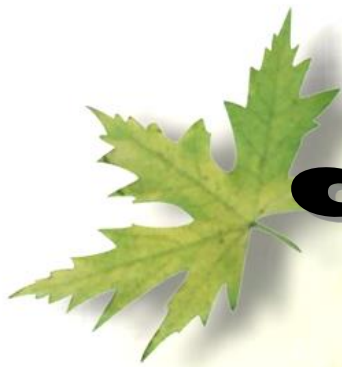
*A la mémoire de ma grand mère Ouardia*

*A ma chère amie avant binôme Siham*

*Et tous ceux qui m'aiment*



*Rezzik dehbria*



# dédicace

*Je dédie ce modeste travail*

*A ma mère .pour son amour, ses encouragement et ses sacrifices*

*A mon père pour son soutien, son affection et la confiance qu'il ma accordé*

*A mon cher petit frère Ouahmed*

*A mes chère sœur Souad et Tassadit*

*A mes chère grandes parentes*

*A tous mes cousin et cousines*

*A ma chère amie avant binôme Dehbia*

*A tous mes amies*

*Et tous ceux qui m'aiment*



*Ait larbi Sihem*

## SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre 1:Généralités</b>	
Introduction .....	3
1.1 Généralités sur les canaux à surface libre .....	3
a- Canaux naturels .....	3
b- Les canaux artificiels .....	3
1.2. Présentation des canaux en matelas Reno .....	4
But du revêtement d'un canal en matelas Reno.....	5
1.3. Caractéristique et fonctionnement des canaux en matelas Reno .....	5
1.4. Mise en œuvre des matelas Reno .....	7
1.5. Catégorie de revêtements.....	11
1.5.1 Revêtement effectué à sec .....	11
1.5.2 Revêtement effectués en présence d'eau .....	14
1.5.3 Revêtement consolidés au imperméabiliser au mastic bitumineux hydraulique .....	15
1.5.4 Revêtement consolidés au imperméabilisé au mastic de bitume, Montés sur pontons et mis à l'eau avec équipements spéciaux .....	17
1.5.5. Resistance des revêtements matelas Reno et en gabion traités au mastic de bitume .....	18
1.6 Comparaison du Revêtement en matelas Reno avec d'autre revêtements . .....	19
1.6.1 Comparaison entre le revêtement en matelas Reno et les Revêtements en enrochement.....	19
1.6.2 Comparaison entre les revêtements en matelas Reno et les revêtements en béton .....	22
Conclusion .....	22

## **Chapitre 2:Caractérisation des moellons de pierres sèches**

Introduction .....	23
2.1. Caractérisation des moellons .....	23
2.2. Mesures in situ.....	23
2.3. Mesures en laboratoire.....	24
2.3.1 Détermination de la masse volumique .....	24
2.4. Analyse granulométrique .....	28
2.4.1 Représentation graphique de la courbe granulométrique .....	29
2.5. Analyse statistique de l'échantillon .....	30
Conclusion.....	34

## **Chapitre 3 Etude déterministe du matelas Reno**

Introduction .....	35
3.1. Calcul hydraulique des cours d'eau à surface libre.....	35
3.2. Dimensionnement des Revêtement en matelas Reno .....	37
3.2.1 Vérification en termes de vitesse .....	37
3.2.1 Vérification en termes de tension d'entraînement.....	39
3.2.3 Estimation des effets de déformation .....	40
3.2.4 Vérification vis-à-vis de l'érosion du matériau de base .....	43
3.3. Cas d'étude.....	44
3.3.1 calcule hydraulique .....	46
3.3.2 Vérification en termes de vitesse .....	46
3.3.3 Vérification en termes de tension d'entraînement .....	47
3.3.4 Effet de déformation .....	48
3.3.5 Vérification de vis-à-vis de l'érosion du matériau de base .....	49
3.4. Résultat et discussions .....	49
Conclusion .....	50

## **Chapitre 4 Analyse fiabiliste du canal en matelas Reno**

Introduction .....	51
4.1. Contexte fiabilité .....	51
4.2. Notion de probabilité .....	51
4.2.1 Variable aléatoire et caractéristique .....	52
4.2.2 Loi de probabilités .....	53

4.2.3 Contexte probabiliste .....	53
4.2.4 Définition de la simulation de Monte Carlo .....	54
4.3. Analyse fiabiliste d'un canal en matelas Reno .....	57
4.3.1 Fonction d'état limite .....	57
4.3.2 Génération de variable aléatoire .....	58
4.3.3 Fonction de densité .....	61
4.4. Organigramme de calcul .....	62
4.5. Evaluation de la probabilité de défaillance .....	63
4.6 Interprétation des résultats .....	63
Conclusion.....	67
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>68</b>
Référence bibliographiques	
Annexes	

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1 :</b> Caractérisation de construction de matelas Reno et de gabion .....	6
<b>Tableau 1.2 :</b> Epaisseur approximative en matelas Reno gabion en fonction de la vitesse du courant.12	
<b>Tableau 1.3 :</b> Revêtement consolidés ou imperméabilisés au mastic bitumineux hydraulique .....	15
<b>Tableau 1.4 :</b> Quantité unitaire minimum de mastic bitumineux pour une pénétration Partille et /ou totale des matelas Reno et des gabions.....	16
<b>Tableau 1.5 :</b> Epaisseur approximative en fonction de la vitesse du courant des revêtements en matelas Reno et en gabion traité au mastic du bitume.....	16
<b>Tableau 1.6 :</b> Epaisseur indicatives du matelas Reno et gabion traités avec du sable asphalte coulé, en fonction de la vitesse de l'eau .....	18
<b>Tableau 2.1 :</b> Masse des moellons de pierre sèche.....	24
<b>Tableau 2.2 :</b> Masse volumique de moellon des pierres sèche .....	27
<b>Tableau 2.4 :</b> Diamètre des moellons de pierres sèche .....	28
<b>Tableau 2.5 :</b> Analyse granulométrique .....	28
<b>Tableau 2.6 :</b> Résultats du test de $\chi^2$ .....	33
<b>Tableau 2.7 :</b> Résultats du test de Kolmogorov .....	34
<b>Tableau 3.1 :</b> Coefficient de rugosité [1] .....	36
<b>Tableau 3.2 :</b> Caractéristique géométrique du canal trapézoïdal .....	45
<b>Tableau 3.3 :</b> Les paramètres hydrauliques.....	46
<b>Tableau 3.4 :</b> Les résultats de calculs hydraulique.....	47
<b>Tableau 3.5 :</b> Les résultats de vérification en termes de tension d'entraînement pour le fond du canal.....	48
<b>Tableau 3.6 :</b> Les résultats de vérification en termes de tension d'entraînement pour les berges.....	48
<b>Tableau 3.7 :</b> Les résultats de vérification vis-à-vis l'érosion .....	49
<b>Tableau 3.8 :</b> Vérification de la stabilité du matelas Reno pour un débit centennal.....	50
<b>Tableau 4.1 :</b> Résultats de calculs du débit de crues pour une période centennale en fonction de différent coefficient de variation .....	59
<b>Tableau 4.2 :</b> Extrait des résultats de génération d'une loi normal de débit sur Excel .....	60
<b>Tableau 4.3 :</b> Probabilité de défaillance de test e vitesse en fonction de coefficient de variation.....	63

<b>Tableau 4.4 :</b> Probabilité de défaillance vis-à-vis le terme de tension d'entraînement du fond de canal et les berges en fonction des coefficients de variation .....	65
<b>Tableau 4.5 :</b> Probabilité de défaillance vis-à-vis de l'effet de déformation du fond de canal et berge en fonction des coefficients de variation .....	66

## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b> : Revêtement en matelas Reno de la rivière de rio Campobasso Molise, Italie, 1989[2].....	4
<b>Figure 1.2</b> : Revêtement en matelas Reno de Maroglio a Caltanisseta Sicily, Italie1982 [2].....	4
<b>Figure 1.3</b> : Revêtement en matelas Reno du canal Perdra do cavalo, Brésil Phase de pose et mise en œuvre [2] .....	5
<b>Figure 1.4</b> : Caractérisation de construction des matelas Reno [2].....	7
<b>Figure 1.5</b> : Mise en ouvre d'un matelas Reno et ligature de plusieurs éléments [2].	8
<b>Figure 1.6</b> : Mise en place et assemblage des éléments [2] .....	9
<b>Figure 1.7</b> : Remplissage des éléments avec des galets desenrochements [2] .....	10
<b>Figure 1.8</b> : Fermeture de l'élément a l'aide de leurs couvercles et de grillage .....	10
<b>Figure 1.9</b> : Iraq-protection des berges de l'ile Tajelat du Tigrià l'aide dematelas Reno galvanise et plastifiés[2].....	13
<b>Figure 1.10</b> : Canalisation en matelas Reno galvanisés et plastifiés du cervaro,Près de son embouchure[2] .....	13
<b>Figure 1.11</b> : Revêtement en matelas Reno galvanisés et plastifiés enPrésence d'eau du canal adducteur du central thermoélectrique de tavazzano a mentenase[2] .....	14
<b>Figure 1.12</b> : Emaille Romagne préparation des matelas Renosur ponton et largage des revêtements sur le Chiavenna et le canal d'évacuation du central nucléaire de Caroso[2].....	18
<b>Figure 1.13</b> : Approfondissement du revêtement vu la profondeur d'érosion prévue[2] .....	20
<b>Figure 1.14</b> : Extension horizontal de revêtements vu la profondeur d'érosion prévue[2] .....	20
<b>Figure 1.14</b> : Epaisseur du matelas Reno en fonction de la vitesse du courant .....	21
<b>Figure 2.1</b> :Moellon constitutif de l'échantillon de mesure de masse .....	23
<b>Figure 2.2</b> : Vue d'ensemble des moellons de pierres sèche.....	24
<b>Figure 2.2</b> : Vue précise de chaque pierre.....	25
<b>Figure 2.3</b> : Chronologie de la pesée de moellon de pierres sèche.....	26
<b>Figure 2.4</b> : Passage du volume de la pierre a la sphère équivalente.....	27

<b>Figure 2.4</b> : Courbe granulométrique.....	29
<b>Figure 2.5</b> : Fonction de densité.....	30
<b>Figure 2.5</b> : Fonction de Répartition.....	30
Vitesse critique du mouvement des roches en fonction de leur taille[2].....	38
<b>Figure 3.2</b> : Vitesse critique qui initie le mouvement de rochede l'épaisseur de matelas Reno[2] .....	38
<b>Figure 3.3</b> :Schéma du mouvement des pierres dans les poches(AGOSTINI et ALL 1976)[2] .....	41
<b>Figure 3.4</b> : Rapport entre le paramètre de déformation et le coefficient d'efficacité de shields (AGOSTINI et ALL 1976)[2].....	42
<b>Figure 3.5</b> : Valeurs des vitesses admissibles maximum pourTerrains cohérent[2] .....	44
<b>Figure 3.6</b> : Coupe transversale du canal trapézoïdal[2].....	45
<b>Figure 3.7</b> : Vitesse critique qui initie le mouvement de roche en fonction de l'épaisseur de matelas Reno[2].....	47
<b>Figure 4.1</b> : Illustration de la simulation de monte -Carlo[2] .....	55
<b>Figure 4.2</b> : Organigramme général du principe de monte Carlo[7] .....	56
<b>Figure 4.3</b> : Première étapes pour génération une loi normale de débit su Excel.....	59
<b>Figure 4.4</b> : Deuxième étape pour générer une loi normale de débit sur excel...60	
<b>Figure 4.5</b> :Courbe de la densité de probabilité de la loi normale pour le diamètre des pierres .....	61
<b>Figure 4.6</b> : Courbe de répartition de la loi normale .....	61
<b>Figure 4.7</b> : Illustra de la manière simplifier le fonctionnement global de calcule Développer .....	62
<b>Figure 4.8</b> : Courbe de défaillance vis-à-vis de vitesse en fonction de coefficient De variation .....	64
<b>Figure 4.9</b> : Courbe de probabilité de défaillance pour la tension d'entraînement Pour le fond de canal en fonction de coefficient de variation.....	65
<b>Figure 4.10</b> : Courbe de probabilité de défaillance pour la tension d'entraînement Pour les bergs en fonction de coefficient de variation.....	65

<b>Figure 4.11</b> : Courbe de probabilité de défaillance de l'effet de déformation pour le fond du canal en fonction de coefficient de variation .....	66
<b>Figure 4.12</b> : Courbe de probabilité de défaillance de l'effet de déformation pour les berges du canal en fonction de coefficient de variation.....	67

<b>Symbole</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
$d_{50}$	Diamètre permettant le passage de 50% de la pierre qui constitue le revêtement	<b>m</b>
$d_{90}$	Diamètre permettant le passage de 90% de la pierre qui construit le revêtement	<b>m</b>
$d_m$	Diamètre moyenne de la pierre du fond	<b>m</b>
<b>Y</b>	profondeur de l'eau	<b>m</b>
<b>V</b>	vitesse moyenne d'écoulement	<b>m/s</b>
<b>Rh</b>	Rayon hydraulique	<b>m</b>
<b>I</b>	Pente du canal	
<b>C</b>	Coefficient de chezy	<b>m<sup>1/2</sup> s<sup>-1</sup></b>
$\eta$	Coefficient de la rugosité	/
<b>C*</b>	Coefficient de shields	/
$\gamma_w$	Masse volumique de l'eau	
$\gamma_s$	Masse volumique des pierres	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>
<b>Vc</b>	Vitesse critique du mouvement des pierres en fonction de leurs tailles	<b>m/s</b>
$\theta$	Angle d'inclinaison des berges	°
$\varphi$	Angle de frottement interne de la pierre qui constitue le revêtement pour les matelas Reno	°
<b>t</b>	Epaisseur du matelas non déformé	<b>m</b>
$\tau_b$	tension tangentielle d'entrainement qui s'exerce sur le fond du canal	<b>Kg/m<sup>2</sup></b>
$\tau_c$	Tension tangentielle critique d'entrainement des berges	<b>Kg/m<sup>2</sup></b>
$\tau_m$	Tension tangentielle d'entrainement qui s'exerce sur les berges	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>
$\tau_s$	Tension tangentielle critique d'entrainement des berges	<b>Kg/m<sup>2</sup></b>
<b>b</b>	Largeur de la base du canal	<b>m</b>
<b>B</b>	Largeur a la surface du canal	<b>m</b>
<b>C'*</b>	Coefficient de shields pour le fond du canal	
<b>C''*</b>	Coefficient de shields pour les berges	
<b>Vb</b>	Vitesse à l'interface du matelas Reno fond sous jacent	<b>m/s</b>
<b>Ve</b>	Vitesse d'érosion	<b>m/s</b>
$d_v$	Diamètre équivalent des interstices	/
<b>f</b>	Coefficient de darcy-weisbach	/
$\eta\zeta$	Rugosité du filtre entre matelas Reno et le sol	/
<b>Cv</b>	Coefficient de variation	/
$\sigma$	Ecart type	/
<b>Q</b>	Débit fréquentiel utilisé	<b>m<sup>3</sup>/s</b>
<b>g</b>	Accélération de la pesanteur	<b>m/s<sup>2</sup></b>
<b>F</b>	Nombre de Froude	
<b>S</b>	Surface moulé du canal	<b>m<sup>2</sup></b>
<b>P</b>	Paramètre moulé du canal	<b>m</b>

Les canaux sont des ouvrages hydrauliques à surface libre qui permettent la libre circulation de l'eau. Ils sont utilisés pour l'irrigation, le drainage et l'approvisionnement en eau. Les écoulements dans ces canaux sont en contact avec ses parois. Ainsi, un revêtement est souvent utilisé pour assurer au sol naturel une protection mécanique contre l'érosion. Parmi les structures flexibles les plus utilisées dans le monde et dans des canaux ouverts, nous avons les revêtements en Matelas Reno.

Lors de la conception du revêtement du matelas Reno, les ingénieurs civils calculent sa stabilité en fonction d'un débit fréquentiel, afin d'optimiser le coût de la structure. Cependant, en pratique, l'évaluation du débit fréquentiel est entachée d'incertitudes. Alors, des coefficients de sécurité préconisés par les codes de conception sont appliqués pour tenir compte de ces incertitudes et assurer une conception suffisamment sûre. Cependant, cette approche ne permet pas d'évaluer les risques liés à la défaillance de la structure de revêtement souple et donc sa fiabilité.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude qui a comme objectif de développer une approche probabiliste pour analyser les fonctions de rupture liées à la stabilité globale d'un matelas Reno d'un canal ouvert. Ainsi, nous avons réparti le travail en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, un bref aperçu est donné sur les revêtements des canaux à 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 à la caractérisation des moellons de pierres sèches utilisés dans les Matelas Reno. Une analyse granulométrique est effectuée pour déterminer le diamètre  $d_{90}$  qui permet le passage de 90% de la pierre qui constitue le revêtement. Par ailleurs, une analyse statistique est opérée pour déterminer le diamètre moyen des pierres  $d_m$ ,

Le troisième chapitre est dédié au calcul déterministe de la stabilité du revêtement en matelas Reno, appliqué à un cas d'étude. Un programme Excel est élaboré à cet effet.

Le quatrième chapitre est consacré à l'analyse fiabiliste de la stabilité du revêtement en matelas Reno. Les fonctions d'état considérées sont celles liées à la vitesse critique, à la stabilité du fond du canal et des berges aux effets de déformation et d'entraînement. Le débit fréquentiel ainsi que le diamètre moyen sont considérés comme variables aléatoires, générés avec une loi de distribution normale. La méthode de simulation de Monte Carlo est utilisée pour calculer la probabilité de défaillance.

## **Introduction**

Les écoulements à surface libre sont des écoulements qui s'effectuent sous l'effet de la gravité, en étant en contact partiellement avec un contenant (canal, rivière, conduite...etc.) et avec l'air dont la pression est généralement atmosphérique. Les canaux en matelas Reno fait l'objectif de notre étude. A cet effet, nous présentons dans ce chapitre ce type de canaux, Ainsi leur caractéristiques et le fonctionnement, est ses différentes mises en œuvre et les catégories de revêtements en matelas Reno.

### **1.1. Généralités sur canaux à surface libre**

On appelle canal un système de transport dans lequel l'eau s'écoule et dont la surface libre est soumise à la pression atmosphérique. Nous distinguons deux catégories de canaux ; à savoir les canaux naturels et les canaux artificiels [4].

#### **a- canaux naturels**

Ce sont les cours d'eau qui existent naturellement sur (ou sous) terre; tels que les ruisselets, torrents, rivières, fleuves et estuaires. Les propriétés géométriques et hydrauliques des canaux naturels sont généralement assez irrégulières. L'application de la théorie hydraulique ne donne que des résultats approximatifs obtenue à partir d'hypothèses qui s'imposent[4].

#### **b- Les canaux artificiels**

Les canaux artificiels sont les cours d'eau réalisées par l'homme, tels que les canaux découverts construits au ras du sol (canaux de navigation, d'adduction et d'évacuation, d'irrigation et de drainage) ou les canaux couverts dans lesquels les liquides ne remplissent pas toute la section (tunnels hydraulique, aqueducs, drain, égouts). Les propriétés hydrauliques des canaux artificiels sont généralement assez régulières l'application de la théorie hydraulique donne souvent des résultats réalistes.

## 1.2. Présentation des canaux en matelas Reno

Les matelas Reno sont utilisés depuis plus d'un siècle, pour les canalisations des cours d'eau naturel et artificiels. Ils sont fabriqués avec un fil en acier de haute qualité, hautement galvanisé pour apporter une protection contre la corrosion à long terme. Un revêtement polymère est rajouté sur le fil lorsque les gabions sont utilisés dans un environnement agressif, où s'il est exigé une longue durée de vie comme l'illustre la figure 1.1 et la figure 1.2.



**Figure 1.1: Revêtement en matelas Reno de la rivière de rio Campobasso, Molise, Italie, 1981[2]**



**Figure 1.2: revêtement en matelas Reno de la rivière de Maroglio a Caltanisseta, Sicily, Italie 1982 [2]**

### ✚ But du revêtement d'un canal en Matelas Reno

Les réalisations du revêtement des berges et du fond d'un cours d'eau canalisé permet d'obtenir de nombreux résultats comme:

- la réduction des fuites d'eau vers la campagne et, parfois de l'infiltration dans le sens contraire ;
  - L'amélioration de la stabilité des berges ;
  - la protection des berges et du fond contre l'érosion ;
- et la réalisation de parois ayant une rugosité prédéterminé et la diminution des frais d'entretien.

### 1.3. Caractéristique et fonctionnement des canaux en Matelas Reno

Pour construire un revêtement d'un canal le technicien doit effectuer un choix entre les nombreux types de revêtement à chaque fois qu'un cas ce présente. Il faut une enquête sur le type de revêtement ayant les caractéristiques requises de perméabilité, rugosité, de durée, d'économie, puis effectue son choix pour adopté la solution qui offre les meilleurs garantie. Sans aucun doute, les revêtements souple offre une série d'avantage qui, dans la plupart des cas, les rendent préférables au revêtement rigides et semi- rigides et c'est justement dans cette catégorie que se placent les matelas Reno. La figure 1.3 montre un exemple d'un revêtement en matelas Reno[1].

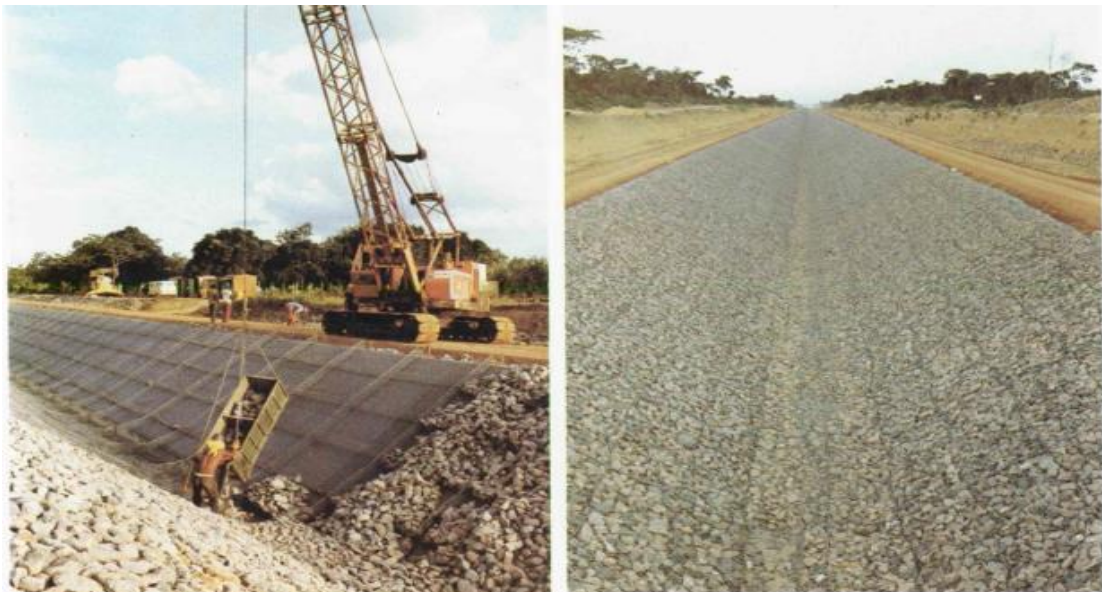


Figure 1.3: Revêtement en matelas Reno du canal Perdra do Cavalo, Brésil, phase de pose et mise en œuvre [2].

Nous illustrons les caractéristiques de construction d'un revêtement en matelas Reno dans le tableau 1.1 à savoir l'épaisseur et dimension des mailles et fils[1].

**Tableau 1.1: Caractéristiques de construction des matelas Reno et des gabions [1]**

Matelas Reno galvanisés			Matelas Reno galvanisés et plastifiés			
Maille type	Fil □mm	Epaisseur □mm	Maille type	Fil		Epaisseur m
				Intérieur □ mm	Extérieur □mm	
6*8	2.00	0.17	6*8	2.00	3.00	0.17
	2.20	0.23		2.20	3.20	0.23
		0.30				
5*7	2.00	0.15				
		0.20				
		0.25				
Largeur 2.00-3.00m-longueur 3.00-4.00-5.00-6.00 m						
Matelas Reno galvanisés			Matelas Reno galvanisés et plastifiés			
Maille type	Fil	Epaisseur	Maille type	Fil		Epaisseur m
				Intérieur □ mm	Extérieur □mm	
10*12	2.70	0.50	10*12	2.40	3.40	0.50
	3.00			2.70	3.70	1.00
8*10	2.70		8*10	2.40	3.40	
	3.00			2.70	3.70	
6*8	2.20					
	2.70					
5*7	2.00	1.00				
	2.40					
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						

Les matelas Reno et les gabions sont en maille hexagonale à double torsion et en fil d'acier doux, avec une galvanisation conforme aux normes de la circulaire. Le fil plastifié est revêtu par extrusion avec un matériel spécial en P.V.C ayant une haute résistance à la corrosion. Les types indiqués à la table sont ceux standards, comme le montre la figure 1.4.

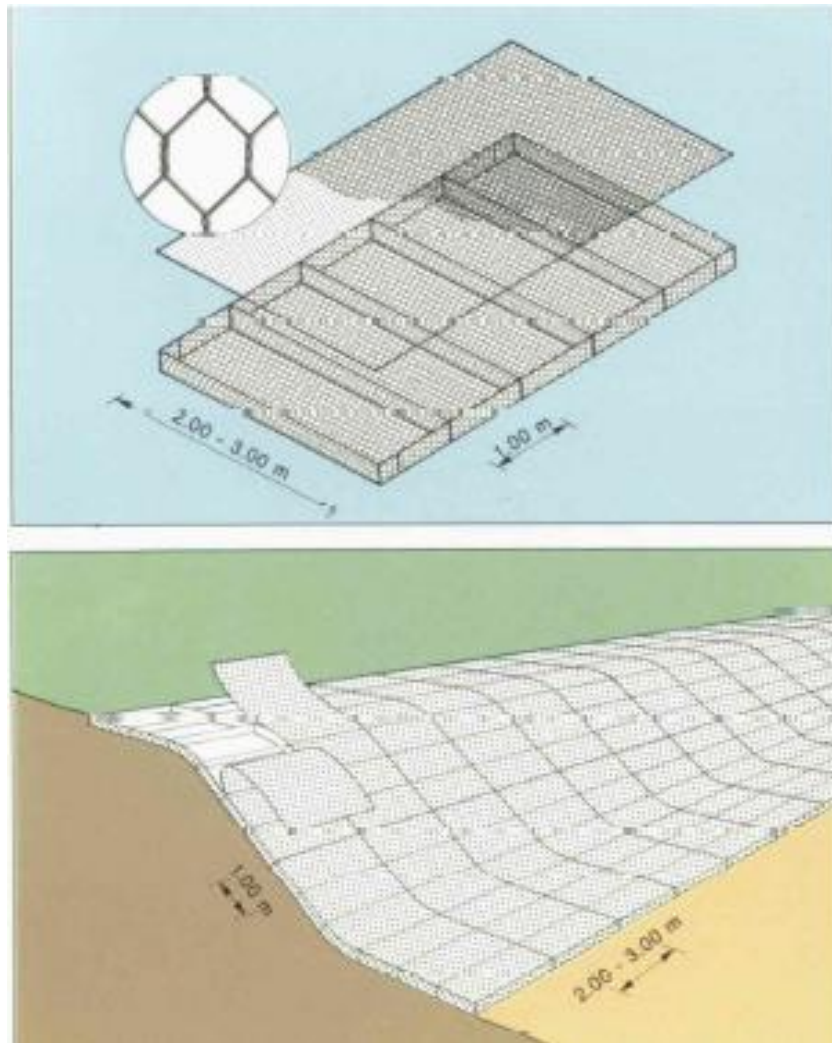


figure 1.4 Caractéristique de construction des matelas Reno [2].

#### 1.4 Mise en œuvre des matelas Reno

Les opérations de ligature et de remplissage des matelas Reno peuvent être ainsi résumées :

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



figure1.5:mise en oeuvre d'un matelas Reno et ligature de plusieurs éléments [2].



figure1.6 (a;b) mise en place et assemblage des éléments [2].



figure 1.7 remplissage des éléments avec des galets des enrochements[2].

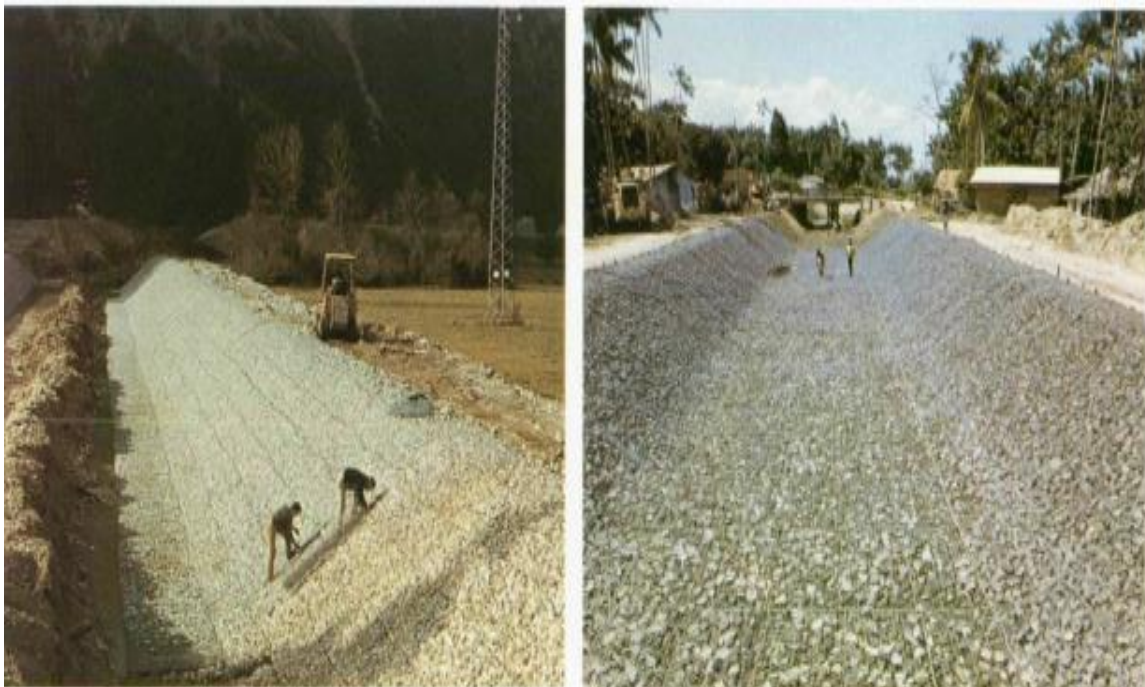


figure 1.8 fermeture des éléments a l'aide de leurs couvercles et de grillage [2].

## 1.5 Catégorie de revêtements

En ce qui concerne l'emploi des matelas Reno pour la protection et les revêtements des canaux et de cours d'eau canalisés et les diverses applications possibles, nous avons considéré pour simplifier, les catégories de travail suivante:

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

### 1.5.1 Revêtement effectué a sec

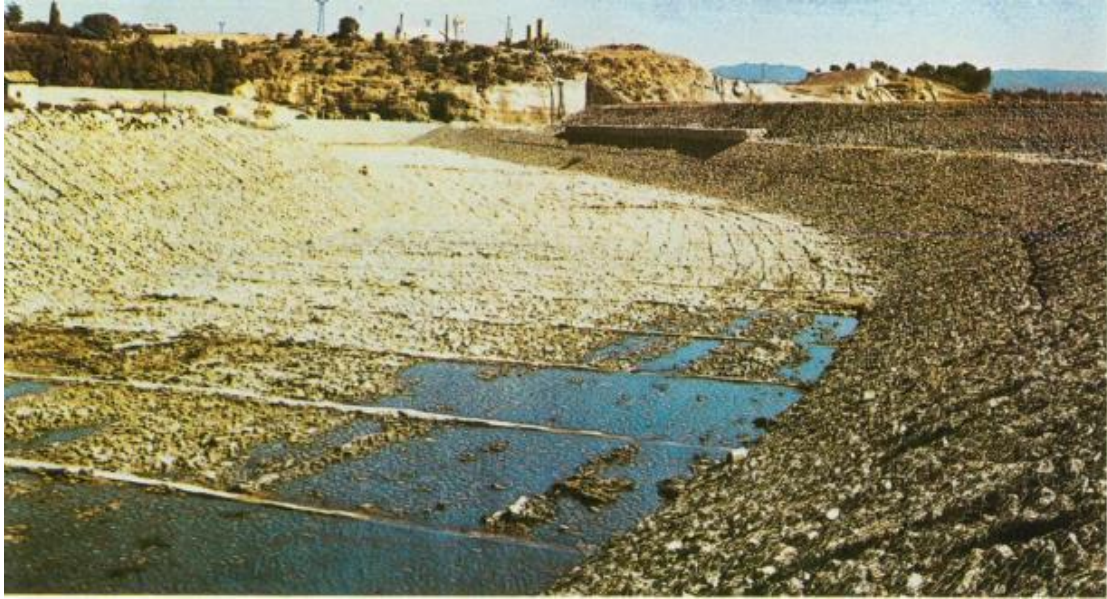
Les revêtements en matelas Reno et en gabion se posent directement sur le terrain qu'ils doivent protéger. Par conséquent, le terrain doit être trop incliné afin d'éliminer tout risque de glissement de l'ouvrage. deux conditions ne sont cependant catégoriques, comme dans le cas des revêtements rigides, puisque les revêtements en matelas Reno et en gabions sont en mesure de s'adopter aux mouvements de la berge. Le matelas est l'un des revêtements les plus avantageux. Il se pose généralement su la berge transversalement par rapport ou cours d'eau et donc, suivant l'inclinaison maximum des berges. La résistance des revêtements en matelas Reno qui dépend de la solidité du grillage dépend aussi de l'épaisseur de la structure de la taille de la pierre de remplissage. Le revêtement dépend aussi la vitesse moyenne du courant. Il été démontre que les revêtements en matelas Reno est stable en présences de charriage de fond dont la tension sont double par rapport aux acceptable pour un revêtement en enrochement de même dimensions. Il aussi été démontre qu'à vitesse du courant égale, le matelas Reno est stable à une épaisseur de 3à4 fois à l'épaisseur nécessaire dans la même condition en adoptant le revêtement en enrochement, comme le démontre au tableau 1.2

**Tableau 1.2: Epaisseur approximative en matelas Reno gabion en fonction de la vitesse du courant [1].**

Type	Epaisseur (m)	Pierraille de remplissage		Vitesse critique m/s	Vitesse limite m/s
		Granulométrie	d <sub>50</sub>		
Matelas Reno	0.15-0.17	70-100	0.085	3.5	4.2
		70-150	0.110	4.2	4.5
	0.23-0.25	70-100	0.085	3.6	5.5
		70-150	0.120	4.5	6.1
	0.30	70-120	0.100	4.2	5.5
		100-150	0.125	5.0	6.4
Gabions	0.50	100-200	0.150	5.8	7.6
		120-250	0.190	6.4	8.0

La réduction de l'épaisseur du revêtement que l'on obtient Grâce à la mise en œuvre des matelas Reno acquiert toute son importance économique pour les travaux concernant les grands fleuves, car ces travaux ont de grande envergure et la quantité de matériau à mettre en œuvre est proportionnelle. Si les berges ont tendance à s'ébouler, il peut être suffisant d'adopter pour les parties éboulées, un revêtement plus robuste et plus lourd en gabion boîte de 0.50 a 1.00 metre 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 choisit un revêtement de matelas Reno et gabion boites.

En présence d'eau industrielle ou saumâtres, particulièrement corrosives, il est préférable d'adopter des matelas Reno et des gabions galvanisé et plastifié. Figure 1.9), et (figure 1.10) [1].



**figure 1.09** Iraq-protection des berges de l'île Tajlat du Tigri a l'aide de matelas Reno galvanise et plastifiés[2].



**figure 1.10** Canalisation en matelas Reno galvanisés et plastifiés du cervaro, près de son embouchure[2].

### 1.5.2 Revêtement 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 quelque fois à l'aide de pierres enveloppées dans des branchage et placées directement sur les berges immergées. La pose présente dès lors d'importantes incertitude 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. Entouré, si le fond est vaseux, la base du revêtement n'a pas d'appui valable, le revêtement glisse et on arrive à devoir répéter fréquemment l'opération rééquilibrage des enrochement, 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 enrochement, il faut habituellement, au contraire procéder à une augmentation de 50% à l'acte de la mise en œuvre.

Les difficultés et les obstacles qui présentaient pour la réalisation de revêtement de berges sous l'eau sont maintenant éliminés grâce aux système 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 (figure 1.11) [1].



**figure 1.11: revêtement en matelas Reno galvanisés et plastifiés en présence d'eau du canal adducteur de la central thermoélectrique de Tavazzano à Mentenase [2].**

### 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 et accrue tout en augmentant l'efficacité protectrice de la structure. Le traitement du mastic de bitume permet également de protéger la structure métallique contre l'action corrosive des eaux salées ou polluées et contre l'abrasion provoquée par le transport solide. À titre informatif, nous illustrons ci-dessous les caractéristiques fondamentales du mastic de bitume, dans le tableau 1.3.

**Tableau 1.3: Caractéristique fondamentale du mastic bitumineux[1].**

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

La quantité de mastic à utiliser varie en fonction du résultat que l'on désire obtenir. Pour une simple consolidation, il faut lier la base de remplissage sans éliminer la perméabilité de la structure de façon à conserver les caractéristiques fonctionnelles de 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 à 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 le tableau 1.4.

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

type	Epaisseur	Dosage du mastic de bitume	
		Infiltration partielle Kg/m <sup>2</sup>	Infiltration complète Kg/m <sup>2</sup>
Matelas Reno	0.15	60-90	120-140
	0.17	80-100	130-150
	0.23	90-120	190-220
	0.25	100-130	200-240
	0.30	120-150	240-280
Gabions	0.15	150-200	400-450
	1.00	200-350	700-800

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 approximative en fonction de la vitesse du courant, des revêtements en matelas Reno et en gabions traité au mastic du bitume[1].**

Type	Epaisseur m	Pierrage de remplissage mm	Mastic de bitume kg/m <sup>2</sup>	Vitesse du courant m/s
Matelas Reno	0.15 – 0.17	70 – 90	80 – 120	5.5
	0.23 – 0.25	70 – 120	120 – 160	6.3
	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 normale 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 à palettes et, le cas échéant, de brûlure. La pose à sec peut exécutée par coulée directe sur la berge à l'aide de l'équipement

Si le camion ne peut atteindre le talus, le mastic est coulé à l'aide d'une grue à partir d'un réservoir isolé. Sous l'eau, l'application du mastic peut être effectuée jusqu'à deux mètres de profondeur en le laissant couler de l'extérieur sous l'effet de la pesanteur. La profondeur est supérieure et, de toute façon, on désire imperméabiliser le revêtement en coulant du mastic de bitume jusqu'à saturation et formation d'une couche extérieure, il faut utiliser un équipement spécial.

#### **1.5.4 Revêtements consolidés ou imperméabilisés au mastic de bitume, montés sur pontons et mise à l'eau avec équipements spéciaux**

Comme nous l'avons vu pour les revêtements imperméabilisés effectués en présence d'eau, et à 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 pose de grandes 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 mis en œuvre avec la plus de facilité et de régularité, par rapport aux résultats que l'on pourrait obtenir à partir d'un plan incliné. La pénétration du mastic est également plus sûre et uniforme. Une fois encore, la mise à l'eau s'effectue facilement en faisant glisser les éléments sur la plateforme du ponton qui a été inclinée pour cette opération. L'installation des éléments s'effectue par superposition des bords (0.40 à 0.60m), 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 opérations relatives à 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 (figure 1.12) [1].

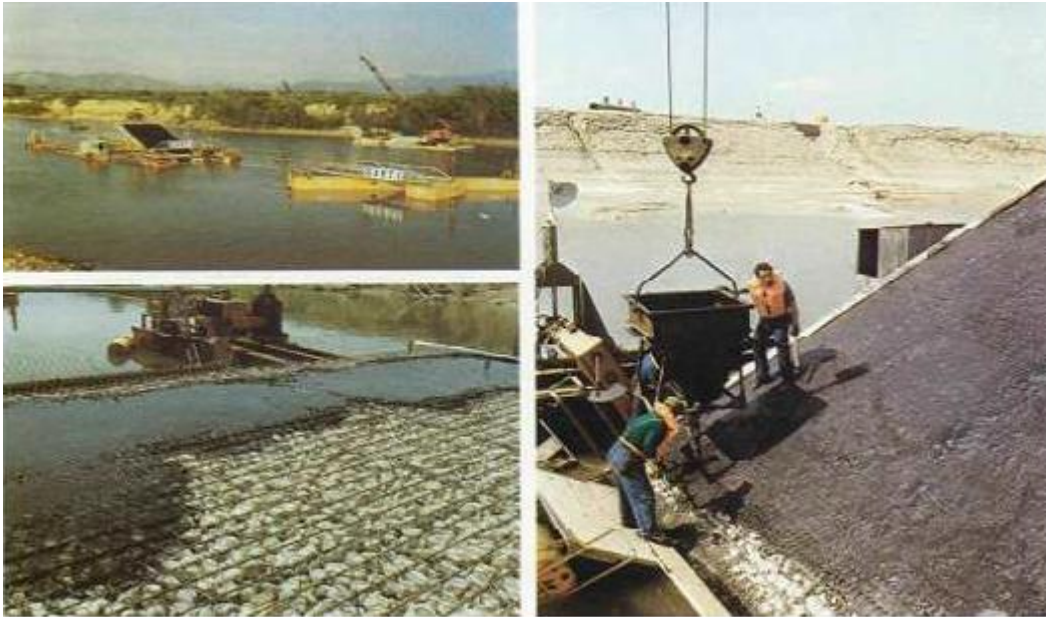


Figure 1.12: Emilie Romagne préparation des matelas Reno sur pont et largage des revêtements sur le Chiavenna et le canal d'évacuation du central nucléaire de caorso [2].

### 1.5.5: Resistance des revêtements matelas Reno et en gabion traites au mastic de bitume

Les revêtements traités de bitume (renforcement et joints) acquièrent un caractère monolithique ainsi qu'un poids total plus élevé, ce qui augmente la résistance aux mouvements de l'eau. de même, le mastic prévient les mouvements des perrés à l'intérieur de la structure, donc on ne parlera plus de premier mouvements en terme de paramètre de stabilité. Pour ce type de revêtements, 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 laquelle des matelas Reno et les gabions bitume peuvent résister, en fonction de leur épaisseur.

Tableau 1.6 épaisseurs indicatives du matelas Reno et gabion traités avec du sable asphalté coulé, en fonction de la vitesse de l'eau [1].

Type	Epaisseur (mm)	Pierraille de remplissage (mm)	Mastic de bitume (Kg/m <sup>2</sup> )	Vitesse du courant (m/s)
Matelas Reno	0.15-0.17	70-90	80-120	5.5
	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

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

### **1.6.1 Comparaison entre le revêtement Reno et les revêtements en enrochement (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 de 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'entraînement. 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:

- Le coefficient de shields des matelas Reno et des gabions sera le double de celui du rip-rap: ainsi, à condition hydraulique égales, on utilisera pour les matelas Reno et les gabions, de la pierre de dimension inférieures à celles du rip-rap. Vice versa, la vitesse supportable par les matelas Reno et les gabions est puis que double par rapport au rip-rap.
- 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. Après 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.
- Les pierres des matelas Reno et des gabions sont de dimensions inférieures à 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.
- La réduction des dimensions des pierres entraîne une légère diminution de la rugosité du revêtement, et une augmentation du débit des cours d'eau.
- Les règles pour les dimensionnement du rip-rap prévoient une épaisseur de revêtement minimum à 0.30m, 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 (0.15m); la mise en œuvre et le plongement en présences de l'eau ne nécessitent ni une augmentation d'épaisseur ni 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 1.13), Ou par étalement horizontal (figure 1.14) [1].

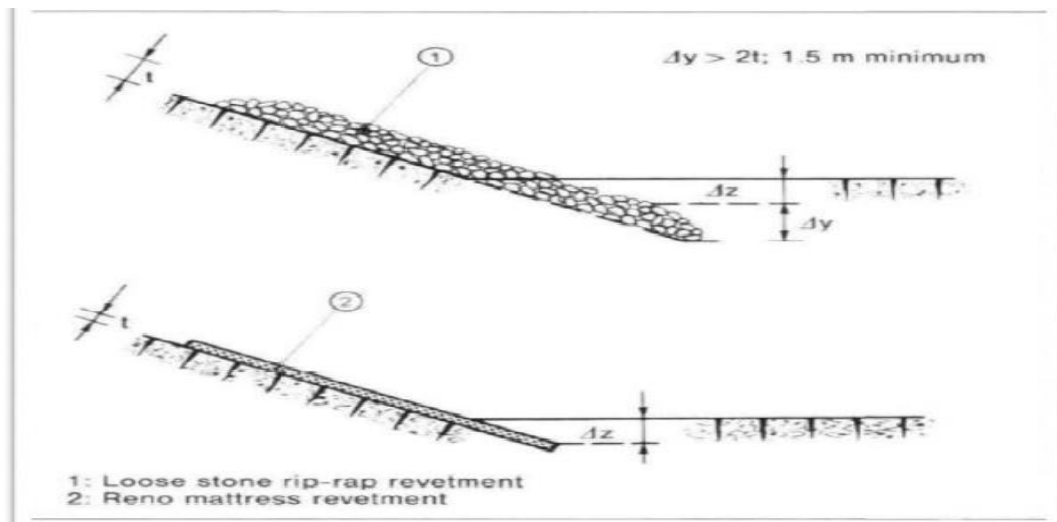


figure 1.13 Approfondissement du revêtement vu la profondeur d'érosion prévue [2]

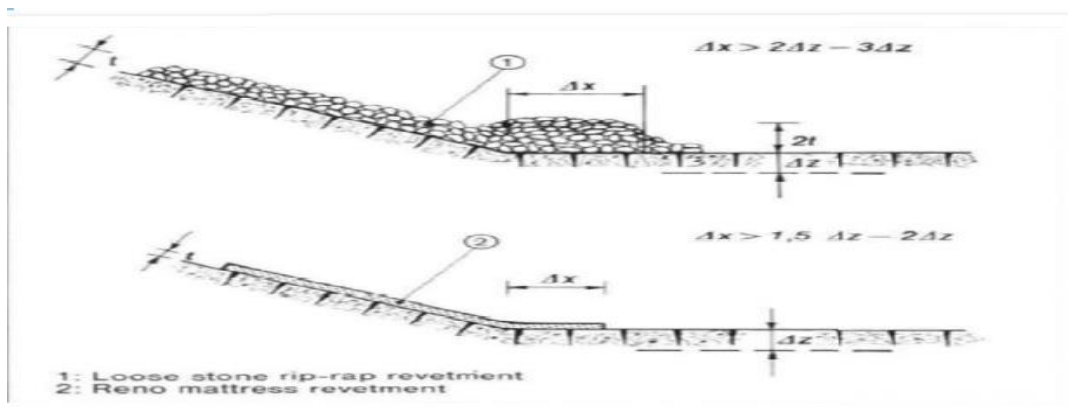


figure 1.14 Extension horizontale de revêtements vu la profondeur d'érosion prévue [2].

Si on utilise des enrochements, il faut pousser la pose du revêtement jusqu'à un niveau inférieur à la profondeur d'érosion prévue  $Dz$ . Si on utilise le matelas Reno, il suffit d'atteindre le niveau d'érosion; il faut toute fois, dans le second cas, augmenter la structure des enrochements, sans pourtant augmenter l'épaisseur du matelas Reno. En se reportant au dimensionnement des revêtements, on a établie un diagramme de comparaison des épaisseurs en fonction de la vitesse du courant (figure 1.15).

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

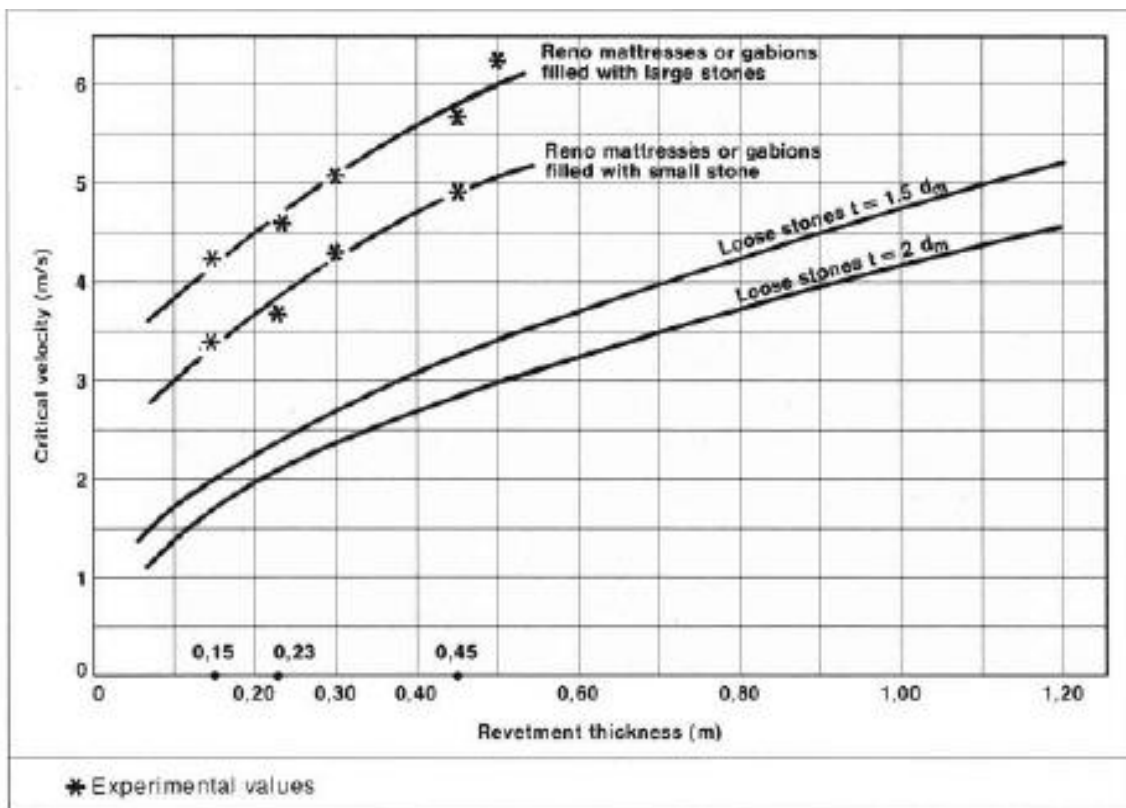


figure 1.15: épaisseur du matelas Reno en fonction de la vitesse du courant[2].

### 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, réduire le facteur de réflexion de 50% ceci pour une inclinaison des berges de 1:3 et une épaisseur du matelas Reno de 0.15m;
- b) De réduire de 40% le run-up 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 à0.25m
- 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 0.15m renforcés au mastic de bitume.

Il est possible de confronter la protection des berges en matelas Reno, entre 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 0.75m, avec une inclinaison de la berge de 1: 1.5; et une épaisseur de revêtement en enrochement de 60à70 cm.

De même, un matelas Reno de 0.25m d'épaisseur est stable pour des hauteurs de vague de 1.25m, avec inclinaison de 1:1.5; alors il faudrait une épaisseur de revêtement en enrochement de 0.95 à 1.15 m.

### Conclusion

Nous avons illustré à travers cette courte synthèse les différentes caractéristiques, fonctionnalités et mise en œuvre d'un revêtement en matelas Reno, ainsi que ses différentes catégories, et des comparaisons 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 détermination les caractéristiques de base d'un calcul déterministe.

## Introduction

Après avoir présenté brièvement le revêtement en maltas Reno dans le chapitre un, nous intéressons dans ce chapitre à la détermination des paramètres de base nécessaire pour le calcul déterministe (chapitre trois)

### 2.1 Caractérisation des moellons

Afin de constituer une base donnée conséquente, sur laquelle il nous sera possible de faire une analyse statistique robuste et fiable, il a été mené aussi bien sur le terrain, qu'en laboratoire, des mesures destinées à déterminer les caractéristiques physiques des moellons.

### 2.2 Mesures in situ

Afin de déterminer le diamètre  $d_{90}$  le diamètre qui permet le passage de 90 pourcent des moellons de pierres sèche, des moellons constitutifs du matelas Reno, nous avons procédé à une analyse d'un échantillon constitué de 100 moellons. L'emplacement sélectionné pour mettre en œuvre ces mesures in situ, fut le chantier d'un projet de murs de soutènement routier par gabions, au niveau de la daïra d'Ait Ouacif, en présence du chef de projet, pour des raisons de sécurité.



figure 2.1 Moellons constitutifs des mesures des masses.

Les mesures effectuées in situ, ont consisté en la pesée de l'échantillon de 100 moellons, en prenant soin de sélectionner des moellons de gabarits différents, permettant à postériori de pouvoir aboutir à des diamètres  $d$  (de sphère de volume équivalente), de valeurs étalées.

**Tableau 2.1 présente une illustration des résultats des pesées effectuées.**

N <sup>o</sup>	Masse (Kg)
1	9.1
2	4.6
3	2.4
-	-
-	-
-	-
98	2.1
99	2.9
100	1.1

:

### 2.3 Mesures en laboratoire

Consécutivement aux mesures in situ, des mesures en laboratoire ont aussi été effectuées. Elles ont consisté principalement en la mesure de volumes sur un échantillon réduit de moellons.

#### 2.3.1 Détermination de la masse volumique

Afin de déterminer la masse volumique absolue  $\rho_{abs}$  des moellons, (qui est une valeur intrinsèque au matériau), nous avons sélectionné un échantillon de Cinq pierres parmi les cents, sur lesquelles nous avons effectué des pesées, mais aussi des mesures de volume. La figure 2. Montre les pierres sélectionnées pour la mesure de  $\rho_{abs}$ .



figure2.2 vue d'ensemble des pierres.

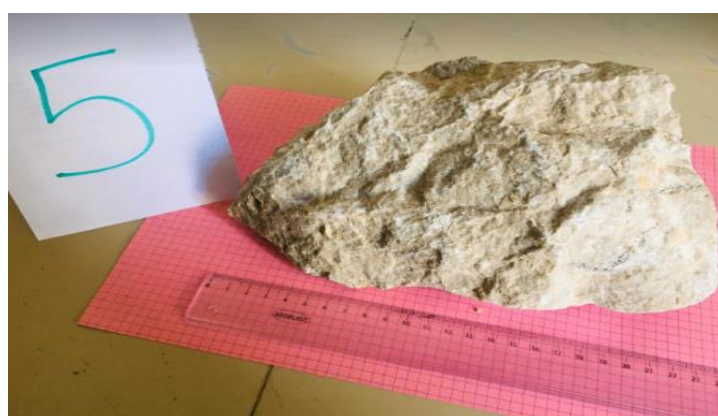
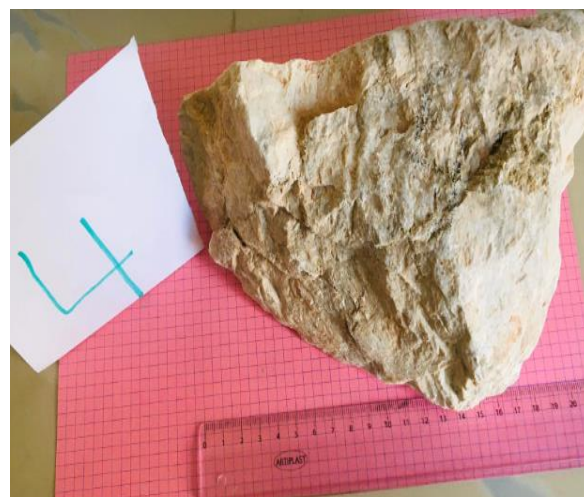
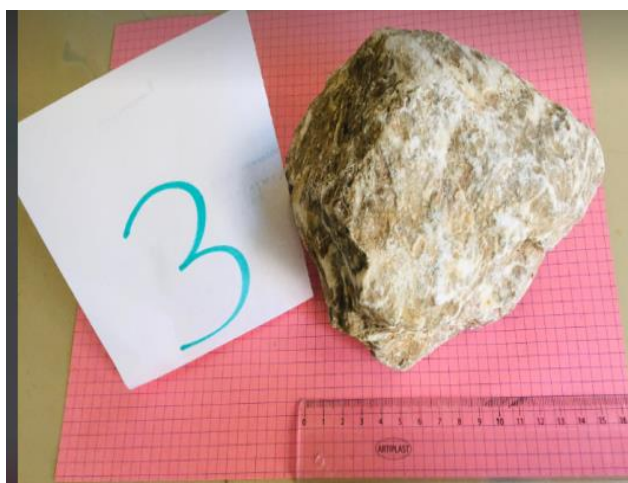


figure 2.3 vue précise de chaque pierre.

A fin de déterminer dans un premier temps le volume de chaque moellon, nous avons menée des mesures de volumes:

1. La masse de chaque moellon de pierre sèche est mesurée.
2. un récipient est ensuite rempli d'eau à ras puis pesé.
3. un moellon est ensuite minutieusement plongé dans l'eau, de manière à expulser du récipient le trop plein.
4. le moellon est retiré du récipient.
5. La masse du récipient après retrait du moellon est mesurée.

Le volume se déterminer par différence de masse entre le récipient rempli à ras et la masse du récipient après avoir plongé le moellon et l'avoir retiré. Etant donné que la masse volumique de l'eau est en  $\text{kg/m}^3$ , cette différence de masse, correspond aussi au volume du moellon testé

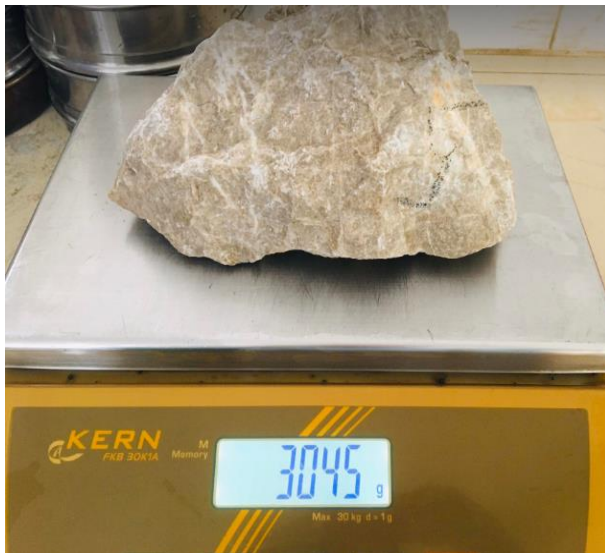


figure 2.4 chronologie de la pesée du moellon.

$$\text{Volume}=(M_i-M_F)/1000 \quad (1)$$

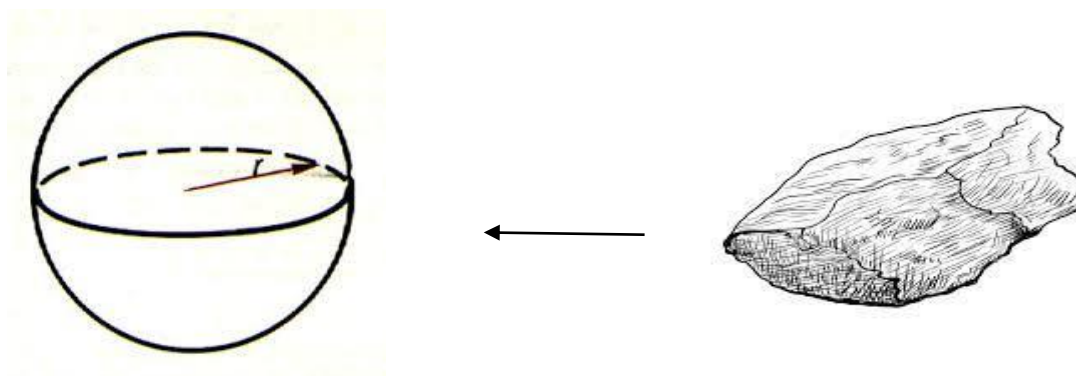
$$\text{Et la masse volumique } \rho = m/v \quad (2)$$

Le tableau 2.3, présente le récapitulatif des résultats obtenus à cette étape.

**Tableau 2.3 Masse volumique de pierres de moellon**

Echantillon	Masse (kg)	Masse récipient plein $M_i$ (kg)	Masse récipient partiel $M_F$ (kg)	$\Delta M$ (kg)	Volume ( $m^3$ )	$\rho = m/v$ ( $kg/M^3$ )
1	4,53	13,34	11,53	1,81	0.00	2503,04
2	4,23	13,34	11,62	1,72	0.00	2464,18
3	1,83	13,34	12,54	0,80	0.00	2295,74
4	3,20	13,34	12,03	1,31	0.00	2443,94
5	3,05	13,34	12,09	1,25	0.00	2439,90
total						2429,360

Après avoir déterminé la masse volumique de l'échantillon  $\rho = 2429.360 \text{ kg/m}^3$ , il est possible de déterminer le rayon et à posteriori, le diamètre de la sphère équivalente en volume à chaque pierre de moellon dont nous connaissons la masse.



**figure 2.5 Passage du volume de la pierre réelle à la sphère équivalente.**

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 \quad \text{donc} \quad R = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} \quad (3)$$

En utilisant la formule, il nous est possible de déterminer l'ensemble des rayons et diamètres de notre échantillon global de 100 moellons.

Tableau 2.4 Diamètre des moellons de pierre sèche

N°	Masse m (kg)	Volume (m3)	Rayon(m)	Diamètre (mm)
1	9,1	0,003745843	0,14110323	282,206458
2	4,6	0,001893503	0,11240245	242,804894
3	2,4	0,000987915	0,09048854	180,977075
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
98	2,1	0,000864425	0,08654917	173,098345
99	2,9	0,00119373	0,0963805	192,760991
100	1,1	0,000452794	0,06976764	139,535286

## 2. 4 Analyse granulométrique

A partir de la série de données constituée, (les diamètres et les masse des moellons de pierre sèche), il est possible de déterminer le pourcentage des refus partiels, cumulés, ainsi que les tamisât partiels et cumulés (tableau2.5). Ces valeurs nous permettront de dessiner la courbe granulométrique.

Tableau 2.5 Analyse granulométrique

Diamètre (mm)	Refus partiel (kg)	Refus cumulé (kg)	Tamisât	Pourcentage de refus
308,6	11,9	11,9	540,7	2,15345639
302,4306652	11,2	23,1	529,5	4,18023887
294,10261991	10,3	33,4	519,2	6,0441549
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
147,5256719	1,3	550,3	2,3	99,5837857
143,6415995	1,2	551,5	1,1	99,800941
139,5352856	1,1	552,6	0	100
totale	552,6			

### 2.4.1 Représentation graphique de la courbe granulométrique

La figure 2.6 Représente la courbe granulométrique des moellons. A partir de cette courbe, nous pouvons déterminer graphiquement, la valeur de diamètre  $d_{90}$  qui permettant le passage de 90% de la pierre qui constitue le revêtement

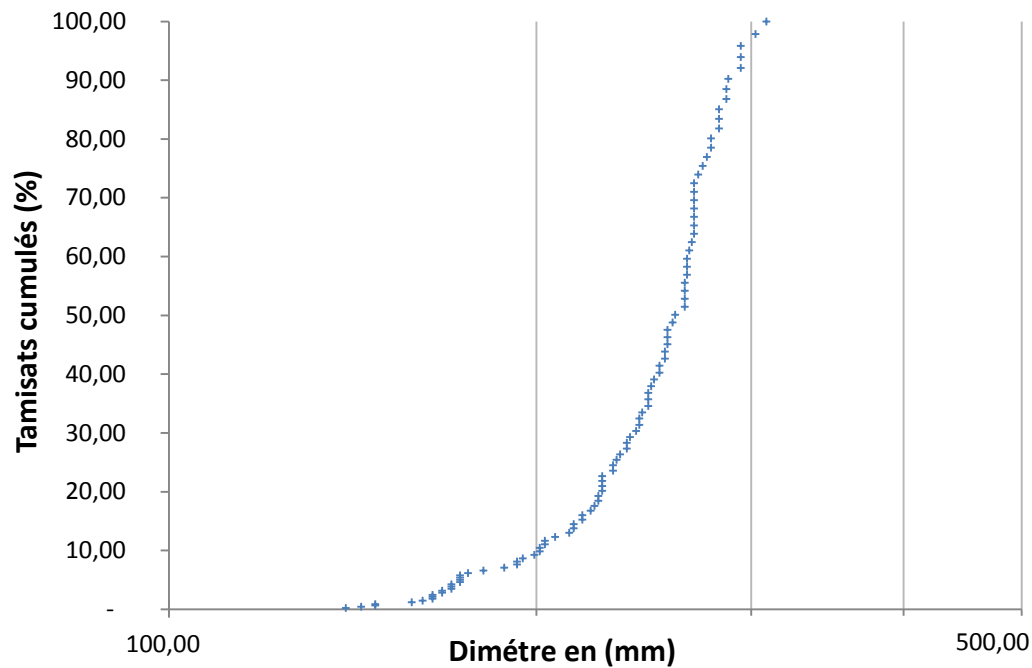


figure 2.6 : Courbe granulométrique

D'après la courbe granulométrique nous distinguons le diamètre  $d_{90}$  le diamètre qui permet le passage de 90 % des moellons de pierres sèche  $d_{90}= 287,28\text{mm}$ .

A partir d'un analyse statistique nous distinguons le diamètre moyen  $d_m$  et le diamètre  $d_{50}$  qui permettant le passage de 50%.

- $d_m = 231.53 \text{ mm}$
- $d_{50} = 240.03 \text{ mm}$

### 2.5 Analyse statistique de l'échantillon

Différentes loi de distribution sont ajustées à notre échantillon de diamètre  $d$  (mm), à savoir la loi normale, la loi log normale la loi weibul et la loi gamma. la fonction de densité sont représentés sur la figure

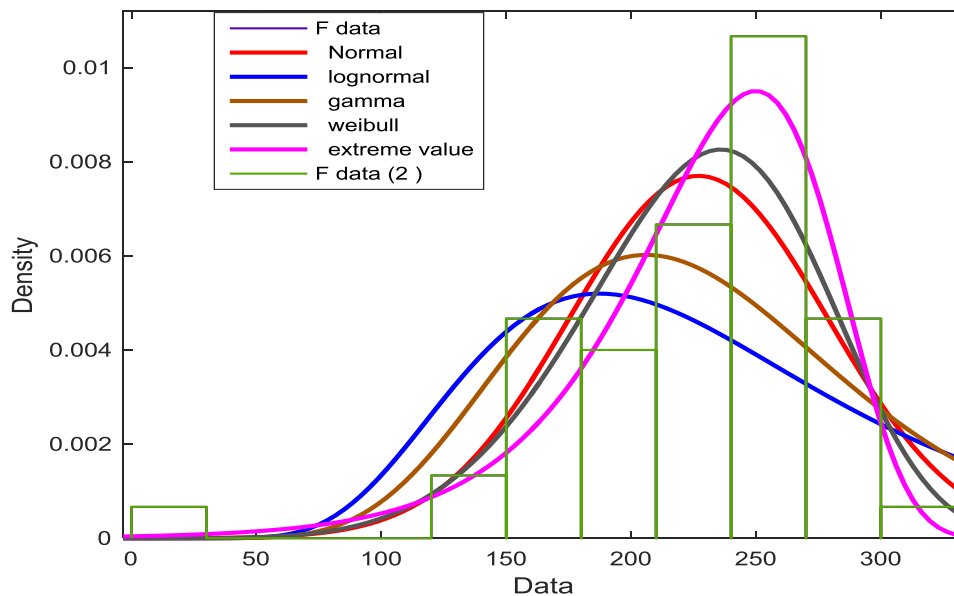


figure 2.7 Fonction de densité.

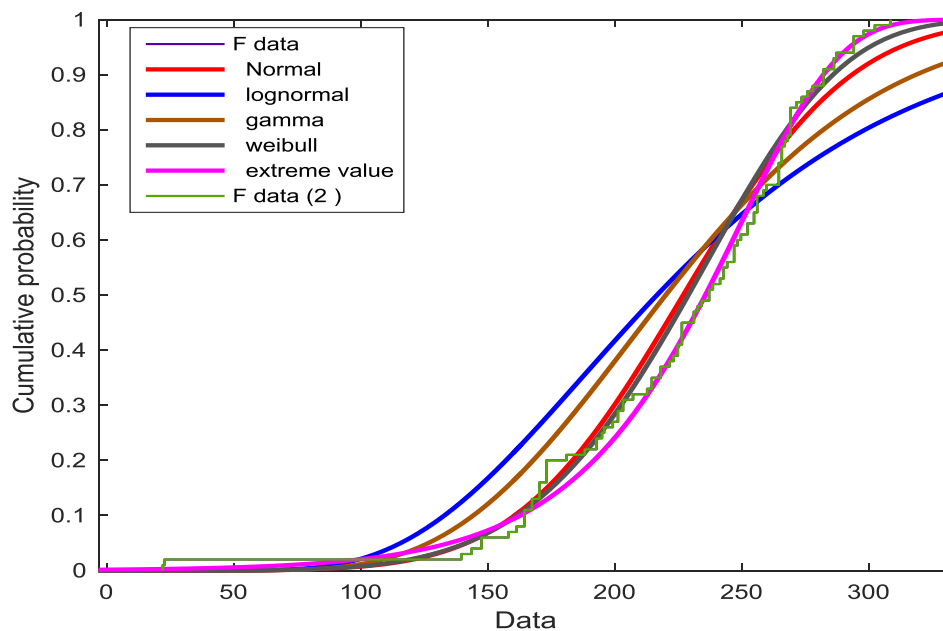


figure 2.8 Fonction de répartition

Pour le choix de la loi adéquate à notre échantillon, nous avons procédé à deux tests d'adéquation à savoir le test de  $X^2$  et le test de Kolmogorov. Les résultats sont présentés dans le tableau qui suivent:

### Test $X^2$

- **Normal distribution**

h = 1

p = 0.0227

st =

chi2stat: 9.5584

df: 3

edges: [22.0000 165.3000 193.9600 222.6200 251.2800 279.9400 308.6000]

O: [11 13 14 23 27 12]

E: [11.6891 14.5003 20.4491 21.4007 16.6206 15.3402]

- **Lognormal distribution**

h = 1

p = 2.8945e-11

st =

chi2stat: 55.2394

df: 4

edges: [22.0000 136.6400 165.3000 193.9600 222.6200 251.2800 279.9400 308.6000]

O: [2 9 13 14 23 27 12]

E: [11.3345 12.5738 14.6949 14.2656 12.2956 9.7944 25.0413]

- **Weibull Distribution**

h = 0

p = 0.1443

st =

chi2stat: 5.4066

df: 3

edges: [22.0000 165.3000 193.9600 222.6200 251.2800 279.9400 308.6000]

O: [11 13 14 23 27 12]

E: [11.2522 13.4046 20.2419 23.3220 18.9619 12.8174]

- **Guembel Extreme Value Distribution**

h = 0

p = 0.1612

st = chi2stat: 6.5580

df: 4

edges: [22.0000 136.6400 165.3000 193.9600 222.6200 251.2800 279.9400 308.6000]

O: [2 9 13 14 23 27 12]

E: [5.2238 5.4165 10.3736 18.0076 25.5344 24.0821 11.3620]

- **Guama Distribution**

h = 1

p = 3.3893e-06

st =

chi2stat: 30.7833

df: 4

edges: [22.0000 136.6400 165.3000 193.9600 222.6200 251.2800 279.9400 308.6000]

O: [2 9 13 14 23 27 12]

- **Guama Distribution**

h = 1

p = 3.3893e-06

st =

chi2stat: 30.7833

df: 4

edges: [22.0000 136.6400 165.3000 193.9600 222.6200 251.2800 279.9400 308.6000]

O: [2 9 13 14 23 27 12]

E: [7.5639 11.1784 15.6575 17.1108 15.5278 12.1995 20.7621]

Un récapitulatif des résultants est donné dans le tableau (2.6).

Tableau 2.6 Résultats du test de  $\chi^2$ 

Lois de distribution	h	P value	chi2stat	Ch2critique	resultants
Normal distribution	1	0.0227	9.5584	7.8417	rejeté
Log normal distribution	1	2.8945e-11	55.2394		rejeté
Weibull Distribution	0	0.1443	<b>5.4066</b>		Accepté
Gamble Extreme Value Distribution	0	0.1612	<b>6.5580</b>		accepté
Gama Distribution	1	3.3893e-06	30.7833		Rejeté

**h0** : la distribution observée n'est pas significativement différente de la distribution théorique. La variable aléatoire suit la fonction de répartition

**h1** : la distribution observée est différente de la distribution théorique

Les résultats montrent que les Weibull et Guembul sont les seule retenues ( $\chi^2_{stat} < \chi^2_{critique}$ )

### Test Kolmogrov

- **Lois normal**

h = 0

p = 0.3303

ksstat = 0.0931

cv = 0.1340

- **Lois Lognormal**

h = 1

p = 0.0024

ksstat = 0.1812

cv = 0.1340

- **Lois Weibull**

h = 0

p = 0.3970

ksstat = 0.0881

cv = 0.1340

- **Lois gamble (ev)**

$h = 0$

$p = 0.6600$

$ksstat = 0.0715$

$cv = 0.1340$

- **Lois Gama**

$h = 1$

$p = 0.0390$

$ksstat = 0.1385$

$cv = 0.1340$

**Tableau 2.7 Résultats du test de Kolmogorov**

Lois de distribution	h	P value	Kstat	Cv	resultas
Normal distribution	0	0.3303	<b>0.0931</b>	<b>0.1340</b>	accepter
Log normal distribution	1	0.0024	0.1812	0.1340	rejetée
Weibull Distribution	0	0.3970	<b>0.0881</b>	<b>0.1340</b>	accepter
Gumball Extreme Value Distribution	0	0.6600	<b>0.0715</b>	<b>0.1340</b>	accepter
Gama Distribution	1	0.0390	0.1385	0.1340	rejetée

Les résultats montrent que les normal, Weibull et Guembul sont retenues (P important) et ksta t inferier à Cv.

### Conclusion

La procédure d'analyser un échantillon de moellon de pierres sèche et de le caractériser, afin de mener une étude statistique. Cette étude nous permis de ressortir les données d'entrée suivantes nécessaires aux analyses déterministe et fiabiliste telle que

- Le diamètre moyen des pierres  $d_m$  et le diamètre  $d_{50}$  qui permet le passage de 50/ des pierres de moellon sèche qui est déterminer a partir d'une analyse statistique
- Le  $d_{90}$  qui permettant le passage de 90/ des pierres qui constituent le revêtement qui est déterminer à partir de la courbe granulométrique
- La loi de distribution à partir du test d'adéquation et le test de Kolmogorov.



## Introduction

Après avoir déterminé le diamètre  $d_{90}$  permettant le passage de 90% de la pierre qui constitue le revêtement, et le diamètre moyenne des pierres  $d_m$ , nous passons dans ce chapitre à la méthode de dimensionnement, et aussi un calcul déterministe et effectué sur un canal trapézoïdale en matelas Reno, qui tient compte des différents vérification de stabilité du matelas Reno en passant par le calcul hydraulique.

### 3.1 Calcul hydraulique des cours d'eau à surface libre[5]

Pour les cours d'eau naturels comme pour les canaux artificiel, il est souvent possible, 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 donc et dont la pente est constante, avec surface libre parallèle qui fond, ainsi la vitesse de l'écoulement est exprimé par la relation de Chézy.

$$V=C\sqrt{R_h \times I} \quad (3.1)$$

Avec

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

$R_h$ : rayon hydraulique (m);

I:pente du canal;

Le coefficient de Chézy (c) peut être donné par la formule de Manning

$$C=\frac{1}{\eta} \cdot Rh^{1/6} \quad (m^{1/2}s^{-1}) \quad (3.2)$$

Où  $\eta$  est un coefficient de rugosité, dont la valeur dépend de la nature des parois (tableau 3.1).

Et aussi donnée par les relations suivantes

$$\color{red}{\oplus} \text{ Formule de Strickler} \quad \eta=\frac{d50^{1/6}}{21} \quad (3.3)$$

$d_{50}$ :diamètre permettant le passage de 50% de la pierre sui constitue le revêtement.

✚ Formule de Meyer-Peter et Muller 
$$\eta = \frac{d_{90}^{1/6}}{26} \quad (3.4)$$

$d_{90}$ : diamètre de 90% qui permettant le passage de 90% de la pierre constitue le revêtement.

Dans ces formules  $\eta$  est exprimé en, toute fois nous recommandons l'utilisation de l'équation (3.3) lorsque la granulométrie est étroite et l'équation (3.4) lorsque elle est étalée. Ils ne faut pas employer ces formules pour le sable, elles conduiraient a des résultats nettement trop élevé.

**Tableau 3.1: Coefficients de rugosité [1]**

type	Nature des berges	$\eta$ (s/m <sup>1/3</sup> )
1	Canaux revêtus en matelas Reno parfaitement colmatés à l'aide du mastic di bitume hydraulique afin d'obtenir une surface plane et lisse	<b>0.0158</b>
2	Canaux revêtus en matelas Reno et en gabions parfaitement colmatés à reflux à l'aide du mastic de bitume hydraulique par coulée direct	<b>0.0172</b>
3	Canaux revêtus en matelas Reno et en gabions renforcés à l'aide de mastic de bitume hydraulique qui se distribue autour de pierraille superficielle	<b>0.0200</b>
4	Canaux revêtus en matelas Reno et en gabions renforcés à l'aide du mastic de bitume qui s'infiltré en profondeur	<b>0.0215</b>
5	Canaux revêtus en matelas Reno remplis avec matériaux de sélection et mise en œuvre soignée	<b>0.0222</b>
6	Canaux revêtus en matelas Reno remplis avec matériaux de sélection et mise en œuvre non soignée	<b>0.0250</b>
7	Canaux revêtus en matelas Reno remplis avec des matériaux de carrière non sélectionnés et mise en œuvre non soignée	<b>0.0270</b>
8	Canaux revêtus en matelas Reno remplis avec un matériel bien sélectionné et mise en œuvre soignée	<b>0.0260</b>
9	Canaux revêtus en gabions remplis avec matériel non sélectionné et mise en œuvre soignée	<b>0.0285</b>
10	Canaux en terre en mauvaises 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 engins mécaniques et entretien négligé	<b>0.0303</b>

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

Ses principaux éléments géométriques et hydrauliques sont indiqués à l'annexe 1

### 3.2 Dimensionnement des revêtements en matelas Reno

Le dimensionnement d'un revêtement en matelas Reno consiste vérification en terme de vitesse de tension d'entraînement, d'effet de déformation, et enfin de stabilité entre le matelas Reno et le sol.

#### 3.2.1 Vérification en termes de vitesse

La figure 3.1 compare la résistance à la vitesse  $V_c$  d'un revêtement en fonction du nombre de Froude est des dimensions des pierres de remplissage.

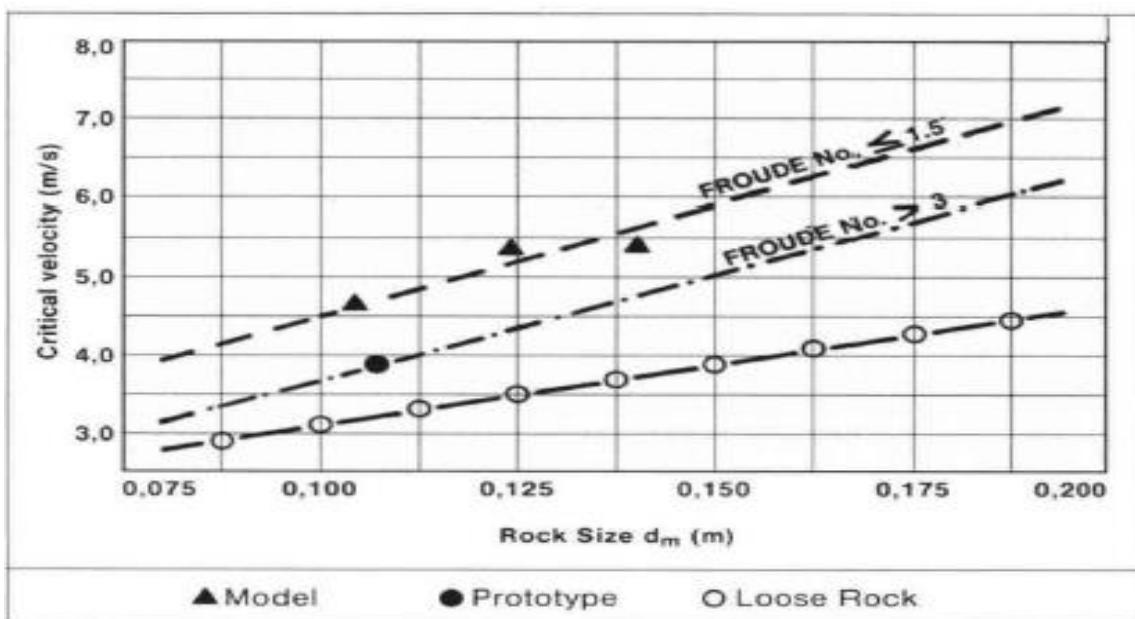


figure 3.1 vitesse critique  $V_c$  du mouvement en fonction de diamètre moyen de pierre  $d_m$  [2].

La figure 3.2 montre la résistance à la vitesse des matelas Reno soumis aux essais, en fonction de l'épaisseur du revêtement utilisé.

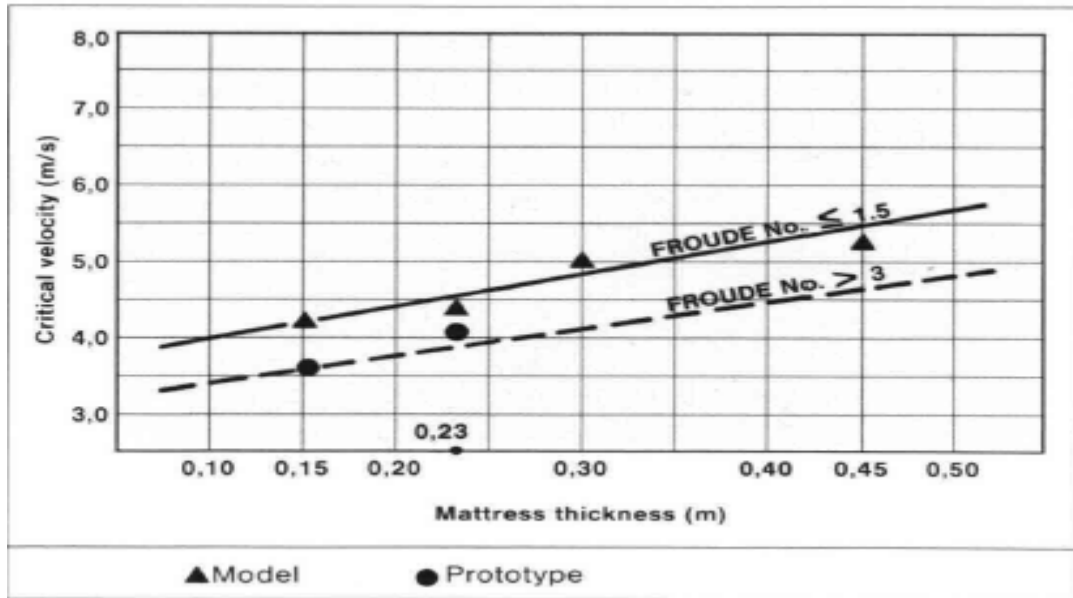


figure 3.2 vitesse critique  $v_c$  en fonction d'épaisseur du matelas Reno[2].

### 3.2.2 Vérification 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 gabion 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:

$$\tau_b = \gamma_w \cdot y \cdot I \tag{3.5}$$

Où  $\gamma_w$  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 de 50% de la pierre qui constitue le revêtement); le coefficient de Shields sera représenté par la valeur adimensionnelle:

$$C^* = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma_w) d_m} \tag{3.6}$$

Où  $\tau_c$  représente la tension tangentielle d'entrainement lors de situations critiques du premier mouvement, et  $\gamma_s$  le poids spécifique du matériau inerte.

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  $C^* = 0.10$ .

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:

$$\tau_c = C^*(\gamma_s - \gamma_w) d_m \quad (3.7)$$

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

$$\tau_b \leq \tau_c \quad (3.8)$$

On admet par contrôle de déformation que:

$$\tau_b \leq 1.2 \tau_c \quad (3.9)$$

### ✚ Les berges

Le coefficient de shileds pour l'enrochement est d'environ 0.047; pour la pierre emprisonnée par grillage métallique (matelas Reno et gabions) le coefficient est de:

$$C^*=0.10$$

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

Pour le revêtement des berges d'un canal à section trapézoïdale, La tension tangentielle est donnée par la relation suivante:

$$\tau_m = 0.75 \times \gamma_w \times Y \times I \quad (3.10)$$

Et la tension tangentielle critique au niveau des berges est donnée par la relation suivante:

$$\tau_s = \tau_c \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \varphi}} \quad (3.11)$$

$\theta$  Représenté l'inclinaison de la berge

$\varphi$  L'angle de frottement interne de la pierre qui constitue le revêtement pour les matelas Reno.

On accepte :

$$T_m \leq T_s \quad (3.12)$$

On admet par contrôle de déformation que les berges du canal sont stables, si et seulement si l'inégalité suivant est vérifiée:

$$\tau_m \leq 1.2 \tau_s \quad (3.13)$$

### 3.2.3. Estimation des effets de déformation

On admet 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 3.3.

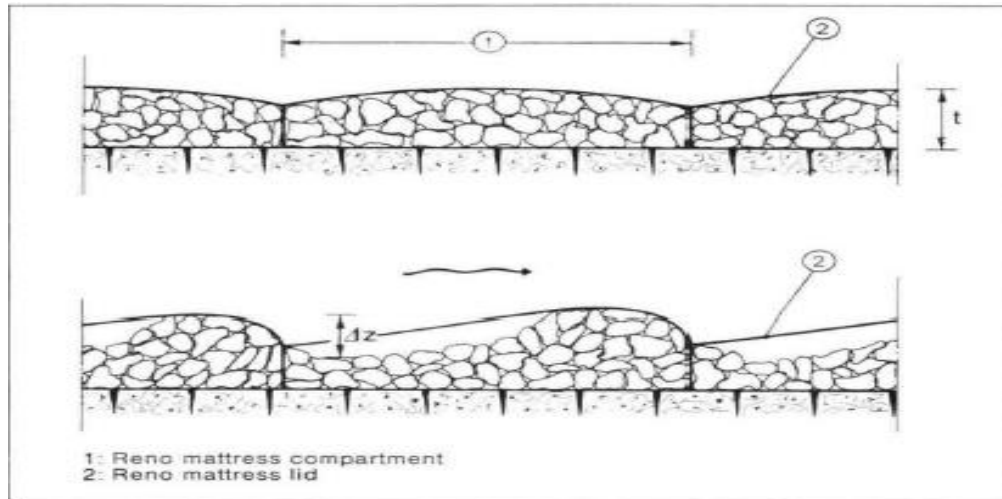


figure 3.3: Schéma du mouvement des pierres dans les poches (AGOSTINI et ALL, 1976)[2].

Si les contraintes de cisaillement augmentent de nouveau, l'un des deux évènements peut se produire:

- soit le revêtement perdra de son efficacité (si le sol de base sous le matelas Reno est exposé);
- 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  $\Delta z/d_m$  est utilisé ou:  $\Delta z$ : la différence de hauteur entre la surface de la roche maximale et minimale dans un compartiment de matelas

Il peut être défini comme paramètre de shields efficace.

$$C'^* = \frac{\tau b}{(\gamma_s - \gamma_w).d_m} \quad (3.14)$$

**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:

$$t - \Delta_t \geq d_m \quad (3.15)$$

Avec:

t: désigne l'épaisseur du matelas Reno non déformé;

$\Delta_t$ : La diminution maximale de l'épaisseur de remplissage;

Les essais montrent que:

$$\Delta_t = \frac{\Delta z}{2} \quad (3.16)$$

$\Delta z$  désigne la distance verticale entre le point le plus haut et le point bas de la surface recouverte par la pierraille.

L'équation précédente devient:

$$\frac{\Delta z}{dm} \leq 2 \times \left( \frac{t}{dm} - 1 \right) \quad (3.17)$$

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

$$t \cdot dm \geq \frac{\Delta z}{2} \quad (3.18)$$

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

La figure 2.4 montre que le paramètre  $\Delta z/dm$  reste inférieure à 1.6 équivalent à  $t = 1.8 \times dm$ , un matelas Reno d'une épaisseur de 1.8 à 2 fois  $dm$  peut supporter des conditions hydraulique difficiles, sans que le fond ne se découvre. D'où nous adopterons comme règle de dimensionnement des matelas Reno des épaisseur au moins égales de 1.8 à 2 fois  $dm$ , ainsi de bonnes marges de résistance.

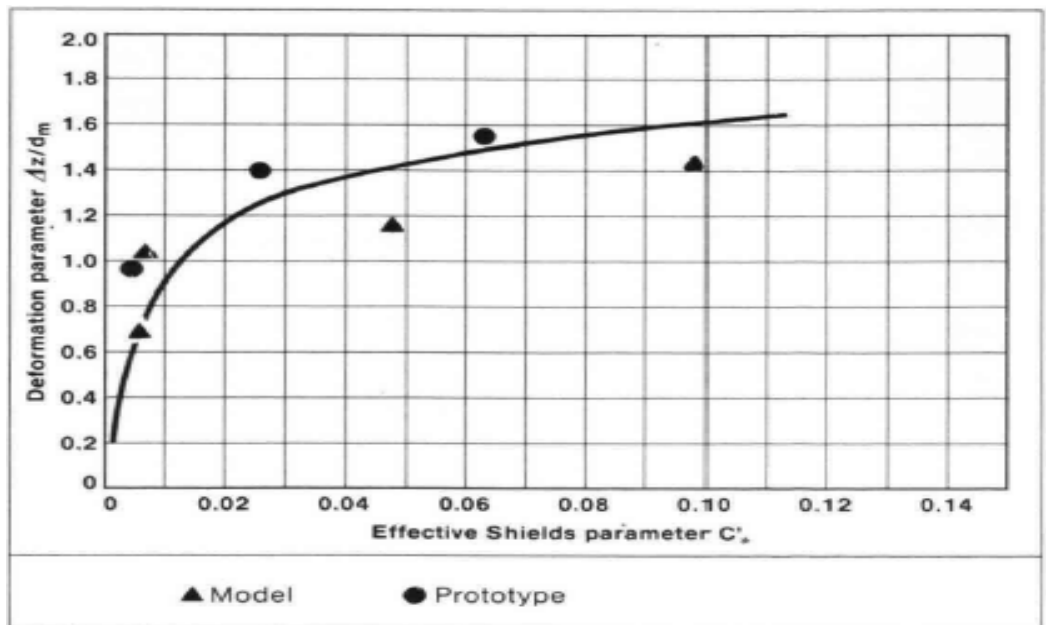


figure 3.4: rapport entre le paramètre de déformation et le coefficient d'efficacité de shields (AGOSTINI et ALL, 1976) [2].

La courbe de la figure 3.4 obéit à l'équation de tendance suivante:

$$\frac{\Delta z}{dm} = 0.306 \ln(x) + 2.328 \quad [3] \quad (3.19)$$

### 3.2.4 Vérification vis-à-vis de l'érosion du matériau de base

L'épaisseur de 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 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:

$$V_b = \frac{1}{\eta\zeta} \left(\frac{dm}{2}\right)^{\frac{2}{3}} \times I^{1/2} \quad (3.20)$$

$V_b$  Représente la vitesse à l'interface du matelas Reno fond sous-jacent et  $\eta\zeta$  le coefficient de rugosité du fond.

On peut poser  $\eta\zeta = 0.02$  s'il y a filtre en géotextile sous le matelas ou s'il n'y en a pas; par contre, on aura  $\eta\zeta = 0.025$  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, nous avons obtenu sa valeur de la figure 2.5 pour les terrains cohérents, et on a pour les terrains incohérents,

$$V_e = 16,1 \cdot d_{50}^{1/2} \quad (3.21)$$

Où  $V_e$  est exprimée en (m/s) et  $d_{50}$  est exprimé en (m) et représente 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 base, à l'interface avec le sol; sa valeur est 1/4, 1/2 de la valeur de  $V_b$ .

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 0.20m, et de toute façon supérieur à la quantité:

$$S = \frac{d_v}{f} \left(1 - \left(\frac{V_e}{V_b}\right)^2\right) \quad (3.22)$$

Où  $f$  est le coefficient de Darcy-Weisbach et  $d_v$  est le diamètre équivalent des interstices:

$$dv = \frac{d50^{(filtre)}}{5} \quad (3.23)$$

On détermine la granulométrie du filtre grâce aux équations suivantes:

$$\frac{d50^{(filtre)}}{d50^{(sol)}} \leq 40 \quad (3.24)$$

$$5 \leq \frac{d15^{(filtre)}}{d15^{(sol)}} \leq 40 \quad (3.25)$$

$$\frac{d15^{(filtre)}}{d85^{(sol)}} \leq 5 \quad (3.26)$$

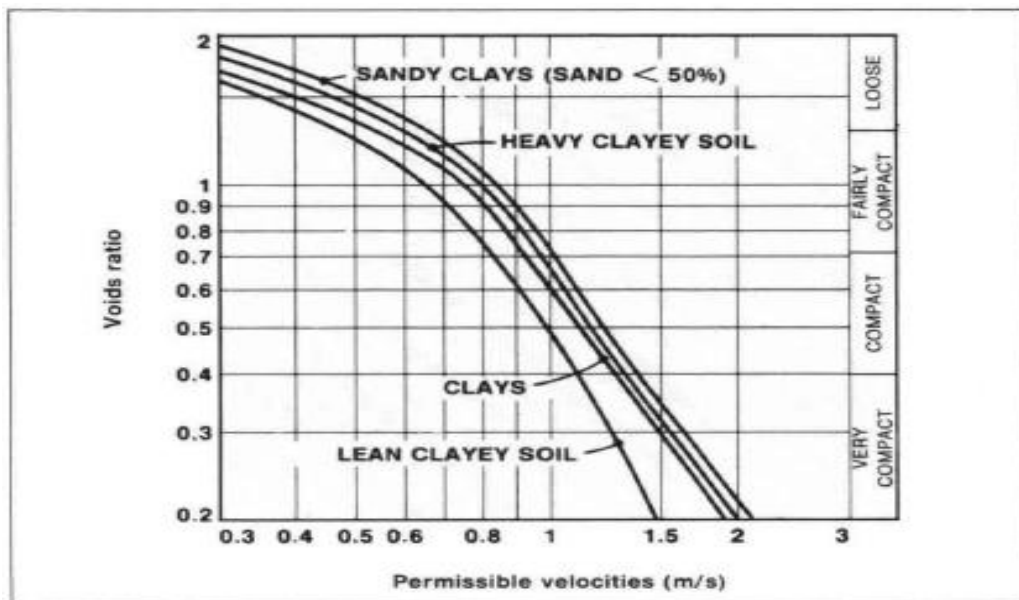


figure 3.5:valeurs des vitesses admissibles maximum pour terrains cohérents[2].

### 3.3 Cas d'étude

#### ✚ Présentation du canal

Dans le cadre d'aménagement d'un cours d'eau naturel, il s'agit de réaliser un canal de drainage pour un débit de crue caractéristique  $Q=279\text{m}^3/\text{s}$ , et la pente du canal  $I=0.008$ , la section transversal de forme trapézoïdale, le canal traverse un sol sablonneux  $d50=0.5\text{mm}$ . Il y a lieu de déterminer les caractéristiques géométriques du canal dans le tableau (3.2), figure 3.6.

Tableau 3.2 caractéristique Géométrique du canal trapézoïdal.

paramètre	valeur	unités
La largeur du canal $b$	12	m
La profondeur de l'eau $y$	3	m
La largeur de la surface de l'eau $B$	22.06	m
La pente du canal $I$	0.008	
Epaisseur du matelas	0.25	m
Diamètre du fil	2.00	mm
Le diamètre permettant le passage 90% de la pierre constitue le revêtement	278	mm
Le diamètre moyenne de la pierre $d_m$	231	mm
La dimension des particules du sol $d_{50}$	0.5	mm

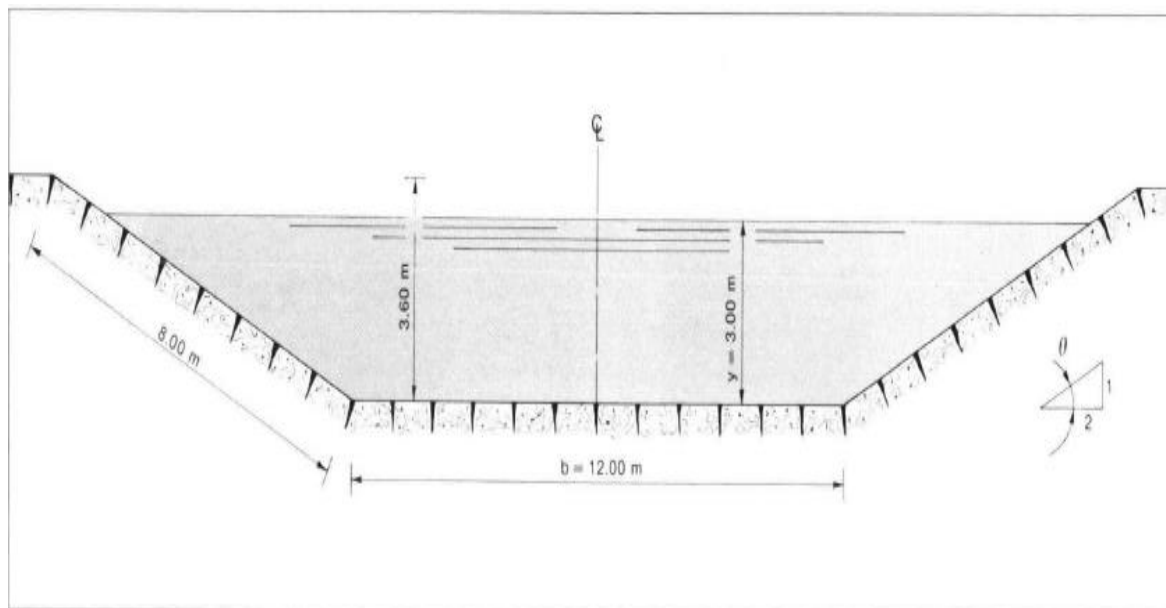


figure 3.6 coup transversal du canal trapézoïdal.

### 3.3.1 calcul hydraulique

Le calcul des paramètres hydrauliques sont représenté dans le tableau (3.4)

Coefficient de rugosité  $\eta$

$$\eta = \frac{d_{90}^{1/6}}{26}$$

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

- Section mouillée  $S_m = by + y^2 \cotg\theta$
- Paramètre mouillé  $P_m = b + 2 \times \frac{y}{\sin\theta}$
- Rayon hydraulique  $R_h = \frac{S_m}{P_m}$
- La largeur de la surface de l'eau  $B = b + 2y \cotg\theta$

Les résultats sont représentés dans le tableau (3.4)

**Tableau 3.3 le paramètre hydraulique**

Paramètre	valeur	unités
Coefficient de rugosité $\eta$	0.0312	
La section mouillée $S_m$	57.50	m <sup>2</sup>
Le périmètre mouillé	26.06	m
Le rayon hydraulique $R_h$	2.20	m
La largeur de la surface de l'eau $B$	24.58	m

### 3.3.2 Vérification en termes de vitesse

La vérification en termes de vitesse est effectuée à partir des relations suivantes et les résultats donnés dans le tableau (3.4)

On détermine la vitesse  $V$ , le débit  $Q$ , et le nombre de Froude comme suit:

- La vitesse  $V = \frac{1}{\eta} \times R_h^{2/3} \times I^{1/3}$
- Le débit d'écoulement  $Q = V \times S_m$
- Nombre de Froude  $F = \frac{V}{\sqrt{\frac{gA}{B}}}$

Les résultats sont donnés dans le tableau (3.4)

Tableau 3.4 les résultats de calculs hydrauliques

Paramètre	Valeur	Unité
La vitesse V	4.85	m/s
Le débit Q	279	m <sup>3</sup> /s
Nombre de Froude F	1.01	

La vitesse critique est obtenue à partir de la figure 3.7 en fonction de l'épaisseur du matelas Reno.

Pour l'épaisseur de 0.25 nous avons la vitesse critique  $V_c=4.67$

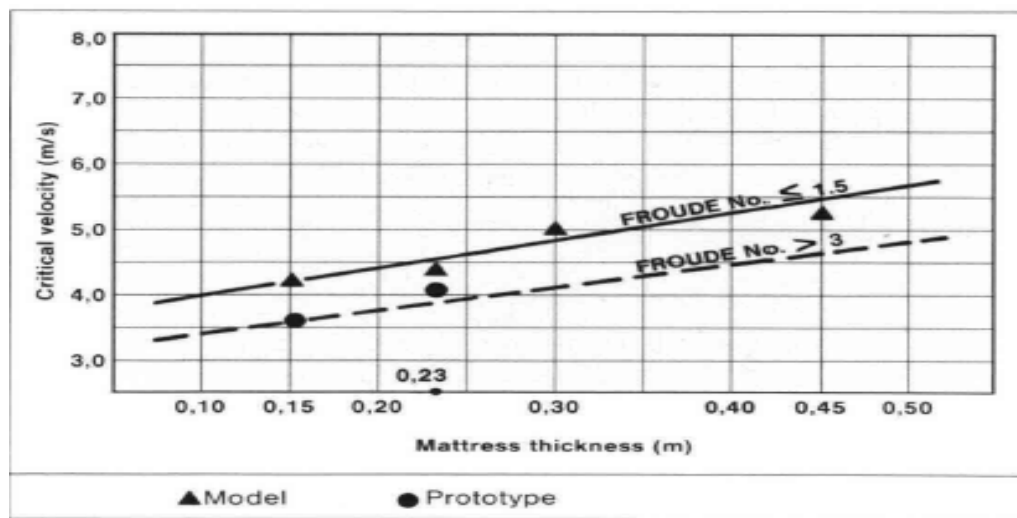


figure 3.7 vitesse critique qui initie le mouvement de roche n fonction de Reno épaisseur du matelas[2].

Les résultats démontrent que  $V > V_c$  donc le teste de vitesse est non vérifiée Pour la vitesse être stable il faut augmente l'épaisseur a 0.35m.

### 3.3.3 Vérification en termes de tension d'entrainement

La vérification en terme de tension d'entrainement est effectué à partir des relations suivante et les résultats représente dans le tableau (3.5)

#### ✚ Stabilité du fond du canal

La tension d'entrainement  $\tau_b$  et la tension critique  $\tau_c$

$$\text{La tension d'entrainement } \tau_b = \gamma_w \times Y \times I$$

$$\text{La tension critique } \tau_c = 0.10(\gamma_s - \gamma_w)dm$$

**Tableau 3.5 les résultats de vérification en termes de tension d'entraînement**

Paramètre	Valeur	unité
La tension d'entraînement $\tau_b$	25	Kg/m <sup>2</sup>
La tension critique $\tau_c$	33.09	Kg/m <sup>2</sup>
La masse volumique de la pierre	2429.36	Kg/m <sup>3</sup>

Les résultats démontrent que  $\tau_b < \tau_c$

#### ✚ Stabilité des berges

$$\tau_m = 0.75 \times \gamma_w \times Y \times I$$

$$\tau_s = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \varphi}} \times \tau_c$$

Donc  $\tau_b < \tau_c$  et  $\tau_m < \tau_s$ , le matelas Reno de 0.25m suffit donc à protéger le fond et les berges. Même si il faut s'attendre à certaine adaptation, les résultats dans le tableau (3.6)

**Tableau 3.6 les résultats de vérification en termes de tension d'entraînement**

Paramètre	Valeur	unité
La masse volumique de l'eau	1000	
La tension d'entraînement des berges $\tau_m$	19	Kg/m <sup>3</sup>
La tension critique des berges $\tau_s$	24.22	Kg/m <sup>3</sup>
Angle de frottement interne de la pierre $\varphi$	41	degrés
Angle de l'inclinaison de la berge	26.5	degrés

### 3.3.4 Effet de déformation

#### ✚ Fond du canal

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

$$C'_* = \frac{\tau_b}{(\gamma_s - \gamma_w) d_m} = \frac{33,09}{(2429,36 - 1000) \times 0,232} = 0,07$$

D'après la figure 3.4, pour le fond du canal  $C'_*=0,07$ , on a  $\Delta z/d_m=1,53$ . Et pour vérifier que le fond est stable on a  $t-d_m \geq \frac{\Delta z}{2}$ ,  $t = 2 \times d_m = 2 \times 0,231 = 0,464$

$$0,464 - 0,231 \geq 0,07 \times 0,231/2$$

Une réduction de  $\Delta z/2=0,17m$  avec un reste de  $0,25-0,16=0,08m$

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:

$$C''_* = \frac{\tau_m}{(y_s - y_w)d_m} = \frac{15}{(2429.36 - 1000) \cdot 0.232} = 0.06$$

D'après la figure 3.4 pour les berges  $C''_* = 0,06$  on a  $\Delta z/d_m = 1.46$

$$t - d_m \geq \frac{\Delta z}{2} ; 0.46 - 0.232 \geq 0.17 \text{ vérifiée.}$$

Donc  $\Delta z = 1.38 \cdot 0.231 = 0.34 \text{ m}$ , ce qui signifie que la partie en amont de la poche subira une réduction de  $\Delta z/2 = 0.17 \text{ m}$  avec un reste de  $0.25 - 0.17 = 0.08 \text{ m}$

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

### 3.3.5 Vérification de vis-à-vis de l'érosion du matériau de base

La vérification à vis-à-vis de l'érosion du matelas Reno est effectuée dans la base de calcul de vitesse à l'interface matelas- filtre et la vitesse d'érosion  $V_e$  les résultats est présente dans le tableau (3.7)

- La vitesse à l'interface matelas-filtre  $V_b = \frac{1}{\eta \zeta} \times \left(\frac{d_m}{2}\right)^{\frac{2}{3}} \times I^{\frac{1}{2}}$
- la vitesse d'érosion pour un sol sablonneux  $V_e = 16.1 d_{50}^{1/2}$

**Tableau 3.7 les résultats de vérification vis-à-vis l'érosion**

Paramètre	Valeur	Unité
Vitesse à l'interface du matelas Reno fond $V_b$	1.06	m/s
Vitesse d'érosion $V_e$	0.36	m/s
Filtre en géotextile entre le matelas et le sol $\eta \zeta$	0.02	
$d_{50}$	0.005	m

La vitesse  $V_b$  est supérieure à la vitesse d'érosion  $V_e$ .

### 3.4 Résultats et discussions

Nous remarquons pour le débit de crue caractéristique, la différente vérification en terme (d'entraînement pour le fond du canal, berges, effet de déformation) est vérifiée. En terme de vitesse et la vitesse entre le matelas Reno et le sol est non vérifiée. Nous jugions de augmenter l'épaisseur du matelas pour réduire la vitesse d'écoulement et utile d'adopter un filtre en gravier pouvant réduire la vitesse à l'interface matelas-

filtre de 2 à 4 fois. Le tableau 3.8 montre la vérification de la stabilité du matelas Reno. Et le calcul déterministe des paramètres du matelas Reno est conforme à l'organigramme cite en annexe 2.

**Tableau 3.8 vérification de la stabilité du matelas Reno pour un débit centennale**

<b>Test de vitesse</b>	Vitesse d'écoulement de l'eau	4.85
	Vitesse critique $V_c$	4.67
	vérification	<b>Non vérifié</b>
<b>Stabilité du fond</b>	Tension d'entraînement $\tau_b$	25
	Tension critique $\tau_c$	33.09
	Vérification la stabilité du fond du canal	<b>vérifié</b>
<b>Stabilité des berges</b>	Tension d'entraînement $\tau_m$	19
	Tension critique $\tau_s$	24.22
	Vérification de stabilité des berges	<b>vérifié</b>
<b>Effet de déformation</b>	Coefficient de shields pour le fond du canal $c'_*$	0.07
	$\Delta z/dm$	1.53
	Vérification de déformation du fond du canal	<b>vérifié</b>
	Coefficient de shields pour les berges $c'_*$	0.06
	$\Delta z/dm$	1.45
	Vérification de déformation pou les berges	<b>vérifié</b>
<b>Stabilité entre le matelas Reno et le sol</b>	Vitesse à l'interface filtre-matelas Reno $V_b$	1.06
	Vitesse d'érosion	0.36
	vérification	<b>Non vérifié</b>

## Conclusion

La réalisation du revêtement d'un canal à ciel ouvert, les ingénieurs calculent la stabilité du matelas Reno pour différents vérification, en termes de vitesse, tension d'entraînement, effet de déformation, et la stabilité entre le matelas et le sol. en s'appuyant sur un débit de crue de projet qui est une valeur caractéristique correspondant à une probabilité d'occurrence supérieure à 95%.

Dans le chapitre qui va suivre, nous avons à analyser le canal avec une méthode fiabiliste en considérant comme variable aléatoires les incertitudes qui sont le débit et le diamètre moyenne des pierres.

## Introduction

Après avoir effectué le calcul déterministe du canal trapézoïdales en matelas Reno, nous nous intéressons dans ce chapitre à l'analyse fiabilité, en utilisant l'approche probabiliste basée sur la simulation de Monte-Carlo classique. La variable aléatoire utilisée dans cette analyse est le débit de crue et le diamètre moyen des pierres obéissant à une loi de distribution de type normale.

### 4.1 Contexte fiabilité

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 leur de vie et de rationaliser leurs exploitations. D'après la littérature, plusieurs méthodes probabilistes ont été utilisées dans le calcul fiabiliste. La fiabilité basée sur l'optimisation de la conception et l'optimisation de conception robuste. Hangzhou Li et Bak Kong Low ont présenté une méthode fiabiliste du premier ordre. Cette méthode est utilisée pour le calcul de l'indice de fiabilité d'un tube circulaire soumise à un champ de contraintes hydrostatiques. Tant dis que Frangopol et Recek 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 Calo, avec laquelle nous effectuerons notre calcul probabiliste.

### 4.2 Notion de probabilité

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 au paramètre d'entrée sont introduites sous forme de loi de probabilité à chaque variable. Ces lois probabilité sont établies à partir d'étude statistiques sur les paramètres concernés. La théorie des probabilités est dite discrète ou continue. Dans le cas discret, c'est-à dire pour un nombre au plus dénombrable d'état 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 permet de calculer la probabilité de dépassement du critère d'état limite, appelée probabilité de défaillance  $P_f$ , que l'on compare à une probabilité de défaillance acceptable  $P_f$  limite. 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  $P_f$  (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 statistique 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[6].

#### 4.2.1 Variable aléatoire et caractéristique

##### a. variable aléatoire

Défini comme aléatoire pour tenir compte des incertitudes (tel 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. Moyenne

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

##### c. variance

En théorie des probabilités, la variance est une 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 de la distance de X à sa moyenne  $\mu$ [3]

$$Var(X) = E(X - \mu)^2 \quad (4.1)$$

**d. Ecart types**

L'écart type 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 [3]

$$\sigma(X) = \sqrt{V_{ar}(X)} \quad (4.2)$$

**e. coefficient de variation**

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

$$Cv = \frac{\sigma(X)}{X} \quad (4.3)$$

**4.2.2 Loi de probabilités**

- **Loi normale (Laplace-gauss)[6].**

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, test 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  $\mu$  et d'écart type  $\sigma$  s'écrit :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4.4)$$

La fonction de répartition s'écrit :

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (4.5)$$

**4.2.3 Contexte probabiliste [8]**

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 la défaillance  $G(x)$  par la fonction performance donnée par l'équation:

$$G(x) = R(x) - S(x) \quad (4.6)$$

$G(x)$ : fonction qui définit la marge de sûreté de la structure;

$X$ : variable aléatoire de base;

R: la résistance;

S: La sollicitation;

$G(x) > 0$  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.

$$P_f = \Pr (G(x) < 0) \quad (4.7)$$

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 paramètre d'entrée qui est le débit et le diamètre moyenne des pierres.

Les valeurs des variables de base le vecteur  $(x)$  sont échantillonnées  $N_f$  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  $P_f$  est alors évaluée par:

$$P_f = \int f\{x\}(x_1 \dots \dots \dots, x_n) d_{x_1} \dots d_{x_n} \quad (4.8)$$

Où :  $\int f\{x\}(x_1 \dots \dots \dots, x_n)$  est la densité de probabilité conjointe du vecteur aléatoire. Pour la résolution de cette équation nous faisons appel à des méthodes de simulation dont Monte-Carlo classique

#### 4.2.4 Définition de la simulation de Monte-Carlo[3]

Le nom "Monte-Carlo" a été popularisé en 1944, par les chercheurs en physique. En effet l'utilisation de l'aléatoire et le caractère répétitif du processus sont analogues à ceux menés dans un casino. Le véritable développement des méthodes de Monte-Carlo s'est produit lors de la seconde guerre mondiale, lors des recherches sur la fabrication de la bombe atomique ainsi ces méthodes probabilistes ont été utilisées pour résoudre des équations aux dérivées partielles. 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 méthode de simulation de monte calo est une technique numérique pour sélectionner des problèmes mathématique en simulant des variables aléatoires[7]. Mais la description la plus habituelle consiste à dire que les la méthode de ce type caractérisent par l'utilisation du hasard pour résoudre des problèmes centrés sue un calcul, elles seront en général applicables a des problèmes de types numérique, ou bien a des problèmes de natures elle même probabiliste.

Cette méthode consiste à déterminer un estimateur  $P_f$  par succession de tirages aléatoire indépendants. On réalise ainsi un nombre  $N_t$  important de tirage des variables aléatoires en accord avec leur loi de la distribution conjointe (loi normale, loi log normale, poisson... etc.).

La figure 4.1 illustre le principe de la méthode de Monte calo.

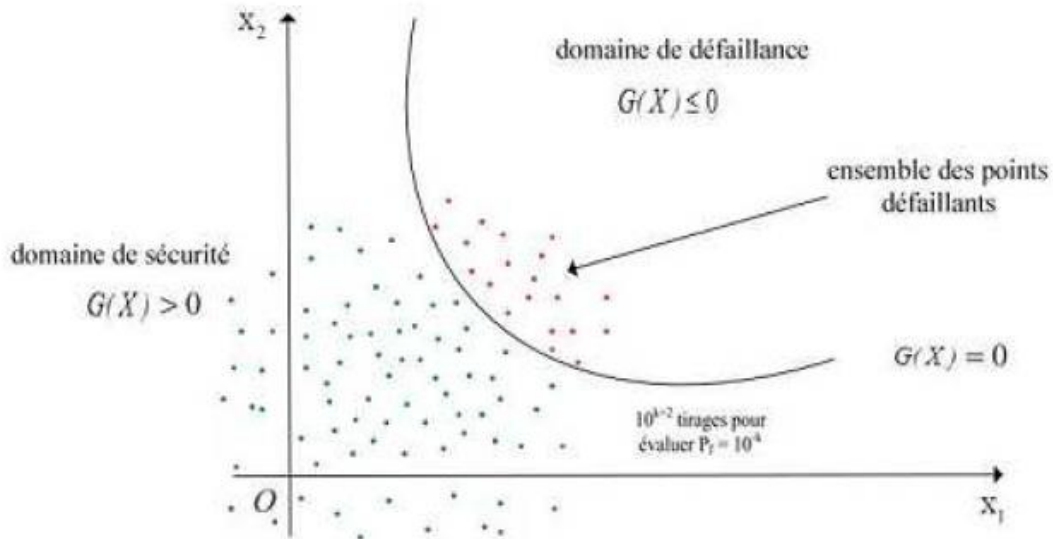


figure 4.1 Illustration de la simulation de Monte-Carlo.

Les valeurs des variables de base (le vecteur  $\{X\}$ ) sont échantillonnées aléatoirement en fonction des distribution de probabilité de  $\{A\}$ . Le nombre de tirage  $N$  sortant dans le domaine de défaillance  $D_f$ , c'est-a-dire le nombre de tirage satisfaisant la condition de  $G(X) \leq 0$  est identifié. La fonction  $I_d$  est une fonction d'indicateur identifiant le domaine de défaillance avec:

$$I_d = 1 \text{ si } G(x) \leq 0$$

$$I_d = 0 \text{ si } G(x) > 0$$

Pour  $N_t$  simulation des vecteurs aléatoires  $X$ , la probabilité de défaillance  $P_f$  est approchée par la moyenne des  $P_i = I_{G(x) \leq 0}$ . On en déduit alors la probabilité de défaillance par un traitement statistique direct:

$$P_f = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} I_d}{N_t} \tag{4.9}$$

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

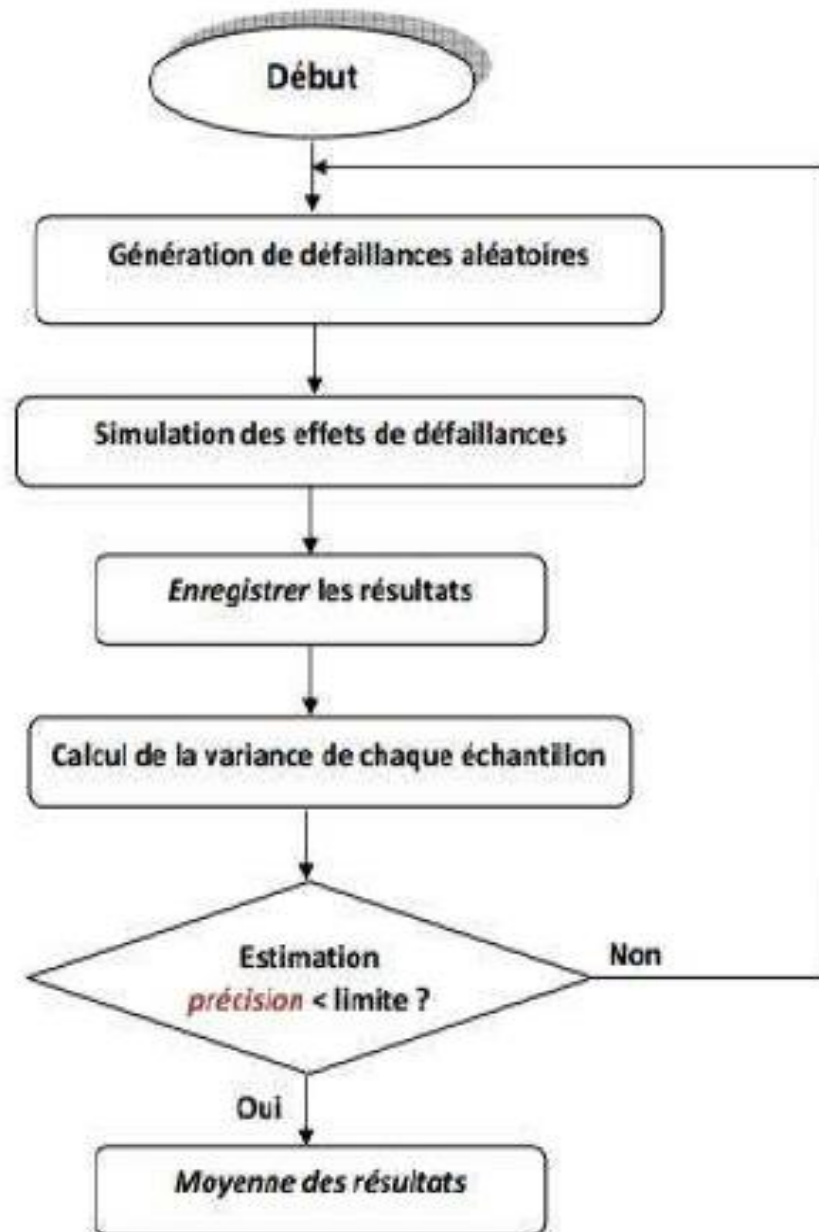


figure 4.2 organigramme général du principe de Monte Carlo [3].

### 4.3 Analyse fiabiliste d'un canal en matelas Reno

Après avoir effectué une analyse déterministe de la stabilité d'un canal revêtu en matelas Reno présentée dans le chapitre 3, nous proposons dans ce qui suit une analyse fiabiliste.

#### 4.3.1 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. Pour le cas de la stabilité d'un matelas Reno, les fonctions d'état limites données par les relations suivantes.

##### ✚ Fonction d'état limite de dépassement de la vitesse critique

$$G_1 = V - V_C \quad (4.10)$$

$V$ : vitesse d'écoulement

$V_C$ : vitesse critique

Pour un état stable:  $V - V_C > 0$

Pour un état de défaillance;  $V - V_C < 0$

##### ✚ Fonction d'état limite de dépassement de la stabilité d'entraînement

- Fond du canal

$$G_2 = \tau_b - \tau_c \quad (4.11)$$

$\tau_b$ : tension d'entraînement du fond du canal

$\tau_c$ : tension critique du fond du canal

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

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

- Berges

$$G_3 = \tau_m - \tau_s \quad (4.12)$$

$\tau_m$ : tension d'entraînement des berges

$\tau_s$ : tension critique des berges

Pour un état stable :  $\tau_m - \tau_s < 0$

Pour un état de défaillance  $\tau_m - \tau_s > 0$

#### ✚ Fonction d'état limite de dépassement de l'effet de déformation

- Fond du canal

$$G_4 = (t - \Delta t) - dm \quad (4.13)$$

$t$ : épaisseur du matelas Reno

$\Delta t$ : Distance verticale entre le point le plus haut et le point le plus bas de la surface du fond du canal recouverte par la pierraille

$dm$  : diamètre moyenne des pierres

Pour un état stable :  $(t - \Delta t) - dm < 0$

Pour un état de défaillance  $(t - \Delta t) - dm > 0$

- Berges

$$G_5 = (t - \Delta t') - dm \quad (4.14)$$

$\Delta t'$ : distance verticale entre le point le plus haut et le plus bas de la surface des berges recouverte par la pierraille.

Pour un état stable :  $(t - \Delta t') - dm < 0$

Pour un état de défaillance :  $(t - \Delta t') - dm > 0$

### 4.3.2 Génération de variable aléatoire

Nous utilisons pour la génération de la variable aléatoire, la loi normale. Les paramètres caractéristiques (moyenne, écart type) du débit de crue de la période de retour 100 ans pour différents coefficients de variation CV sont présentés dans le tableau 4.1.

**Tableau 4.1 Résultats de calculs du débit de crues pour la période de retour  $Q_{100}$  pour différents coefficient de variation Cv.**

Variation Cv	Débit moyenne Q	Ecart type
5%	249.88	12.494
10%	226.277	22.62
15%	206.743	31.011
20%	190.313	38.062
25%	176.303	44.075

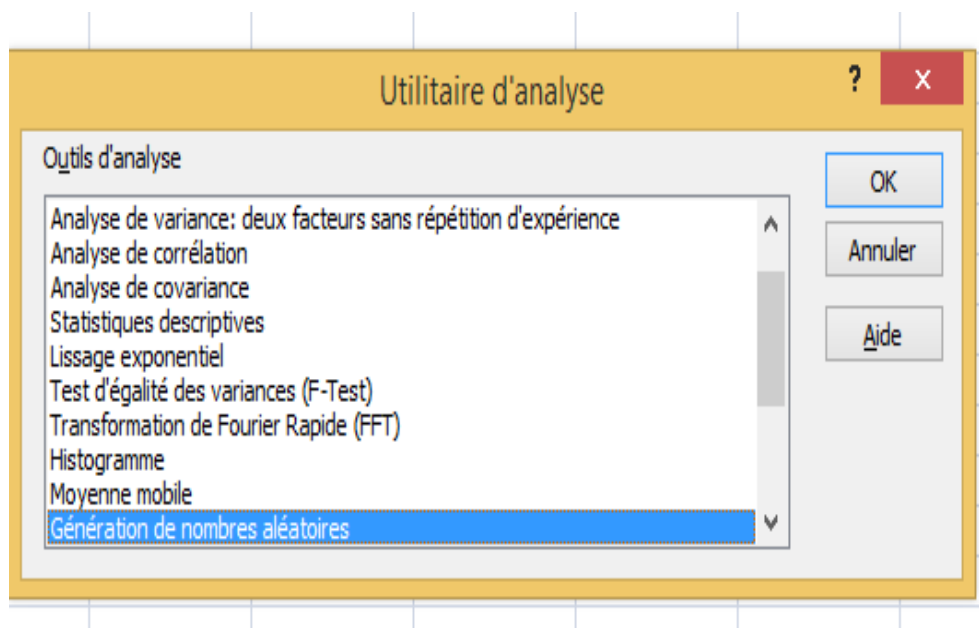
Les caractéristiques statistiques du diamètre moyen des pierres sont données comme suit :

$$D_m = 0.231 \text{ mm} \quad \text{écart type} = 0.0231 \text{ pour } C_v = 10\%$$

- **Etapas de génération de la variable aléatoire sous Excel**

**Etape 1:** commande sur Excel → données → utilitaire d'analyse

Une boîte de dialogue (figure 4.4) apparaît: sélectionné génération de nombres aléatoires.



**Figure 4.3 : Première étape pour générer une loi normale de débit sur Excel.**

**Étape 2:** introduire le paramètre l'écart type et la moyenne de débit de crue suivant les équations de tableau, le nombre aléatoire et le nombre de tirage.

Figure 4.4 deuxième étape pour génère une loi normale de débit sur Excel.

**Étape 3:** les résultats obtenus pour génération d'une loi normale sont représentés dans le tableau (4.2).

Tableau 4.2 extrait du résultat de génération d'une loi normale de débit sur l'Excel.

219,485749
197,375807
231,8021
255,150831
253,383682
265,480471
176,884248
220,97982
251,04641
201,695831
210,664582
188,039421
184,499876
204,163021
208,78027
178,369396
213,430539
217,137444

### 4.3.3 Fonction de densité

La variable aléatoire diamètre moyen  $d_m$  est générée par une loi normale. Les figures (4.6) et (4.7) montre respectivement l'évolution de la fonction de densité et la fonction de répartition pour la moyenne 0.231 et l'écart type 0.0231 qui correspond au diamètre des pierres.

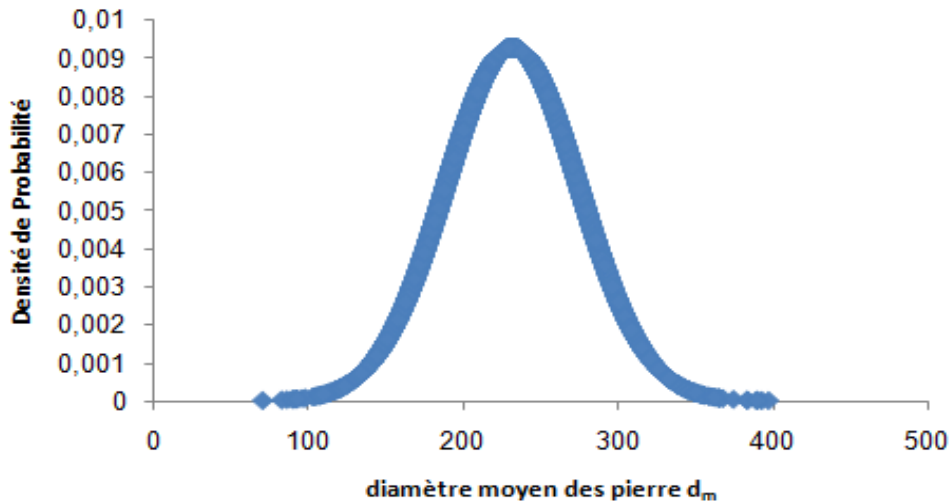


figure 4.5 : Courbe de la densité de probabilité de la loi normale pour le diamètre des pierres.

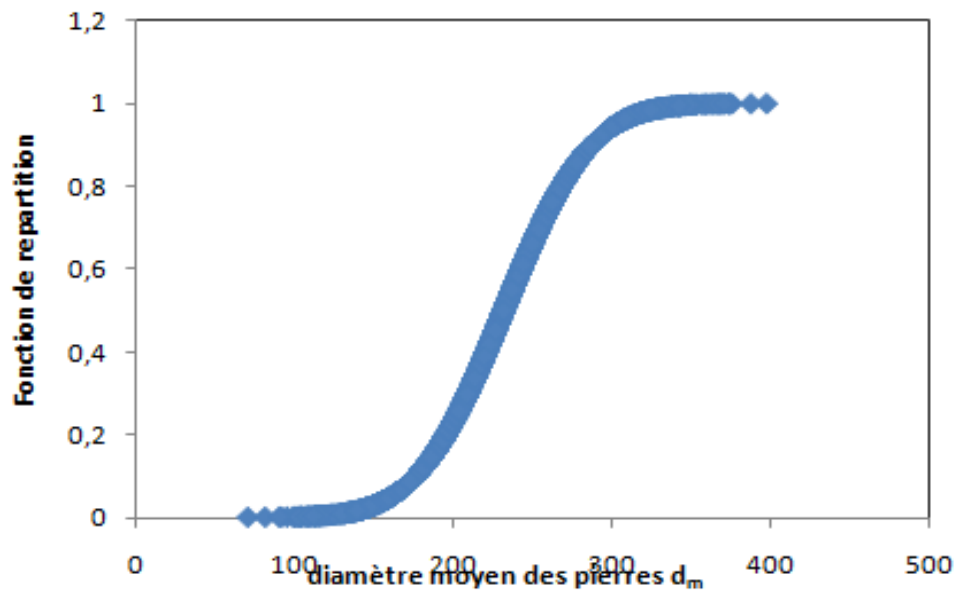
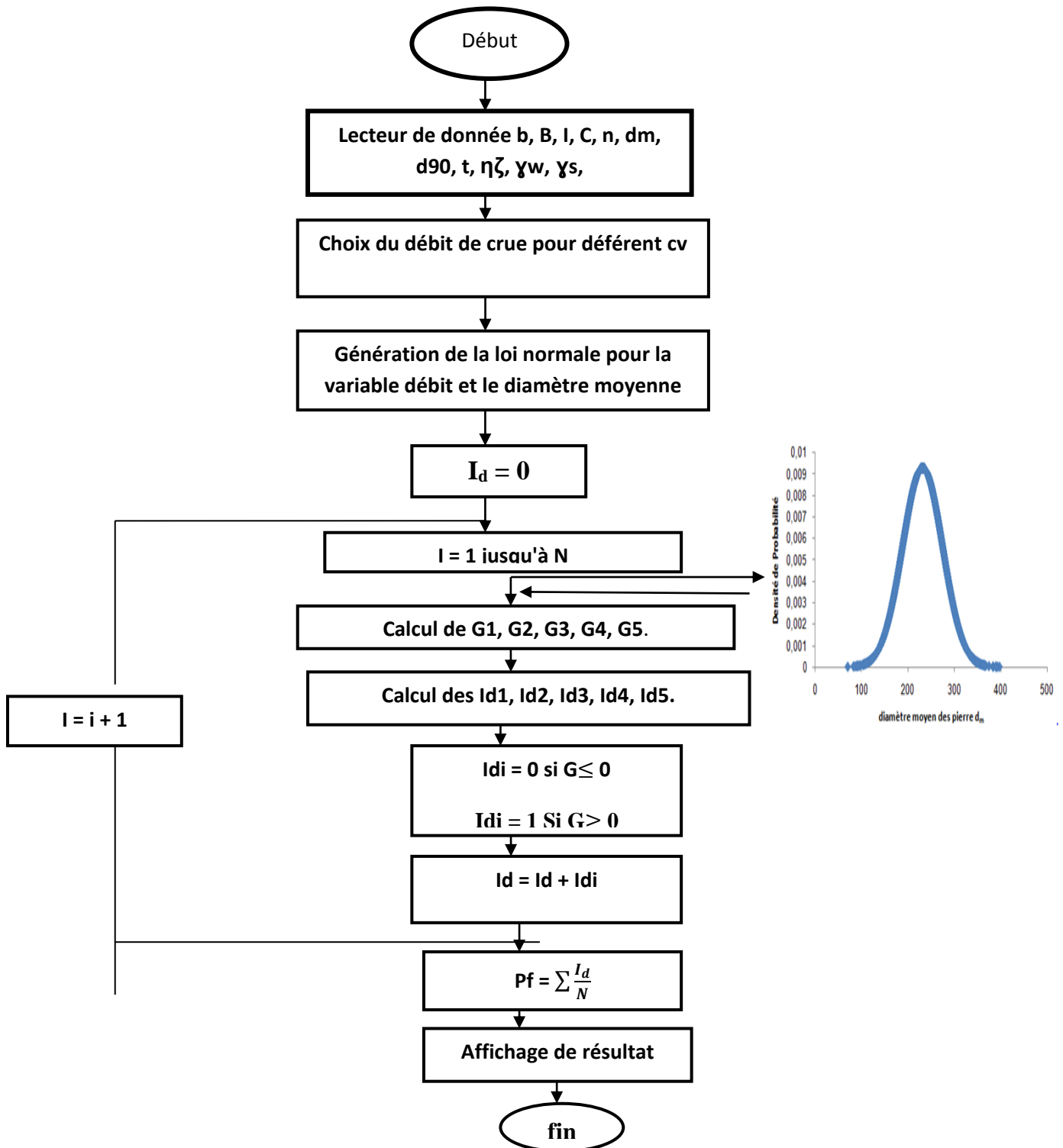


figure 4.6 : Courbe de répartition de la loi normale.

### 4.4 Organigramme de calcul

La méthode d'évaluation de la fiabilité du matelas Reno requière la mise en œuvre de multiples calculs et l'échange de plusieurs données. A cet effet, nous avons développé un programme de calcul sous Excel, qui nous permet d'évaluer sa probabilité de défaillance sous différents débits. La figure (4.7) illustre de manière simplifiée le fonctionnement global du programme de calcul développé.



#### 4.5 Évaluation de la probabilité de défaillance

La probabilité de défaillance  $P_f$  est évaluée par la méthode de Monte Carlo par la relation (4.8) et conformément à l'organigramme élaboré. Le nombre de tirage est fixé à 30000.

#### 4.6 Interprétation des résultats

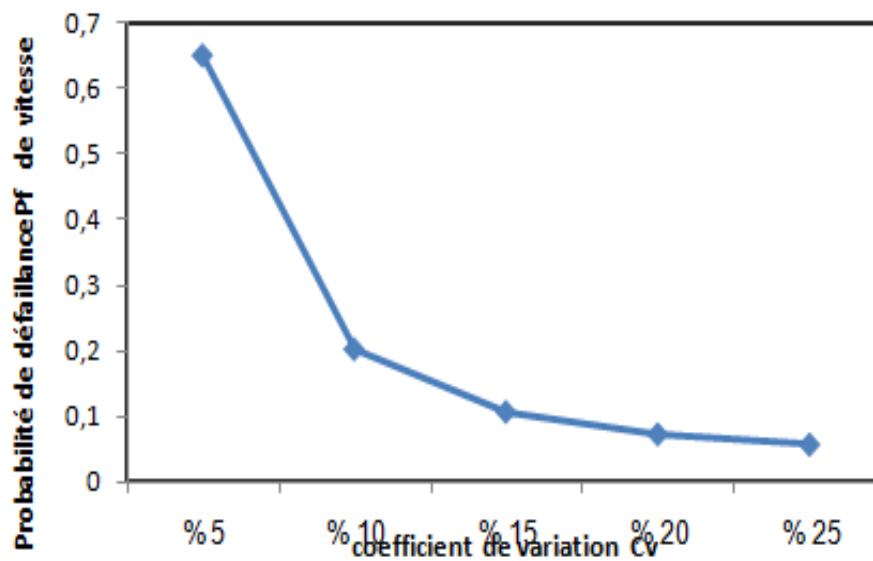
Le résultat de calcul des fonctions d'état limite  $G(x)$ , ainsi que le test sur l'indicateur  $I_d$  est présenté en annexe 3. Nous présentons ci-dessous, l'évaluation de la probabilité de défaillance  $P_f$  obtenus pour les différents coefficients de variation et pour toute la différente vérification de stabilité du matelas Reno.

- **Défaillance vis-à-vis du test de vitesse**

Le tableau (4.3), et la figures (4.09) illustrent les résultats de la probabilité de défaillance en fonction du coefficient de variation  $C_v$  vis-à-vis du test de vitesse. Nous remarquons que la probabilité de défaillance  $P_f$  diminue avec l'augmentation du coefficient de variation. Toutefois, les probabilités de défaillance sont toutes supérieures à la probabilité de défaillance admissible pour les structure de génie civil ( $p_{f_{adm}} = 10^{-3}$ ). Nous concluons que le matelas Reno n'est pas stable en terme de vitesse. Cette condition a été corrigée en augmentant l'épaisseur du matelas Reno.

**Tableau (4.3) probabilité de défaillance du test de vitesse pour différents coefficient de variation.**

Coefficient de variation $C_v$	Probabilité de défaillance $P_f$ pour la vitesse
5%	0.6502
10%	0.2031
15%	0.1077
20%	0.0736
25%	0.0578



**Figure (4.8) courbe de défaillance vis-à-vis test de vitesse en fonction de coefficient de variation.**

#### ✚ Défaillance vis-à-vis des tensions d'entrainements (fond du canal, berge).

Le tableau (4.4), et les figures (4.10), (4.11) illustrent les résultats de la probabilité de défaillance en fonction du coefficient de variation  $C_v$  vis-à-vis des tensions d'entrainement. On note que la probabilité de défaillance est sensible au coefficient de variation  $C_v$  plus ce dernier augmente plus l'incertitude sur le débit  $Q$  et le diamètre moyen des pierres  $d_m$  est importante. Par ailleurs, nous remarquons que le matelas Reno est stable en termes de tension d'entrainement (fond du canal) pour le coefficient de variation  $C_v$  inférieur à 10%. Pour  $C_v$  supérieur à 10% les probabilités de défaillance dépassent la valeur admissible ( $pf_{adm} = 10^{-3}$ ) ; ce qui provoque l'entrainement du matelas Reno. Pour les berges l'entrainement du matelas est constatée à partir de  $C_v$  à 5%. Cet effet d'entrainement qui survient en premier peut être dû à l'inclinaison des berges. A cet effet, nous préconisons la réduction de l'épaisseur du matelas no déformé sur les berges.

Tableau 4.4 Probabilité de défaillance vis-à-vis de la tension d'entrainement du fond du canal et les berges pour différents variations.

Coefficient de variation Cv	Pf de la stabilité du fond du canal	Pf pour la stabilité des berges
5%	0.0000	0.0001
10%	0.0003	0.0021
15%	0.0022	0.0171
20%	0.0054	0.0411
25%	0.0087	0.0685

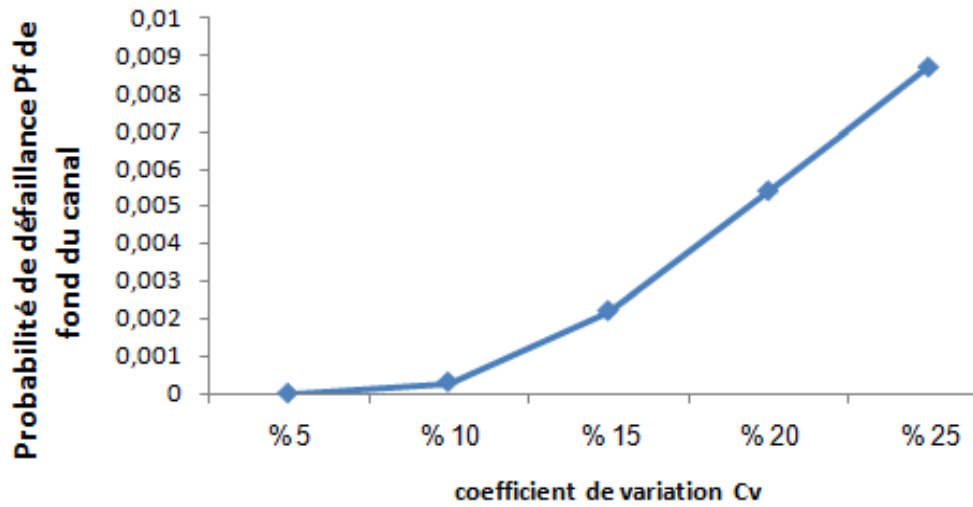


figure 4.9 courbe de probabilité de défaillance pour la tension d'entrainement pour le fond du canal en fonction de coefficient de variation.

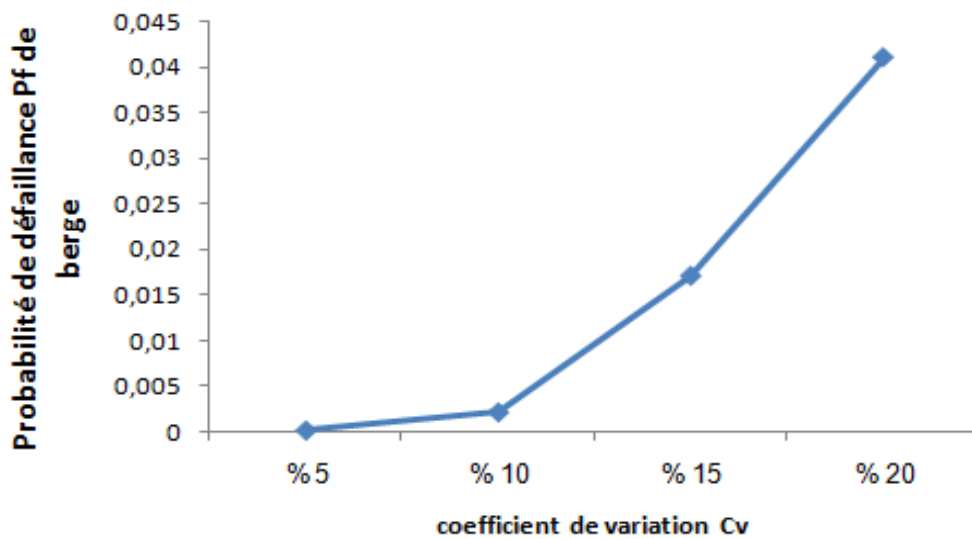


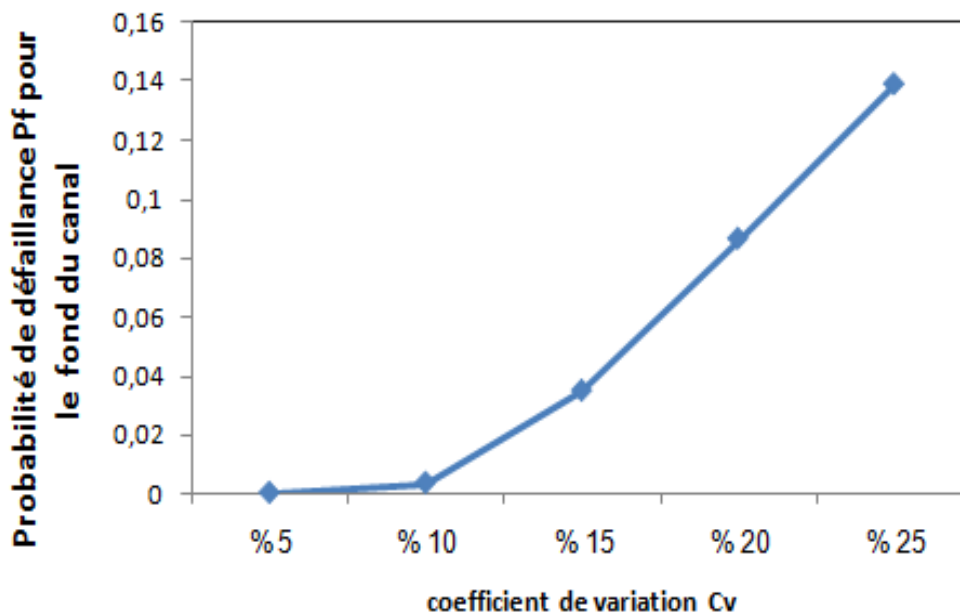
figure 4.10 courbe de probabilité de défaillance de la tension d'entrainement pour les berges en fonction des coefficients de variation.

#### ✚ Défaillance vis-à-vis de l'effet de déformation (fond du canal, berge)

Le tableau (4.5), et les figures (4.12), (4.13) illustrent les résultats de la probabilité de défaillance en fonction du coefficient de variation  $C_v$  vis-à-vis de l'effet de déformation. Nous remarquons que le matelas Reno au fond du canal est stable en termes l'effet de déformation pour le coefficient de variation  $C_v$  inférieur à 5%. Pour  $C_v$  supérieur à 5%, les probabilités de défaillance dépassent la valeur admissible ( $p_{f_{adm}} = 10^{-3}$ ) ; ce qui entraîne la déformation du fond. Pour les berges la déformation du matelas est constatée à partir de  $C_v$  à 10%.

**Tableau 4.5 Probabilité de défaillance vis-à-vis l'effet de déformation (fond du canal et berges) en fonction des coefficients de variation.**

Coefficient de variation $C_v$	Pf de l'effet de déformation pour le fond	Pf de l'effet de déformation pour les berges
5%	0.0001	0.0001
10%	0.0035	0.0003
15%	0.0349	0.0101
20%	0.0866	0.0407
25%	0.1392	0.0804



**figure 4.11 courbe de probabilité de défaillance  $P_f$  de l'effet de déformation pour le fond du canal en fonction des coefficients de variation.**

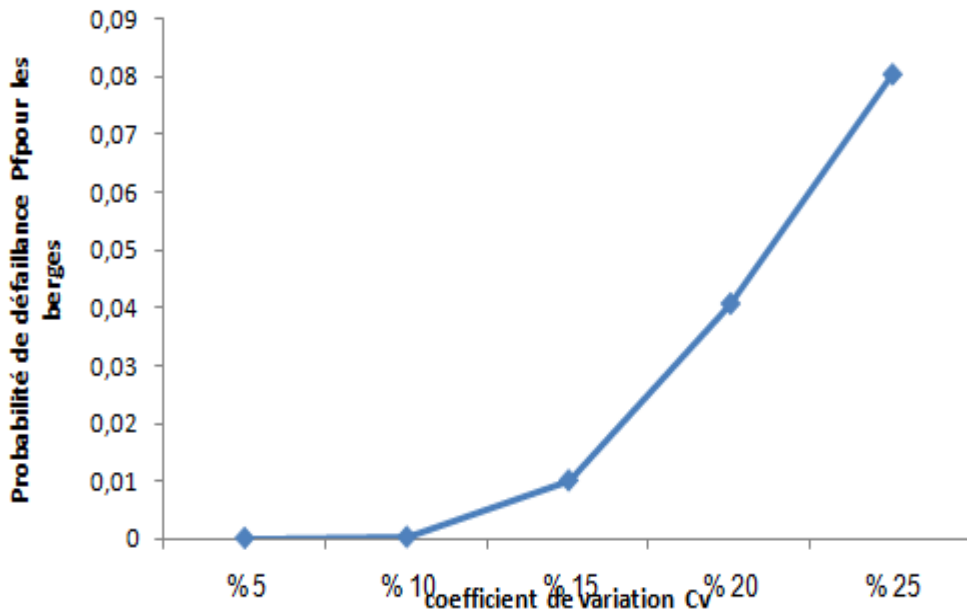


figure 4.12 courbe de probabilité de défaillance Pf de l'effet de déformation pour les berges en fonction des coefficients des variation.

## Conclusion

Le calcul fiabiliste du canal en matelas Reno est conduit dans ce chapitre en considérant deux variables aléatoires; le débit de crue de fréquence centennale et le diamètre moyen des pierres. Les fonctions d'état limites sont dictées par la cause physique de la défaillance, à savoir l'état limites de vitesse, la tension d'entraînement et l'effet de déformation du matelas Reno au fond du canal et au niveau des berges. La probabilité de défaillance est calculée par la méthode classique de Monté Carlo, pour différents coefficients de variation.

Les résultats de calcul fiabiliste a mis en évidence la déformation du matelas Reno avant l'effet d'entraînement au niveau du fond du canal et l'entraînement du matelas avant la déformation au niveau des berges due à l'inclinaison de ces dernières. Comme recommandation, il y'a lieu, d'augmenter l'épaisseur du matelas Reno au niveau du fond pour vérifier les vitesses et réduire l'épaisseur du matelas non déformé au niveau des berges pour empêcher l'effet d'entraînement.

Nous avons illustré à travers cette courte synthèse les différentes caractéristiques, fonctionnalités et mise en œuvre d'un revêtement en matelas Reno, ainsi que ses différentes catégories, et des comparaisons avec différents revêtements de canaux à ciel ouvert (revêtement en béton, et en enrochement), pour distinguer les ressemblances et les différences. Par la suite, et pour mener l'étude déterministe de stabilité du revêtement en Matelas Reno vis-à-vis de l'état limite de déformation et d'entraînement, nous avons procédé à la caractérisation des moellons, à partir d'une analyse granulométrique et d'une analyse statistique.

Ces deux analyses nous ont permis de ressortir les données d'entrée nécessaires aux analyses déterministe et fiabilistes telles que:

- le diamètre moyen des pierres  $d_m$  et le diamètre  $d_{50}$  qui permet le passage de 50%.
- le diamètre  $d_{90}$  qui permet le passage de 90% de la pierre qui constitue le revêtement.
- la loi de distribution du diamètre moyen à partir du test d'adéquation  $X^2$  et le test de Kolmogorov.

Les différentes vérifications effectuées par le calcul déterministe de stabilité du revêtement ont été concluantes compte tenu des coefficients de sécurité préconisés par les codes de conception.

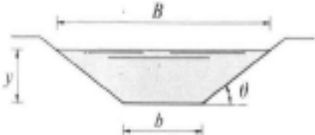
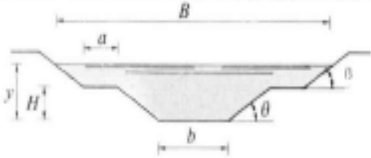
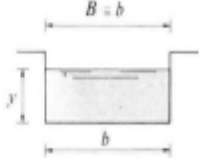

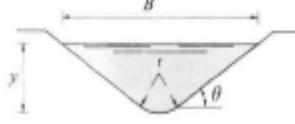
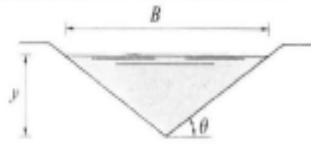
Le calcul fiabiliste du canal en matelas Reno est conduit en considérant deux variables aléatoire ; le débit de crue de fréquence centennale et le diamètre moyen des pierres. Les fonctions d'état limites sont dictées par la cause physique de la défaillance, à savoir l'état limites de vitesse, la tension d'entraînement et l'effet de déformation du matelas Reno au fond du canal et au niveau des berges. La probabilité de défaillance est calculée par la méthode classique de Monté Carlo, pour différents coefficients de variation.

Les résultats de calcul fiabiliste a mis en évidence la déformation du matelas Reno avant l'effet d'entraînement au niveau du fond du canal et l'entraînement du matelas avant la déformation au niveau des berges due à l'inclinaison de ces dernières. Comme recommandation, il y'a lieu, d'augmenter l'épaisseur du matelas Reno au niveau du fond pour vérifier les vitesses et réduire l'épaisseur du matelas non déformé au niveau des berges pour empêcher l'effet d'entraînement.

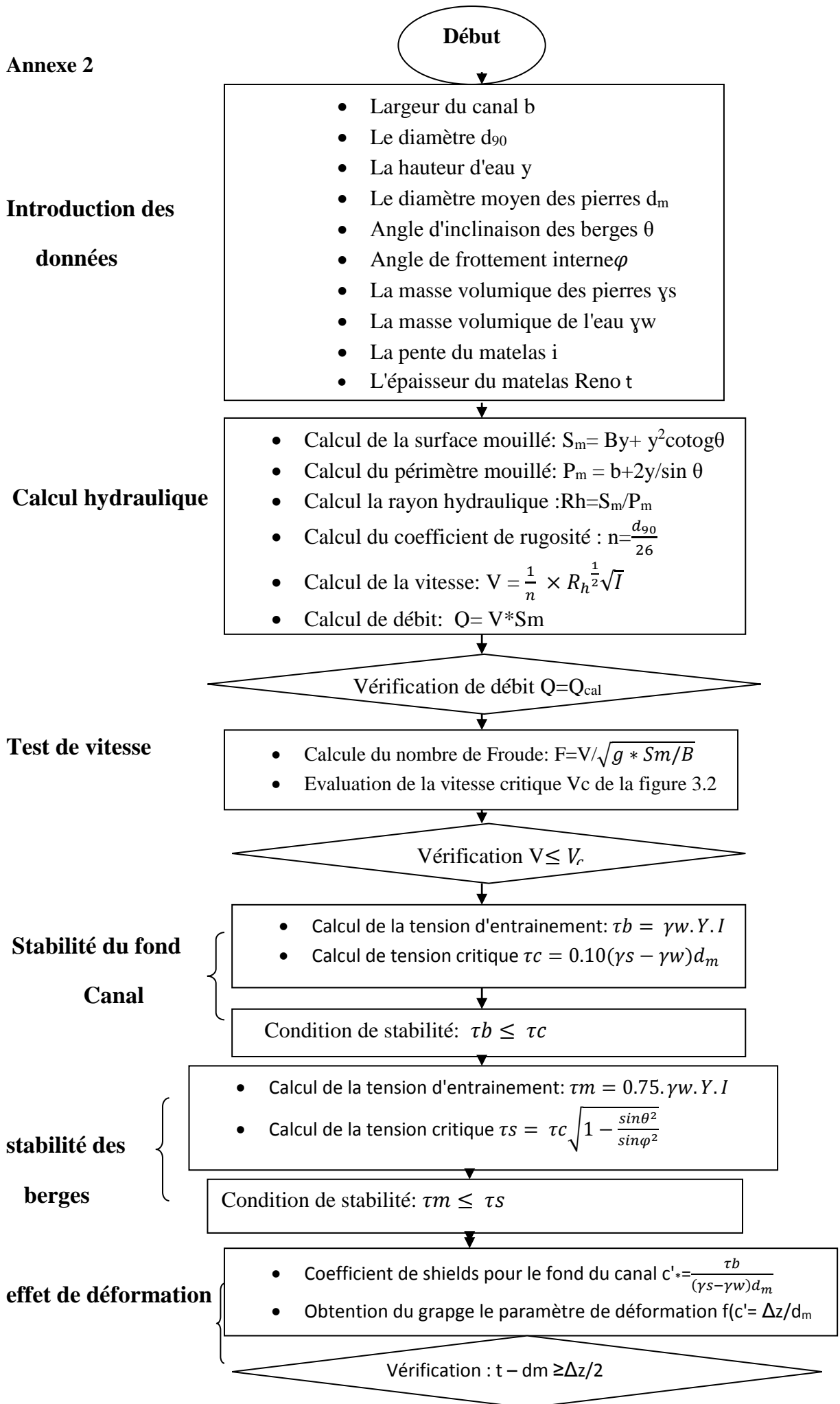
- [1] Hydraulics Laboratory Engineering Research Center Colorado State University-Fort Collins –USA
- [2] **R.AGOSTINI, A. CONTE, G.MALAGUTI, A.PAPETTI**, "Flexible Linings in Reno mattress and Gabions for and canalized water courses", **1985**
- [3] **IMERZOUKENE L, OUHAROUN M**,Analyse fiabiliste de la stabilité d'un canal revêtu en matelas Reno, MASTER ? UMMTO, W. TIZI OUZOU, 2015.
- [4] **MESSAOUD M, SLIMANI K**, Etude d'un canal trapézoïdal en matelas Reno (recalibrage oued Allaghane),2021.
- [5] **G. DEGOUTE**," aide-mémoire d'hydraulique à surface libre"
- [6] **O. TEBBI**. "Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélères". Université d'Angers, **2005**.
- [7] **M. LEMAIRE**, "Approche probabiliste du dimensionnement – Modélisation de l'incertain et méthode d'approximation". Technique de l'ingénieur, France, **2009**.
- [8] **M. LEMAIRE, A. CHATEAU NEUF, & J.C.MITTEAU**, "fiabilité des structures" (Lavoisier ed.). France.2005.

## Annexe 1

### Éléments géométriques hydrauliques de quelques sections de canaux

Section	Area (A)	Wetted perimeter (C)	Hydraulic radius (R)
 Trapezoidal	$y(b + y \cot \theta)$	$b + \frac{2y}{\sin \theta}$	$\frac{y(b + y \cot \theta)}{b + \frac{2y}{\sin \theta}}$
 Compound trapezoidal	$(b + 2a) \cdot y + y^2 \cot \theta - 2aH$	$b + 2a + \frac{2y}{\sin \theta}$	$\frac{(b + 2a) \cdot y + y^2 \cot \theta - 2aH}{b + 2a + \frac{2y}{\sin \theta}}$
 Rectangular	$b y$	$b + 2y$	$\frac{b y}{b + 2y}$
 Parabolic	$\frac{2}{3} B y$	$B + \frac{8}{3} \frac{y^2}{B}$	$\frac{2 B^2 y}{3 B^2 + 8 y^2}$
 Triangular with rounded invert	$\frac{B^2 \tan \theta}{4} - r^2 \tan \theta + r^2 \theta$	$\frac{B}{\cos \theta} - 2r \tan \theta + 2\theta$	$\frac{\frac{B^2 \tan \theta}{4} - r^2 \tan \theta + r^2 \theta}{\frac{B}{\cos \theta} - 2r \tan \theta + 2\theta}$
 Triangular	$y^2 \cdot \cot \theta$	$\frac{2y}{\sin \theta}$	$\frac{y}{2} \cos \theta$

Annexe 2



effet de  
de déformation

- Coefficient de shields pour les berges  $c'' = \frac{\tau m}{(\gamma_w - \gamma_s) d_m}$
- Obtention dans le graphe le paramètre de déformation  $f(c'') = \Delta z / d_m$

Vérification:  $t - d_m \geq \Delta z' / 2$

stabilité entre  
le matelas-Renoet  
le sol

- vitesse a l'interface filtre matelas Reno:  $V_b = \frac{1}{\eta \zeta} \left( \frac{d_m}{2} \right)^{2/3} \times I^{1/2}$
- Vitesse d'érosion:  $V_e = 16.1 \times d_{50}^{1/2}$

Vérification :  $V_b \leq V_e$