

N° d'ordre :...../....



UNIVERSITE MOHAMMED PREMIER
ECOLE NATIONALE DES SCIENCES APPLIQUEES
D'AL HOCEIMA



Département: Génie Civil & Environnement
Option : Hydraulique

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état
en Génie Civil

Etudes de conception des aménagements de l'Oued
Chouf Cherg pour la protection contre les
inondations de la ville de Missour

Réalisé Par :
Mohammed Ali AJRAOUI

Effectué au
Ministère Déléguée Chargé de l'Eau- DAH - Rabat

Encadré à l'ENSAH par :
Prof. Hossain El Ouarghi

Encadré à DAH par :
M. Hamza Elachab

Soutenu le 15/07/2016 devant le jury composé de :

Pr. Hossain El Ouarghi
Pr. Abderrahim Azouani
Pr. Said Bengamra

Président (ENSAH)
Professeur (ENSAH)
Professeur (ENSAH)

Année Académique: 2015-2016

Dédicaces

A la plus belle perle du monde... ma tendre mère **Oum Kaltoum**,

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A celui qui a toujours garni mes chemins avec force et lumière... mon très cher père **Chakib**,

L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect.

Que Dieu te Préserve et te procure santé et longue vie.

A ma petite sœur **Nihad** qui me comble toujours de son amour et encouragement,

Je te souhaite tout le succès... tout le bonheur

A la mémoire de mes Grands-pères **Lhaj Mohammed** et **Lhaj Larbi**,

J'aurais tant aimé que vous soyez présents. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Je vous dédie aujourd'hui ma réussite. Que Dieu, le miséricordieux, vous accueille dans son éternel paradis.

A mes grand-mères **Mima Aziza TERRAB**, **Aziza BOUSSEKRI** ainsi que ma très chère tante **Lhaja Aicha**,

A tous **mes Oncles** et **mes Tantes**,

A l'ensemble de la famille **AJRAOUI**, **BENKASSEM** et **FELLOUSSI**

A tous **mes amis** en Souvenir des plus beaux instants qu'on a passé ensemble,

A **toute personne** qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie...

Merci

Mohammed Ali



Remerciements

Au terme de ce travail, il m'est agréable d'adresser quelques expressions de remerciements et de reconnaissances à toute personne dont l'intervention au cours de ce projet a favorisé son aboutissement.

Je présente mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à Monsieur Hossain EL OUARGHI, Professeur au département du Génie Civil et Environnement à l'Ecole Nationale Des Sciences Appliquées d'Al Hoceima (ENSAH), pour sa disponibilité, sa collaboration, sa modestie et sa sympathie, pour ses compétences, sa pédagogie et ses directives fructueuses qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de ce projet, qu'il soit avisé ici de mon sincère merci.

Et c'est en aveu du succès de ce PFE que mon fervent remerciement se voue encore, à mon encadrant Monsieur Hamza ELACHAB ingénieur à la Direction des Aménagements Hydrauliques au sein du Ministère Chargé de l'Eau. Je le remercie surtout pour sa serviabilité et ses hautes qualités morales, pour son soutien et ses conseils avisés.

J'adresse aussi ma plus vive reconnaissance à tous mes enseignants de l'ENSAH pour la formation qu'ils m'ont donné ainsi qu'aux membres du jury qui ont accepté de juger mon modeste travail.

Finalement, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Résumé

Mon projet de fin d'études contribue à la réalisation d'une étude d'aménagement de l'Oued Chouf Cherg situé dans la province de Boulemane. Ce centre est menacé par des risques d'inondation à cause de sa topographie et son urbanisation non contrôlée.

Cette étude a pour objectifs de diagnostiquer le mécanisme d'écoulement de l'Oued Chouf Cherg, de déterminer les zones inondables au niveau de ce dernier via une modélisation différentiel utilisant le logiciel HEC-RAS et de proposer un schéma d'aménagement permettant sa protection contre les inondations. Ce travail est composé premièrement d'un aperçu général de la conception des ouvrages hydrauliques suivi d'une étude détaillée de l'aménagement de l'Oued Chouf Cherg pour la protection de la ville de Missouri contre les inondations et enfin la présentation de la solution proposée pour palier à ce problème.

La modélisation de l'écoulement de l'eau dans l'Oued Chouf Cherg est réalisée pour un débit de pointe correspondant à une période de retour centennale. Les résultats sont exploités pour définir la limite des plus hautes eaux en cas des crues et donc définir les zones inondables.

La solution optimale retenue est l'aménagement des rives de l'Oued par des digues en gabions d'une hauteur variable.

Mots clés: Crues, Modélisation, Chouf Cherg, HEC RAS, Aménagements, Protection.



Abstract

My graduation project aims the realization of a development plan for flood protection of the “Oued Chouf Cherg” located in the province of Boulemane. This center is threatened by the risk of flooding because of its topography and uncontrolled urbanization.

This study aims to diagnose the flow mechanism of the “Oued Chouf Cherg”, determine its flood zones via the one-dimensional modeling software HEC-RAS and then propose a development plan for its protection against flooding. This work consists firstly in a general overview of the design of hydraulic structures, then to the detailed study of the development plan for flood protection of the “Oued Chouf Cherg” crossing the town of Missouri and finally proposing an adequate solution to solve this problem.

The modeling of the flow of water, in the “Oued Chouf Cherg” was carried out for peak flows corresponding to a centennial return period. Results are exploited to define the limits of the water of the “Oued” in case of inundation and thus define flood zones.

The optimal solution adopted is a development plan of the “Oued” shorelines by the implementation of gabion dikes of variable height.

Key words: Flood, Modeling, Chouf Cherg, HEC RAS, Development plans, Protection.



SOMMAIRE

Introduction générale.....	11
I-Causes des inondations.....	14
II-Conception des ouvrages	20
II-1-Considérations techniques.....	20
II-1-1- Les structures en enrochement et leurs réponses	20
II-1-2-La conception de l'ouvrage.....	22
II-1-3-Le dimensionnement de l'ouvrage.....	23
II-2-Considérations économiques.....	24
II-1-1- Coût sur le cycle de vie.....	24
II-1-2-Les éléments de coût.....	24
II-1-3-Estimation du coût	25
II-1-4-Recherche, production et transport d'enrochement	26
II-1-5-Construction.....	27
II-1-6-Maintenance et réparation.....	28
II-1-7-Démolition	28
II-3-Considérations environnementales.....	29
II-3-1-Utilisation durable de l'enrochement comme matériau de construction.....	29
II-3-2-Evaluation des impacts environnementaux.....	30
II-3-3-Les opportunités pour l'amélioration de l'environnement.....	33
II-3-4-Vue d'ensemble du processus de l'Etude d'Impact sur l'Environnement.....	35
II-4-Considérations sociales	36
II-4-1-L'hygiène et la sécurité.....	37
II-4-2-La construction	37
II-4-3-L'engagement des parties concernées.....	38
III-Caractéristiques et classification des cours d'eau	39
III-1- Caractéristiques d'un cours d'eau.....	39
III-2-Classification des cours d'eau.....	40
IV-Présentation du logiciel HEC RAS.....	47
IV-1-Description du modèle.....	47
IV-2-Les équations mises en jeu	47
IV-2-1- Les équations de Saint-Venant 1D	47
IV-2-2- La formule de Manning-Strickler.....	54
IV-2-3- Les relations de seuil.....	56
V-Etude de protection contre l'inondation dans la ville de Missour	58



V-1-Généralités	58
V-1-1-Cadre de l'étude.....	58
V-1-2-Aire de l'étude	58
V-1-3-Situation géographique.....	58
V-1-4-Situation administrative.....	59
V-1-5-Cadre administratif	59
V-1-6-But de l'étude	59
V-1-7-Démographie et population	60
V-1-8-Documents utilisés par l'IC	60
V-2-Position du problème	62
V-3-Rappel du diagnostic de la situation actuelle.....	62
V-3-1-Sur la rive droite	62
V-3-2- Sur la rive gauche	63
V-4-Rappel de l'étude hydrologique.....	64
V-5-Résultat de l'étude hydraulique	65
V-6-Projet.....	65
V-6-1-Périmètre vieux Missouri/ Commune Sidi Boutaib.....	65
V-6-2-Matériaux de construction : définition et zone d'emprunt.....	66
V-7-Impact sur l'environnement	66
VI-Modélisation de la crue centennale de l'Oued Chouf Cherg sur Hec-Ras	68
VI-1 Etapes de la modélisation	70
VI-1-1-Entrée du projet.....	70
VI-1-2- Visualisation des résultats	76
VI-2- Observations importantes	78
VI-2-1-Conditions aux limites.....	78
VI-2-2-Conditions initiales.....	79
VI-3- Justification du choix de la variante	79
VII- Les digues en gabion et dimensionnement.....	81
VII-1-Définition des gabions.....	81
VII-2-Application des gabions	81
VII-3-Classification des gabions	81
VII-4-Elements constitutifs des gabions	82
VII-4-1-Propriétés du grillage des gabions	82
VII-4-2-Caractéristiques et propriétés des enrochements pour gabion	83
VII-4-3-Propriétés physiques des gabions.....	84
VII-4-4-Propriétés hydrauliques des gabions.....	84



VII-5-Stabilité mécanique des gabions	85
VII-6-Avantages des gabions	87
VII-7-Etude de stabilité des murs en gabions.....	87
VII-8-Travaux d'aménagements de protection recommandés	90
Conclusions et recommandations.....	92
Revue Bibliographique	95
Annexes	97
Annexe 1 : Les zones inondables au Maroc avec risques variables	98
Annexe 2 : Situation générale Sidi Boutaib	98
Annexe 3 : Schéma géologique et hydrologique de la zone d'étude.....	99
Annexe 4 : Schéma descriptif du diagnostic de la situation actuelle.....	100
Annexe 5 : Résultat de la modélisation de la crue centennale de l'oued Chouf Cherg.....	100
Annexe 6: Aménagement de missour.....	109
Annexe 7 : Résultat de l'étude de stabilité des murs en gabion	109
Annexe 8: Photos de l'oued Chouf Cherg.....	121



Liste des tableaux

<i>Tableau 1: Description des grands types de chenaux, selon la classification de Rosgen (1994)</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 2: Classes de cours d'eau en fonction de la pente (Rosgen, 1996)</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 3: Classes de cours d'eau en fonction de la sinuosité (Rosgen, 1996).....</i>	<i>44</i>
<i>Tableau 4: Classes de cours d'eau en fonction du ratio largeur/profondeur.....</i>	<i>45</i>
<i>Tableau 5: Classes de cours d'eau en fonction du ratio de confinement (Rosgen, 1996).....</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 6: Classes de cours d'eau en fonction de la pente (Rosgen, 1996)</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 7: Les valeurs du coefficient n de Manning</i>	<i>55</i>
<i>Tableau 8: Quelques ordres de grandeur du coefficient de Strickler</i>	<i>56</i>
<i>Tableau 9: Le taux d'accroissement de la population dans la région de Missouri entre 1994 et 2004.</i>	<i>60</i>
<i>Tableau 10: Carte topographique des régions en périphérie avec Missouri.....</i>	<i>60</i>
<i>Tableau 11: Les débits retenus à l'Oued de Chouf Cherg pour différentes périodes de retour</i>	<i>65</i>
<i>Tableau 12: Normes européennes relatives au grillage métallique à double torsion.....</i>	<i>83</i>
<i>Tableau 13: Recommandations pour l'enrochement utilisé dans les gabions.....</i>	<i>84</i>
<i>Tableau 14: Récapitulatif des résultats.....</i>	<i>90</i>



Liste des figures

Figure 1: Topographie d'une plaine d'inondation	15
Figure 2: Les différents éléments d'un ouvrage en enrochement	22
Figure 3: La clé de classification de Rosgen (1994) pour les cours d'eau naturels	41
Figure 4: Conservation de la charge entre deux sections (source : HEC-RAS).....	49
Figure 5: Découpage de la section pour le calcul du frottement (source : HEC RAS)	49
Figure 6: Bilan sur un petit volume de contrôle pour les équations de moment et de continuité	50
Figure 7: Notation employée dans la description des profils en long.....	52
Figure 8: Représentation de l'écoulement sur un seuil déversant.....	56
Figure 9: Fenêtre principale de HEC-RAS.....	68
Figure 10: Fenêtre nouveau projet	70
Figure 11: Option système d'unité HEC RAS.....	71
Figure 12: Fenêtre Geometric Data	71
Figure 13: Fenêtre Cross Section- profil 67	72
Figure 14: Fenêtre Steady Flow Data	74
Figure 15: Fenêtre Reach Boundary Conditions	75
Figure 16: Fenêtre Steady Flow Analysis.....	76
Figure 17: Vue en 3D des sections transversales de l'Oued Chouf Cherg	77
Figure 18: Fenêtre Profile Output Table	77
Figure 19: Boîtes de gabions	82
Figure 20: Matelas de gabions	82
Figure 21: Avantages du grillage à double torsion par rapport au grillage en mailles simples.....	83
Figure 22: fenêtre GEO 05 Gabions: caractéristiques du matériau.....	88
Figure 23: fenêtre GEO 05 gabions : géométrie.....	88
Figure 24: fenêtre GEO 05 gabions: caractéristiques du sol	88
Figure 25: fenêtre GEO 05 Gabions: vérification de la stabilité du mur d'une hauteur de 5m.....	89
Figure 26: Coupe type de la digue en gabions.....	89
Figure 27: Les zones inondables au Maroc avec risques variables.....	98
Figure 28: Situation générale Sidi Boutaib.....	98
Figure 29: Schéma géologique et hydrologique de la zone d'étude	99
Figure 30: Schéma descriptif du diagnostic de la situation actuelle	100
Figure 31: Aperçu d'un tronçon de profils en travers au long de l'oued Chouf Cherg.....	109
Figure 32: Fenêtre GEO 05 Gabions- Matériau- Mur de 5m.....	110
Figure 33: Fenêtre GEO 05 Gabion- Géométrie du mur de 5m.....	110
Figure 34: Fenêtre GEO 05 Gabions- Sols- Mur de 5m.....	111
Figure 35: Fenêtre GEO 05 Gabions- Eau- Mur de 5m.....	111
Figure 36: Fenêtre de vérification de la stabilité du mur de 5m	112
Figure 37: Fenêtre GEO 05 Gabion- Matériau- Mur de 5,5m	113
Figure 38: Fenêtre GEO 05 Gabions- Géométrie du mur de 5,5m	113
Figure 39: Fenêtre GEO 05 Gabions- Sols- Mur de 5,5m.....	114
Figure 40: Fenêtre GEO 05 Gabions- Eau- Mur de 5,5m.....	114
Figure 41: Fenêtre de vérification de la stabilité du mur de 5,5m	115
Figure 42: Fenêtre GEO 05 Gabions- Géométrie du mur de 6m	115
Figure 43: Fenêtre GEO 05 Gabions- Coupe du mur de 6m.....	116
Figure 44: Fenêtre GEO 05 Gabions- Sols- Mur de 6m.....	116
Figure 45: Fenêtre GEO 05 Gabions- Eau- Mur de 6m.....	117



<i>Figure 46: Fenêtre de vérification de la stabilité du mur de 6m</i>	<i>117</i>
<i>Figure 47: Fenêtre GEO 05 Gabions- Géométrie du mur de 6,5m</i>	<i>118</i>
<i>Figure 48: Fenêtre GEO 05 Gabions- Coupe du mur de 6,5m.....</i>	<i>118</i>
<i>Figure 49: Fenêtre GEO 05 Gabions- Sols- Mur de 6,5m.....</i>	<i>119</i>
<i>Figure 50: Fenêtre GEO 05 Gabions- Eau- Mur de 6,5m.....</i>	<i>119</i>
<i>Figure 51: Fenêtre de vérification de la stabilité du mur de 6,5m</i>	<i>120</i>
<i>Figure 52: Aperçu global de l'oued Chouf Cherg.....</i>	<i>121</i>
<i>Figure 53: Aperçu d'un tronçon de l'oued Chouf Cherg.....</i>	<i>121</i>
<i>Figure 54: Dégâts de crues antérieurs- problème d'affouillement</i>	<i>122</i>
<i>Figure 55: Dégâts de crues antérieurs- charriages grossiers</i>	<i>122</i>
<i>Figure 56: Vue du pont au niveau amont de l'oued Chouf Cherg.....</i>	<i>123</i>
<i>Figure 57: Aperçu des murs en gabion.....</i>	<i>123</i>

Liste des abréviations

ENSAH : Ecole Nationale Des Sciences Appliquées d'Al Hoceima

DEAH : Direction des Etudes et des Aménagements Hydrauliques

DAH: Direction des Aménagements Hydrauliques

WCED: Report of the World Commission on Environment and Development

EIE : Etude d'Impact sur l'Environnement

EDP : Equations aux Dérivées Partielles

RN : Route Nationale

IC : Ingénieur Conseil

ERAC : Etablissement Régional d'Aménagement et de Construction

PNI : Plan National de protection contre les Inondations

TN : Terrain Naturel

AFNOR : Association Française de Normalisation

NM: Norme

LOB: Left Over Bank

ROB: Right Over Bank

PVC: Polychlorure de Vinyle



Introduction générale

Une inondation correspond à la submersion ponctuelle d'une zone habituellement sèche, par des eaux douces ou salées. Cette inondation peut être un phénomène régulier ou catastrophique et peut se produire lentement ou très rapidement.

Il existe deux types d'inondation, selon qu'elles provoquent des eaux douces ou des eaux marines. Les premières, que l'on pourrait qualifier de terrestres, tandis que les inondations marines concernent le littoral.

Au Maroc, personne ne peut oublier le jour du vendredi 10 octobre 2008, ce jour où Missour a fait la Une de la presse, s'ajoutant ainsi aux autres villes du Maroc qui ont vécu le désastre d'une inondation. Après une nuit entière de pluie diluvienne sur les montagnes avoisinantes et sur les plateaux de Midelt, le fleuve Moulouya et l'oued Chouf Cherg ont débordés et ont submergé des terres cultivées et villages habités.

Les phénomènes d'inondations ne sont pas récents au Maroc et plusieurs grands aménagements de protection ont déjà été réalisés. Néanmoins ces phénomènes sont ressentis plus fortement aujourd'hui en raison du fort développement démographique, économique, urbain, agricole, industriel ou touristique du territoire.

Aujourd'hui tous les états ont conscience que des moyens de prévention appropriés doivent être mis en place pour lutter contre ces catastrophes. Au Maroc une étude de « **Plan Directeur de Protection contre les Inondations et Impacts des Ouvrages de Protection sur l'Environnement** » a été lancée par la Direction Générale de l'Hydraulique. [1]

A travers cette étude de nombreuses zones à haut et à moyen risque d'inondations ont été identifiés. C'est le cas de la commune rurale Sidi Boutaib, dite ancien Missour, dans la province de Boulemane.

Problématique : Les cours d'eau jouent un rôle essentiel dans le cycle de l'eau en véhiculant les eaux de pluie vers la mer. Ils permettent aussi le développement économique, social et industriel le long de leur berge car l'être humain a toujours été attiré par les sources d'eau.

Les inondations provoquent des perturbations dans la vie des riverains qui peuvent se manifester par :

- Des pertes de vies humaines ;
- Ralentissement et paralysie de l'activité économique ;



- Destruction des cultures et chute des rendements ;
- Destruction et dégradation des infrastructures.

A l'échelle du bassin méditerranéen, les risques d'inondation viennent en deuxième rang derrière les risques sismiques, mais ils occupent en revanche le premier rang sur le plan de fréquences d'occurrences. [2].

L'aménagement des zones inondables constitue actuellement une composante principale des aménagements hydrauliques. Pour cerner ce problème dans sa globalité, le Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau et de l'environnement a mené une étude nationale de protection des villes et centres contre les inondations (Plan National de lutte contre les Inondations, 2009). Cette étude a pour ambition d'avoir une vision globale à l'échelle de la totalité du territoire national de l'ensemble des risques réels et potentiels d'inondation en vue de dégager et de planifier les différentes mesures qui permettront d'y faire face. Suite à cette étude de nombreux sites à risque d'inondations ont été identifiés.

La région Nord Orientale compte parmi les agglomérations du Maroc touchées par les inondations. La charge solide emportée par les oueds traversant la zone, causent de sérieux dommages aux populations et aux infrastructures. Comme indiqué auparavant, cette région a déjà connu d'importantes crues. La plus récente date de 2008 sur oued Chouf Cherg, elle a causé de lourds dégâts matériels.

Le présent travail porte sur une étude de protection contre les inondations pour la ville de **Missour**, cette étude a été envisagée par la **Direction des Aménagements Hydrauliques** relative au Ministère Déléguée Chargée de L'eau. Cette direction a confié par la suite la mission d'étude de protection contre les inondations au bureau d'études conseils Al Khibra.

En particulier, l'objectif de l'étude consiste à diagnostiquer le mécanisme d'écoulement dans l'Oued Chouf Cherg, délimiter les zones inondables et proposer des mesures efficaces pour assurer un meilleur passage des crues.

Pour atteindre les objectifs fixés, le travail a été mené selon la méthodologie suivante : La première étape de notre travail a consisté en la consultation de la documentation traitant la problématique. Cette recherche nous a permis de tirer les renseignements enrichissants sur :

- Les causes et impacts des inondations ;
- Les dommages causés par les inondations à travers le monde et au Maroc en particulier;



- Les considérations techniques, économiques, environnementales et sociales dans la conception d'un ouvrage hydraulique ;
- Les caractéristiques d'un cours d'eau et sa classification ;
- Le fonctionnement du logiciel utilisé pour la modélisation du cours d'eau en utilisant **HEC-RAS**.

La seconde étape consiste en une étude de protection contre les inondations de l'oued Chouf Cherg.

Pour réaliser cette étude, les étapes, suivantes, ont été suivies :

D'abord, **un rappel** du diagnostic de la situation actuelle de la ville de Missouri incluant le résultat de l'étude hydraulique de l'oued Chouf Cherg.

Ensuite, à partir des levées topographiques fournis par la Direction des Aménagements Hydrauliques et disponibles au niveau du bureau d'étude Al Khibra, un **modèle hydraulique** de l'oued a été établi sous le logiciel de la modélisation HEC-RAS pour la détermination des hauteurs d'eau dans l'oued et la **délimitation des zones inondables** dans le centre.

Enfin, la proposition d'un **schéma d'aménagement** des rives de l'Oued par des digues en gabions d'une hauteur variables, et ceci afin de protéger le centre de Missouri contre les inondations.

I-Causes des inondations

A-LA PLUIE ET LA NEIGE

Une partie de l'eau de pluie ou de la neige est retenue par le sol, absorbée par la végétation ou évaporée ; le reste, l'eau de ruissellement, atteint le lit des cours d'eau. Les crues se produisent lorsque le sol et la végétation ne peuvent pas assimiler toute l'eau de ruissellement et provoquent une élévation du lit du cours d'eau. Le plus souvent, celui-ci ne déborde pas, mais l'eau ruisselle parfois dans les quantités qui ne peuvent être transportées dans les lits des rivières, ni retenues dans les bassins naturels et les réservoirs artificiels situés derrière les barrages. Le cours d'eau déborde et il se produit alors une inondation. Environ 30% des précipitations ruissellent et à cette quantité peuvent encore s'ajouter des masses de neige fondue. Beaucoup de rivières connaissent des crues périodiques au printemps et débordent de leur lit pour atteindre leur plaine d'inondation.

Ces plaines d'inondation sont, ou devraient être, exemptes de toute construction. Les inondations subites, qui peuvent survenir en automne dans les régions méditerranéennes, sont généralement dues à des précipitations intenses sur une zone relativement réduite. Les pratiques agricoles intensives diminuent la capacité du terrain à retenir l'eau et augmentent le ruissellement. La maîtrise des inondations passent par le reboisement et par la mise en œuvre de méthodes efficaces de traitements des sols, de conservation et de reboisement.

B-LES LITS DE LA RIVIERE : LES CRUES

Un cours d'eau présente trois éléments morphologiques différents :

Le lit mineur occupé en permanence par les eaux ; le lit majeur saisonnier, inondé à peu près tous les ans, en période de crue ; le lit majeur exceptionnel, où l'écoulement ne s'effectue que lors de grandes crues. Ces trois zones sont susceptibles d'être modifiées par des changements climatiques ou par des transformations consécutives à l'activité humaine. Ainsi les multiplications de surfaces revêtues (routes et pistes d'aérodrome) diminuent la perméabilité d'ensemble du bassin et rend alors les crues beaucoup plus brutales.



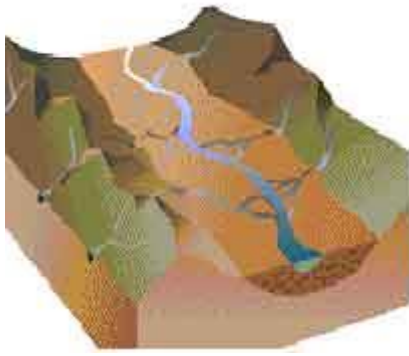


Figure 1: Topographie d'une plaine d'inondation

Une plaine d'inondation ou plaine alluviale est une vaste étendue de terrain sablonneux, graveleux et argileux qui recouvre le fond d'une vallée. Les plaines d'inondation se forment lorsqu'un cours d'eau sillonnant une vallée sort de son lit mineur et se répand sur son lit majeur. Il entre alors en crue et recouvre de limons de débordement la plaine alluviale. En se retirant, le cours d'eau dépose des sédiments (sable, gravier, argile) qui enrichissent le sol de la plaine, qui est généralement très fertile.

Un cours d'eau se compose en amont, d'un bassin de réception qui collecte les eaux, d'un chenal d'écoulement et en aval d'un cône de déjection avec l'embouchure. En période de crue, le chenal d'écoulement ne suffit plus pour évacuer le brusque afflux des eaux provenant du bassin de réception. Le fleuve déborde alors de son lit mineur et inonde les rives. Dans les régions tempérées, les crues normales d'un fleuve peuvent être notablement amplifiées si des pluies abondantes affectent simultanément les bassins de réception des cours d'eau et de leurs affluents : tel fut le cas de la Seine en 1910. [3].

-Impact des inondations :

Les inondations font beaucoup de dégâts qui entraînent de grandes pertes.

Il existe principalement trois catégories de dégâts que créent ces inondations :

- Les dégâts matériels
- Les dégâts humains
- La dégradation du paysage (catégorie moins importante)

A -DEGATS MATERIELS

Lorsque les inondations se passent, les constructions (habitations, magasins, ponts, bâtiments publics ...) sont dégradées et parfois même dévastées, ravagées ainsi que les pylônes électriques etc. Les appareils électriques (appareils de communication, électroménagers) étant trempés sont hors circuit. Les maisons inondées ne facilitent pas la vie des habitants, d'autant plus que le ravitaillement est difficile, les voies étant impraticables.

B -DEGATS HUMAINS

Au moment de l'inondation, beaucoup de personnes périssent noyées ou sont frappées par des décombres emportés par le courant. D'autres nombreuses personnes disparaissent sous les eaux.

Les personnes victimes de l'inondation quittent leur logement vers d'autres hébergements temporaires et souvent difficiles à trouver. Les personnes restant dans la ville qui logent dans des bâtiments en hauteur subissent un manque de vivres et d'eau potable. Les voies étant impraticables, le ravitaillement se fait avec des barques donc les blessés sont évacués vers les hôpitaux par hélicoptère. Comme beaucoup de personnes sont mortes, les risques d'épidémie sont grands. Lorsque l'inondation se produit l'hiver, le froid est un grand danger pour les personnes restées dans la ville, ainsi peut se former de la glace.

C- MODIFICATION DU PAYSAGE

Les eaux en crues modifient le paysage de façon invraisemblable. Les villes sont vides de tout occupant, les monuments ravagés, les bois rasés, les habitations détruites, les récoltes et cultures pourrissent. [4].

Dommmages causés par les inondations à travers le monde

Les inondations représentent chaque année un pourcentage important des pertes économiques dues aux catastrophes naturelles (49 % du total mondial en 1999). Pour la période 1985–1999, le nombre d'événements ayant provoqué des dommages s'élevait à 2410 pour l'ensemble de la planète (430 pour l'Europe), représentant 30 % (respectivement 25 %) de l'ensemble des catastrophes naturelles. Durant la même période, elles ont provoqué la mort de plus de 250 000 personnes (1 800 pour l'Europe), soit environ la moitié du nombre total de victimes imputées aux catastrophes naturelles [5]. Parmi l'ensemble des continents, l'Asie est celui qui paie le plus lourd tribut aux inondations : le pourcentage d'événements dommageables est de 37 %, celui des pertes en vies humaines est de 88 %, et celui des pertes économiques est de 68 % des totaux respectifs mondiaux. Cette situation est évidemment à mettre en relation avec les grands fleuves chinois et la situation particulière du Bangladesh. Dans ce dernier pays, 85 % du territoire national est exposé à d'importants risques d'inondations. La situation chinoise n'est pas en reste, bien que les plaines inondables ne représentent qu'une partie infime du territoire. Par exemple, pour le Yangtse, elle représente 1,5 % de la surface du pays, mais elle concentre 250 millions d'habitants et 45 % de la production du riz et des autres céréales y sont produites.



-Impact des inondations au Maroc

La géologie et le climat du Maroc le classe dans la catégorie des pays les plus vulnérables aux inondations. En effet, Les catastrophes les plus fréquentes et les plus meurtrières pour ce pays sont la récurrence terrible des inondations. Les inondations de l'Oued Ourika de 1995, et celles de l'Oued Maleh de 2002 restent gravées dans les mémoires des marocains. Historiquement, le Maroc a enregistré, entre 1951 et 2015, pas moins de 35 épisodes d'inondations. Par le passé, les crues permettaient d'irriguer les régions arides selon les pratiques ancestrales d'épandage d'eau. Mais avec la forte croissance démographique et le développement des infrastructures, ces crues génèrent des inondations qui constituent des menaces pour les populations locales. En plus, le savoir-faire local permettant de gérer ce type de situation a disparu avec le temps. Ces constats ont été typiquement illustrés par les inondations mortelles que le Sud du Maroc a connues en Novembre 2014. Avec l'urbanisation du pays, les crues qui auparavant avaient un impact positif par l'irrigation qu'elles permettaient, constituent désormais une menace pour les populations vivant dans les régions arides et semi arides ou les oueds, généralement asséchés, sont capable de se transformer rapidement en torrents déchainés.

En particulier, les inondations au Maroc ont des impacts sur l'ordre social et sur l'écosystème. En effet, parmi leurs conséquences néfastes, on peut citer, entre autres, les glissements de terrain dus à des sols saturés, les pertes en vies humaines dues à la noyade, la pollution des réserves d'eau et les épidémies en relation avec la contamination éventuelle des puits et des nappes phréatiques, la perte de la culture, des réserves alimentaires et des animaux et l'effondrement des maisons. [6]

Crues Historiques au Maroc

Les précipitations qui se sont abattues des dernières années sur le Maroc ont provoqué des inondations qui ont plongé, certaines régions du Royaume dans l'isolement. Parmi les sites exposés à ce risque, on peut citer les exemples suivants:

➤ Ourika

Le bassin versant de l'Ourika, situé dans le Haut Atlas de Marrakech, présente une forme allongée avec des pentes très importantes au niveau des affluents et des versants. De point de vue lithologique, les terrains sont assez imperméables ce qui fait accroître les risques d'inondations. Cette situation favorise une augmentation des volumes d'eau mobilisés par le cours d'eau principal et le développement d'importantes crues.



De plus le bassin connaît souvent des épisodes orageux parfois rapides qui génèrent des inondations surtout en période d'été.

Cette région, a déjà connu plusieurs crues dans les années passées mais les plus dangereuses sont celles d'Août 1995 qui ont tout emporté sur leur passage avec plus d'une centaine de morts et quatre-vingts disparus. (Agence de Bassin Hydraulique du Tensift, 2005)

➤ **Gharb**

Le bassin hydraulique du Gharb dispose du plus fort débit des eaux de surface. Malgré leur grande capacité de stockage, les barrages de cette région sont saturés.

Cette région qui se trouve à la croisée des deux grands fleuves Sebou et Baht, est aussi soumise à de fortes inondations, dont la cause reste liée à la nature argileuse du sol et à l'abondance des eaux qu'il faut transférer vers les régions les moins loties.

➤ **Mghogha**

La ville de Tanger, notamment le quartier industriel de Mghogha est aussi menacé par le risque d'inondation.

Lors de ces dernières inondations d'Octobre 2009, Oued Mghogha a submergé deux zones industrielles occasionnant d'énormes dégâts matériels à des dizaines d'usines ; ce secteur a été paralysé pendant plusieurs jours, à cause de ces inondations. En effet, 62 mm étaient largement suffisants pour que ce quartier et toute la ville du Détroit se noient sous les eaux. (La vie éco. 2010).

➤ **Malha**

La province de Taza a connu le 22 Novembre 2002 des précipitations torrentielles d'origines orageuses qui ont engendré la crue d'oued Larbâa et son affluent oued El Haddar.

La crue d'oued Larbâa a touché le quartier Malha à 5H30 et a duré 5h. Le débit de pointe est estimé à 800 m³/s. Le volume de la crue est d'environ 14,4 Mm³.

Comme pour les crues précédentes, les douars Malha et Chleuh ont été les plus touchés par les eaux de crue.

L'enquête de crue menée par l'agence urbaine de Taza a mesuré une emprise inondée de l'ordre de 300m au niveau de douar Malha. Le nombre de logements touchés par cette crue est de 34 unités.



➤ **Missour**

En période de pluie intense, des quantités d'eau importantes déferlent sur les concentrations limitrophes à Oued Chouf Cherg urbaines et rurales, provoquant de grandes inondations, comme celle du 10 Octobre 2008. Ces crues torrentielles de l'oued Chouf Cherg et Moulouya ont subi au niveau de la commune Sidi Boutayeb et du périmètre urbain de la ville de Missour des dégâts importants ; on cite à titre indicatif et non exhaustif :

- Au niveau des localités Tchabt, Al Harcha, Gabdor, Ouled Boutahar, OuledBouzazia et Douira (commune rurale de Sidi Boutayeb).

- Destruction et submersion des dizaines de maisons
- Submersion de différents champs de culture et arrachage des arbres fruitiers.
- Colmatage des seguias.

- Au niveau de la ville de Missour :

- Inondation des dizaines de maisons au niveau du quartier Erac
- Destruction du pont métallique sur oued Moulouya



II- Conception des ouvrages

II-1- Considérations techniques

II-1-1- Les structures en enrochement et leurs réponses

Il s'agit de décrire les principes généraux des structures en enrochement et leurs réponses aux sollicitations.

Un éventail de scénarios doit être considéré pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques, incluant ceux liés au fonctionnement normal de l'ouvrage en service et aussi aux situations extrêmes ou accidentelles. Des dégradations ou même des ruptures de l'ouvrage ou de ses composantes peuvent se produire, résultat des chargements induits par ces situations. Cette rupture survient lorsque la réponse excède une valeur de la performance liée aux exigences fonctionnelles des ouvrages. En général, les mécanismes de rupture sont dénommés par référence aux déplacements ou aux déformations qu'ils engendrent.

Les principaux mécanismes de rupture des ouvrages en enrochement sont les suivant :

-Franchissement : c'est le phénomène de la dégradation de la crête et du talus arrière due à des combinaisons de houles et de niveaux d'eau extrêmes. Ceci peut être considéré comme étant une rupture de l'ouvrage vis-à-vis des exigences de service.

-Tassement : le poids d'un ouvrage produit une action supplémentaire sur le sol de fondation, qui peut se compacter, soit instantanément soit progressivement pour les couches compressibles peu perméables. Le tassement peut atteindre 5 à 10% de la hauteur de l'ouvrage pour une digue à talus.

-Instabilité des pentes : un frottement interne faible ou décroissant dans un ouvrage en enrochement peut générer une rupture par grand glissement. Lorsque l'angle du talus de l'ouvrage est proche de l'angle de frottement, des petites variations des actions peuvent induire une instabilité de la pente.

-Glissement de (ou d'une partie de) l'ouvrage : la stabilité d'un talus en enrochement est contrôlée par l'angle du talus, la masse volumique des blocs, les pressions interstitielles occasionnées par les différences de niveaux d'eau et le mouvement des vagues, le frottement interne et l'imbrication des blocs. Les ouvrages en crête-généralement des murs en béton-peuvent se déplacer, typiquement en glissant sous l'action de la houle. Par conséquent, un frottement adéquat entre l'ouvrage et les enrochements sous-jacents est critique pour la stabilité au glissement.



-Mouvements des blocs d'encrochement de la carapace : la houle et les courants déterminent les forces de soulèvement et de trainée agissant sur un bloc d'encrochement de la carapace. A long terme, les matériaux de l'ouvrage peuvent devenir sujets aux détériorations. Cela peut se traduire par une dégradation de la roche, les blocs s'arrondissant et leur imbrication diminuant. Des ruptures d'encrochements peuvent se produire sous l'action de la houle, ce qui peut localement réduire l'imbrication de la carapace ou réduire la masse moyenne de l'encrochement et augmenter la probabilité de rupture de la carapace.

-Migration des sous-couches : un écoulement interne peut s'établir à cause d'une différence de niveau d'eau ou de pressions locales excessives. Lorsqu'un gradient hydraulique critique est atteint, associé à des vitesses d'écoulement élevées, les éléments fins sont transportés depuis la couche interne de l'ouvrage au travers des éléments plus gros des couches supérieures.

Généralement, ces éléments fins passent facilement à travers la carapace, conduisant à une perte de matériaux des couches inférieures –filtres et sous-couches) et/ou du noyau, ce qui peut facilement créer des tassements locaux.

-Renard : des chenaux d'écoulement préférentiel peuvent se créer dans le squelette granulaire à cause des migrations d'éléments fins hors de l'ouvrage. Ces courts chenaux peuvent s'interconnecter et permettre ainsi une érosion interne progressive, provoquant éventuellement l'effondrement de l'ouvrage. Ce phénomène est davantage susceptible de se produire aux interfaces structurelles, telles que les transitions entre des matériaux perméables et des matériaux moins perméables, ou au contact entre des matériaux granulaires lâches et des matériaux granulaires compactés.

-Erosion du fond : la houle et les courants peuvent mettre en mouvement les sédiments. L'interaction avec l'ouvrage (réflexion de la houle, génération de turbulence) peut conduire à un affouillement du fond ou de la plage directement au droit de l'ouvrage, avec pour conséquence potentielle la sape du pied l'ouvrage.

-Liquéfaction : les actions cycliques peuvent générer de pressions interstitielles excessives lorsque la capacité de dispersion de l'augmentation des pressions interstitielles est faible. La liquéfaction fait référence à de matériaux granulaires fins ou des pressions interstitielles induites sont si élevées que les contacts inter granulaires sont perdus. Le milieu dans son ensemble (squelette solide et eau) perd sa résistance au cisaillement et se comporte alors comme un fluide épais. Dans ces circonstances, toute action de cisaillement causera une rupture par glissement ou une instabilité. [7].



II-1-2-La conception de l'ouvrage

Un ouvrage comprend différents éléments, chacun ayant une fonction critique associée à la performance de l'ensemble de l'ouvrage et un rôle particulier au sein de l'ouvrage. Les éléments les plus critiques d'un ouvrage en enrochement sont généralement une carapace (qui doit être stable), une fondation (pour minimiser les tassements), une protection de pied (pour éviter l'affouillement) et une crête (pour protéger efficacement l'ouvrage). Les éléments et leurs importances relatives diffèrent suivant le type d'ouvrages en enrochement considéré. Pour tous les ouvrages, il est nécessaire de comprendre la fonction de chaque élément et son importance dans la conception de l'ensemble.

Lors du dimensionnement d'un ouvrage il est important de déterminer quels sont les cas de charges (intensité et durée) appliqués à chaque élément de l'ouvrage.

Par exemple, le dimensionnement de la butée de pied ou du tapis anti-affouillement doit tenir compte de plusieurs niveaux d'eau, pour établir les conditions critiques de stabilité.

Au contraire, pour le dimensionnement de la crête pour des performances de franchissement satisfaisantes, seul le niveau d'eau maximum est généralement important.

La conception d'un ouvrage en enrochement doit comprendre au minimum l'analyse et le dimensionnement des éléments suivants :

- La carapace (talus avant, crête et protection du talus arrière) ;
- La butée de pied (y compris protection anti-affouillement) ;
- Les sous-couches et les filtres ;
- Le noyau et les fondations (drainage/tassement) ;

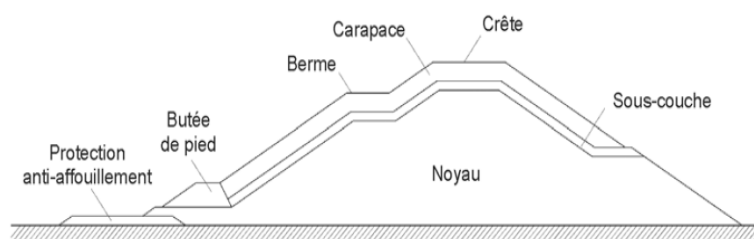


Figure 2: Les différents éléments d'un ouvrage en enrochement

La conception doit traiter la géométrie en plan, les principaux profils, les dispositions particulières aux limites de l'ouvrage et au niveau des transitions dans l'ouvrage et les dispositions empêchant l'érosion par contournement de l'ouvrage. [8].

II-1-3-Le dimensionnement de l'ouvrage

Après avoir choisi une ou plusieurs solutions qui répondent aux exigences fonctionnelles, la phase suivante s'intéresse au dimensionnement et aux détails de l'ouvrage.

La phase de dimensionnement consiste en une série de calculs, voire d'essais sur modèles réduits, pour vérifier ou ajuster si nécessaire tous les détails de l'ouvrage et de sa construction. C'est souvent un processus itératif qui commence par le développement et l'analyse des différentes options envisagées aux études d'avant-projet et qui permet de choisir l'option préférée. Au stade des études de projet, celle-ci sera détaillée, et de nouvelles variantes peuvent émerger lors de la recherche du meilleur équilibre entre le coût total et l'efficacité fonctionnelle. A ce stade, les variantes sont généralement des variations mineures par rapport à l'option choisie.

L'objectif des calculs et des modèles physiques est d'assurer que l'ouvrage dimensionné répondra aux exigences fonctionnelles pour son environnement et les conditions aux limites spécifiques. Toutes les conditions aux limites disponibles doivent être intégrées, en particulier tous les détails sur les conditions de site. Selon la cadence des études, il se peut que les résultats d'études commandés plus tôt ne soient disponibles qu'au moment des études de projet. Lorsque c'est possible, les méthodes de construction doivent être prises en compte dans les études.

L'équilibre entre les considérations économiques et la sécurité d'exploitation de l'ouvrage, liée au niveau de performance requis et de risque acceptable, doit aussi être calculé. Ceci doit être exprimé en termes de risques de non performance ou de risque de dépassement de conditions spécifiées.

Une conception technique saine est essentielle pour s'assurer que le niveau de stabilité et de protection de chaque partie de l'ouvrage est conforme aux prescriptions. Les risques principaux sont soit un sous-dimensionnement, conduisant à une rupture potentielle, ou un surdimensionnement, conduisant à une sécurité certaine mais aussi à un ouvrage probablement plus coûteux et plus efficace que nécessaire. [9].

Lors du dimensionnement, un éventail de scénarios doit être identifié pour évaluation, en tenant compte des cas de charges, du risque de dégradation et des modes et mécanismes de



rupture associés. Par exemple, dans le dimensionnement des ouvrages de défense contre les inondations, il est courant d'inclure au moins un scénario avec une brèche et un scénario avec franchissement ou surverse sans brèche. Il peut être utile d'organiser les mécanismes de ruptures possibles sous forme d'« arbres de défaillance » ou de « chaînes d'événements ». Lorsque plusieurs mécanismes peuvent conduire à la rupture, ceux-ci doivent être analysés séparément pour établir leur probabilité d'occurrence et leur importance relative. Si nécessaire, ils doivent être combinés pour déterminer la probabilité globale de rupture ; la « résistance » d'un ouvrage est associée au mécanisme de rupture le plus fragile. [10], [11], [12], [13] et [14].

II-2-Considérations économiques

Il est essentiel d'avoir une bonne compréhension du coût de l'ouvrage au cours de son cycle de vie. Diverses méthodes et exigences existent pour déterminer les coûts, souvent spécifiques à un pays ou à la fonction de l'ouvrage.

II-1-1- Coût sur le cycle de vie

Comme pour tout projet, un principe fondamental dans la conception des ouvrages hydrauliques en enrochement est la minimisation de son coût total dans les limites des exigences fonctionnelles et des conditions aux limites. Le coût sur le cycle de vie tient compte du coût total de l'ouvrage durant sa vie depuis sa construction jusqu'à son éventuel démantèlement ou remplacement. Il inclut le coût de la maintenance et de l'exploitation de l'ouvrage. Il peut également inclure la réutilisation éventuelle des matériaux dans le futur.

Le coût sur le cycle de vie peut être utilisé comme aide aux décisions prises lors du processus de financement. Par exemple, il peut être utilisé pour identifier si un investissement initial plus important est justifié par rapport à un coût initial moindre mais avec un coût de fonctionnement et de maintenance supérieur pendant l'exploitation de l'ouvrage. [15] et [16].

II-1-2-Les éléments de coût

Les coûts d'un ouvrage en enrochement se déclinent généralement suivant les catégories ci-dessous :

- Approvisionnement en matériaux ;
- Construction ;
- Maintenance et réparation ;
- Démolition ;



De plus, il faut aussi tenir compte des coûts associés aux reconnaissances et aux études conduisant au dimensionnement détaillé et à la préparation des documents contractuels. Ces coûts ne constituent généralement pas plus de 5 à 10% du montant global de l'ouvrage. Un investissement additionnel dans les premières phases d'études est souvent relativement peu coûteux, peut réduire les incertitudes et générer une économie importante pour le projet dans son ensemble. Par exemple, le coût des études sur un modèle numérique détaillé de propagation de la houle ou des essais sur modèles physiques est souvent équivalent à la construction de seulement 2 à 3m de digue. Ceci illustre l'avantage de conduire les études initiales à un niveau approprié pour optimiser le dimensionnement. Des arguments similaires peuvent s'appliquer à d'autres aspects du processus de conception.

Les coûts d'un projet peuvent souvent être séparés en coûts fixes et coûts variables. Les coûts variables sont liés au temps passé ou à la quantité de matériaux manipulés.

Par exemple, les coûts dépendant du temps peuvent être importants lorsqu'il y a un risque que le planning ne soit pas tenu. Les conséquences économiques de cadences de production supérieures ou inférieures doivent être considérées lorsque le planning et les recettes sont critiques pour le maître d'ouvrage. Dans cette situation, une réduction de la durée du chantier en contrepartie d'un coût de construction supérieur peut être plus économique pour le maître d'ouvrage.

II-1-3-Estimation du coût

Lors du processus de conception, l'optimisation du coût est recherchée à différents niveaux et différentes phases des études.

L'élaboration du programme et les études de définition conduisent à des solutions alternatives dont les coûts doivent être déterminés.

Parmi les choix qui en découlent, une solution sera probablement la base des études de projet. Tout doit donc être mis en œuvre pour produire des solutions aussi réalistes que possibles.

A cause des incertitudes inhérentes aux estimations initiales, il est souvent souhaitable de retenir plus qu'une solution, éliminant les options à mesure que l'estimation s'affine. Les coûts des études et de la construction (production, transport, placement) sont estimés plus précisément que les coûts de maintenance et de réparation car ces derniers sont plus incertains. En évaluant les options, leur coût minimal doit être considéré, en y ajoutant les risques potentiels liés aux erreurs dans les estimations à cette étape et à la précision des



diverses estimations. A ce niveau, il est souvent souhaitable de privilégier un coût d'investissement légèrement supérieur et un coût de maintenance inférieur.

Au début des études, les estimations basées sur des prix historiques sont suffisantes pour définir un coût approximatif. Une approche rudimentaire consiste à prendre les quantités principales, de les estimer séparément et d'ajouter une marge pour couvrir le cout des aspects mineurs restants. Le problème avec cette approche est que les prix peuvent être sommaires ou spécifiques au site et donc difficiles à actualiser ou à adapter. Une meilleure précision peut être obtenue en utilisant des techniques analytiques d'estimation dès que les caractéristiques principales du projet sont connues.

Pendant la phase d'appel d'offres, les différentes entreprises de travaux vont utiliser le même processus d'estimation du coût, en tenant compte de leur propre expérience, en optimisant l'utilisation d'équipements spécialisés qu'il possèdent ou qu'il peuvent mobiliser et en incluant les marges pour la supervision, les frais généraux, les marges de profit et le risque pour arriver au montant total de l'offre. Différentes formes de prix peuvent être adoptées, telles qu'un prix unitaire appliqué sur des quantités mises en œuvre ou un forfait pour une activité planifiée. Des primes pour une exécution rapide et le respect du budget peuvent aussi être convenues entre le maître d'ouvrage et l'entreprise.

Ce processus est différent dans le cas d'une carrière dédiée et lorsque la conception est adaptée au gisement en matériau.

II-1-4-Recherche, production et transport d'enrochement

Une part significative du coût d'un ouvrage en enrochement est associée à la recherche, la production et le transport d'enrochement.

Recherche et production

Un des premiers enjeux est la disponibilité d'enrochement de taille, de quantité, de durabilité suffisante. En effet, la taille maximale d'enrochement pouvant être produit est bornée quelle que soit la carrière. Lorsqu'une carrière locale doit être utilisée, la conception de l'ouvrage doit refléter la taille, la qualité et la quantité des enrochements disponibles, lorsque cela est possible (appelé « conception basée sur la ressource »). Les carrières locales sont souvent préférables parce qu'il peut être difficile d'obtenir des enrochements de taille ou de qualité supérieure d'une autre carrière à cause du transport et des facteurs économiques et environnementaux. La sélection d'un gisement local d'enrochement peut contraindre à utiliser des enrochements de qualité inférieure (moins durable). La conception et la planification de la



maintenance de l'ouvrage doivent en tenir compte et cet aspect doit être évalué en termes de coût sur le cycle de vie du projet.

Transport

Le transport au site- par exemple par voie d'eau ou par voie terrestre- peut imposer le lieu d'approvisionnement en enrochement. Le choix du mode de transport est influencé par la méthode préférentielle de construction, l'accessibilité (au chantier et à la carrière), les contraintes et les coûts environnementaux, en reconnaissant que le coût final est influencé par chacun de ces facteurs. Les lois de concurrence peuvent aussi être impliquées, par exemple la disponibilité au niveau régional d'un petit nombre de barges servant à tous les projets en cours.

II-1-5-Construction

L'opération la plus couteuse sur le cycle de vie d'un ouvrage est en général sa construction. Son coût est divisé en trois types de coûts, dont l'importance variera suivant la nature de l'ouvrage, le type de contrat et les équipements utilisés. Ce dernier est important lorsque des équipements flottants sont utilisés pour la construction d'une grande partie de l'ouvrage, d'autant plus que ceux-ci risquent d'être uniques. Il y aura donc des problèmes de disponibilité et d'adaptation précise à la tâche. Les coûts peuvent donc être divisés selon les trois catégories suivantes :

Les coûts fixes. Ceux-ci incluent la mobilisation, la démobilisation et remobilisation des installations et des équipements de chantier ; la réalisation et la démolition des éléments du chantier et des ouvrages ou accès temporaires ; les assurances, les essais, l'ouverture et la fermeture de carrières dédiées ou le site de fabrication des blocs préfabriqués, la fabrication des moules ; les clôtures ou les barrières temporaires pour séparer l'espace public du chantier ou pour des raisons d'hygiène et de sécurité ; les protections individuelles des ouvriers, les zones de visite pour le public et les panneaux d'information, les fermetures ou les déviations de routes ou de chemins piétonniers ; les relations avec les autorités de pêche, l'installation de lieu de mouillage et d'amarrage et des appontements temporaires ; et le nettoyage final du site. De nombreuses entreprises vont inclure des marges pour tenir compte du risque qu'elles doivent anticiper dans le contrat (durée d'immobilisation due aux intempéries, tassements, etc.) et de toute inflation.

Les coûts dépendants de la durée. Cette catégorie comprend la supervision du chantier et les équipements (particulièrement les équipements qui ne sont pas utilisés tout le temps, mais qui doivent rester constamment sur le chantier tels que les pelles, les grues) et la location des



bureaux ; le contrôle du public aux interfaces chantier/public, la mise à jour des panneaux d'information et la maintenance des équipements et ouvrages cités au-dessus ;

Les coûts ré évaluable. Ces coûts sont directement reliés à l'avancement des travaux, à la quantité de matériaux utilisés (en tenant compte des transformations et des déchets) et à la main-d'œuvre aux équipements nécessaires à la fabrication, la manutention, la préparation et la mise en œuvre des matériaux.

Certaines dépenses ne vont pas toujours être classées dans la même catégorie, telles que les plongeurs (qui peuvent être employés pour un coût minimal à la commande), les opérations de forage et d'abattage, les opérations de contrôle qualité, le remplissage et la ré préparation des moules, les coûts liés à des activités partielles ou discontinues, le travail à la marée et phase. La méthode de chiffrage de ces dépenses dépendra de la sensibilité du coût unitaire aux changements de quantité. (CIRIA, 1991) [17]

II-1-6-Maintenance et réparation

Pendant la période de service d'un ouvrage, certaines dépenses sont récurrentes, dont les suivantes :

- Surveillance et auscultation de l'ouvrage et de l'environnement proche (p. ex. le niveau d'une plage) ;
- Evaluation de l'état et des performances ;
- Réparation ;
- Réhabilitation et remplacement.

Le niveau de complétude, et donc le coût, des opérations ci-dessus dépendant de facteurs comme la fréquence et la sévérité des tempêtes et les désordres accidentels. Leur coût est aussi influencé par les décisions prises lors de la conception de l'ouvrage sur la durée de vie, le niveau de dommage admissible et la fréquence de surveillance. Une dépense dont la probabilité d'occurrence dans l'année peut être estimée peut être incluse comme le produit du montant de la dépense et de sa probabilité d'occurrence.

II-1-7-Démolition

Dans certaines circonstances, il pourra être envisagé de mettre un ouvrage hors service et de le démolir. Le coût de cette opération peut inclure :

- Les équipements ;



- L'enlèvement des matériaux du site ;
- Une mise en décharge ou une réutilisation des matériaux ;
- Le traitement des matériaux pollués.

Dans cette situation, ces dépenses doivent être prises en compte à la conception et vont probablement influencer le choix de dimensionnement. [17]

II-3-Considérations environnementales

Les ouvrages en enrochement peuvent potentiellement avoir des impacts importants sur l'environnement et ceux-ci doivent être considérés à chaque phase du projet. Cette section met en avant les problématiques environnementales qui apparaissent pendant la planification, la conception ou la construction d'un ouvrage en enrochement. Les problématiques environnementales ne sont pas à évaluer seulement dans la zone de chantier mais aussi sur le site d'extraction et de stockage des matériaux et sur les trajets empreintés lors du transport. Elles s'appliquent aussi lorsque des modifications des conditions de site peuvent provoquer des désordres sur les habitats ou causer des changements d'activité.

Il y a une grande quantité de documents techniques et réglementaires traitant de l'évaluation environnementale du projet. Cette section traite des considérations environnementales spécifiques à l'utilisation des enrochements en site aquatique et identifie le type d'information qui peut être utilisé pour l'évaluation environnementale de ces ouvrages.

II-3-1-Utilisation durable de l'enrochement comme matériau de construction

Les matériaux alternatifs devraient être évalués suivant leur performance environnementale plutôt que simplement utilisés parce que préférés à priori. Le rapport de Bruntland (WCED, 1987) encourage l'utilisation accrue de matériaux provenant de sources alternatives pour répondre aux besoins de la construction nécessitant des granulats et des enrochements naturels. Ceci inclut les matériaux secondaires, les dérivés et les déchets de l'industrie.

Le principe d'industrie de la construction durable nécessite :

- Une utilisation efficace des matériaux ;
- Une minimisation de la production de déchets ;
- Le recyclage des déchets.



Des ouvrages durables en enrochement doivent viser à réduire la consommation d'énergie et de matériaux, le transport et la production de déchets. Pour chaque option de conception, utilisant de l'enrochement naturel ou des matériaux alternatifs, l'extraction, le transport, la mise en œuvre, l'exploitation et le démantèlement doivent être étudiés sur la durée du cycle de vie de l'ouvrage. Des critères portant sur l'énergie, les déchets, les matières premières et la perception humaine doivent être évalués pour classer les options par ordre de préférence. [18] et [19].

II-3-2-Evaluation des impacts environnementaux

De nombreuses questions environnementales doivent être résolues au cours de la planification, de la conception, de la construction et de l'exploitation de l'ouvrage. Beaucoup de celles-ci sont communes à tous les aménagements construits en environnement maritime ou fluvial, et comprennent les effets sur l'environnement physique du site (géomorphologie, paysage) et les effets sur les phénomènes physiques (houle, courants). Souvent ces impacts sont en fait la fonction première de l'ouvrage. Les constructions peuvent affecter l'écologie, la fonction sociale, les loisirs, les aménagements, les perceptions humaines, la qualité de l'air et de l'eau, etc.

Tous ces facteurs nécessitent d'être considérés comme faisant partie du projet.

Lors de la phase « études », plusieurs opportunités se présentent pour réduire les impacts environnementaux. Celles-ci comprennent la sélection et la spécification des matériaux et l'intégration des considérations environnementales dans la comparaison des options.

Les ouvrages en enrochement sont généralement considérés comme moins réfléchissants vis-à-vis de la houle que les ouvrages verticaux. Ceci peut être important lorsque l'affouillement du fond marin ou du lit de la rivière est un problème. Lorsqu'un habitat physique au voisinage de l'ouvrage est protégé par la loi, les impacts négatifs sur cet habitat physique doivent être évités.

Le transport des matériaux de construction peut être le plus important problème environnemental. Une liste hiérarchisée des options d'approvisionnement des matériaux à considérer lors des études est donnée ci-dessous.

- 1- Utilisation de matériaux adéquats disponibles sur le site provenant d'un aménagement antérieur ou d'un ouvrage existant.
- 2- Utilisation de matériaux récupérés localement ou recyclés remplissant les fonctions identifiées dans l'analyse fonctionnelle.



- 3- Utilisation de matériaux récupérés ou recyclés provenant de plus loin mais qui peuvent être acheminés par la voie d'eau ou par train ou utilisation de matériaux naturels extraits localement.
- 4- Utilisation de matériaux récupérés ou recyclés lointains transportés par la route ou utilisation de matériaux naturels lointains transportés principalement par la voie d'eau ou par train.
- 5- Utilisation de matériaux primaires lointains transportés par la route.

En évitant une sur-spécification des matériaux lors de la phase de conception il est possible de réduire les déchets et d'encourager le recyclage des matériaux. Quelques organisations ont d'ores et déjà mis en place des plans de gestion des déchets de chantier qui analysent les déchets qui vont probablement être produits sur le chantier et réduisent ainsi ce qui est mis en décharge. Lorsque cela est possible, les facteurs environnementaux doivent être inclus dans l'analyse coûts-bénéfices. Ceci peut être réalisé en utilisant une évaluation des imprévus, ce qui nécessite de demander aux intéressés combien ils seraient prêts à payer pour des services environnementaux spécifiques ou, alternativement, de quantifier la compensation qu'ils seraient prêts à accepter contre l'abandon de services environnementaux spécifiques.

Le dossier environnemental représente une partie importante de la demande d'autorisation de travaux. L'étude d'impact aborde les problématiques telles que les impacts sur les habitats protégés et la réduction de la surface des habitats marins. L'étude d'impact fait partie à part entière du processus de consultation du public.

Lorsque l'utilisation d'engrochement naturel est envisagée, les questions environnementales suivantes se posent pendant la construction :

- L'approvisionnement des engrochements ;
- Leur transport ;
- Leur mise en œuvre.

L'engrochement naturel est généralement extrait par forages puis tirs d'abattage ou par découpage. Le matériau naturel approprié à cette utilisation particulière est sélectionné et traité par différentes méthodes de tri et par découpage du bloc rocheux. Les impacts environnementaux comprennent :

- Le bruit et les vibrations dus aux tirs, au concassage et au tri/criblage ;



- Le dérangement et la destruction d'habitat ;
- La modification et l'enlèvement de la terre arable ;
- Les émissions de particules dans l'air et dans l'eau ;
- L'interruption de l'écoulement des eaux de surface et souterraines ;
- Le dérangement du trafic local ;
- Les émissions de dioxyde de carbone dues à la combustion des énergies fossiles ;
- La consommation d'énergie pendant le criblage, le tri, le concassage, la foration et le transport ;
- La production de déchets solides ;
- Les impacts visuels.

Le transport de matériaux de construction par voie d'eau peut être possible dans les rivières navigables et les canaux, mais pour beaucoup de rivières et de petits cours d'eau le seul moyen de transport pratique est la route.

Les méthodes de transport itinéraires doivent être choisies en prenant en compte la vulnérabilité de l'environnement.

Le transport ferroviaire a une capacité importante et un impact limité sur l'environnement, permettant le transport de grande quantité d'enrochement. Suivant la proximité de la carrière et du chantier au réseau ferré, des manipulations additionnelles peuvent être nécessaires ainsi que du transport routier dans certains cas.

La livraison des enrochements peut nuire aux riverains, particulièrement si elle a lieu la nuit, résultat d'un travail 24 heures sur 24. Le déchargement nécessite souvent des équipements lourds, inévitablement bruyants. Leurs alarmes de recul sont souvent considérées comme la source de bruit la plus dérangeante due à leur tonalité et à leur volume. A moins de trouver une méthode sûre pour permettre leur débranchement sans risque, les travaux de nuit risquent d'être dérangeant s'ils ont lieu près de quartiers résidentiels. Les approches pour réduire les nuisances peuvent être les suivantes :

- Effectuer des livraisons près des habitations en journée, avec des livraisons de nuit sur les autres parties du chantier ;



- Mettre en place des dispositifs anti-bruit temporaires entre les habitations et le chantier ;
- Sur les lieux touristiques, planifier la livraison en dehors des mois d'affluence.

Les impacts environnementaux lors de la mise en place des enrochements sont les suivants :

- Nuisance sonore ;
- Impacts sur l'environnement du site, perturbations d'habitats et des sédiments dues aux excavations ;
- Impacts visuels et perturbations des habitats au niveau des zones de stockage des enrochements ;
- Consommation d'énergie des machines ;
- Perturbation de la faune locale telle que les oiseaux, en réduisant la zone de nourrissage et les perchoirs.

Les bénéfices environnementaux de l'utilisation d'enrochement proviennent du peu de déchets produits et des faibles risques de pollution de l'air de l'eau comparativement à l'utilisation de béton prêt à l'emploi ou gâché sur place. L'excédent d'enrochement peut être ajouté à l'ouvrage ou stocké pour subvenir aux besoins des futures opérations de maintenances. [20] et [21]

II-3-3-Les opportunités pour l'amélioration de l'environnement

Les ouvrages en enrochement nécessitent généralement une maintenance, car ils sont situés dans un environnement aquatique dynamique. Les enrochements peuvent donc être déplacés, usés par frottement ou fracturés. Des équipements lourds peuvent être nécessaires pour la maintenance, bien que les impacts environnementaux associés soient généralement limités.

A moins d'être enfouis sous les matériaux existants ou sous l'eau, les ouvrages en enrochement peuvent avoir un impact significatif sur le paysage et dans le champ de vision. Ce problème est souvent soulevé quand de tels ouvrages sont proposés. Néanmoins, il est possible de mettre en avant que les ouvrages en bois tels que les épis ont un impact similaire, mais après de longues périodes d'utilisation, ces ouvrages ont été acceptés. Au cours du temps, il pourrait en être de même pour les ouvrages en enrochement.



Les effets sur les équipements de loisir sont une autre source de problèmes. Les ouvrages en enrochement peuvent retenir les plantes aquatiques et les déchets, ce qui n'est pas attrayant et peut provoquer des problèmes d'odeurs lorsqu'ils se décomposent.

Ceci est un moindre problème lorsque les vides sont largement remplis (p.ex. avec du sable) ou dans les zones exposées où les vides sont régulièrement nettoyés par la houle et les courants. Ceci peut-être plus embarrassant dans les zones qui sont déjà sujettes à l'accumulation de végétation ou de déchets, dans ce cas un accord doit être trouvé avec le maître d'ouvrage ou l'autorité locale pour que les ouvrages en enrochement soient nettoyés régulièrement.

Les ouvrages en enrochement sont potentiellement dangereux pour le public, car des personnes risquent de glisser ou de tomber. Des accès piétons le long de l'ouvrage en enrochement peuvent être difficiles à mettre en place. Dans certains cas il peut être nécessaire de maintenir un accès piéton à un tronçon de littoral ou de berge.

Néanmoins, même si certaines personnes considèrent positivement l'accès le long de l'ouvrage, il peut être plus économique et plus sûr d'en empêcher l'accès.

Les impacts environnementaux potentiels associés à la phase de service d'un ouvrage comprennent aussi :

- La perte directe ou le recouvrement d'habitats côtiers sous l'emprise de l'ouvrage ;
- L'intrusion dans le champ de vision et l'impact sur le paysage (p.ex. vue sur la mer des maisons) ;
- Les impacts sur les loisirs (incluant les changements des accès au littoral et la perte de zones sèches et peu profondes pour les jeux d'enfants) ;
- La sécurité des ouvrages en enrochement ;
- Les besoins d'un suivi écologique.

Les problématiques environnementales à considérer lors de la phase de démolition d'un ouvrage en enrochement sont sensiblement les mêmes que celles des autres phases de la vie de l'ouvrage. Un avantage souvent mis en avant est que les ouvrages en enrochement sont assez simples à déconstruire et que les enrochements peuvent être réutilisés ou recyclés directement dans d'autres ouvrages. Même si les enrochements ont été sévèrement usés et dégradés par l'environnement marin, ils peuvent toujours être recyclés en granulats naturels.



Les aspects environnementaux à considérer pendant la phase de démolition sont les suivants :

- La destruction des habitats potentiels dans les ouvrages en enrochement ;
- La réactivation d'un ancien apport en sédiment et recréation d'habitats côtiers naturels ;
- Les rejets accidentels pendant la démolition, ou échec involontaire dans l'enlèvement de l'ensemble de l'ouvrage ;
- La modification du paysage à nouveau ;
- La présence de servitudes sur ou dans l'ouvrage.

La conception de l'ouvrage doit avoir pour but d'imiter les environnements rocheux, comme les littoraux et les lits de rivière, tel qu'ils sont dans la nature. L'ouvrage doit comporter des tailles d'enrochement et de vides variées, des formes et des orientations irrégulières afin de fournir une variété de micro-habitats pour les petites espèces mobiles et sédentaires ainsi qu'aux plus grandes espèces. Pour les ouvrages en zone côtière, les caractéristiques du littoral rocheux doivent être imitées en créant des vasques et des cavités pour former des flaques, des saillies pour créer des surplombs et en plaçant des blocs isolés pour créer des zones d'affouillement local. Le coût et la mise en œuvre de telles mesures doivent être considérés en même temps que les aspects de conception.

II-3-4-Vue d'ensemble du processus de l'Etude d'Impact sur l'Environnement

Les projets doivent respecter un grand nombre d'exigences légales. Pour beaucoup de projets, il est nécessaire de préparer une étude d'impact avant que le projet puisse se poursuivre. L'EIE est un outil pour estimer les impacts de la construction et de la phase opérationnelle. Pour les sites où la sauvegarde de la nature est primordiales ou les sites Ramsar affectés par les travaux, les exigences définies par les directives européennes sur les habitats doivent être respectées. Certaines autorités réclament des études destinées à assurer l'amélioration de la biodiversité, particulièrement concernant les habitats et espèces protégés.

La procédure de l'étude d'impact a les avantages suivants pour le maître d'ouvrage :

- L'identification des impacts environnementaux pendant la phase de définition et d'études de projet conduira à une incorporation économique des mesures environnementales pour réduire les impacts négatifs ;



- La communication et la concertation, qui font partie intégrante de l'évaluation, réduiront le risque d'un refus inopiné du projet au dernier moment ;
- Les raisons probables d'objection au projet seront identifiées suffisamment tôt pour permettre de traiter les questions sensibles et de diminuer les retards sur le projet ;
- L'opportunité pour le public d'être consulté peut conduire à une meilleure acceptation du projet par les personnes affectées ;
- Les impacts environnementaux négatifs imprévus qui peuvent engendrer des conséquences financières significatives seront minimisés ;
- L'établissement des autorisations formelles ou des consentements nécessaires peut faciliter certains aspects de l'évolution du projet.

Le résultat de l'EIE est normalement présenté sous forme d'un dossier d'étude d'impact. Pour les études réglementairement obligatoires, ce dossier va former la partie principale de l'autorisation de travaux.

La compilation des informations sur les impacts potentiels sur l'environnement comporte quatre étapes :

- **La définition du champ de l'étude**, pour identifier les problématiques prioritaires à une évaluation détaillée ;
- **L'analyse de l'état initial**, pour définir l'environnement existant ;
- La projection de l'aménagement proposé sur l'environnement existant et **l'évaluation des impacts probables** ;
- L'investigation de **mesures de réduction des impacts** qui ont été identifiées comme négatives, et une incorporation possible de ces mesures dans la conception. [22], [23], [21], [24], [25], [26], [27]

II-4-Considérations sociales

Les travaux d'aménagement sont en général réalisés au bénéfice de la société. Les aspects sociaux qu'il est nécessaire de considérer pendant la phase projet sont les suivants :

- L'hygiène et la sécurité ;
- Les impacts sociaux de la construction et de l'exploitation de l'aménagement ;



- L'implication des parties concernées.

II-4-1-L'hygiène et la sécurité

Les travaux en milieu aquatique sont souvent dangereux de part la nature de l'environnement. L'environnement côtier ou marin peut être très instable, et parfois imprévisible, avec des changements soudains et importants de vent, de houle et de niveaux d'eau. Les rivières peuvent également être difficiles, sujettes aux crues éclair et aux débits saisonniers importants. Les risques pour les travaux, les équipements et les personnels ne doivent pas être sous-estimés et doivent être considérés pendant la planification, les études et la construction.

Les risques potentiels pour la sécurité dans un environnement dynamique incluant les changements dans les conditions de sol (au fond de la rivière ou de la mer), les accès et la zone de chantier. La planification du chantier et la conception de l'ouvrage doivent avoir pour but d'éviter ces dangers. La protection des personnels est une exigence fondamentale. Le maître d'œuvre doit s'interroger sur la méthode de construction de l'ouvrage, afin de s'assurer que le dimensionnement permet d'adopter des opérations de construction sûres.

La protection du public et/ou des futurs usagers de l'aménagement est importante. Les ouvrages en enrochement dans les zones accessibles au public sont souvent dangereux. Par exemple, les enfants peuvent se trouver coincés dans les vides de la carapace ou blessés voire écrasés par le mouvement des blocs d'enrochement instables.

De tels problèmes doivent être considérés dès le début de la conception, peut être en exigeant une forme d'enrochement adéquate pour s'assurer que l'imbrication est correcte.

Une signalisation appropriée peut être utilisée pour informer le public des dangers et attirer son attention sur les rôles de l'ouvrage. Il est essentiel de supprimer ou de réduire les risques à la source, tôt dans la phase de conception. [28]

II-4-2-La construction

Les travaux de construction peuvent perturber et gêner les riverains. Les contraintes et les opportunités doivent être déterminées en associant le public et identifiées dès la phase projet. Lorsque cela est possible, les contraintes doivent être surmontées dès la phase de conception. Les points à résoudre sont les suivants :

- Les opportunités d'emplois locaux ;
- Les plans d'accès au chantier ;



- Des heures de travail réduites ;
- Les méthodes de construction spécifiques ;
- L'accès du public sur et autour des ouvrages ;
- La valeur esthétique ou d'agrément potentiel.

II-4-3-L'engagement des parties concernées

Lorsque les parties concernées sont consultées dès le début, une conception plus acceptée peut être produite et des problèmes évités. Il peut y avoir une grande différence entre ce que le concepteur conçoit comme étant un problème et la perception des parties concernées. Dans de nombreux cas, la prise en compte des besoins locaux a un impact faible sur le coût ou la construction de l'ouvrage, mais peut améliorer la qualité de service de l'ouvrage.

L'engagement dès le début des parties concernées aide à informer les personnes affectées par le processus technique- sur les motivations et raisons techniques qui conduisent à certaines décisions, par exemple. Cette compréhension peut résulter en une acceptabilité des méthodes de construction choisies malgré les perturbations à court terme.

Dans certaines parties du monde, l'utilisation de matériaux locaux et de main-d'œuvre locale apporte des bénéfices importants pour la population en termes de revenus et d'emplois. Des conceptions différentes peuvent être à prévoir dans ces circonstances. [29] et [30]



III-Caractéristiques et classification des cours d'eau

III-1- Caractéristiques d'un cours d'eau

Les formes et caractéristiques physiques d'un cours d'eau naturel sont le résultat d'un état d'équilibre entre les capacités de transport de l'eau et des sédiments et les apports hydrologiques et sédimentaires. Un cours d'eau avec son système de plaine de débordement sont en équilibre lorsque les caractéristiques physiques, couplées avec la pente et le débit, permettent d'offrir les vitesses requises pour le transport des sédiments et le stockage des charges sédimentaires générées par le bassin versant. Les modifications à cet équilibre peuvent être induites par des événements climatiques, hydrologiques ou géologiques; elles peuvent également être le résultat d'une intervention humaine comme la mise en place d'un barrage, la diversion d'une partie des débits, l'extraction minière ou l'urbanisation du bassin versant.

$$Q_s D \sim Q S \quad (*1)$$

Où Q_s est le débit sédimentaire, D est le diamètre moyen des sédiments, Q est le débit et S est la pente du cours d'eau. La relation donnée par l'équation 1 indique qu'il existe une proportionnalité entre les différents paramètres et qu'on peut s'attendre à un réajustement si un ou l'autre des paramètres est affecté. La relation ne fournit pas cependant d'information directe quant aux caractéristiques physiques des cours d'eau ni relativement aux seuils critiques qui entraîneront ou non des changements.

Un premier paramètre pour l'évaluation des cours d'eau est sa position dans le système hydrographique du bassin versant. Cette position fournit en effet une première indication des caractéristiques générales du cours d'eau, incluant sa pente longitudinale ainsi que les dimensions du canal.

Les autres paramètres à considérer pour l'évaluation d'un cours d'eau comprennent les dimensions du canal (caractéristiques physiques), le pattern en plan (caractéristiques et localisation des méandres) ainsi que d'autres caractéristiques comme la forme du lit, la composition granulométrique du lit et des berges ainsi que les alternances de bassins d'eau calme (fosses) et de tronçons avec un écoulement plus rapide, séparés par des seuils. La présence de fosses, de seuils et de tronçons plus rapides, avec également des secteurs d'érosion locale aux bas des berges, sont des éléments importants pour assurer et maintenir des habitats sains.



Tel que mentionné précédemment, un paramètre fondamental ayant un impact significatif sur les caractéristiques du cours d'eau est le débit de plein bord. Ce débit est celui qui transporte la majorité de la charge sédimentaire et qui contribue donc à l'établissement de la forme et des caractéristiques du cours d'eau. Les débits plus importants pourront dans certains cas avoir accès à une plaine de débordement plus large. Historiquement, on a tenté d'établir une relation entre les débits de plein bord et la stabilité des cours d'eau.

Puisqu'on estimait que ce débit à pleins bords était représentatif du débit régissant la forme géomorphologique des cours d'eau, on jugeait qu'un critère de contrôle pour l'érosion permettant de maintenir les débits avant et après développement pour cette période de retour serait adéquat. [31]

III-2-Classification des cours d'eau

Les modifications aux cours d'eau que l'urbanisation entraînera pourront être variables en fonction des types de cours d'eau et il devient donc important de pouvoir les caractériser et les classer adéquatement. Un système de classification détaillé a été développé par Rosgen (1994, 1996) et peut fournir un cadre d'analyse très utile.

Ce système, classe les cours d'eau selon leur degré d'encaissement, le rapport largeur/profondeur, la sinuosité, la pente ainsi que les matériaux qu'on retrouve dans le canal principal.

**Sinuosité* : c'est un indice résultant de la quantité de méandres que présente le cours d'eau. Il se calcule par le rapport de la longueur totale du cours d'eau entre 2 points sur la distance séparant les deux points.

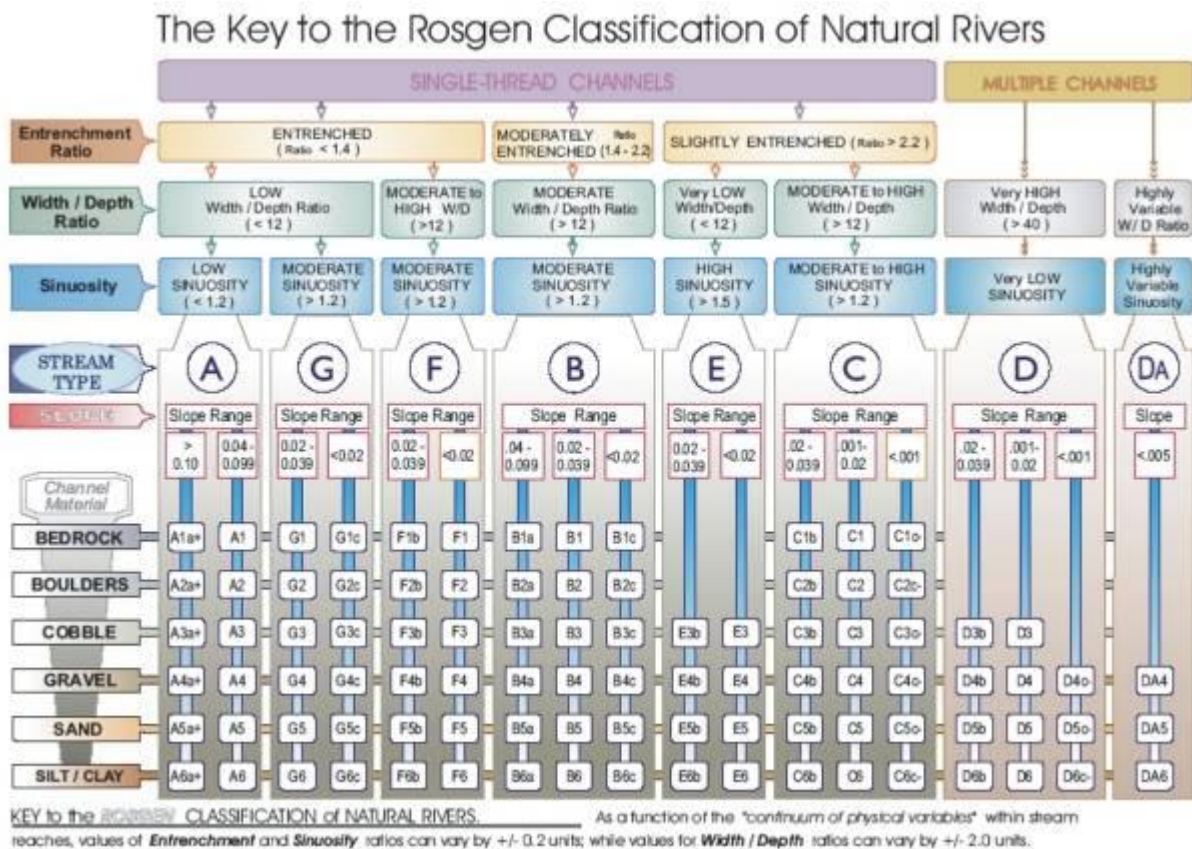


Figure 3: La clé de classification de Rosgen (1994) pour les cours d'eau naturels

Le processus de classification commence par le choix entre les entrées « cours d'eau à chenal unique » et « cours d'eau à chenaux multiples ». En descendant dans la clé de classification, il est nécessaire de définir le rapport d'encastement. La définition du rapport d'encastement donnée par l'auteur est « la largeur de la surface soumise aux crues divisée par la largeur du chenal à pleins bords » (ROSGEN, 1994). La largeur de la surface soumise aux crues est définie par l'auteur comme « la largeur mesurée pour une hauteur égale à deux fois la profondeur maximale à pleins bords » (ROSGEN, 1994). Dans la suite de la classification, le critère suivant est le rapport largeur/profondeur. Ce rapport est calculé en divisant la largeur à pleins bords par la profondeur moyenne du chenal.

Pour donner une continuité à la classification, afin d'arriver à un des 94 sous-types de cours d'eau proposés par Rosgen (1994), il est nécessaire d'établir la pente du profil en long du tronçon et ensuite le type de matériel du chenal, du fait que ces deux variables interfèrent directement avec le style fluvial (ROSGEN, 1994).

Enfin, la détermination de la sinuosité est la dernière étape pour arriver à un des huit types de chenaux. Le type Aa+, le type de chenal n° 9 qui n'est pas représenté dans la clé de classification, existe pour les chenaux à très forte pente, très encastés, avec une charge sédimentaire formée de débris.

Le système de classification proposé par Rosgen (1994) est très vaste. L'auteur discute son applicabilité dans plusieurs domaines de la science, comme par exemple dans les recherches sur l'évolution des systèmes fluviaux, les études hydro-sédimentaires et les travaux de restauration et récupération d'habitats. Ces dernières années, cette méthodologie a gagné en notoriété et, malgré sa popularité, elle a été soumise à quelques dures critiques de la part de Miller et Ritter (1996). Selon ces deux auteurs, la classification proposée par Rosgen (1994) présente une terminologie sans consistance et pas très bien définie, et utilise de façon très discutable des extrapolations de données entre des cours d'eau similaires. La classification en question utilise la surface soumise aux crues comme un des facteurs de contrôle, ce qui, selon Miller et Ritter (1996), n'a aucune signification géomorphologique pour certains cours d'eau, comme par exemple les cours d'eau des milieux désertiques. L'absence de prise en considération de l'histoire des cours d'eau, quant au régime climatique et au régime hydrologique, et l'inconsistance des modèles évolutifs présentés par Rosgen (1994) ont été aussi beaucoup critiquées par Miller et Ritter (1996).

Tableau 1: Description des grands types de chenaux, selon la classification de Rosgen (1994)

<i>Type de</i>	<i>Description Générale</i>
Chenal	
<i>Aa+</i>	<i>Cours d'eau à très forte pente, très encaissé, transport de débris</i>
<i>A</i>	<i>Forte pente, encaissement, rapides, chenaux à seuils et mouilles. Haute énergie / transport de débris associé avec des sols de dépôts. Très stables si le bedrock ou les blocs dominant dans le chenal.</i>
<i>B</i>	<i>Modérément encaissé, gradient modéré, chenal dominé par seuils avec mouilles espacées de façon non fréquente. Style et profil très stables. Berges stables.</i>
<i>C</i>	<i>Faible gradient, méandres, bancs dans les points de courbure des méandres, seuils et mouilles, chenaux alluviaux avec plaines d'inondation larges et bien définies.</i>
<i>D</i>	<i>Chenal en tresses avec bancs longitudinaux et transversaux. Chenal très large avec berges érodables.</i>
<i>DA</i>	<i>Chenal anastomosé (chenaux multiples), étroit et profond, avec plaine étendue et bien végétalisée associée à des terres humides. Relief très souple avec sinuosité fortement variable. Berges stables.</i>
<i>E</i>	<i>Faible gradient, chenaux à méandres avec seuils et mouilles, faible rapport</i>



largeur-profondeur et faible dépôt. Très efficient et stable. Fort rapport de largeur des méandres.

F Chenal à méandres encaissés, avec seuils et mouilles, faible gradient et fort rapport largeur-profondeur.

G « Ravine » encaissée avec seuils et mouilles et faible rapport largeur-profondeur, gradient modéré.

Le premier paramètre utilisé pour identifier les classes de cours d'eau est la pente. Le tableau 2 donne l'établissement des classes selon ce paramètre. Un deuxième paramètre est la sinuosité, qui est définie comme étant le rapport de la longueur du canal le long de sa ligne de centre à la longueur de la vallée mesurée le long du centre des méandres ou de la vallée. La sinuosité produit de la résistance à l'écoulement et altère la pente effective du canal. Le tableau 3 définit les catégories selon ce paramètre.

Tableau 2: Classes de cours d'eau en fonction de la pente (Rosgen, 1996)

Types de cours d'eau	Pente
A	0,04 – 0,099
B	0,02 – 0,039
C	< 0,02
D	< 0,02
Da	< 0,005
E	< 0,02
F	< 0,02
G	0,02 – 0,039

Tableau 3: Classes de cours d'eau en fonction de la sinuosité (Rosgen, 1996)

Types de cours d'eau	Rapport de sinuosité
Aa	1,0 – 1,1
A	1,0 – 1,2
B	> 1,2
C	< 1,4
D	Canaux multiples
Da	Canaux multiples
E	> 1,5
F	> 1,4
G	> 1,2

Un autre paramètre pour classer les cours d'eau est le rapport largeur/profondeur (la largeur étant mesurée au débit de plein bord et la profondeur étant la profondeur moyenne de la section pour ce même débit).

Ce ratio dépend en grande partie de la résistance des matériaux en place, de leur capacité de maintenir une pente et de résister à l'érosion. Des matériaux cohésifs vont par exemple produire des canaux plus étroits et profonds. Le tableau 4 donne les classes par rapport à ce paramètre.

**Tableau 4: Classes de cours d'eau en fonction du ratio largeur/profondeur
(Rosgen, 1996)**

Types de cours d'eau	Rapport largeur/profondeur
Aa	< 12,0
A	< 12,0
B	< 12,0
C	< 12,0
D	> 40,0
Da	< 40,0
E	< 12,0
F	< 12,0
G	< 12,0

Les dimensions des matériaux en place sur le lit et les berges sont le quatrième paramètre pour la classification, avec comme indice la dimension médiane (D50). Ce facteur est aussi associé à la résistance du canal à l'érosion et a également une influence sur la résistance à l'écoulement. Un autre facteur de classement est le ratio de confinement, qui est défini comme le ratio de la largeur de la plaine de débordement à la largeur à pleins bords du canal. La largeur pour la plaine de débordement est définie comme étant la largeur correspondant à deux fois la profondeur d'eau maximale du canal.

Le tableau 5 donne les types en fonction de ce paramètre.

Tableau 5: Classes de cours d'eau en fonction du ratio de confinement (Rosgen, 1996)

Types de cours d'eau	Rapport de confinement
A	< 1,4
B	1,4 – 2,2
C	> 2,2
D	n/a
E	> 2,2
F	< 1,4

Finalement, un sixième paramètre pour la classification de Rosgen est une mesure du relief dans le bassin versant : pentes générales, géologie de surface et forme générale du paysage. Ce paramètre est un indicateur pour la stabilité des pentes et la production de sédiments dans le bassin versant. Le tableau 6 donne les classes relativement à ce paramètre. [32]

Tableau 6: Classes de cours d'eau en fonction de la pente (Rosgen, 1996)

Type	Description
A	Pentes fortes, relief accidenté, stabilité des pentes diminuant de la classe 1 à 5 avec la diminution de la dimension des sédiments
B	Pentes modérées, relief modérément accidenté, stabilité des pentes diminuant de la classe 1 à 5 avec la diminution de la dimension des sédiments
C	Vallées larges, sols alluviaux

IV-Présentation du logiciel HEC RAS

Le logiciel HEC-RAS est un logiciel de simulation de l'hydraulique dans les rivières et canaux développé par le corps des ingénieurs de l'armée américaine. Il permet d'évaluer les débits et hauteurs d'eau sur l'ensemble des sections d'une rivière. Il utilise des équations d'hydraulique à surface libre (Saint-Venant 1D, Manning-Strickler...) et des modèles pour les seuils, le frottement etc.

IV-1-Description du modèle

Dans le cadre du modèle hydraulique nous avons utilisé le logiciel HEC-RAS. Ce logiciel permet de modéliser les débits et les hauteurs d'eau dans une rivière. La première étape consiste à modéliser la rivière. Le modèle de la rivière nous a été fourni par les enseignants. Ce modèle se constitue d'une succession de sections dans lesquelles on calcule le débit et la hauteur d'eau: elles correspondent au maillage de la rivière.

Ces sections ont été mesurées et sont donc assez fidèles à la réalité. On peut y observer le lit majeur et le lit mineur ainsi que l'érosion due aux lacets de la rivière.

Le logiciel HEC-RAS nous permet d'exécuter la modélisation hydraulique des cours d'eau naturels ou des canaux afin de reconstruire le profil d'eau et les caractéristiques hydrauliques (niveau, vitesse, etc.) dans toutes les sections.

La modélisation hydraulique peut être effectuée, au besoin, dans un régime d'écoulement permanent ou variable et avec un schéma unidimensionnel ou presque bidimensionnel. Le logiciel HEC RAS est un système intégré conçu pour une utilisation interactive avec une interface graphique qui permet d'accéder à d'autres éléments tels que l'analyse hydraulique, l'archivage et la gestion des données et la visualisation des résultats. Le système comporte trois éléments principaux pour la modélisation hydraulique selon le schéma conçu respectivement à flux continu unidimensionnel, variée et une avec fond mobile. Les trois composantes sont toutefois étroitement liées en utilisant les mêmes données géométriques.

IV-2-Les équations mises en jeu

IV-2-1- Les équations de Saint-Venant 1D

Le logiciel HEC-RAS utilise les équations de Saint-Venant 1D ("shallow water equations" en anglais) pour relier les hauteurs d'eau et les débits. Ces équations se déduisent des équations de Navier-Stokes grâce à des simplifications liées au modèle de la rivière.

Les équations de SAINT-VENANT sont une forme intégrée (intégration selon la hauteur) des équations de Navier Stockes.



Elles permettent de calculer les hauteurs d'eau et vitesses moyennes le long de la direction d'écoulement en fonction du temps. Elles ne sont applicables qu'en régime graduellement varié.

a) Le cas stationnaire

Comme nous l'avons dit dans la partie précédente, le maillage consiste en une succession de sections. Le logiciel calcul la hauteur d'une section à partir de la hauteur d'eau de la section précédente à l'aide de l'équation de conservation de l'énergie (conservation de la charge).

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

Where: Z_1, Z_2 = elevation of the main channel inverts

Y_1, Y_2 = depth of water at cross sections

V_1, V_2 = average velocities (total discharge/ total flow area)

a_1, a_2 = velocity weighting coefficients

g = gravitational acceleration

h_e = energy head loss

Le coefficient de pertes de charge h_e se calcule à l'aide de la formule suivante:

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right|$$

Avec L la distance entre les deux profils, S_f la pente de la ligne d'énergie (pente de frottement) et C le coefficient d'expansion ou de contraction.

Pour calculer le débit on utilise l'équation de Manning $Q = K \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$ avec :

Q : débit transité par le profil en m³/s

$K=1.486$ (coefficient de rugosité du lit de l'oued)

S : section mouillée en m²

R_h : rayon hydraulique = S/P en m ; P : périmètre mouillé



I : pente longitudinale du tronçon de l'oued

On voit donc que le débit sur chaque section est calculé à partir de la hauteur d'eau puisque le rayon hydraulique, la section mouillée ainsi que les pertes de charge dépendent de la hauteur d'eau.

On peut visualiser cette conservation de la charge à l'aide de l'image suivante:

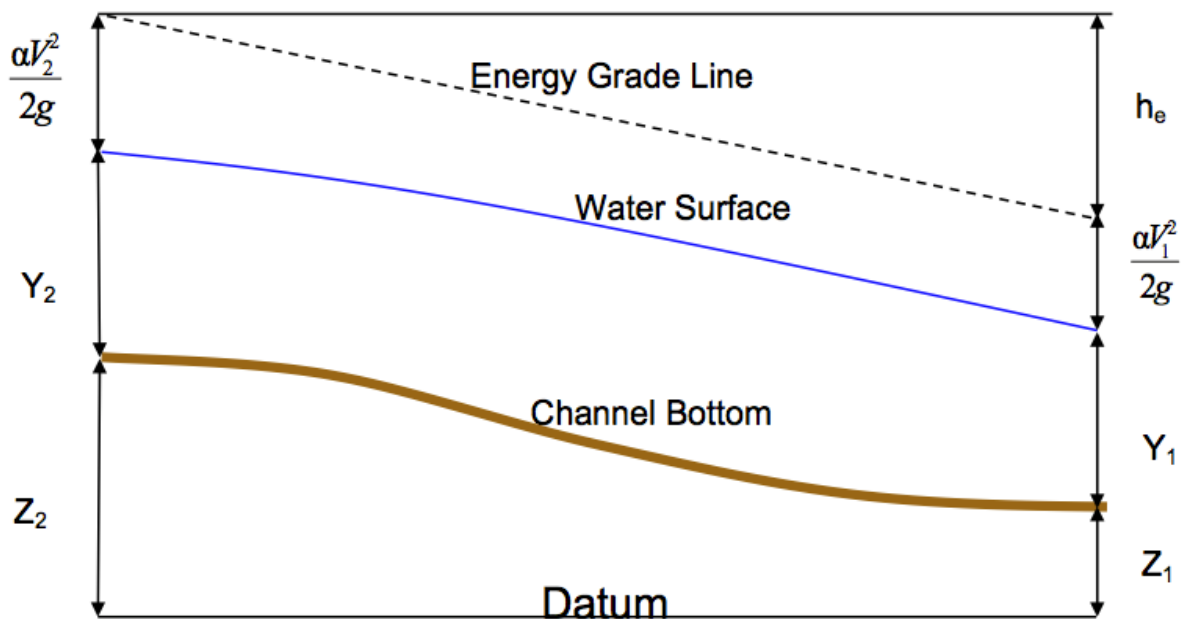


Figure 4: Conservation de la charge entre deux sections (source : HEC-RAS)

Pour obtenir des résultats satisfaisants il est nécessaire d'évaluer correctement les pertes de charges, et donc le frottement. Pour cela HEC-RAS découpe chaque section en plusieurs domaines verticaux et évalue le frottement sur chacun de ces domaines. En effet le frottement dépend de la vitesse et on se doute bien que la vitesse n'est pas la même sur les bords, dans le lit majeur ou dans le lit mineur. Le découpage se fait comme sur l'image qui suit:

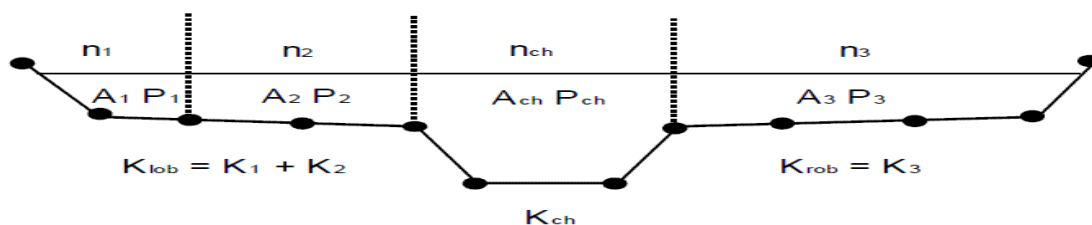


Figure 5: Découpage de la section pour le calcul du frottement (source : HEC RAS)

Pour faire les calculs lorsqu'il n'y a pas de stationnarité une première approche pourrait être de calculer les débits et les hauteurs pour chaque temps, et donc chaque débit d'entrée, à l'aide de l'étude stationnaire. Cependant une étude plus rigoureuse consiste à faire le calcul à l'aide d'équations qui prennent en compte la non stationnarité.

b) Le cas non stationnaire

Dans notre cas les études que nous avons faites étaient pour la quasi-totalité des études instationnaires puisque l'on modélisait des crues. La résolution sous HEC RAS se fait alors différemment. Les équations utilisées cette fois-ci sont la conservation de la masse et la conservation de la quantité de mouvement. Ces équations correspondent en fait aux équations de Saint-Venant 1D. Pour obtenir ces équations on fait un bilan sur un petit volume de contrôle, comme sur l'image suivante:

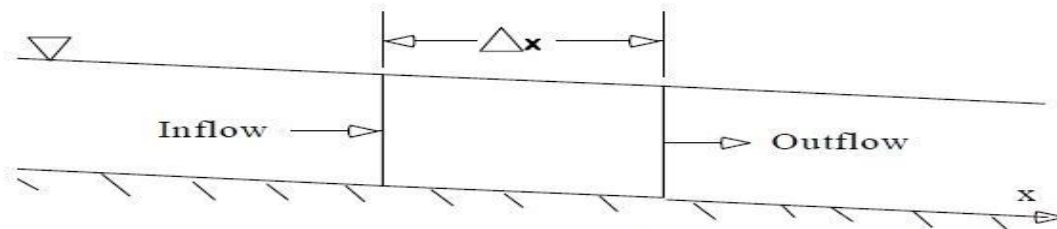


Figure 6: Bilan sur un petit volume de contrôle pour les équations de moment et de continuité

On obtient l'équation de conservation de la masse:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0$$

Avec A_T la section, Q le débit et q_l le débit entrant latéral par unité de longueur.

L'équation de conservation de la quantité de mouvement s'écrit:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f) = 0$$

Avec $\frac{\partial z}{\partial x}$ la pente de la hauteur d'eau, S_f la pente de la ligne d'énergie (pente de frottement), A la section et V la vitesse moyenne.

Pour résoudre ces équations, le logiciel utilise la théorie des différences finies qui est à la fois pratique et simple pour ce cas 1D. Il utilise un schéma implicite qui permet d'utiliser un pas de temps beaucoup plus important que dans le cas du schéma explicite. [33]

IV-2-1-1-Les hypothèses d'obtention des équations de Saint Venant :

Nous allons utiliser ici les hypothèses simplificatrices suivantes :

(H1) On s'intéresse à un écoulement d'eau le long d'un profil bidimensionnel curviligne, dont les variations sont faibles (rayon de courbure infini), c'est-à-dire la surface d'écoulement est à peu près plane, d'inclinaison θ par rapport à l'horizontale. On rattache un système de coordonnées cartésiennes (x, y, z) à ce repère (x est orienté selon la ligne de plus grande pente, y est normale au plan de glissement, z représente une direction latérale).

(H2) On considère un mouvement essentiellement bidimensionnel (z n'intervient pas dans les calculs). Les calculs peuvent être généralisés à la dimension 3.

(H3) Il n'y a pas de variation significative de la section d'écoulement sur de courtes distances (les variations sont toujours progressives). Il en est de même pour les hauteurs d'écoulement, qui varient doucement d'un point à l'autre de l'écoulement sur un même bief.

On parle de régime graduellement varié ou bien d'approximation des grandes longueurs d'onde pour désigner ce régime ou cette approximation. Il s'agit donc d'un régime peu éloigné du régime permanent uniforme. Les lignes de courant sont donc parallèles à la surface libre, elle-même à peu près parallèle à la ligne de fond. Le rapport caractéristique $Q = H^*/L^*$ – appelé rapport d'aspect – est petit devant 1 (avec H^* : échelle de hauteur et l'échelle de longueur) ; typiquement pour une rivière de 10 km et profonde de 10 m, on a $Q = 10^{-3} \ll 1$.

(H4) Les lignes de courant au sein de l'écoulement ne subissent pas de bifurcation brutale.

(H5) La surface d'écoulement exerce une contrainte de frottement τ_p sur le fond de la rivière (lit).

(H6) La masse volumique de l'eau est constante (pas d'effet du transport solide en suspension).

(H7) Il n'y a pas de variation de masse durant l'écoulement (apport ou perte d'eau).

(H8) Le lit est fixe (pas de transport solide, pas d'érosion, pas de dépôt) et de rugosité uniforme tout le long du bief considéré. On va donc essentiellement ici considérer le cas $b(x, t) = 0$. Le cas d'un lit mobile peut également être traité dans le présent cadre théorique.

(H9) La pente locale n'est pas trop forte ($\tan \theta$ doit être inférieur à 10–20 %) sinon il y a un risque d'instabilité de la surface libre.



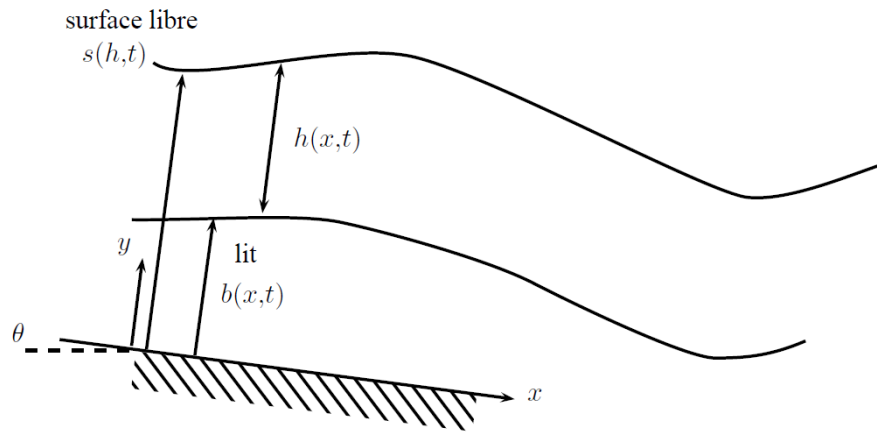


Figure 7: Notation employée dans la description des profils en long

Le principe de base dans les modèles de type Saint-Venant est de partir des équations locales de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, de les intégrer suivant la verticale pour les moyenner, puis de les simplifier en supprimant les termes de faible influence.

IV-2-1-2-Synthèse

Écoulement unidirectionnel

Dans le cas d'un écoulement unidirectionnel sur fond fixe et sans transport solide, les équations de Saint-Venant sont composées :

– d'une équation de conservation de la masse (1.1) :

$$\left| \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{u}}{\partial x} = 0, \right|$$

– d'une équation de conservation de la quantité de mouvement (1.2) :

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = g \sin \theta - g \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_p}{\rho h}.$$

Les équations de Saint-Venant (1.1) – (1.2) sont particulièrement adaptées aux canaux à faible pente et aux rivières avec un lit bien défini.

Pour boucler ces équations, il faut connaître la loi de frottement $\tau_p(u, h)$. Il faut aussi préciser des conditions aux limites, qui dépendent principalement du type de régime (super- ou subcritique)

– Pour un régime supercritique, l'information se propage uniquement de l'amont vers l'aval (il n'y a pas de remontée d'informations). La condition à la limite doit être posée à l'amont. Dans un problème d'évolution, il est nécessaire de spécifier à la fois les conditions initiales et les conditions aux limites ;

– Pour un régime subcritique, l'information se propage non seulement de l'amont vers l'aval, mais également de l'aval vers l'amont (il y a une remontée d'informations). La condition à la limite doit être posée à l'aval pour un simple problème de type cours de remous. Dans un problème d'évolution, il faut préciser principalement les conditions initiales. Selon le problème, les conditions aux limites peuvent être superflues ou bien non compatibles avec les conditions initiales.

Les équations de Saint-Venant permettent de résoudre un grand nombre de problèmes hydrauliques dès lors que la courbure de la surface libre n'est pas trop forte, en particulier lorsqu'il n'y a pas de ressaut hydraulique séparant un régime supercritique d'un régime subcritique ou bien lorsqu'il y a une chute d'eau au niveau d'un seuil.

En pratique, les types de problème que l'on peut résoudre sont très divers, par exemple :

- propagation d'une crue dans une rivière, qui est en fait le cas de notre étude.
- rupture de barrage dans une rivière ;
- évolution d'une ligne d'eau en fonction du débit fourni.

IV-2-1-3-Conditions aux limites

Les logiciels dédiés à la modélisation des écoulements bidimensionnels à surface libre se basent sur la résolution numérique d'un système d'équations aux dérivées partielles qui régit cet écoulement. C'est le cas pour les systèmes EDP, elles nécessitent des conditions aux limites pour assurer la fermeture du problème (nombre des inconnues égal au nombre des équations). Ce paramètre joue un rôle majeur pour la détermination de la solution numérique du problème.

Dans le cas d'un modèle unidimensionnel, seulement deux conditions aux limites, une à l'amont et une à l'aval doivent être spécifiées.

Les conditions aux limites peuvent être définies par une hauteur d'eau ou par un débit constant ou variable au cours du temps (exemple : un hydrogramme). Une courbe de tarage peut également être utilisée comme condition à la limite aval pour mieux prendre en compte



la relation débit hauteur d'eau. Alors que dans un modèle bidimensionnel la définition des conditions aux limites risque d'être beaucoup plus compliquée.

De nombreuses simplifications concernant les caractéristiques du cours d'eau doivent donc être introduites et faites pour pouvoir modéliser de manière approchée les écoulements.

Dans les modèles monodimensionnels, également appelés modèles filaires, la géométrie du cours d'eau est représentée par une succession de profils en travers eux-mêmes repérés sur un profil en long. Les conditions aux limites nécessitent la connaissance d'un hydrogramme et d'un limnigramme.

Ce type de modèle fournit le débit passant à travers chaque section (ou la vitesse moyenne dans chaque section) et la cote de la surface libre dans la section en fonction du temps.

Les limites des modèles monodimensionnels sont:

- La représentation monodimensionnelle fournit de bons résultats pour des écoulements débordant peu du lit mineur.
- Les résultats restent satisfaisants lorsque le débordement est important, à condition que la plaine d'inondation ne présente pas de trop fortes singularités, comme des obstacles transversaux par exemple, et que la topologie de la rivière n'évolue pas avec le débit suite aux coupures de méandres, ou d'écoulement dans des bras normalement à sec, . . .).

Les modèles unidimensionnels à casiers complètent la représentation monodimensionnelle en introduisant la possibilité de modéliser des zones de stockage en cas de débordement. Ces entités, appelées casiers, sont reliées à l'écoulement principal et, éventuellement, entre elles par des lois d'ouvrages qui définissent leur comportement (remplissage/vidange). Ces modèles permettent de prendre en compte les phénomènes de stockage de l'eau. L'échange de volume entre l'écoulement principal et les casiers latéraux est généralement représenté par une loi d'ouvrage (déversoir, vanne, etc.) ou par une loi de résistance. La difficulté principale réside dans le calage des coefficients régissant les lois de ces casiers.

IV-2-2- La formule de Manning-Strickler

Un des paramètres important aussi à définir représente la rugosité du lit. Ce coefficient n , appelé coefficient de Manning, contribue à avoir une modélisation la plus proche de la réalité en prenant en compte la vitesse d'écoulement de l'eau sur le fond de la rivière et sur les berges.



Il faut signaler en outre, que HEC-RAS permet à l'aide d'une fonctionnalité très avancée, de prendre en considération l'atténuation de la rugosité à mesure que la profondeur de l'eau augmente, ce qui rend le modèle encore plus réaliste.

Le coefficient de Manning (n) est défini par la formule :

$$Vitesse = \frac{1}{n} * R_h^{2/3} * S^{1/2} \quad \left\{ \begin{array}{l} R_h = \text{Rayon hydraulique} \\ S = \text{Surface} \end{array} \right.$$

Le tableau suivant présente quelques valeurs du coefficient n de Manning :

Tableau 7: Les valeurs du coefficient n de Manning

Valeurs du coefficient n de Manning				
Nature des surfaces	Etats des parois			
	Parfait	Bon	Assez bon	Mauvais
A) Canaux artificiels				
Ciment lissé	0,01	0,011	0,012	0,013
Mortier de ciment	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs en bois raboté	0,01	0,012	0,013	0,014
Aqueducs en bois non raboté	0,011	0,013	0,014	0,015
Canaux revêtus de béton	0,012	0,014	0,016	0,018
Moëllons bruts	0,017	0,02	0,025	0,03
Pierres sèches	0,025	0,03	0,033	0,035
Moëllons dressés	0,013	0,014	0,015	0,017
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire lisse	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire plissée	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre droits et uniformes	0,017	0,020	0,0225	0,025
Canaux avec pierres, lisses et uniformes	0,025	0,030	0,033	0,035
Canaux avec pierres, rugueux et irréguliers	0,035	0,040	0,045	-
Canaux en terre à larges méandres	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre dragués	0,025	0,0275	0,030	0,033
Canaux à fond en terre, côtés avec pierres	0,028	0,030	0,033	0,035
B) Cours d'eau naturels				
1) Propres, rives en ligne droite	0,025	0,0275	0,030	0,033
2) Idem 1 avec quelques herbes et pierres	0,030	0,033	0,035	0,040
3) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0,035	0,040	0,045	0,050
4) Idem 3, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0,040	0,045	0,050	0,055
5) Idem 3, avec quelques herbes et pierres	0,033	0,035	0,040	0,045
6) Idem 4, avec pierres	0,045	0,050	0,055	0,060
7) Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0,050	0,060	0,070	0,080
8) Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0,075	0,100	0,125	0,150

Le coefficient de Strickler (k) est également utilisé dans la littérature et correspond à l'inverse du coefficient de Manning :

$$k = \frac{1}{n}$$

Voici quelques ordres de grandeur du coefficient de Strickler :

Tableau 8: Quelques ordres de grandeur du coefficient de Strickler

Nature des parois	Valeur de K en $m^{1/3} / s$
Béton lisse	75-90
Canal en terre, non enherbé	60
Canal en terre, enherbé	50
Rivière de plaine, sans végétation arbustive	35-40
Rivière de plaine, large, végétation peu dense	30
Rivière à berges étroites très végétalisées	10-15
Lit majeur en prairie	20-30
Lit majeur en vigne ou taillis	10-15
Lit majeur urbanisé	10-15
Lit majeur en forêt	<10

IV-2-3- Les relations de seuil

Le logiciel HEC-RAS propose un module de modélisation des seuils. A proximité du seuil, l'écoulement n'est plus régi par la loi de Manning-Strickler, mais par la loi de seuil. C'est à dire qu'il passe d'un régime fluvial (ou subcritique) en amont du seuil à un régime torrentiel (ou supercritique) sur le parement aval du seuil. La théorie des écoulements à surface libre nous dit qu'au niveau du passage critique de l'écoulement au-dessus du seuil, la valeur du débit correspond à une hauteur d'eau précise de la lame d'eau déversante.

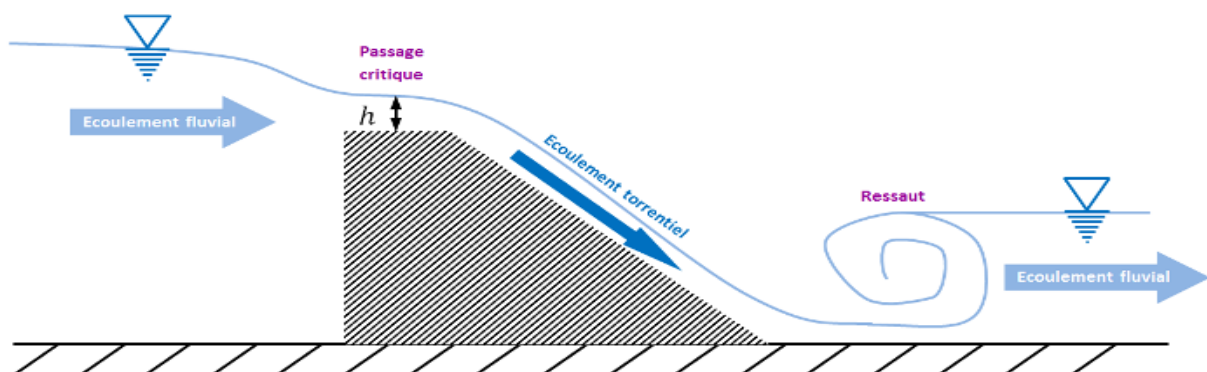


Figure 8: Représentation de l'écoulement sur un seuil déversant

Ces seuils permettent de retarder les crues et ont un impact important sur l'écoulement dans la rivière. Cependant on constate que les lois que nous avons utilisé jusqu'à présent ne fonctionnent pas pour le cas du seuil. Pour modéliser ces seuils, et pour modéliser les déversoirs également, HEC-RAS utilise une nouvelle équation. Cette équation s'appelle l'équation standard des déversoirs et s'écrit:

$$Q=CLH^{3/2}$$

Avec C un coefficient compris en 2,6 et 4,0 L la largeur de la crête du seuil et H l'énergie à l'amont au-dessus du seuil. [33]

V-Etude de protection contre l'inondation dans la ville de Missour

V-1-Généralités

V-1-1-Cadre de l'étude

L'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya a confié à la société 'Al Khibra Études et Conseils''(IC) des missions relatives à l'étude de protection contre les inondations à Missour (O.ChoufCherg /Sidi Boutayeb). Cette zone a été durement touché le 10 octobre 2008 par plusieurs débordements de l'oued Chouf Cherg qui ont inondé plusieurs centaines d'hectares et détruits des dizaines de logements en pisé dans la Commune rurale de Sidi Boutayeb, dite ancien Missour.

L'étude est structurée selon les missions et phases suivantes :

Mission 1 : Diagnostic de la situation actuelle, étude hydrologique, hydraulique et définition des travaux d'aménagement

Mission 2 : Etablissement de l'avant-projet détaillé de la solution retenue, du mémoire technique d'exécution et dossier d'Appel d'Offres.

Mission 3 : Exécution des plans et états parcellaires, par levé au sol des terrains nécessaires à la réalisation des aménagements de protection en vue d'expropriation

Le présent rapport concerne la mission II qui traite l'établissement de l'avant-projet détaillé de la solution retenue, du mémoire technique d'exécution et dossier d'Appel d'Offres.

V-1-2-Aire de l'étude

La ville de Missour et la commune rurale de Sidi Boutayeb font partie du bassin versant de la Moulouya qui constitue le fleuve principal de la région géographique du Maroc Nord Oriental. Elles se situent au niveau de la confluence de ce cours d'eau avec son important affluent, l'oued Chouf Cherg.

L'aire à protéger contre les inondations objet de la présente étude, concerne le tronçon aval de l'oued Chouf Cherg délimité par le franchissement de la RN15 et la confluence avec l'oued Moulouya. Elle concerne plus particulièrement les douars de la Commune Rurale Sidi Boutayeb situés sur la rive droite et l'extension du centre Missour située en rive gauche.

V-1-3-Situation géographique

La ville de Missour se situe sur la route nationale n°15 reliant la RN13 (Ifrane -Errachidia) et la RN6 (Fes-Oujda) à environ 100 km à vol d'oiseau au Sud-est de la ville Boulmane (Chef-lieu de la province). Elle est située au sein de la commune rurale Sidi Boutayeb.



Le siège de la commune Sidi Boutayeb est situé à environ 7 km au Sud-Ouest de la ville de Missour.

Celle-ci est accessible à partir de :

- la ville de Guercif par la route nationale RN 15 sur 158 km.
- la ville de Boulmane par les routes RR 503 puis la RP5108 et la RN15 sur 145 Km.
- La ville de Midelt par les routes nationales RN 13 et RN 15 qui relie Midelt à Missour sur 143 km.
- Les centres Boumerieme et Ouizegth par la RR601.

V-1-4-Situation administrative

La ville de Missour (commune) a été créée lors du découpage communal de 1959. Son appellation a pour origine le mot "Youssr", "aisance", en raison de sa situation dans une zone agricole réputée jadis, par la richesse de ses parcours naturels et ses cultures vivrières.

En 1992, la commune a été érigée en Municipalité et se détacha ainsi de la commune rurale Sidi Boutayeb et de celle d'Ouizegth. Elle est le chef-lieu et comprend le siège de la province de Boulemane depuis la création de cette dernière en 1975.

V-1-5-Cadre administratif

Administrativement, la commune urbaine de Missour et la commune rurale de Sidi Boutayeb dépendent du cercle de Missour, province de Boulemane. La commune de Missour est située au centre de la commune rurale Sidi Boutayeb. Celle-ci est délimitée par les communes suivantes :

- AlmisMarmoucha au Nord-Ouest ;
- Ermila au Nord Est ;
- Boumerième au Sud Est (province de Figuig) ;
- Enjil à l'Ouest ;
- Ouizegth au Sud

V-1-6-But de l'étude

Le but de la présente étude est de définir un schéma d'aménagement pour la protection des zones à risque d'inondations pouvant être provoquées par l'oued Chouf Cherg, en fonction notamment de l'état d'occupation du sol actuel et futur et afin d'assurer le transit des crues sans débordement.



V-1-7-Démographie et population**Tableau 9: Le taux d'accroissement de la population dans la région de Missour entre 1994 et 2004**

Municipalité (M), Commune Rurale	1994				2004				Taux d'accroissement
	Marocains	Etrangers	Total	Ménages	Marocains	Etrangers	Total	Ménages	
MISSOUR (M)	12748	29	12777	2470	20950	28	20978	4286	5.1
SIDI BOUTAYEB	8922	2	8924	1457	9502	20	9522	1705	0.7

En 1994, la population de Missour était 12 777 habitants. Actuellement ce chiffre dépasse les 20 000 habitants. Le taux d'accroissement est de l'ordre de 5,1%.

Toutefois, la population de la Commune Rurale Sidi Boutayeb n'a augmenté que de 0.7 %. Ceci montre que la population de la région se concentre dans le centre-ville de Missour.

Les activités des habitants de la région sont principalement des activités commerciales, agricoles et d'élevages.

L'urbanisation de la ville de Missour s'est développée surtout le long de la route nationale n°15 où on constate le taux d'occupation le plus important avec du commerce de part et d'autre de ladite voie.

Celle des douars de la commune rurale de Sidi Boutayeb s'est développée le long des reliefs plats, notamment dans l'emprise et aux bords des affluents de l'oued Chouf Cherg.

V-1-8-Documents utilisés par l'IC

Les documents et données de base, utilisés par l'IC pour l'établissement de la présente étude, sont les suivants :

Topographie

La carte topographique régulière, établie par la Direction de la Conservation Foncière, du Cadastre et de la Cartographie :

Tableau 10: Carte topographique des régions en périphérie avec Missour

Intitulé	Echelle	Code de la Carte
Missour	1/50 000	Feuille NI-30-IX-1a
Anjil	1/50 000	Feuille NI-30-VIII-1b



Missour	1/100 000	Feuille NI-30-IX-1
Immouzzar des Marmoucha	1/100 000	Feuille NI-30-VIII-2
Ksabi	1/100 000	Feuille NI-30-II-4

Plans d'aménagement

Plan d'aménagement de la ville de Missour à l'échelle 1/2 000, dressé en 2001 par l'Agence Urbaine et de Sauvegarde de Fès, portant le numéro 5047. Il est à noter que ce plan a été homologué en 2002.

Restitution du périmètre irriguée Vieux Missour

Restitution du périmètre vieux Missour à l'échelle 1 /5 000, dressé sur la base de la prise de vue de 2000 par le Ministre de l'Agriculture du Développement Rural et des Pêches Maritimes, Direction provinciale de Boulmane.

Notes et données existantes

Monographie de la ville de Missour établie par la Municipalité de Missour ;

Monographie de la province de Boulmane ;

Canevas directeur indicatif pour la préparation du plan de développement économique et sociale (commune rurale Sidi Boutayeb) ;

Assistance Technique pour le calage des formules empiriques pour le calcul hydrologique - Ministère de l'Equipement, Direction des Routes et de la Circulation Routière.

Actualisation des études hydrologiques au niveau des sites de barrages en projet (actualisation des séries des apports - bassin de Moulouya) - Ministère de l'Equipement, Direction Générale de l'Hydraulique, Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau.

Données Hydrologiques

Les pluies annuelles maximums journalières des postes de Missour et Ksibate.

La série des pluies mensuelles du poste Missour.

Les débits maximums instantanés (m³/s) au niveau de la station de Missour sur l'oued Moulouya à l'aval de sa confluence avec l'oued Chouf Cherg.



Les débits maximums instantanés (m³/s) au niveau de la station de Ksibate sur l'oued Cheg Lard, qui contrôle un bassin versant limitrophe de ceux des oueds Chouf Cherg.

V-2-Position du problème

Le phénomène d'inondation au niveau du tronçon aval de l'oued Chouf Cherg n'est pas récent, mais il est aujourd'hui ressenti de manière de plus en plus forte en raison du développement du périmètre et de la poussée urbaine que connaissent les zones planes des deux rives.

Le lit de l'oued et ses zones d'épandage de crues, qui étaient jadis des zones vierges, sont devenus des aires de plus en plus convoitées et exploitées soit par l'arboriculture et/ou par les constructions. Ainsi, elles sont devenues de plus en plus exposées aux aléas des inondations.

Durant la saison pluvieuse, le périmètre "Vieux Missouri", les douars de la commune de sidi Boutayeb, l'extension Sud Est de la ville de Missouri et les zones limitrophes à l'oued se trouvent constamment menacés par des inondations provoquées par les crues de l'oued Chouf Cherg.

Ces inondations peuvent être, dans certains cas, très dévastatrices à l'instar de celles survenues en octobre 2008 qui ont causé la submersion de près de 2 400 hectares avec des pertes en bétail et d'importants dégâts matériels ainsi qu'une sérieuse perturbation des activités industrielles notamment les huileries, et commerciales au niveau des zones limitrophes à l'oued.

V-3-Rappel du diagnostic de la situation actuelle

Au passage des importantes crues, les rétrécissements du lit de l'oued créent des étranglements à l'écoulement et engendrent des débordements au niveau des points bas. Ces points peuvent être répartis en zones de débordement comme suit :

V-3-1-Sur la rive droite

Zone I

A quelques centaines de mètre environ à l'aval du pont de la RN 15, l'oued présente une dépression en rive droite au niveau de laquelle les eaux des crues débordent et se dirigent vers les douars : Oulad Bouzazia, Oulad Sliman et Oulad Sghir.



Zone II

La seconde dépression se situe au droit du douar Sidi Boulaalam. Les eaux de débordement de cette zone accentuent le problème d'inondation au niveau de la première zone d'une part et se dirigent vers le douar Guebdour d'autre part.

Zone III

A une centaine de mètres à l'aval de la Zone II, les eaux débordent encore sur la rive droite et se dirigent vers le douar Guebdour et la partite Sud-Ouest du douar Tchabet.

Zone IV

Au niveau de cette zone, la section de l'oued est la plus réduite sur tout le tronçon concerné. La rive droite présente des berges de hauteurs relativement faibles de 2 à 4m. La topographie du terrain de cette rive présente une pente de direction Nord-Sud et qui favorise l'écoulement vers le Sud du périmètre, en direction de l'oued Moulouya. Au moment des crues les eaux de débordement de cette zone divaguent dans tout le périmètre en engendrant l'inondation des parcelles agricoles et des douars Harcha, Tchabete, Oulad Boutaher et Guebdour.

Zone V

A l'aval du pont Missouri – Sidi Boutayeb et à l'amont de la confluence de l'oued Chouf Cherg avec les oueds Lamrayer et Moulouya, la rive droite forme des dépressions avec des berges de faibles hauteurs.

La topographie du terrain de cette rive présente une pente de direction Nord-Ouest – Sud Est et qui favorise l'écoulement vers l'oued Moulouya. Au moment des crues les eaux débordent sur cette rive en engendrant l'inondation des parcelles agricoles.

V-3-2- Sur la rive gauche

Zone VI

A l'amont immédiat du douar Sidi Boulaalam, la rive gauche de l'oued présente une légère dépression. Au passage des crues les eaux de l'oued Chef Cherg débordent au niveau de cette zone en direction du douar Sidi Boulaalam. L'impact des inondations au niveau de cette zone se limite aux terrasses agricoles.



Zone VII

A l'amont immédiat du pont Missouri - Sidi Boutayeb, la rive gauche de l'oued présente une zone plane avec une pente qui se dirige vers le centre de Missouri. Au moment des crues, l'oued déborde sur sa rive gauche et se dirige vers la partie Sud Est de la ville de Missouri, plus particulièrement vers le quartier ERAC.

Il convient de signaler également que l'occurrence des inondations au niveau de ce quartier par le débordement de l'oued Chouf Cherg intervient souvent à un moment où l'ERAC se trouve déjà inondé par les eaux pluviales des talwegs et chaâbas qui le traversent ou le longent.

Ainsi, ces inondations sont dues à l'absence d'un système de drainage adéquat et en raison du fait que l'aménagement actuel de la plaine ne tient pas compte des risques de son inondabilité.

Zone VIII

Au niveau de la confluence de l'oued Chouf Cherg avec son affluent l'oued Lamrayer, la rive gauche de l'oued Lamrayer est caractérisée par l'édification et le développement du quartier El Massira.

A ce niveau l'oued Chouf Cherg forme un méandre pour se jeter dans l'oued Moulouya. Au passage des crues les eaux de débordement de l'oued Chouf Cherg à cet endroit se dirigent vers le quartier El Massira avant de se jeter dans l'oued Moulouya.

V-4-Rappel de l'étude hydrologique

Afin de déterminer les débits des crues pour le bassin de l'oued Chouf Cherg, et pour différentes fréquences de retour et en absence des données sur les débits maximums annuels dans la zone de l'étude, une approche basée sur les 4 méthodes suivantes a été suivie :

Approche par les formules empiriques pour le calcul des crues de fréquences rares et notamment de fréquence de retour 1/10 nécessaires pour la méthode du Gradex.

Ajustement des débits maximums instantanés dans les stations limitrophes

Transposition directe des débits de pointe par la méthode de Francou-Rodier à partir des bassins versants similaires et avoisinants.

Utilisation du Gradex des pluies à partir du débit de pointe décennal estimé.



Sur la base de ces différentes méthodes. Le tableau suivant récapitule les débits retenus :

Tableau 11: Les débits retenus à l'Oued de Chouf Cherg pour différentes périodes de retour

Bassins versants	Q 10	Q 20	Q 50	Q 100
Chouf cherg	673	822	1020	1170

V-5-Résultat de l'étude hydraulique

Pour la réalisation des simulations hydrauliques et la délimitation des zones inondées au passage des crues de différentes périodes de retours, l'IC a monté un modèle hydraulique numérique d'oued Chouf Cherg sur la base du levé topographique détaillé de la zone de l'étude.

Le principe et les outils de modélisation ont été présentés dans la mission 1. Le paragraphe suivant présente les résultats des simulations effectuées.

V-6-Projet

Pour réduire l'impact des inondations au niveau des zones menacées par les inondations de l'oued Chouf Cherg, la solution retenue en étroite collaboration avec le Maître d'ouvrages et les organismes compétents, se compose de :

V-6-1-Périmètre vieux Missouri/ Commune Sidi Boutaib

Les tronçons à protéger se situent entre le pont de la RN 15 et celui liant la ville de Missouri à Sidi Bouteib.

Les berges sont fragiles et ont des hauteurs faibles par rapport à la crue du projet (crue centennale). Sur les rives de ces tronçons se situés le périmètre Vieux Missouri et les douars de la commune Sidi Boutayeb.

L'aménagement retenu pour assurer la protection de ces tronçons consiste en :

- **La protection des talus**

Pour prévenir les affouillements et les dégradations du talus coté eau, une protection en gabions a été prévue (voir annexes).

Les gabions utilisés seront des gabions de 2.00 x 1.00 x 1 m mis en place en marches d'escalier avec une pente du talus moyenne égale à celle du talus amont de la digue, soit 1H/1V.



Le parement amont de la protection en gabion sera revêtu par une couche en béton dosé à 300 kg /m³, de 5 cm d'épaisseur non armé.

Le pied de la digue sera ancré sur une profondeur d'au moins 2 m dans l'assise. En amont, sur 1.00 m de profondeur l'ancrage sera protégé par des enrochements.

Une couche de sable et une membrane en géotextile seront mises entre les gabions et le corps de la digue pour assurer l'assise des gabions.

V-6-2-Matériaux de construction : définition et zone d'emprunt

Les gabions seront constitués par un grillage à mailles hexagonales, double torsion, de dimensions 80 mm x 100 mm ou 100 mm x 120 mm

Le fil pour couture et contreventement sera identique au fil de treillis. Les tirants d'ancrages et armatures seront en acier doux (D 16 à D 40), à béton.

Les pierres pour les blocs de remplissage des gabions, pour la maçonnerie et pour les enrochements seront achetées auprès des meilleures carrières de la région.

Les blocs de remplissage des gabions n'auront pas leur plus petite dimension inférieure à 150 mm. Ils seront rangés à la main de façon à ne laisser que le minimum de vide entre eux.

Le géotextile non tissé aiguilleté qui jouera un rôle de transition ou de filtre sera constitué de filaments continus en polypropylène ou en polyester. Sa masse surfacique pourra varier entre 100 et 600 g/m². Sa perméabilité transversale devra être supérieure à 10⁻⁴m/s sous 2 bars.

V-7-Impact sur l'environnement

La protection de l'oued Chouf Cherg contre l'inondation est généralement prévue pour des raisons économiques : atténuation des dégâts provoqués par les crues.

Terrains à exproprier

L'emprise de la future digue est en partie située sur les terrasses agricoles de l'oued. La superficie de ces terrains actuellement cultivables est estimée à 13 ha.

Impact sur l'environnement

Il est à noter que la taille de la digue de protection reste modeste et n'a pas une influence déterminante sur l'importance des impacts négatifs sur l'environnement.



Le milieu biotique ne présente aucune espèce végétale ou animale rare, menacée ou protégée.

Installation de chantier et réalisation des travaux

Pendant la phase et l'installation des travaux aucun impact potentiel négatif ne peut engendrer sur les composantes sensibles de l'environnement affectées par le projet fait l'objet.

Les installations du chantier et les locaux administratifs peuvent être placés en haut de la rive droite à quelques deux cent mètres en aval du pont sur la RN15. Ils ne vont engendrer aucun impact négatif significatif.

Impact social

La réalisation de la digue sur l'oued Chouf Cherg constitue un enjeu principal aux aspects économique et social liés à la protection des zones environnantes contre les crues périodiques. En effet, les inondations ont pris un caractère catastrophique imposant la prise de dispositions de réduction et de prévention dans le cadre d'un aménagement global dans lequel se situe la réalisation du présent ouvrage.

Les effets négatifs sont pratiquement inexistantes puisque la planification est effectuée dans les règles de l'art et les besoins de la population et des riverains directs ainsi que les droits d'usage de l'eau sont simultanément pris en compte (aucun préjudice n'est produit dans la zone aval).

L'impact social sur la population est positif. La réalisation de l'ouvrage permettra de faire travailler la main d'œuvre locale. Si l'on considère que 20% du coût de l'ouvrage sera affecté à la main d'œuvre et en retenant une indemnisation de 100 Dh/J, on dégagera environ 177 000 journées de travail soit environ 400 personnes pendant 18 mois.



VI-Modélisation de la crue centennale de l'Oued Chouf Cherg sur Hec-Ras

HEC-RAS est un logiciel intégré pour l'analyse hydraulique qui permet de simuler les écoulements à surface libre. Il a été conçu par le Hydrologic Engineering Center de l'US Army Corps of Engineers. La version actuelle de HEC-RAS (5.0.0) comporte une interface graphique permettant d'éditer, modifier, visualiser les données d'entrée et d'observer les résultats obtenus. L'interface Ras-Mapper permet de visualiser les zones inondables à partir des données de terrain en extension « .flt ».

Pour démarrer HEC-RAS, double-cliquez sur l'icône HEC-RAS 5.0.0 lnk placé sur le bureau, ou bien allez dans le menu Démarrer et choisissez le programme HEC-RAS 5.0.0. Fait important à noter, HEC-RAS utilise comme symbole décimal le point, et non la virgule utilisée habituellement dans notre système d'unité. Un message d'erreur peut apparaître lors du démarrage si le symbole décimal spécifié pour votre ordinateur n'est pas le point. Vous pouvez changer ce symbole dans le Panneau de configuration de Windows.

Suite au démarrage de HEC-RAS vous devez obtenir la fenêtre principale de HEC-RAS qui illustrée à la figure ci-dessous :

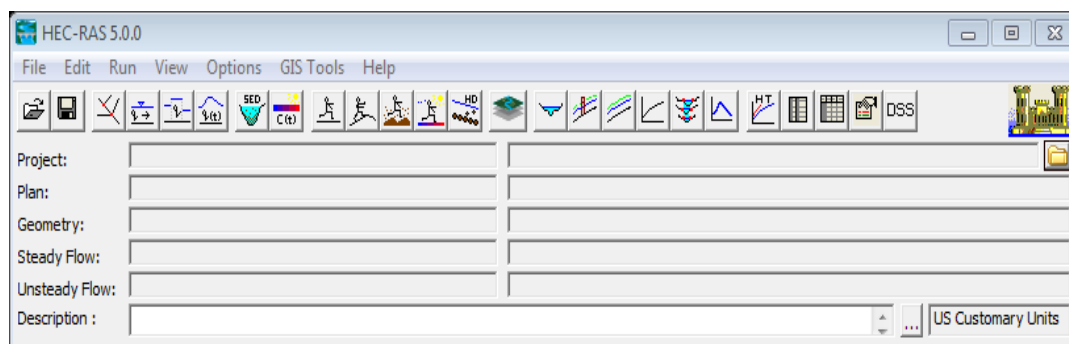


Figure 9: Fenêtre principale de HEC-RAS

Projet (Project) : Le fichier Projet contient le titre et la description du projet, le système d'unités utilisées et les liens vers tous les fichiers qui lui sont associés. Il contient aussi les variables par défaut qui peuvent être définies par l'utilisateur et une référence au dernier Plan utilisé (voir la description d'un Plan plus bas). Il comporte l'extension .PRJ.

Géométrie (Geometry) : Ce fichier contient toutes les informations géométriques sur le cours d'eau analysé, soit le schéma arborescent, les sections transversales, la distance entre chaque section, les coefficients de Manning et s'il y a lieu, les structures présentes (ponts, ponceaux). Un projet peut comporter plusieurs géométries afin d'analyser différentes variantes



(par exemple avec ou sans obstruction dans la rivière). Les fichiers peuvent ainsi comporter l'extension .G01 à G.99.

Débit (Flow) : Le fichier Débit est utilisé pour simuler les écoulements permanents. Il contient le nombre de Sections (Profile) devant être calculés, les données de débit pour chacun d'eux et les conditions limites pour chaque tronçon. Un Profile désigne l'ensemble des niveaux d'eau calculés pour des conditions particulières de débit. De la même façon que précédemment, l'extension du fichier peut être de .F01 à .F99.

Plan (Plan) : Un fichier Plan contient un titre et une description du plan, de façon similaire aux informations d'un Projet. Il contient de plus la référence aux fichiers Géométrie et Débit associés à ce Plan. Le concept de Plan permet ainsi de simuler différentes combinaisons de Géométrie et de débit qui peuvent être nécessaires dans le cadre d'une étude hydraulique. Il y a un fichier .P** pour chaque Plan et ceux-ci peuvent comporter l'extension .P01 à .P99.

Simulation (Run) : Le fichier simulation contient toutes les données nécessaires à l'exécution d'une simulation, définie à l'intérieur d'un Plan. Ce fichier est automatiquement créé par HEC-RAS lorsqu'une simulation est lancée. Son extension peut-être .R01 à .R99. Par exemple, le fichier .R01 correspond au Plan .P01

Résultats (Output) : Tous les résultats d'une simulation sont contenus dans le fichier Output. Les fichiers de résultats possèdent l'extension .O01 à .O99 et leur numérotation est également associée à celle des fichiers Plan.

La barre de menu comprend toutes les fonctions disponibles de HEC-RAS. Le menu File permet d'ouvrir, de créer et de sauvegarder un projet (avec extension .prj). Les autres options permettent de modifier le titre du projet ou d'effacer tous les fichiers reliés à un projet.

Outre le menu File, le menu Edit est également important et permet de spécifier les données de base décrivant le système hydrographique devant être modélisé ainsi que les conditions du débit dans ce système.

La principale étape de la création d'un projet de modélisation avec HEC-RAS est de définir la géométrie de notre cours d'eau, au moyen de sections transversales. Cette étape est réalisée en choisissant l'option Geometric Data... Toute les données reliées à la géométrie du cours d'eau sont sauvegardées dans les fichiers dont l'extension est .G** où ** désigne les chiffres représentant une numérotation séquentielle.



Une autre option disponible dans le menu Edit est Steady Flow Data... Cette option permet de spécifier la ou les valeurs de débit dans le cours d'eau qui devront être modélisés, ainsi que les conditions limites de l'écoulement. Les informations qui sont spécifiées avec cette option sont contenues dans les fichiers .F**.

VI-1 Etapes de la modélisation

VI-1-1-Entrée du projet

- **Projet**

Dans le menu File, choisir l'option New Project pour obtenir une fenêtre similaire à celle illustrée plus bas. La première étape est de choisir le dossier de travail où le projet sera sauvegardé.

Dans notre cas, on va travailler sur le projet de l'aménagement de l'Oued Chouf Cherg au niveau de la commune Sidi Boutayeb dans le cadre de l'étude de protection contre les inondations à Missour.

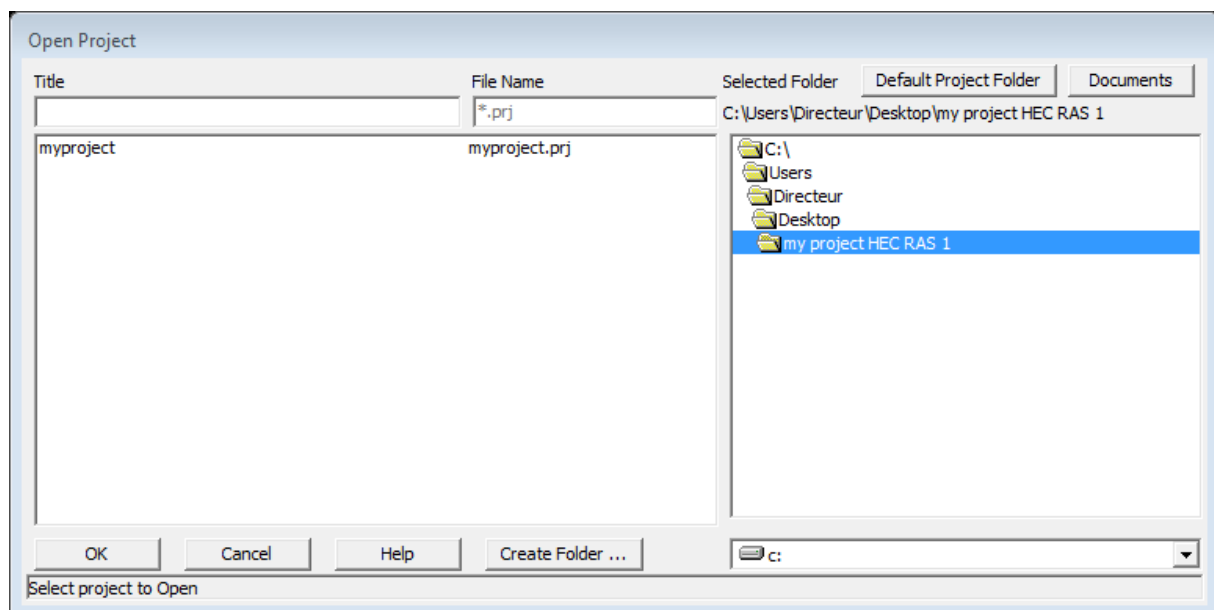


Figure 10: Fenêtre nouveau projet

Un nouveau répertoire peut d'ailleurs être créé avec le bouton Create Directory. Le titre du projet sera par la suite spécifié dans la ligne haute et un nom de fichier doit aussi être indiqué dans la case suivante, tout en conservant l'extension .prj. Dans notre cas, notre projet sera nommé 'myproject'. Il ne faut pas utiliser les accents pour un nom de fichier. Après avoir appuyé sur OK, un message apparaît pour confirmer les informations soumises. Appuyez à nouveau sur OK et les données seront sauvegardées dans le fichier et le répertoire indiqué.

Avant d'entrer les informations reliées à la géométrie et aux débits, il faut spécifier le système d'unité utilisé. Dans le menu Option, allez à Units System et choisissez System International (Metric System).

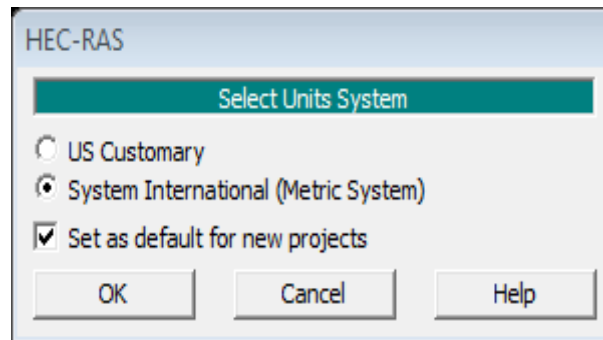


Figure 11: Option système d'unité HEC RAS

- **Géométrie des sections**

Après avoir défini les principaux paramètres du projet, la deuxième étape est de définir les caractéristiques géométriques du système modélisé. Sélectionnée Edit / Geometric Data... et la fenêtre Base Geometric Data apparaît.

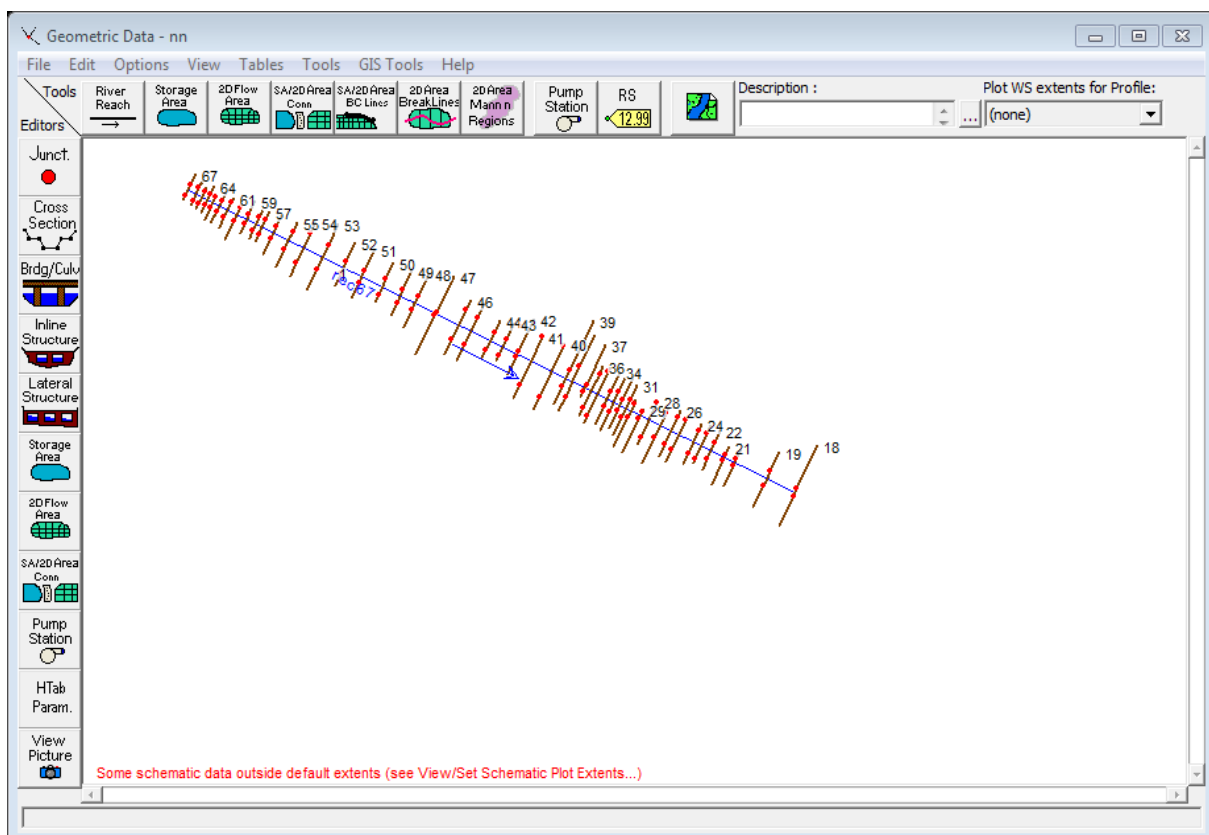


Figure 12: Fenêtre Geometric Data

Pour vous aider à tracer le tronçon de rivière à l'étude, vous pouvez ajouter une image de fond à cette fenêtre. Appuyez sur le bouton Add /Edit background pictures... et appuyez sur Add afin de sélectionner le fichier image. Après avoir appuyé sur Close, un message apparaît car la taille de l'image est plus grande que la taille de l'écran. Il est possible d'ajuster l'échelle en choisissant dans le menu View l'option Full Plot. Pour sauvegarder les étapes accomplies, allez à File / Save Geometric Data as... Sauvegardez les données de la géométrie sous un fichier. Pour représenter le tronçon à étudier, cliquez sur le bouton River Reach. Le curseur se transforme en crayon et vous et vous pouvez alors dessiner le tronçon de rivière à l'aide d'une suite de points qui vont de l'amont vers l'aval, en suivant le centre de la rivière sur l'image de référence. Vous double-cliquez pour indiquer la fin du tronçon. A ce moment, une fenêtre apparaît vous demandant d'indiquer le nom de la rivière et le nom du tronçon.

Les autres caractéristiques géométriques nécessaires à cette étape sont les sections transversales à différents endroits de la rivière. Les sections transversales sont représentées au moyen de points représentant des coordonnées X-Y, où X est la distance par rapport à un point de référence arbitraire placé sur la rive et Y est l'élévation du fond de la rivière.

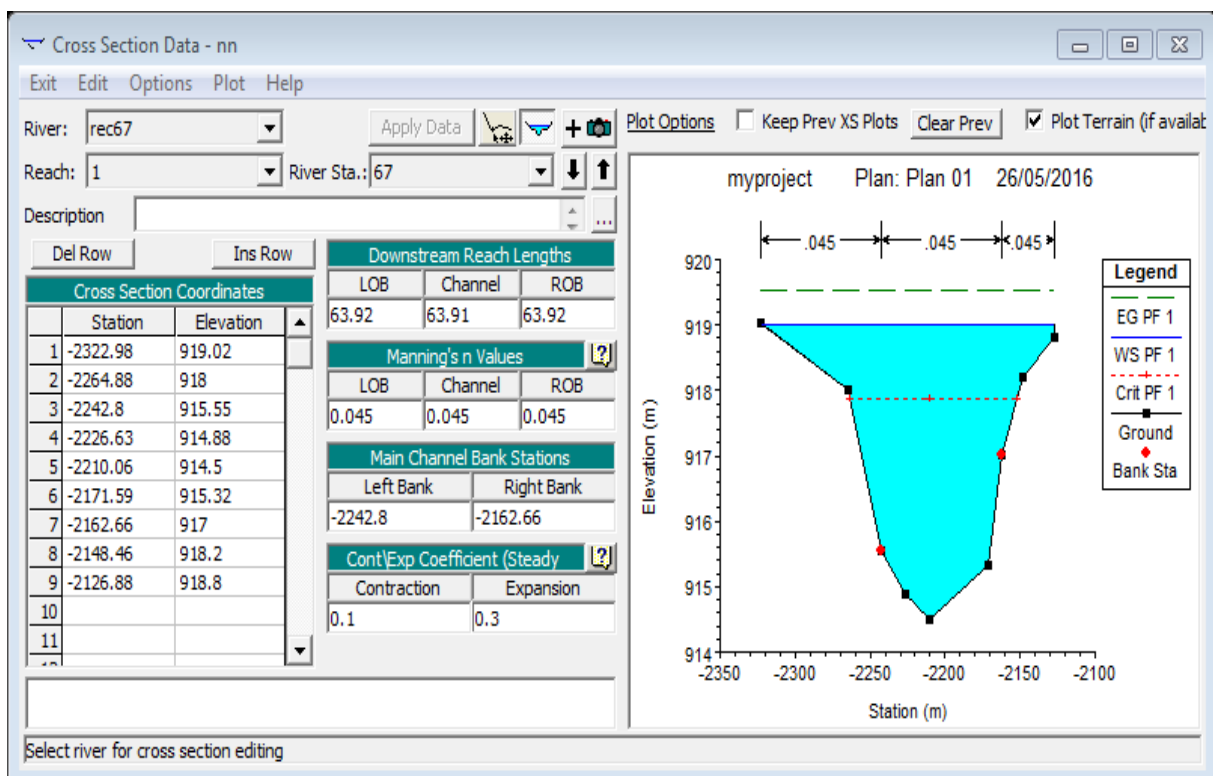


Figure 13: Fenêtre Cross Section- profil 67

Pour entrer les données, vous devez cliquer sur le bouton Cross-Section dans la partie gauche pour obtenir une fenêtre similaire à celle illustrée ci-haut.

Dans le menu Option, choisissez Add a new Cross Section... Il vous est alors demandé de définir la station (River Station) de cette section transversale qui est en fait un identificateur numérique.

HEC-RAS place sur un tronçon de rivière les stations en ordre décroissant de la partie amont vers la partie aval. La signification de chacun des termes que l'on y retrouve est décrite ci-dessous :

River : nom de la rivière sur laquelle la nouvelle section sera ajoutée ;

Reach : nom du tronçon de la rivière sur laquelle la nouvelle section sera ajoutée ;

River station : Identification numérique de la section transversale ;

Description : Commentaire de l'utilisation sur cette section

Cross-section coordinates : Coordonnées relatives dans le plan X-Y des points définissant la section transversale ;

Downstream Reach Lengths : Distance en mètres jusqu'à la prochaine section transversale située en aval. LOB signifie la partie gauche de la plaine inondable et ROB sa partie droite, alors que Channel désigne le lit principal de la rivière ;

Manning's values : Coefficient de Manning de chaque portion de la section transversale ;

Main channel bank stations : Coordonnées, dans le plan X seulement, des limites gauches et droite du lit principal de la rivière. Les valeurs fournies doivent correspondre à une valeur déjà présente dans la partie Cross-section coordinates.

Après avoir entré les données, cliquez sur Apply Data. Vous pouvez alors visualiser la section transversale que vous venez de définir dans la partie adjacente de la fenêtre. Les autres sections seront rentrées de la même manière.

Pour augmenter la stabilité des calculs de niveau par le modèle. Il est recommandé d'avoir une distance raisonnable entre deux sections transversales. En assumant que la pente et les propriétés des sections varient de façon linéaire entre deux sections consécutives, la fonction XS interpolation dans le menu Tools permet d'ajouter par interpolation de nouvelles sections entre deux sections existantes.

Pour terminer, vous pouvez vérifier les données spécifiées avec le menu Tables. Les mêmes paramètres pour toutes les sections y sont regroupés à l'intérieur d'un même tableau et



peuvent y être modifiés. Avant de quitter la fenêtre Geometric Data, sauvegardez les informations que vous avez rentrées.

- **Débit et conditions aux limites**

L'étape suivante de la modélisation hydraulique sur HEC-RAS est de spécifier les débits utilisés pour calculer les profils d'écoulement. Dans la fenêtre principale, cliquez sur le bouton Steady Flow Data. Pour obtenir une fenêtre similaire à celle illustrée plus bas.

Pour entrer les valeurs des débits, indiquées d'abord Number of Profiles. Par la suite, dans le menu Options, allez à Edit Profil Names...et indiquez les noms de profils appropriés. Les valeurs de débit qui sont entrées aux cases correspondantes sont représentatives de la section amont et sont considérées valides sur tout le tronçon de rivière. HEC-RAS permet toutefois de représenter des changements de débits aux sections transversales, lorsqu'un affluent important entraîne un changement de débit dans le tronçon.

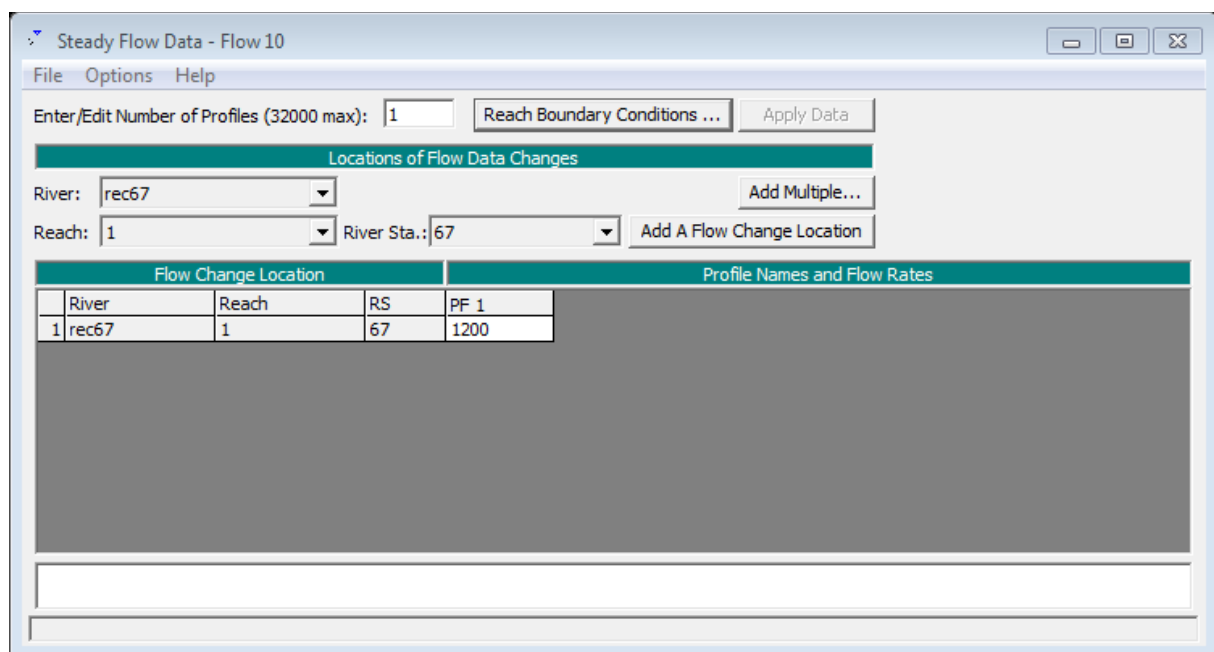


Figure 14: Fenêtre Steady Flow Data

Lorsque les débits correspondants aux différents profils devant être calculés sont spécifiés, il faut par la suite définir les conditions limites de l'écoulement en cliquant sur le bouton Reach Bondary Conditions. Les conditions limites sont nécessaires pour calculer la hauteur d'eau initiale aux extrémités de chaque tronçon. Pour un écoulement fluvial, seulement les conditions à l'aval sont nécessaires, tandis que pour un écoulement torrentiel, les conditions à l'amont seulement sont nécessaires. Selon le régime d'écoulement modélisé, une seule des deux conditions limites peut être indiquée. On a le choix entre trois conditions aux limites : hauteur critique, hauteur normale et hauteur connue. Avant de passer à l'étape suivante,

sauvegardez ces données avec File / Save Flow Data as...Entrez le titre et quittez cette fenêtre pour revenir au menu principal de HEC-RAS.

Dans notre cas, on dispose de 67 profils tout au long du tronçon de l'Oued Chouf Cherg.

D'autre part, on tiendra compte d'un débit centennal de $1200\text{m}^3/\text{s}$ et d'une pente de 0.007 comme conditions aux limites à l'amont, c'est-à-dire au niveau du profil 67.

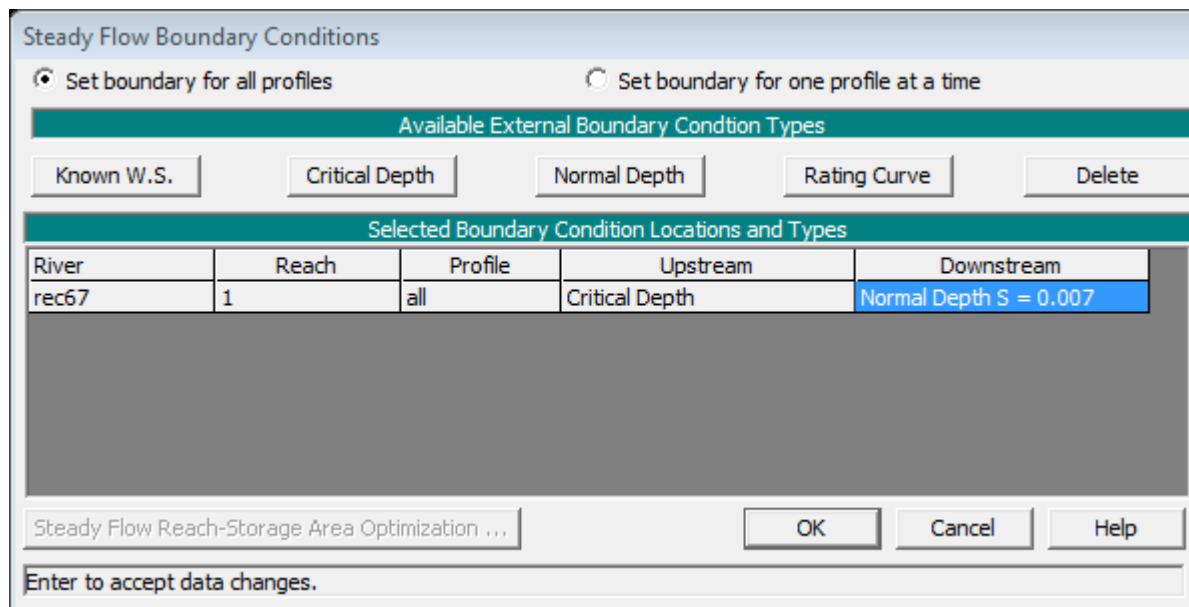


Figure 15: Fenêtre Reach Boundary Conditions

- **Simulation hydraulique**

La dernière étape nécessaire à la modélisation avec HEC-RAS est de définir le plan utilisé.

Cliquez sur le bouton Perform à Steady Flow Simulation pour obtenir la fenêtre présentée plus bas. Le Geometry File et Steady Flow File que vous avez créés y sont indiqués. Dans le menu File, choisissez New Plan. Lorsque requis, entrez le titre et l'identificateur indiqué sur la figure ci-dessous.

Choisissez le régime d'écoulement et appuyez sur Compute pour débiter la simulation. Une fenêtre montrant la progression de la simulation s'ouvrira et les calculs s'effectueront.

Pour notre projet, on ne s'intéressera qu'au régime d'écoulement permanent en injectant le débit le plus défavorable ($1200\text{m}^3/\text{s}$), qui sera bien sur le même tout au long de l'Oued mis en jeu, pour savoir la valeur du pic de la crue centennale.



En fait le régime d'écoulement non permanent ou unsteady flow étudie le comportement de la crue, ce qui par conséquent ne fait pas partie de l'objet de ce projet.

Lorsque le programme a terminé, vous pouvez fermer la fenêtre Hydraulic Computation, ainsi que la fenêtre Steady Flow Analysis.

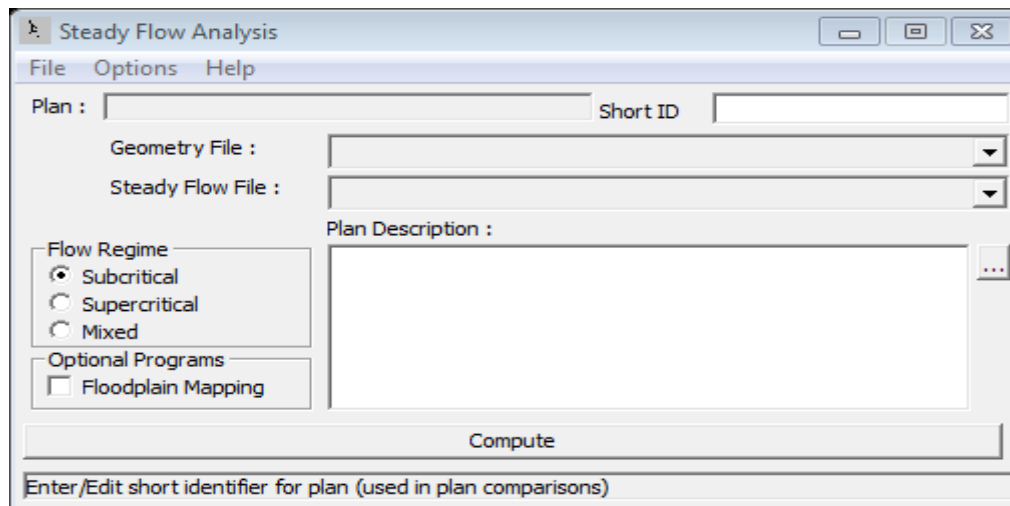


Figure 16: Fenêtre Steady Flow Analysis

VI-1-2- Visualisation des résultats

A la suite de la simulation, les résultats sont automatiquement sauvegardés dans un fichier. Un des résultats intéressant à consulter est la vue en profil du tronçon simulé. Cette fonction, View Profiles, est située dans la barre de boutons. Allez également dans le menu Option de cette fenêtre. Vous y trouverez les options d'affichage, telles que Zoom et Plan. Il y a aussi d'autres options qui permettent d'afficher les résultats d'un ou plusieurs plans, d'ajouter ou supprimer l'affichage de certains profils, de changer le tronçon dont les résultats sont actuellement affichés. Ce menu Options est d'ailleurs similaire pour différentes fenêtre graphiques permettant de visualiser les résultats.

Une autre option graphique intéressante est accessible via le bouton View 3D multiple cross section plot.... Les sections transversales de début et de fin peuvent être modifiées pour afficher qu'une partie du tronçon à l'étude. Rotation et Azimuth permettent quant à eux de modifier l'angle de vue. Dans ce projet, on a choisi un angle de rotation de 120° et un angle Azimuth de 18° pour bien visualiser en 3D les sections de transversales de l'Oued Chouf Cherg.

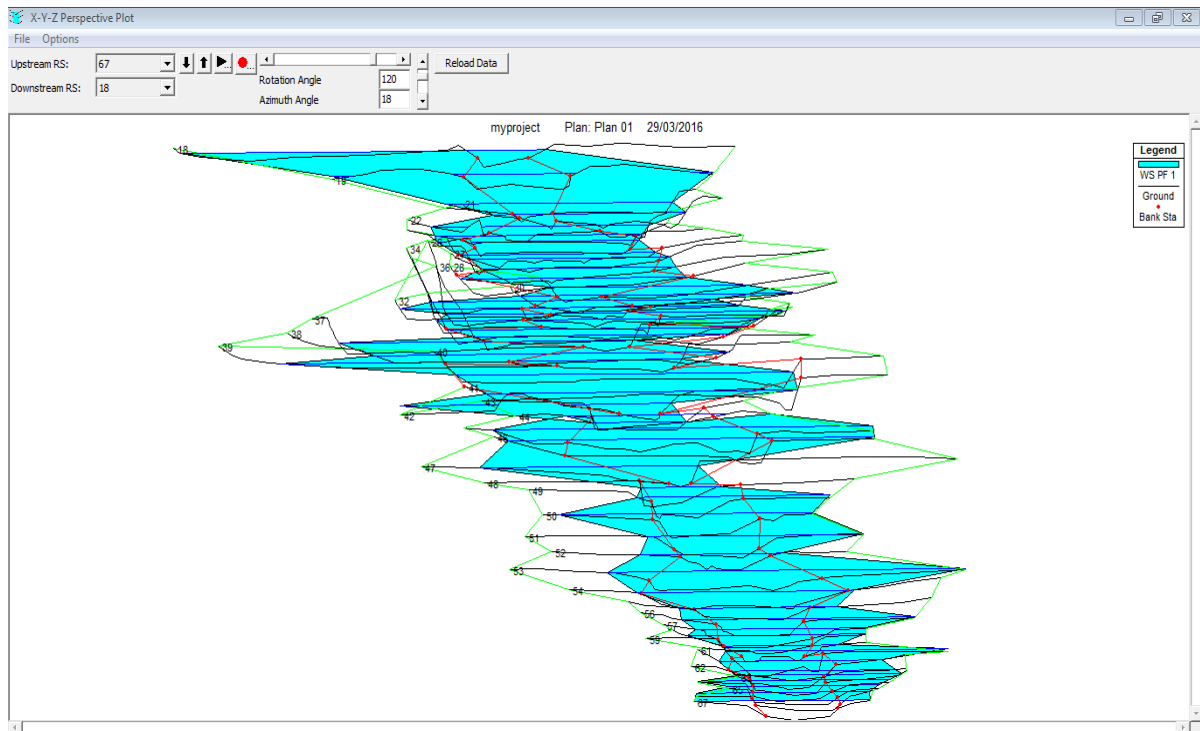


Figure 17: Vue en 3D des sections transversales de l'Oued Chouf Cherg

Deux autres boutons, View Detailed Output at XS... et View Output at Multiple..., permettent de voir les résultants sous forme tabulaire.

Profile Output Table - Standard Table 1

HEC-RAS Plan: Plan 01 River: rec67 Reach: 1 Profile: PF 1

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
1	67	PF 1	1200.00	914.50	919.00	917.88	919.52	0.003686	3.36	423.86	195.04	0.54
1	66	PF 1	1200.00	914.60	918.82		919.28	0.003284	3.09	441.45	192.31	0.51
1	65	PF 1	1200.00	914.42	918.72		919.13	0.002698	2.91	456.87	166.29	0.46
1	64	PF 1	1200.00	914.00	918.63		919.02	0.002519	2.90	484.68	212.46	0.45
1	63	PF 1	1200.00	913.72	918.37		918.87	0.003549	3.30	426.61	181.90	0.53
1	62	PF 1	1200.00	913.59	917.81	917.27	918.61	0.006616	4.06	332.14	183.37	0.70
1	61	PF 1	1200.00	913.39	917.84		918.22	0.002770	2.74	461.18	180.83	0.46
1	60	PF 1	1200.00	912.00	917.73		918.04	0.001762	2.52	540.29	247.31	0.38
1	59	PF 1	1200.00	913.00	916.47	916.47	917.67	0.012932	5.11	264.18	127.09	0.96
1	58	PF 1	1200.00	912.30	916.44	915.38	916.90	0.003627	3.12	432.78	198.00	0.53
1	57	PF 1	1200.00	912.06	916.31		916.73	0.003182	2.95	450.21	188.69	0.49
1	56	PF 1	1200.00	911.83	915.72	914.97	916.34	0.005385	3.58	385.26	259.40	0.63
1	55	PF 1	1200.00	911.47	914.34	914.34	915.32	0.014211	4.39	277.76	174.30	0.96
1	54	PF 1	1200.00	910.20	914.19	912.59	914.37	0.001787	1.86	644.65	242.46	0.36
1	53	PF 1	1200.00	909.60	914.06		914.17	0.000876	1.55	891.33	397.64	0.26
1	52	PF 1	1200.00	909.00	912.60	912.60	913.71	0.013031	4.70	268.63	157.75	0.94
1	51	PF 1	1200.00	907.00	912.01	910.24	912.39	0.002194	2.77	491.09	238.97	0.42
1	50	PF 1	1200.00	906.42	911.78		912.04	0.001716	2.32	592.83	281.76	0.37
1	49	PF 1	1200.00	906.20	911.08	910.09	911.64	0.004887	3.39	398.03	214.23	0.60

Figure 18: Fenêtre Profile Output Table

Finalement, comme on peut voir dans le tableau des résultats des sections transversales, il y a plusieurs variables qui sont calculées par HEC-RAS en plus des niveaux d'eau.

A partir des résultats fournis par HEC-RAS, il sera maintenant possible de visualiser les hauteurs d'eau atteintes au niveau de chaque profil grâce à l'option view cross section, ce qui va nous permettre par la suite de conclure s'il y aura des débordements ou non, et par conséquent déterminer les zones inondables au niveau de l'Oued Chouf Cherg pour enfin prévoir la hauteur d'aménagement convenable pour chaque débordement. (Voir l'annexe 5)

VI-2- Observations importantes

VI-2-1-Conditions aux limites

Aux extrémités, il y a généralement une caractéristique seulement et une autre équation est nécessaire pour lever l'indétermination. C'est ce qu'on appellera condition aux limites. Elle est donc à spécifier.

On distingue pour les écoulements à surface libre :

- Profondeur spécifiée – Condition Amont
- Profondeur spécifiée – Condition Aval
- Débit spécifié – Condition Amont
- Débit spécifié – Condition Aval

Pour les écoulements subcritiques, les conditions aux limites sont exigées aux extrémités amont et aval.

Pour l'écoulement supercritique, les conditions aux limites sont exigées seulement à l'extrémité amont.

Conditions Amont

Les conditions aux limites amont sont exigées à l'extrémité amont de tous les biefs non connectés à d'autres biefs ou à des zones de stockage.

Condition Aval

Les conditions aux limites aval, sont exigées à l'extrémité aval de tous les biefs non connectés à d'autres biefs ou zones de stockage.



Quatre types de conditions aux limites aval peuvent être spécifiés :

- Limigramme $H(t)$
- Hydrogramme $Q(t)$
- Courbe de tarage $Q(H)$
- Profondeur normale (à partir de l'équation de Manning)

VI-2-2-Conditions initiales

Il faut connaître le niveau d'eau et le débit à chaque section transversale ainsi que les élévations pour toutes les zones de stockage :

Entrer les données de débit pour chaque bief et le programme effectuera des calculs de niveaux correspondants à chaque section. Et entrer une élévation de départ pour les zones de stockage.

Lecture d'un fichier d'élévation et de débit provenant d'une exécution précédente (utilisé lors de l'exécution d'une simulation continue qui doit être divisé en périodes plus courtes). La sortie de la première période est utilisée en tant que conditions initiales pour la prochaine période. A utiliser lorsque qu'on rencontre des problèmes de stabilité.

VI-3- Justification du choix de la variante

- 1- - L'Oued Chouf Cherg est caractérisé par une largeur moyenne entre rives de 100m ce qui ne permet pas l'aménagement du radier.
 - Toute fois en dépit des dépenses, l'aménagement du radier va induire une accélération des vitesses ce qui va provoquer la modification de la morphologie de l'oued. => Terrain dévasté par l'eau de l'oued.
 - *Le radier ne va pas être aménagé.*
- 2- - Problématiques à résoudre :
 - Débordement de l'eau au-delà du niveau de berges naturelles ;
 - Vu la nature du sol constitutif des berges qui est limoneux et friables en rencontre un problème de sapement des berges.
 - Pour résoudre le problème de débordement, on recourt à la construction d'une protection avec une hauteur supérieure à celle de l'eau.



- Pour protéger les berges contre le sapement ou l'érosion, on peut soit construire :
 - **Mur en béton :**
 - Le fond de l'oued est constitué de matériaux alluvionnaires (fondation inexistante)
 - La probabilité d'avoir des affouillements dus aux sous pressions ou à l'érosion sous la fondation des murs est grande. De plus le béton n'est pas un matériau déformable ce qui peut provoquer une rupture du béton.
Mur en béton inapproprié.
 - **Digue en remblai avec protection par des enrochements :**
 - Matériaux fins (limons, argiles), donc il y aura un phénomène d'érosion du aux vitesses d'écoulements qui dépassent les 4m/s.
Digue en remblai inapproprié.
 - **Digue en gabion ou en alvéoles :**
 - Les digues en alvéoles sont des digues déformables, cependant le m³ coûte 500 dh.
 - Les digues en gabion sont aussi des digues déformables, résistantes et moins chère avec un prix de 400dh le m³, d'où leur utilisation dans le cas de notre projet pour différentes raisons citées et conclus déjà.



VII- Les digues en gabion et dimensionnement

VII-1-Définition des gabions

Les gabions sont des structures composites polyvalentes et robustes, constituées de cages en grillage à double torsion remplies de blocs durs et résistants.

Ils peuvent remplir plusieurs types de fonctions dans des environnements côtiers, estuariens et fluviaux comme la protection contre l'érosion et le soutènement.

Le choix et la mise en place des blocs de remplissage appropriés, de la taille adéquate du grillage, des diamètres des fils métalliques et de la protection contre la corrosion sont des étapes importantes de ce processus pour mettre au point des solutions résistantes, durables et réussies du point de vue esthétique.

VII-2-Application des gabions

Les gabions peuvent être utilisés pour plusieurs types d'ouvrages, ou ils combinent les fonctions de protection contre l'érosion et le soutènement.

Ces ouvrages peuvent être soit :

- ✓ Ouvrages de soutènement,
- ✓ Protection anti-affouillement,
- ✓ Revêtement des canaux,
- ✓ Barrages mobiles
- ✓ Revêtements qui équipent les berges de rivières,
- ✓ Protection des lits de rivière contre l'érosion.

Dans le cas de notre projet, les gabions seront utilisés comme ouvrages de soutènement pour protéger d'une part contre l'affouillement, d'autre part contre l'érosion des berges et des lits du Oued Chouf Cherg, et enfin contre l'inondation de ce dernier.

VII-3-Classification des gabions

Les gabions peuvent être classés en boîtes de gabion, matelas de gabions et sacs de gabions, ainsi que définis ci-dessous :

- **(boîtes de) gabions** sont des cages métallique à double torsion de taille diverses, uniformément subdivisés en cellules remplis d'enrochement durable. C'est la forme qui sera en fait prise en compte pour la protection de notre Oued.



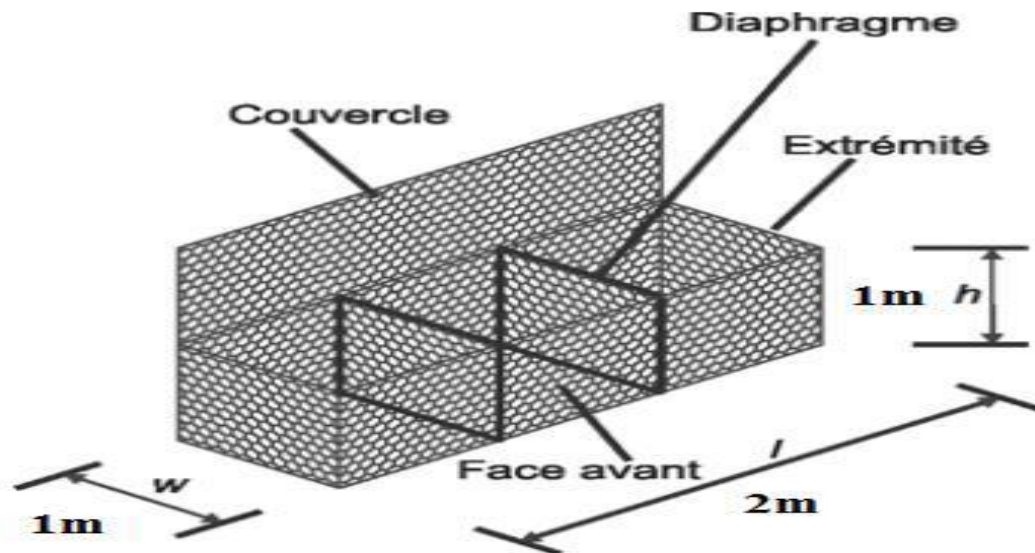


Figure 19: Boîtes de gabions

- Les **matelas de gabions** sont des gabions dont la hauteur est relativement faible par rapport à la longueur et à la largeur. ($h < 50 \text{ cm}$)

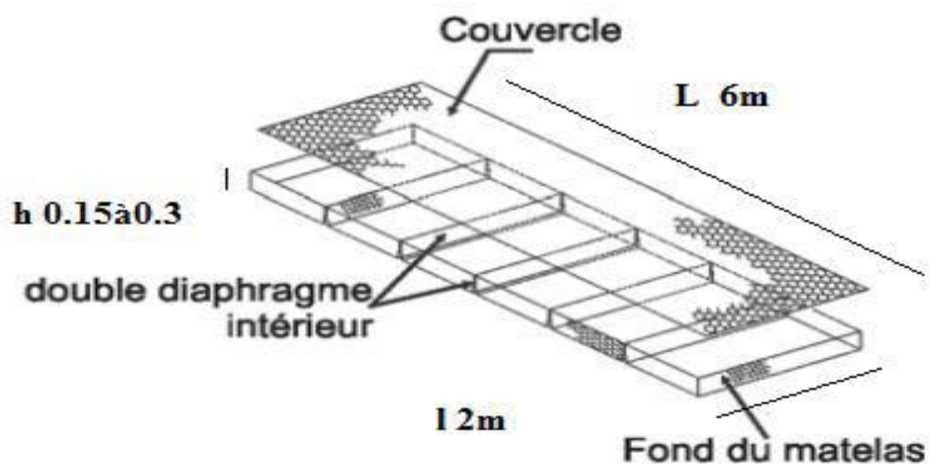


Figure 20: Matelas de gabions

- Les sacs de gabions ou gabion tubulaires sont des noms adoptés pour désigner des gabions en forme de « saucisse » qui servent principalement en génie fluvial à la protection de pied de berge.

VII-4-Elements constitutifs des gabions

VII-3-1-Propriétés du grillage des gabions

On utilise souvent un grillage à double torsion puisqu' il permet aux ouvrages finis de se déformer de manière significative sans se rompre et sans se « détricoter » si un fil est coupé.

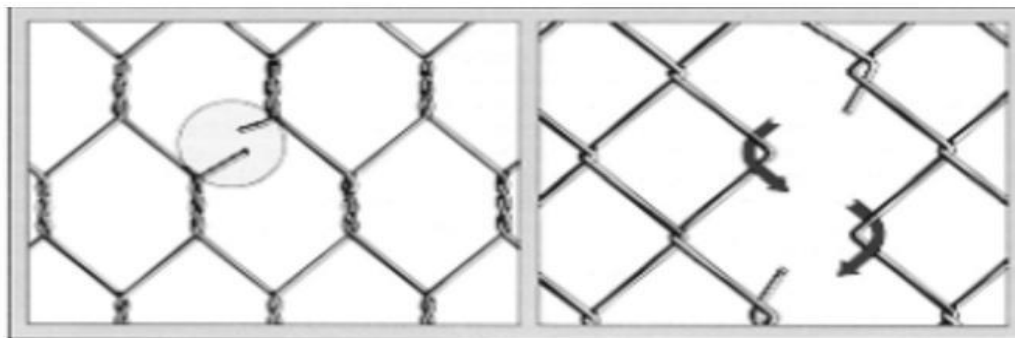


Figure 21: Avantages du grillage à double torsion par rapport au grillage en mailles simples

La seule norme existante pour la fabrication des gabions est la norme américaine AST A975-97. Les normes européennes actuelles n'ont trait qu'aux propriétés mécaniques et à la résistance à la corrosion du grillage et des fils métalliques.

Tableau 12: Normes européennes relatives au grillage métallique à double torsion

Propriétés du fil métallique	Normes d'essai	Contenu
Composition du fil d'acier	EN 10218-2	Composition de l'acier, résistance
Composition du grillage en acier	EN 10223-3	Le diamètre du fil, d (mm) dépend de la taille du grillage : Grillage 60 × 80 mm → $d = 2.2$ ou 2.4 mm Grillage 80 × 100 mm → $d = 2.7$ mm Grillage 100 × 120 mm → $d = 2.7$ ou 3 mm
Protection anti-corrosion (galvanisation)	EN 10244-1 EN 10244-2	L'épaisseur du revêtement est conforme à la classe A; la masse du revêtement, m_c , est liée au diamètre du fil d : $d = 2.2$ et 2.4 mm; $m_c = 230$ g/m ² $d = 2.7$ mm; $m_c = 245$ g/m ² $d = 3.0$ mm; $m_c = 255$ g/m ²
Protection anti-corrosion (enduit polymère)	EN 10245-1 EN 10245-2 EN 10245-3	Impératifs relatifs aux enduits organiques, PVC ou PE: épaisseur, composition, résistance, durabilité, flexibilité

La protection anticorrosion du grillage se présente sous deux formes ; tout d'abord grâce au processus de galvanisation du fil, ensuite par l'application d'un enduit polymère, en général PVC.

VII-3-2-Caractéristiques et propriétés des enrochements pour gabion

Les enrochements inclus dans les gabions doivent être résistants et, habituellement, il est utile de spécifier la qualité de l'enrochement à l'aide de la norme EN 13383.

Tableau 13: Recommandations pour l'enrochement utilisé dans les gabions

Propriété	Norme européenne de référence	Suggestion
Résistance mécanique de la roche ¹	Résistance à la compression (EN 1926) EN 13383 – 1	Classe EN 13383-1 : CS 60 (voir la Section 3.7.1)
	Los Angeles (EN 1097-2) Fragmentabilité FR (EN 1097-2)	LA < 45 ou LA > 45 et FR < 7
Résistance à l'attrition	Micro-Deval (EN 1097-1) Fragmentabilité FR (EN 1097-2)	M _{DE} < 45 ou M _{DE} > 45 et FR < 7
Résistance au gel/dégel	EN 13383 – 1	Catégorie pour FTA: Perte de masse < 0.5 %
Masse volumique de la roche	EN 13383 – 2	Masse volumique apparente > 2.2 t/m ³
Blocométrie	EN 13383 – 1 ²	CP _{90/180} ou équivalent (voir la Section 3.4.3.2) (ou CP _{90/130} pour les matelas)
Forme	-	Pas de condition spécifique
Type de roche	Pétrographie	Roche calcaire, siliceuse, méta- morphique ou ignée

VII-3-3-Propriétés physiques des gabions

La porosité des gabions varie selon le type de remplissage et la technique de remplissage. Les valeurs peuvent aller de 25 à 35%.

Leur résistance à la compression et au cisaillement dépend du type de grillage, du diamètre du fil et de l'enrochement utilisé pour le remplissage des cages.

Résistance à la compression : Le seul essai de résistance a été effectués sur des gabions d'un grillage 80*100 mm avec un fil de 2.7 mm de diamètre, rempli de blocs de 80*100 mm ont indiqué une contrainte de compression maximale importante de 4.5 Mpa à la rupture, avec des déformations de 50 à 60 %, ce qui souligne la nature flexible mais résistante des gabions.

Résistance au cisaillement : L'expérience a suggéré que les gabions ont une résistance au cisaillement similaire à celle d'un sol avec angle de frottement de (35à 45°) et une cohésion apparente de 40 Kpa.

VII-3-4-Propriétés hydrauliques des gabions

1. Stabilité statique de l'élément entier (les couches de gabions) d'une épaisseur, D';
2. Stabilité dynamique de l'enrochement, de taille caractéristique D_{n50} , dans la cage.

Il y a plusieurs méthode qui permette de calculer le diamètre des enrochements et l'épaisseur des gabions dont : formule de Shield, Pilarczyk, Escarmeia et May.



Chacune de ces méthodes s'applique pour un environnement donnée.

Formule d'ESCARMEIA et MAILLE tiré de l'équation de ISBAH cette équation est utilisé pour des fonds plat ou de pente inférieure $2 \text{ h} / 1 \text{ v}$.

$$\diamond D_{n50} = C_T \frac{(U_b)^2}{g\Delta}$$

Avec D_{n50} : taille médiane des enrochements

C_T : coefficient de turbulence

U_b : vitesse à 10% du fond

g : pesanteur

Δ : densité relative déjaugée

Gabions et matelas de gabions: $\Delta = (1-n_v)(\rho_r/\rho_w - 1)$

où n_v = porosité de couche $\cong 0.4$ (-), ρ_r = masse volumique apparente de la roche (kg/m^3) et ρ_w = masse volumique de l'eau (kg/m^3)

VII-5-Stabilité mécanique des gabions

La détermination de la section du mur en gabion est basée sur la vérification des conditions de stabilité :

- Celle relatives à la stabilité de glissement et renversement (stabilité générale),
- Celle relatives à la stabilité élastique c.à.d. aux contraintes, (stabilité locale)
- Celle relatives aux contraintes normales transmises à l'assise.

- Forces agissant sur le mur en gabion :

Les principales forces agissant sur les murs de gabion sont la force verticale et la contrainte latérale appliquée par le sol. Si d'autres forces sont rencontrées, tels que les charges des véhicules ou des charges sismiques, ils doivent également être inclus dans l'analyse.

La contrainte latérale du sol est en général déterminée par la formule Coulomb adaptée pour le matériau granulaire. Cette formule suppose une distribution triangulaire de contrainte, d'où, la résultante est égale :



$$Pa = Ka * ws * \frac{H^2}{2}$$

S'il y a une surcharge q : $Pa = Ka * (ws * \frac{H^2}{2} + qH)$

Avec ws : le poids volumique du sol,

Ka : coefficient de pression qui s'exprime,

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi - \beta)}{\cos^2 \beta \cos(\delta + \beta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \alpha)}{\cos(\delta + \beta) \cos(\alpha - \beta)}} \right]^2}$$

Où β : l'inclinaison du mur,

α : la pente du sol protégé,

ϕ : angle de frottement interne du sol

δ : angle de frottement du mur .

Le point d'application de cette force est situé à une distance d_a de la base qui vaut :

$$d_a = \frac{H(H + 3q/ws)}{3(H + 2q/ws)}$$

- Résistance au renversement :

Le moment appliqué sur le sol tend à renverser le mur. M_0 doit être équilibrée par le moment stabilisant du poids M_r . En statique, on exprime cette condition par l'inégalité : $Mr \geq SF_0 * M_0$ avec SF_0 est le coefficient de sécurité, égale 2.

- Résistance au glissement :

La force développée par le sol Ph tend à faire glisser le mur. Elle doit être équilibrée par la force de frottement μW_v (W_v la composante vertical du poids). En statique, on exprime cette condition par l'inégalité : $\mu W_v \geq SF_s * Ph$ avec SF_s est le coefficient de sécurité, égale 1.5

d. vérification de contrainte normale au niveau de l'assise :

Si B désigne la largeur de la base, donc l'excentricité e est égale :

$$e = \frac{B}{2} - (Mr - M_0)/W_v;$$



L'excentricité doit satisfaire : $-B/6 \leq e \leq B/6$

La contrainte normal maximal de compression à la base est donnée par :

$$P = \left(\frac{Wv}{B} \right) * \left(1 + 6 * \frac{e}{B} \right)$$

La contrainte maximale de compression P doit être inférieure à P_b : $P \leq P_b$.(P_b doit inclure le coefficient de sécurité). (Rick Christopherson, 2012). [34]

VII-6-Avantages des gabions

Les gabions sont utilisables pour des vitesses du courant allant jusqu'à 6 m/s et des hauteurs de vagues jusqu'à 1.5 m.

Des essais réalisés à l'université de Fort Collins montrent que le paramètre de Shield ψ est trois fois plus élevée pour les gabions que pour les enrochements libre ($\psi=0.14$ pour gabion ; $\psi=0.04-0.05$ enrochement) donc la taille des enrochements des gabions sera trois fois plus petite que celle des rip-rap.

Les gabions sont utilisables pour des vitesses du courant allant jusqu'à 6 m/s et des hauteurs de vagues jusqu'à 1.5 m.

Des essais réalisés à l'université de Fort Collins montrent que le paramètre de Shield ψ est trois fois plus élevée pour les gabions que pour les enrochements libre ($\psi=0.14$ pour gabion ; $\psi=0.04-0.05$ enrochement)


VII-7-Etude de stabilité des murs en gabions

➤ Entrée du Modèle

La stabilité des murs en gabions au glissement et au renversement a été vérifiée grâce au logiciel GEO 05 Gabions.

Les données suivantes présentent les fenêtres d'entrée pour le cas du mur en gabions d'une hauteur de 5m :



 Ajouter

Num.	Nom matériau
> 1	Matériau n° 1


Remplissage

Poids volumique : $\gamma = 18.00$ [kN/m³]
 Angle de frottement interne : $\phi = 30.00$ [°]
 Cohésion : $c = 0.00$ [kPa]

Treillis métallique


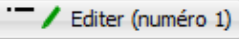
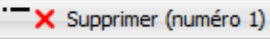
Résistance du maillage à la traction : $R_t = 40.00$ [kN/m]
 Distance entre les barreaux verticaux : $v = 1.00$ [m]
 Capacité portante de la jointure : $R_s = 40.00$ [kN/m]

Figure 22: fenêtre GEO 05 Gabions: caractéristiques du matériau

 Ajouter

Num.	Largeur b [m]	Hauteur h [m]	Décalage a [m]	Surplomb. du maill.	Surplombement l [m]	Capacité portante R_t [kN/m]	Matériau
> 7	2.00	1.00	1.00				Matériau n° 1
6	2.00	1.00	1.00				Matériau n° 1
5	2.00	1.00	1.00				Matériau n° 1
4	2.00	1.00	1.00				Matériau n° 1
3	2.00	1.00	1.00				Matériau n° 1
2	2.00	1.00	1.00				Matériau n° 1
1	2.00	1.00					Matériau n° 1

Figure 23: fenêtre GEO 05 gabions : géométrie

 Ajouter  Editer (numéro 1)  Supprimer (numéro 1)

Num.	Identification du sol
> 1	Limons

Limons

Poids volumique : $\gamma = 20.00$ kN/m³
 Etat de contraintes : effective
 Angle de frottement interne : $\phi_{ef} = 30.00$ °
 Cohésion du sol : $c_{ef} = 25.00$ kPa
 Angle de frot. structure-sol : $\delta = 10.00$ °
 Sol : pulvérulent
 Poids volumique du sol saturé : $\gamma_{sat} = 20.00$ kN/m³

Figure 24: fenêtre GEO 05 gabions: caractéristiques du sol

Vérification

Somme des forces appliquées à la structure

Nom	F_{hor} [kN/m]	Point d'application z [m]	F_{vert} [kN/m]	Point d'application x [m]	Coef. renv.	Coef. transl.	Coef. contrainte
Poids- mur	0.00	-4.16	152.00	4.66	1.000	1.000	1.350
Pression active	73.00	-2.56	0.06	2.00	1.350	1.350	1.000
Pression hydraulique	-55.00	-2.76	0.00	8.00	1.000	1.000	1.000
Soulèvement hydraulique	0.00	-7.00	0.00	8.00	1.000	1.000	1.000

Vérification du mur entier

Vérification de la résistance au renversement
Moment résistant $M_{res} = 505.82$ kNm/m
Moment de renversement $M_{Ovr} = 100.78$ kNm/m
Résistance du mur au renversement **ADMISSIBLE**

Vérification de la résistance au glissement
Force horizontale résistante $H_{res} = 125.27$ kN/m
Force horizontale sollicitante $H_{act} = 43.55$ kN/m
Résistance du mur au glissement **ADMISSIBLE**

Vérification globale - MUR **ADMISSIBLE**

Contrainte maximale à la base de la fondation : 102.63 kPa

Figure 25: fenêtre GEO 05 Gabions: vérification de la stabilité du mur d'une hauteur de 5m

PROFIL EN TRAVERS TYPE DE LA DIGUE EN GABIONS

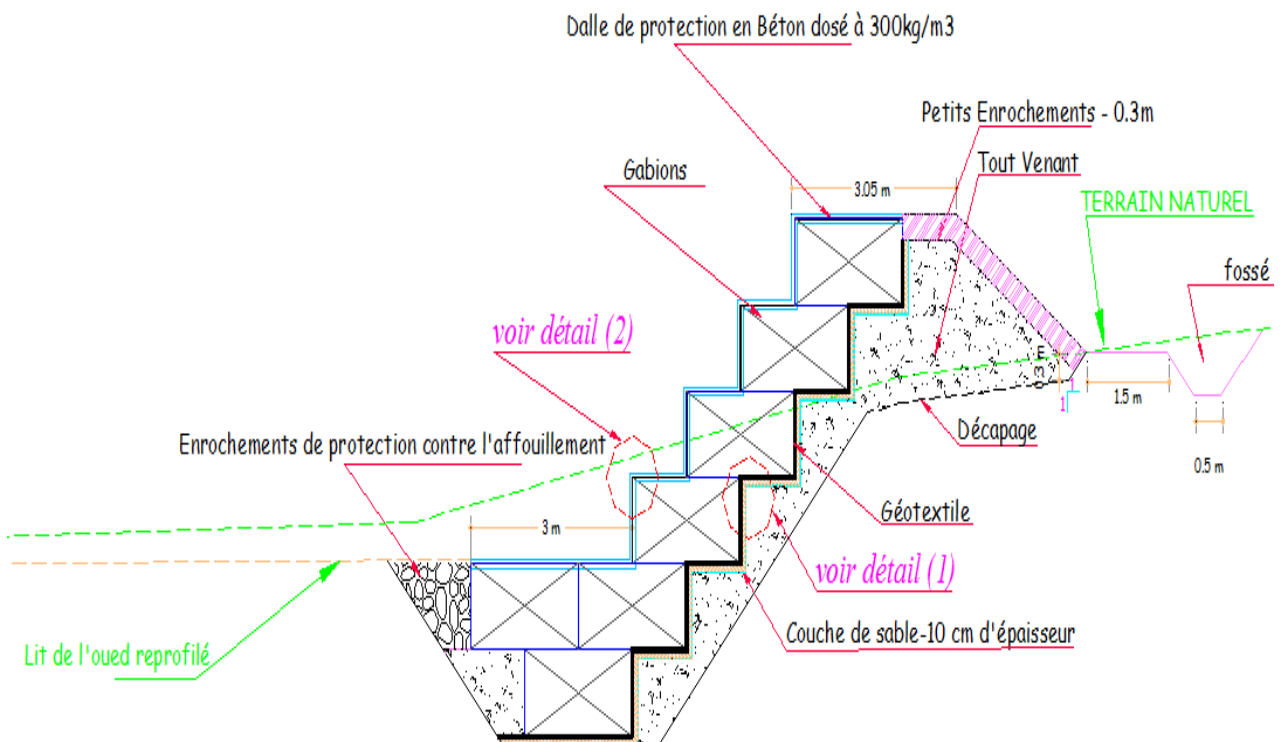


Figure 26: Coupe type de la digue en gabions

Tableau 14: Récapitulatif des résultats

Profil	Type d'aménagement	Hauteur d'aménagement	Profondeur d'affouillement	Hauteur totale d'aménagement
67 à 65 59 à 52 48 à 18	Digue en gabions	5 m	2 m	7 m
64 à 63	Digue en gabions	5,5 m	2 m	7,5 m
51 à 47	Digue en gabions	6 m	2 m	8 m
60 46 à 45	Digue en gabions	6,5 m	2 m	8,5 m

VII-8-Travaux d'aménagements de protection recommandés

Les débordements de l'Oued Chouf Cherg et les inondations qu'ils provoquent au niveau du périmètre Vieux Missouri, de la commune rurale de Sidi Boutayeb et de la Ville de Missouri sont dus :

A la présence de terrasses à un niveau relativement bas, de part et d'autre de l'oued, et notamment sur la rive droite de l'oued Chouf Cherg au niveau du périmètre Vieux Missouri et sur la rive gauche au niveau du quartier ERAC.

Au rétrécissement de la section de l'oued par endroit suite aux développements des terrasses agricoles.

Ces inondations ont un caractère dangereux du fait que la ville de Missouri s'étend, sous la pression urbanistique, vers les terrasses des oueds exposées aux inondations.

La protection de ces zones contre les inondations passe au préalable par la mise en oeuvre d'un système de réduction de la vulnérabilité dans les zones fréquemment inondées.



Ces zones doivent être déclarées zones non aédificandi et toute habitation se trouvant à l'intérieur doit être recasée ailleurs.

Ces mesures peuvent être regroupées comme suit :

Interdire toute construction nouvelle à l'intérieur des zones inondables soumises aux aléas les plus forts et saisir toutes les opportunités pour réduire le nombre des constructions exposées. Dans les zones inondables où les aléas sont moins importants, il convient donc de prendre les dispositions nécessaires pour réduire la vulnérabilité des constructions qui pourront éventuellement être autorisées.

Contrôler strictement l'extension de l'urbanisation dans les zones d'expansion des crues. (Cas le zone d'expansion du quartier ERAC)

Eviter tout aménagement ou nouveau remblaiement qui ne seraient pas justifié par la protection de lieux fortement urbanisés. En effet, ces aménagements sont susceptibles d'aggraver les risques en amont et en aval.

Les aménagements qui pourraient être envisagés pour pallier aux problèmes d'inondations précités risquant de toucher la partie Sud Est de la ville de Missouri, le périmètre d'irrigation, Vieux Missouri et les douars de la commune rurale Sidi Boutayeb qui bordent l'oued, sont présentés en annexe. Une description des principes de ces aménagements de protection est présentée ci-après :

- **Aménagement de l'Oued Chouf Cherg**

Pour réduire l'impact des inondations au niveau des zones menacées par les inondations de l'oued Chouf Cherg, il est nécessaire de réaliser les aménagements suivants :

Recalibrage de l'oued depuis le pont de la RN15 jusqu'à sa confluence avec l'oued Moulouya. Ce recalibrage consiste à uniformiser le lit mineur de l'oued et renfoncer les berges. Il sera réalisé par le déplacement des remblais vers les rives tout en gardant une section uniforme au niveau de chaque sous tronçon.



Conclusions et recommandations

Conclusions

La région de Boulemane compte parmi les agglomérations du Maroc touchées par les inondations. La charge solide emportée par les oueds traversant la zone, causent de sérieux dommages aux populations et aux infrastructures. Cette région a déjà connu d'importantes crues dans les dernières décennies. La plus mémorable date de 2008 sur l'Oued de Chouf Cherg, elle a causé de lourds dégâts matériels. L'oued Chouf Cherg draine les eaux de ruissellement des plus importants massifs montagneux du Moyen Atlas.

Le centre de **Missour** est parmi les localités traversées par Oued Chouf Cherg. Les eaux collectées par ce bassin s'écoulent vers la périphérie Sud Est de la ville de Missour.

Le risque d'inondation s'est développé avec l'extension de la ville de Missour vers ces oueds par la création de nouveaux lotissements et aménagements publics.

Le diagnostic de la problématique d'inondation fait ressortir une concordance de plusieurs facteurs ;

- L'oued présente des dépressions en rive droite au niveau desquelles les eaux des crues débordent et se dirigent vers les douars.
- L'urbanisation non contrôlée du centre
- A l'amont immédiat du pont Missour - Sidi Boutayeb, la rive gauche de l'oued présente un zone plane avec une pente qui se dirige vers le centre de Missour
- Les abords du cours d'eau sont exploités en parcelles agricoles, ce qui rend facile leur destruction en cas de crue.

Le présent travail porte sur une étude de protection contre les inondations pour la ville de **Missour**, cette étude a été envisagée par la **Direction des Aménagements Hydrauliques** relative au Ministère Déléguée Chargée de L'eau. Cette direction a confié par la suite la mission d'étude de protection contre les inondations au bureau d'études conseils Al Khibra.

L'objectif de l'étude consiste à diagnostiquer le mécanisme d'écoulement dans l'Oued Chouf Cherg, délimiter les zones inondables et proposer des mesures efficaces pour assurer un meilleur passage des crues.



Pour réaliser cette étude, j'ai suivi les étapes ci-après :

- Aperçu général de la conception des ouvrages hydrauliques ;
- Etude détaillée de l'aménagement de l'Oued Chouf Cherg pour la protection de la ville de Missouri contre les inondations ;
- Modélisation du cours d'eau à son état actuel à l'aide d'un modèle de simulation des écoulements en rivière HEC-RAS ;
- Délimitation des zones inondables en utilisant le logiciel HEC-RAS ;
- Etude d'aménagements de protection contre les inondations ;

Dans l'aperçu général, j'ai précisé les considérations qu'il faudrait appliquer, à savoir techniques, économiques, environnementales et sociales, pour assurer une bonne conception de l'ouvrage.

La partie de l'étude détaillée de la protection de la ville de Missouri contre les inondations a consisté au rappel du diagnostic actuel et l'étude hydrologique de l'oued Chouf Cherg, ensuite au résultat de l'étude hydraulique, et enfin à la définition des aménagements de protection contre les inondations à Missouri.

La modélisation de l'écoulement de l'eau dans l'Oued Chouf Cherg est réalisée pour un débit de pointe correspondant à une période de retour centennale. Les résultats sont exploités pour définir la limite des plus hautes eaux en cas des crues et donc définir les zones inondables.

Plusieurs solutions se sont présentées après une étude critique et économique la solution optimale choisi est la protection des berges par des digues en gabions.

La dernière étape consiste au dimensionnement de la digue dans chaque profil.

Recommandations

Devant les pertes en vies humaines constatées, devant l'inquiétude exprimée par les investisseurs, et devant la menace qui pèse sur des infrastructures, il est évident que le Maroc n'a guère le choix, il est condamné à protéger ses habitants, et ses infrastructures, le coût est certes élevé, mais il est beaucoup moins que celui des dégâts que causerait une crue surtout la vie humaine.

La responsabilité de l'Etat en matière de prévention des risques d'inondation repose sur :

- l'information des populations ;



- la maîtrise de l'urbanisation dans les zones inondables ;
- la préservation des zones naturelles d'expansion de crues ;
- la constitution à l'échelle des bassins hydrographiques d'un document de référence sur les phénomènes d'inondation permettra de mieux saisir les opportunités de développement en dehors de zones inondables
- et de développer la conscience du risque chez les populations exposées.

Les principes applicables en matière de prévention du risque « inondation » sont :

- la connaissance du risque d'inondation est un préalable à toute action ;
- l'établissement d'une cartographie des zones inondables est une action prioritaire ;
- l'information la plus large possible des citoyens de l'existence de l'atlas des zones inondables (AZI) est à mener.

Les atlas des zones inondables sont des documents cartographiques de connaissance et d'information sur les zones inondables par débordement de cours d'eau.

L'atlas des zones inondables a vocation à être enrichi à mesure de l'évolution des connaissances. Pour faciliter ce travail d'actualisation permanente, les informations reportées sur fond cartographique doivent être numérisées et organisées dans un système d'information géographique (SIG). Ce travail de numérisation se poursuit.

L'atlas des zones inondables constitue un outil de référence pour les services de l'Etat dans les différentes tâches dont ils ont la responsabilité. Il doit guider les collectivités territoriales dans leurs réflexions sur le développement et l'aménagement du territoire, en favorisant l'intégration du risque d'inondations dans les documents d'urbanisme (plans locaux d'urbanisme, cartes communales, règlements de lotissement, permis de construire). Il peut faciliter l'identification des zones de rétention temporaires des eaux de crues ainsi que les zones de mobilité du lit mineur des cours d'eau.

Un autre volet très important dans les programmes d'aménagement des zones inondables est la gestion, la surveillance et l'entretien des ouvrages mis en place pour la protection contre les inondations.



Revue Bibliographique

- [1] Direction de l'aménagement hydraulique (2001). *Etude du plan directeur contre les inondations et impacts des ouvrages de protection sur l'environnement*.
- [2] Adelin Villeveille (1997). *Regional Assessment of Climate Change in the Mediterranean: Volume 2*
- [3] Anthony Hurtubise (2014). *Sur l'environnement*. On Prezi.
- [4] BLANCHON D (2010). *L'eau, une ressource menacée?*, Paris, Documentation française
- [5] Munich Re (1999). *Annual Report*
- [6] ZAHOUR G (2009). *Gérer les risques d'inondations au Maroc*.
- [7] André, P, Delisle, E, Reveret, J P et Sene, A (2003). *L'évaluation des impacts sur l'environnement : processus, acteurs et pratique*, 2^{ème} édition, Ecole Polytechnique de Montréal
- [8] Budd, M, John, S, Simm, J ET Wilkinson, M (2003). *Coastal and marine environmental siteguide*. C584, CIRIA, Londres
- [9] Brampton, A, Wallis, M ET Holliday, E (2004). *Potential use of alternatives to primary aggregates in coastal and river engineering*. C590, CIRIA, Londres
- [10] Vrijling, J K (2001). "Probabilistic design of water defence systems". *The Netherlands Reliability Engineering and System Safety*, vol 74, n 3, Décembre 2001, pp 337-344
- [11] Schiereck G J (2001). *Introduction to bed, bank and shore protection- engineering the interface of soil and water*. Delft University Press (ISBN 90-407-1683-8)
- [12] Mockett, I D & Simm, J D (2002). *Risk levels in coastal and river engineering: a guidance framework for design*. Thomas Telford, Londres
- [13] Oumeraci, H, Kortenhaus, A, Allsop, W, De Groot, M, Crouch R, Vrijling, H et Voortman H (2001). *Probabilistic design tools for vertical breakwaters*. AA, Balkema, Rotterdam (ISBN 90-5809-248-8)
- [14] van Gelder, P H A J M (2000). *Statistical methods for the risk-based design of civil structures*. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering. Report no 00-1, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Technische Universiteit Delft (ISSN 0169-6548 00-1)
- [15] Mockett, I D & Simm, J D (2002). *Risk levels in coastal and river engineering: a guidance framework for design*. Thomas Telford, Londres
- [16] AIPCN (2001). "Low Water Corrosion-A Practitioner's Perspective" Proceedings 30th PIANC-AIPCN Congress, Sydney, Australia, 2002



- [17] SIRIA (1991). *Rock Manual*.
- [18] Brampton et al (2004). *Chapter 2, Rock Manual*.
- [19] Masters, N (2001). *Sustainable use of new and recycled materials in coastals and fluvial construction: a guidance manual*. Thomas Telford, Londres
- [20] Coventry, S, Kingsley, M ET Woolveridge, C (1998). *Environmental good practice-working on site*. C503, CIRIA, Londres
- [21] Budd et al (2003). *Chapter 2, Rock Manual*.
- [22] Morris, P & Therivel, R (1995). *Methods of environmental impact assessment*. Oxford Brookes University, Oxford
- [23] Simm et al. (2003). *Chapter 2, Rock Manual*.
- [24] VFN (1998). *Les barrages mobiles de navigation-guide du chef de projet*. Groupe moniteur, Paris
- [25] Michel, P (2001). *L'étude d'impact sur l'environnement*. Ministère de l'aménagement du Territoire et de l'environnement, Paris
- [26] SETRA (1996). *Projets routiers: Le dossier d'étude d'impact : guide méthodologique*. SETRA, Bagneux
- [27] CETMEF (1978). *Les études préalables aux aménagements portuaires*. CETMEF, Compiègne
- [28] Simm, J D & Cruickshank, I C (1998). *Construction risk in coastal engineering*. Thomas Telford, Londres
- [29] Howard, N, Edwards S ET Anderson, J (1999). *Methodology for environmental profiles of construction materials, components and buildings*. Building Research Establishment, Garston
- [30] WCED (1987). *Our common future. Report of the 1987 World Commission on Environment and Development (the Brundtland Report)*. Oxford University Press
- [31] BIOTEC, Malavoi J.R., 2007 : *Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau*. Publication de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. 62 p. Forst C
- [32] Rosgen, D.L. (1996). *Applied river morphology*. Wildland hydrology, Pagosa Spring, CO.
- [33] ENSEEIHT. (2006). <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/projnum/content/2011-g3/1-modeliser-une-riviere-avec-hec-ras>
- [34] Rick Christopherson. (2012). *MGS Gabion Walls Design Guide*.



Annexes

Annexe 1 : Zones inondables au Maroc à risques variables

Annexe 2 : Situation générale de Sidi Boutaib

Annexe 3 : Schéma géologique et hydrologique de la ville de Missour

Annexe 4 : Schéma descriptif du diagnostic de la situation existante

Annexe 5 : Résultat de la modélisation de la crue centennale de l'oued Chouf Cherg

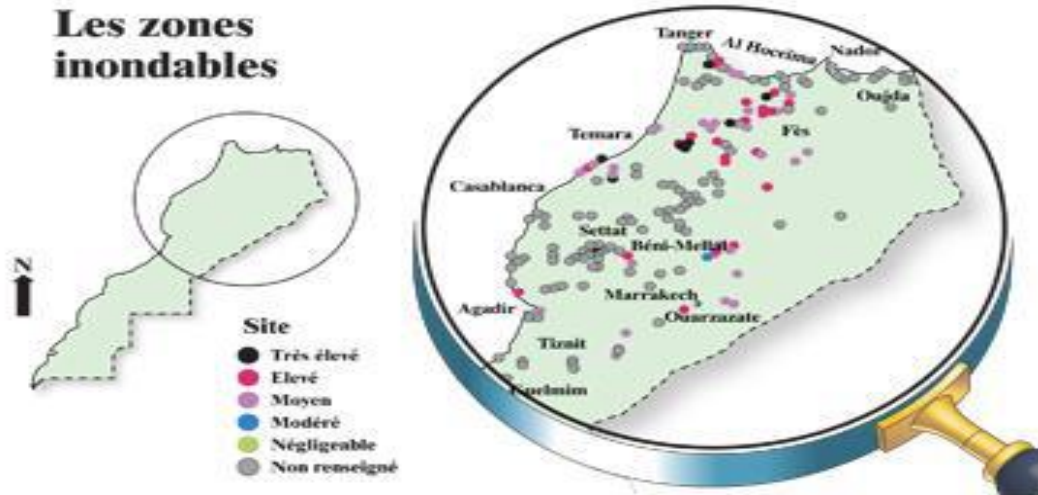
Annexe 6 : Aménagement de Missour

Annexe 7 : Résultat de l'étude de stabilité des murs en gabion

Annexe 8 : Photos de l'Oued Chouf Cherg



Annexe 1 : Les zones inondables au Maroc avec risques variables



Source: Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau et de l'Environnement

Figure 27: Les zones inondables au Maroc avec risques variables

Annexe 2 : Situation générale Sidi Boutaib

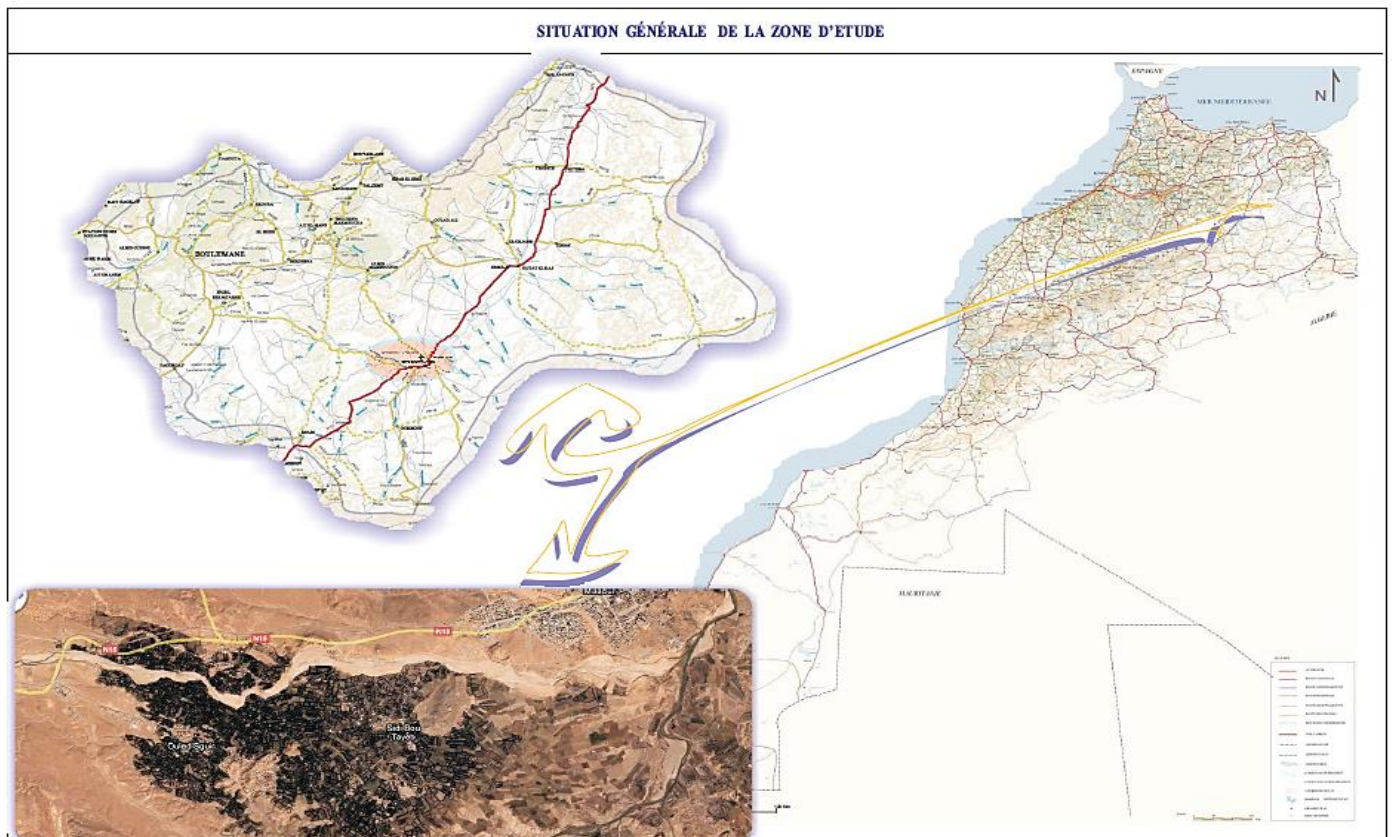
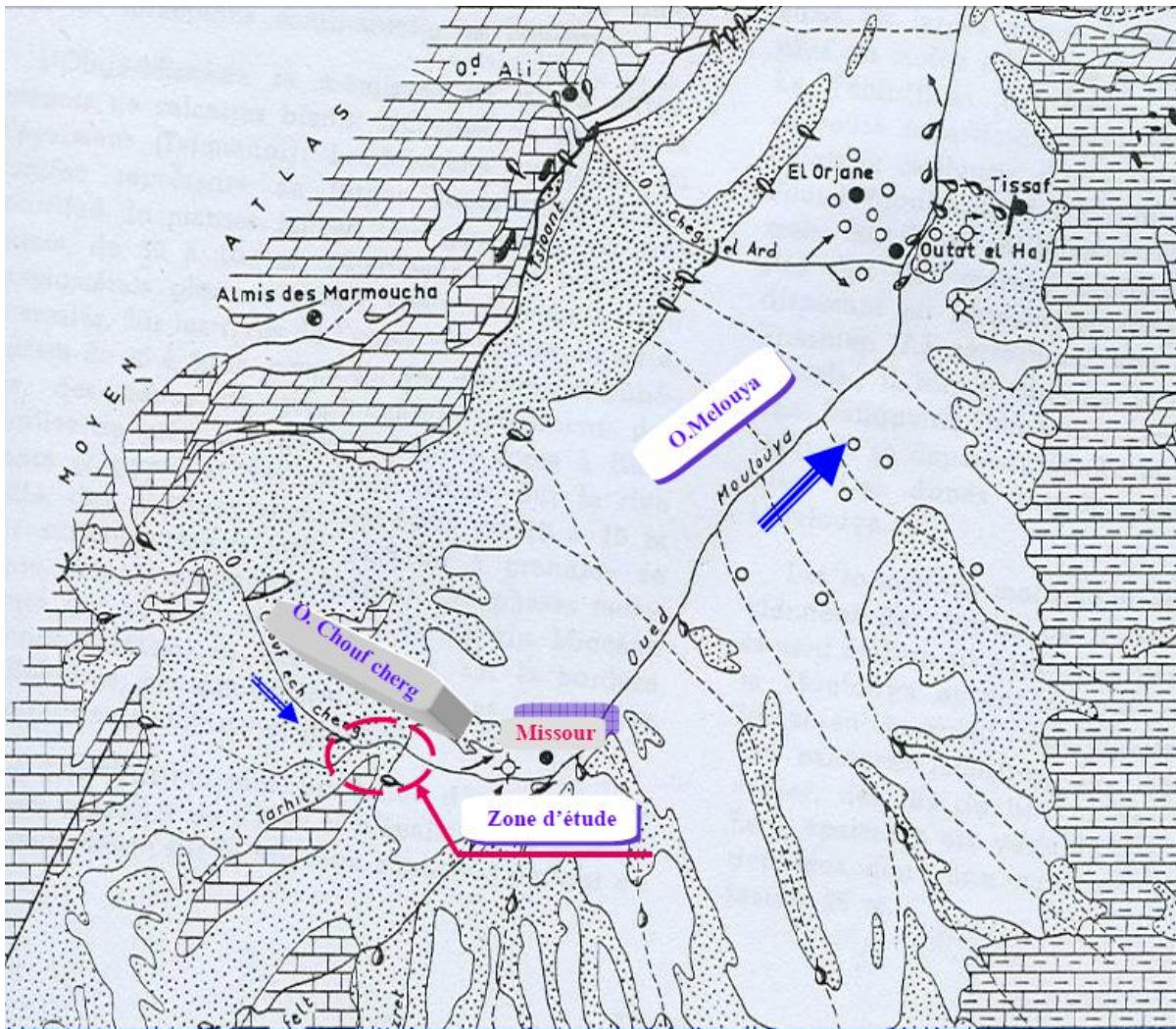


Figure 28: Situation générale Sidi Boutaib

Annexe 3 : Schéma géologique et hydrologique de la zone d'étude



Légende :




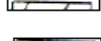
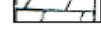

-  Quaternaire : galets, limons, agiles, calcaire lacustre, marnes et conglomérats
-  Tertiaire : marno-grés
-  Crétacé : marneux à la base, calcaire au sommet
-  Dogger : calcaire, dolomies, marnes
-  Lias : calcaires
-  Trias : marne

Figure 29: Schéma géologique et hydrologique de la zone d'étude

Annexe 4 : Schéma descriptif du diagnostic de la situation actuelle

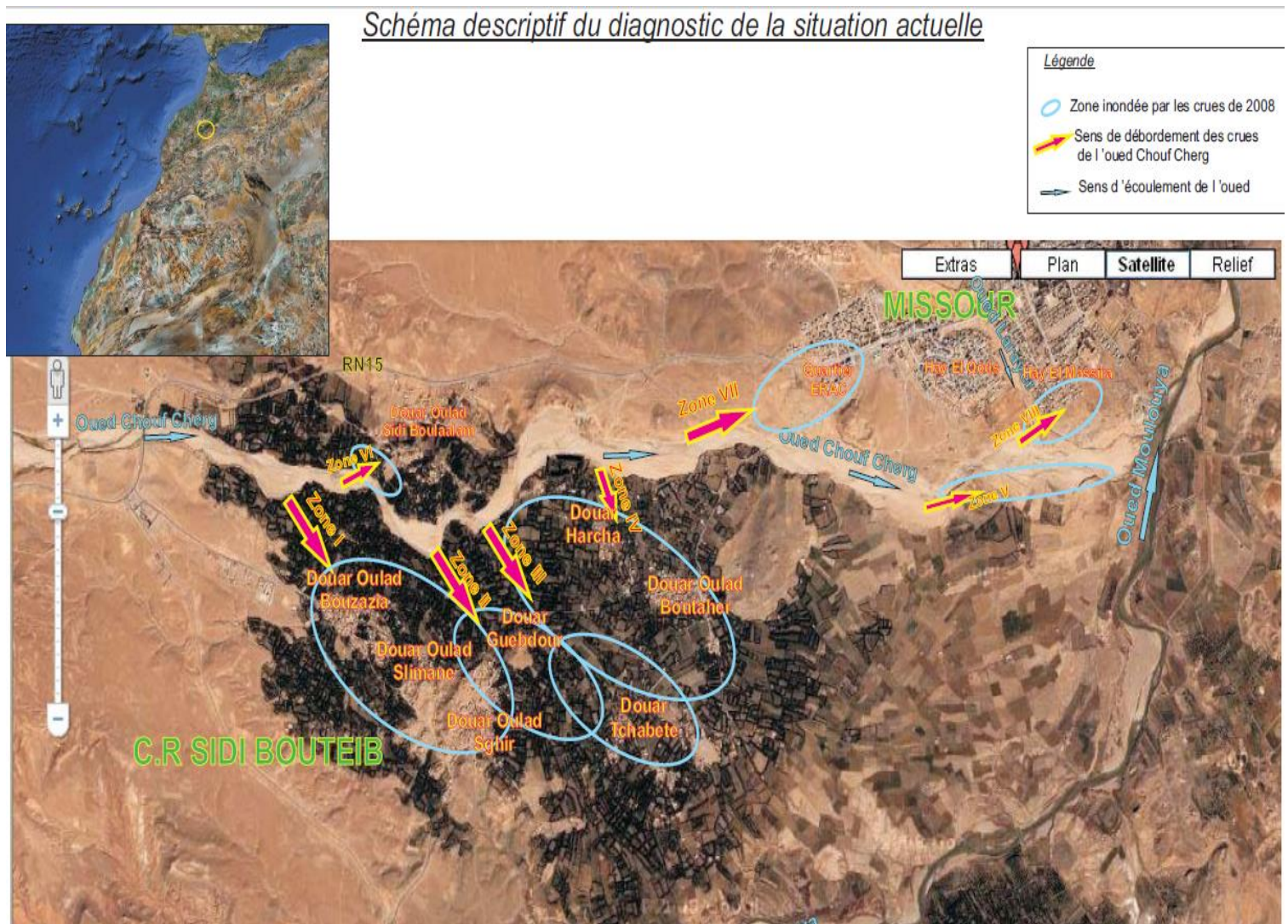
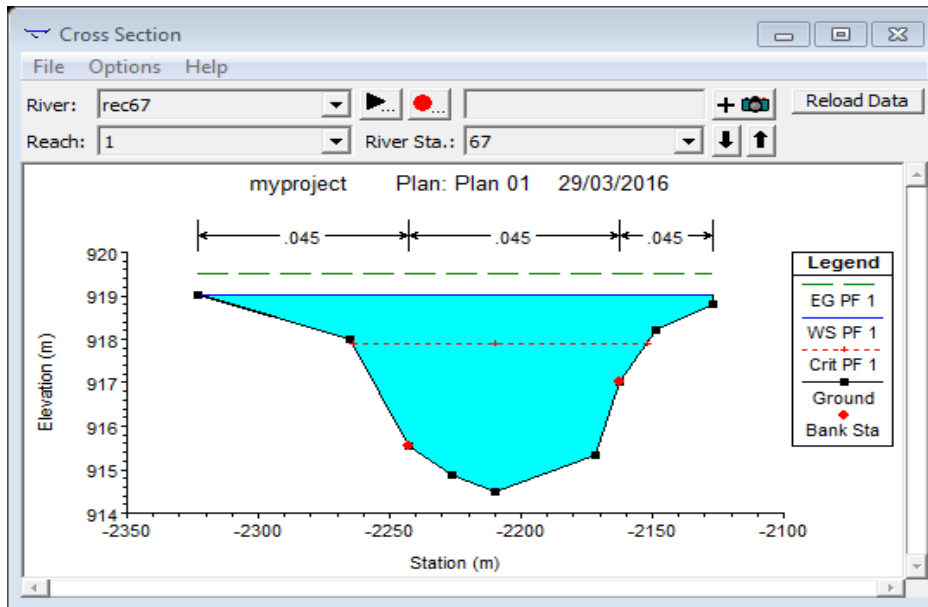


Figure 30: Schéma descriptif du diagnostic de la situation actuelle

Annexe 5 : Résultat de la modélisation de la crue centennale de l'oued Chouf Cherg



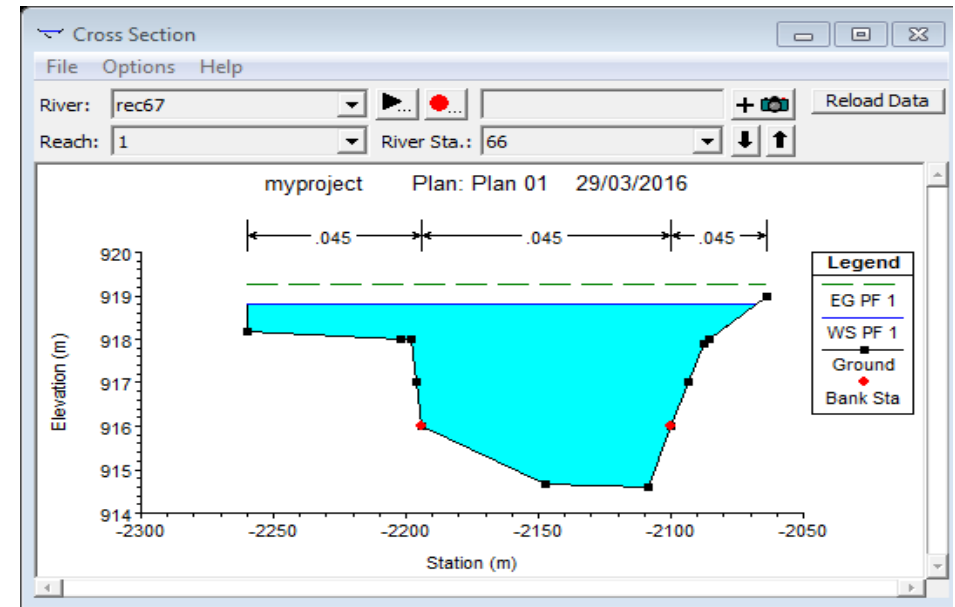
Cross section- Profil 67

Au niveau du profil amont 67, on remarque qu'il y a un débordement au niveau de la rive droite.

On doit donc calculer la hauteur d'eau de ce profil pour déterminer la hauteur de l'aménagement mis en jeu. Il est important de signaler qu'on doit ajouter une hauteur de sécurité de 50cm en plus de la hauteur d'eau calculée.

$$\text{On a : } h_{67} = 919,01 - 914,5 = 4,5\text{m} \quad ; \quad h_{67} + 0,5 = 5\text{m}$$

D'après ces résultats, on doit donc prévoir une canalisation jusqu'à la hauteur de 5m.



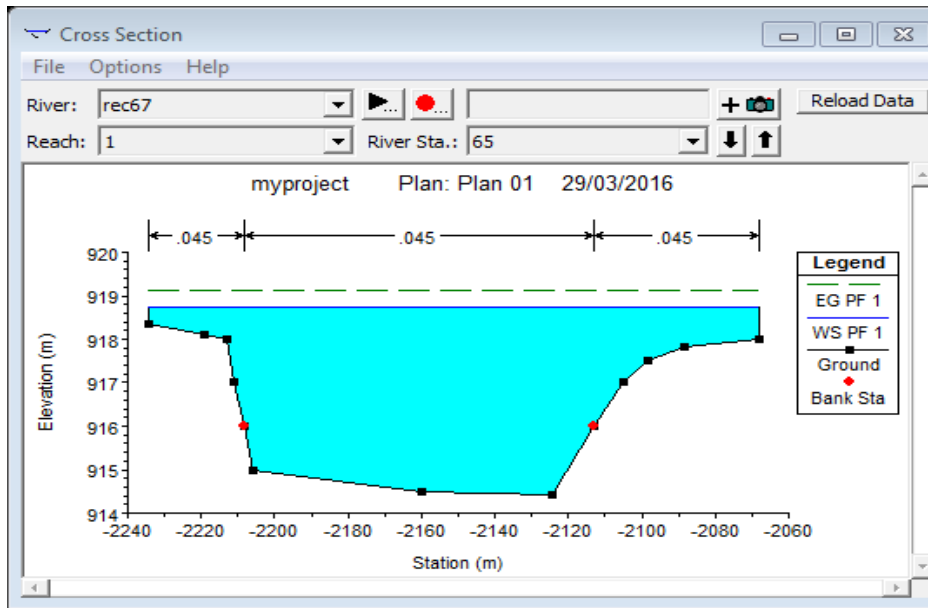
Cross section- Profil 66

Au niveau du profil 66, on remarque qu'il y a un débordement au niveau de la rive gauche.

$$\text{On a : } h_{66} = 918,8 - 914,6 = 4,23\text{m} \quad ; \quad h_{66} + 0,5 = 4,73\text{m}$$

D'après ces résultats, on doit donc prévoir une canalisation jusqu'à la hauteur de 5m.



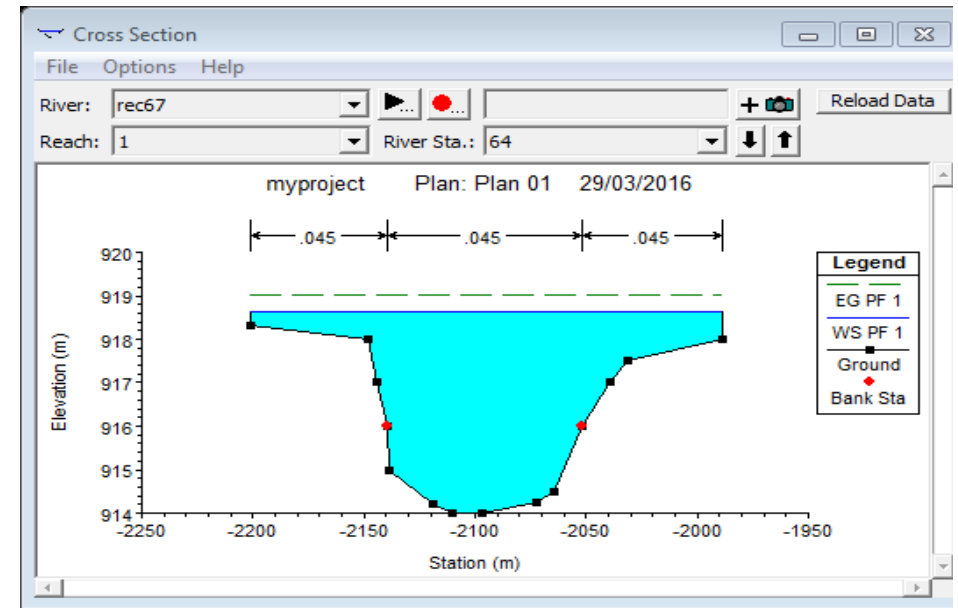


Cross section- Profil 65

Au niveau du profil 65, on remarque qu'il y a un débordement au niveau des deux rives.

$$\text{On a : } h_{65} = 918,72 - 914,4 = 4,32\text{m} \quad ; \quad h_{65+0,5} = 4,82\text{m}$$

D'après ces résultats, on doit donc prévoir une canalisation jusqu'à la hauteur de 5m.



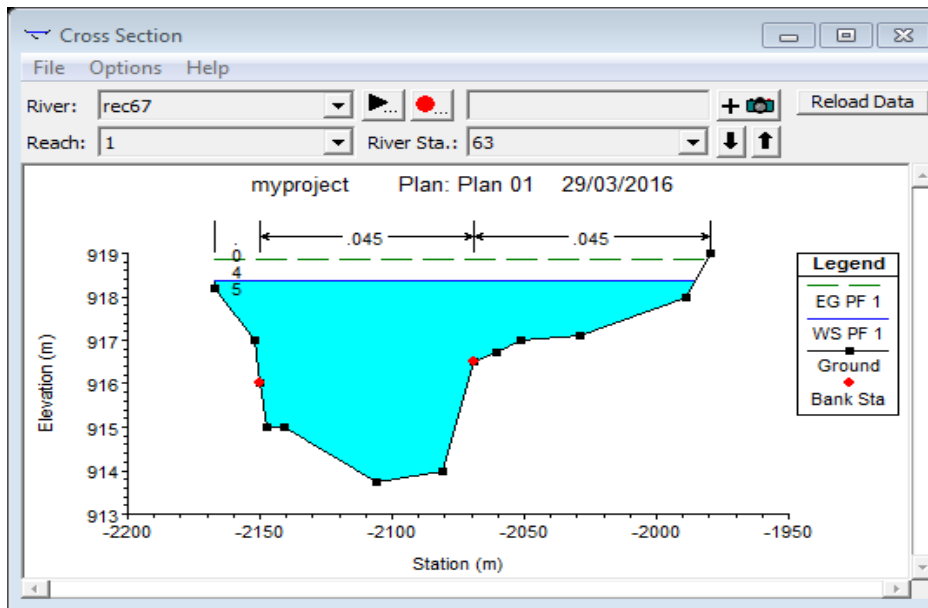
Cross section- Profil 64

Au niveau du profil 64, on remarque qu'il y a un débordement au niveau des deux rives.

$$\text{On a : } h_{64} = 918,62 - 914 = 4,62\text{m} \quad ; \quad h_{64+0,5} = 5,12\text{m}$$

D'après ces résultats, on doit donc prévoir une canalisation jusqu'à la hauteur de 5,5m.



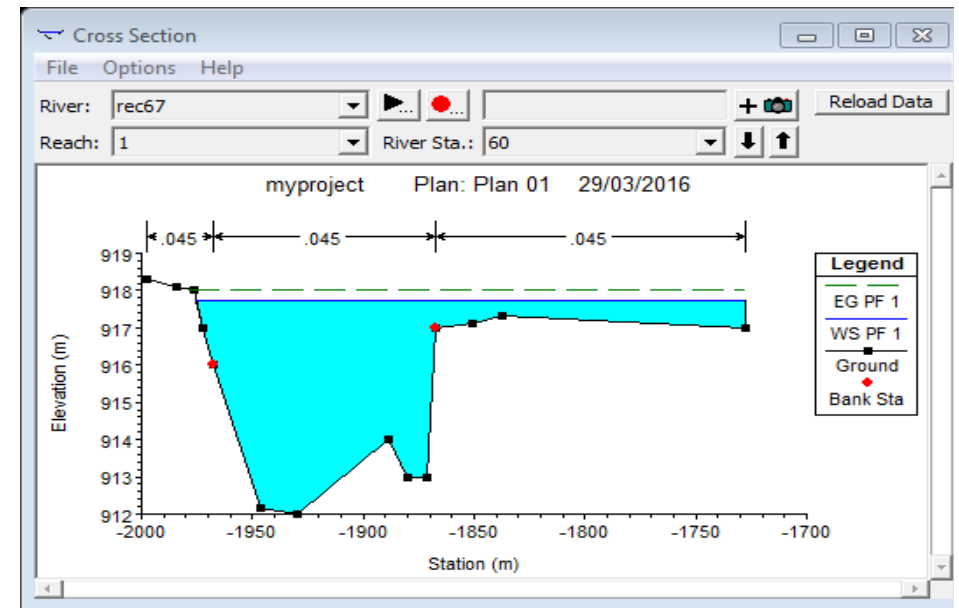


Cross section- Profil 63

Au niveau du profil 63, on remarque qu'il y a un débordement au niveau de la rive gauche.

On a : $h_{63} = 918,38 - 913,72 = 4,66\text{m}$; $h_{63+0,5} = 5,16\text{m}$

D'après ces résultats, on doit donc prévoir une canalisation jusqu'à la hauteur de 5,5m.



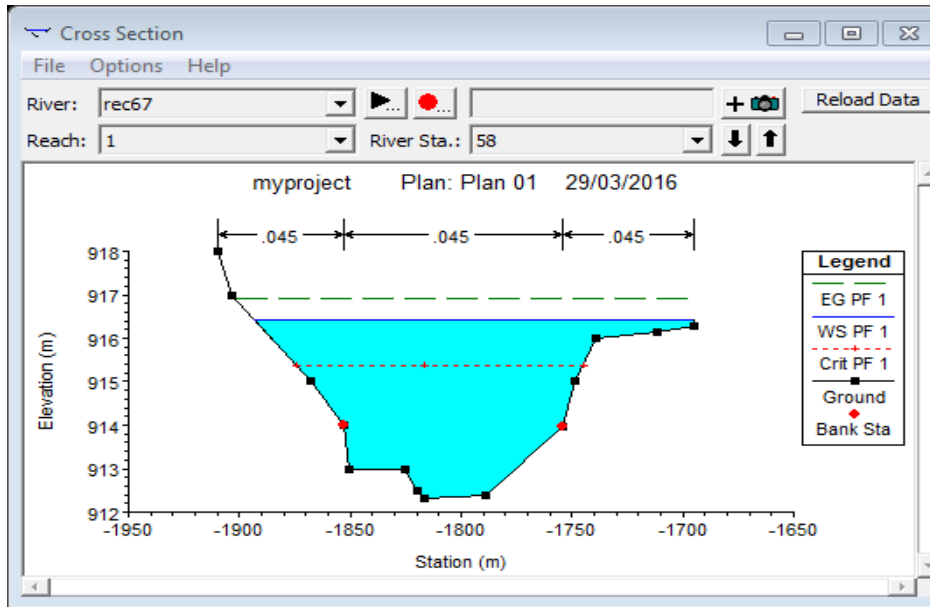
Cross section- Profil 60

Au niveau du profil 60, on remarque qu'il y a un débordement au niveau de la rive droite.

On a : $h_{60} = 917,73 - 912 = 5,73\text{m}$; $h_{60+0,5} = 6,23\text{m}$

D'après ces résultats, on doit donc prévoir une canalisation jusqu'à la hauteur de 6,5m.



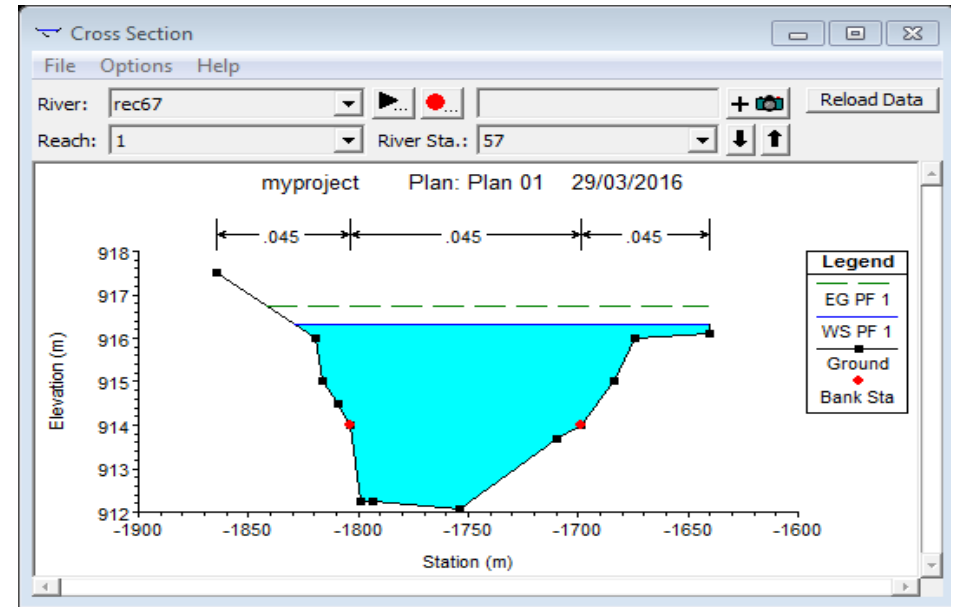


Cross section- Profil 58

Au niveau du profil 58, on remarque qu'il y a un débordement au niveau de la rive droite.

On a : $h_{58} = 916,43 - 912,3 = 4,13\text{m}$; $h_{58+0,5} = 4,63\text{m}$

D'après ces résultats, on doit donc prévoir une canalisation jusqu'à la hauteur de 5m.



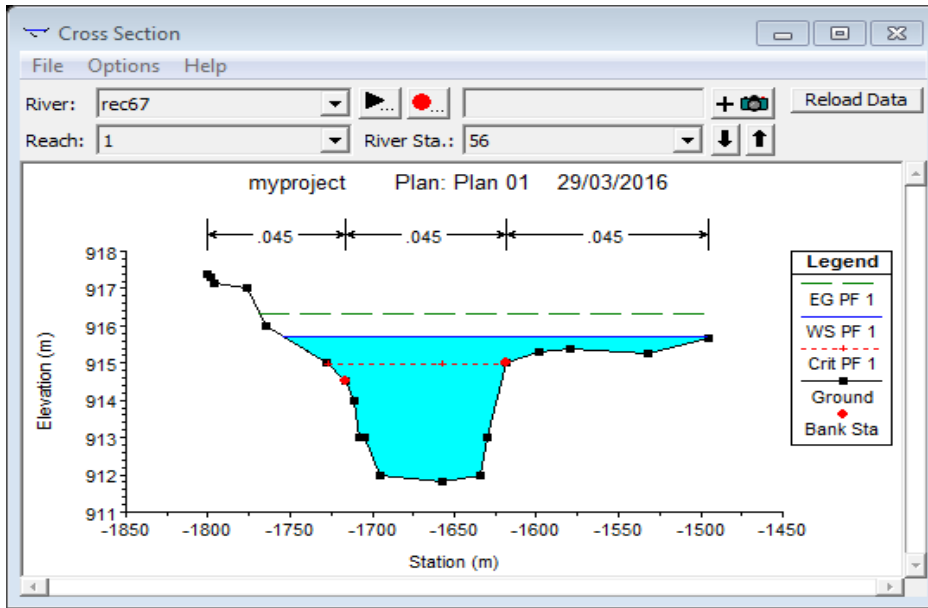
Cross section- Profil 57

Au niveau du profil 57, on remarque qu'il y a un débordement au niveau de la rive droite.

On a : $h_{57} = 916,31 - 912,06 = 4,25\text{m}$; $h_{57+0,5} = 4,75\text{m}$

D'après ces résultats, on doit donc prévoir une canalisation jusqu'à la hauteur de 5m.



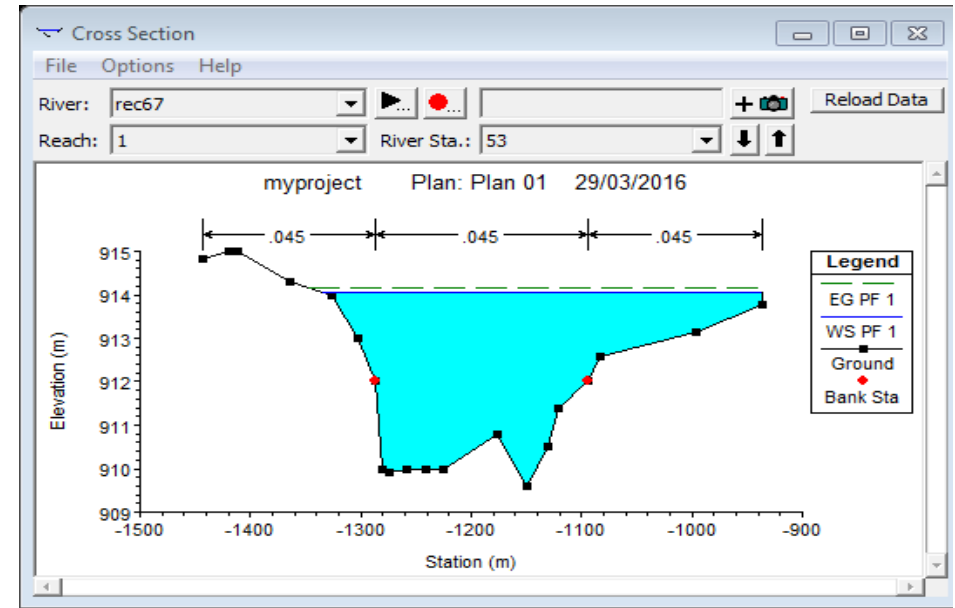


Cross section- Profil 56

Au niveau du profil 56, on remarque qu'il y a un débordement au niveau de la rive droite.

$$\text{On a : } h_{56} = 915,72 - 911,85 = 3,87\text{m} \quad ; \quad h_{56+0,5} = 4,37\text{m}$$

D'après ces résultats, on doit donc prévoir une canalisation jusqu'à la hauteur de 4,5m.



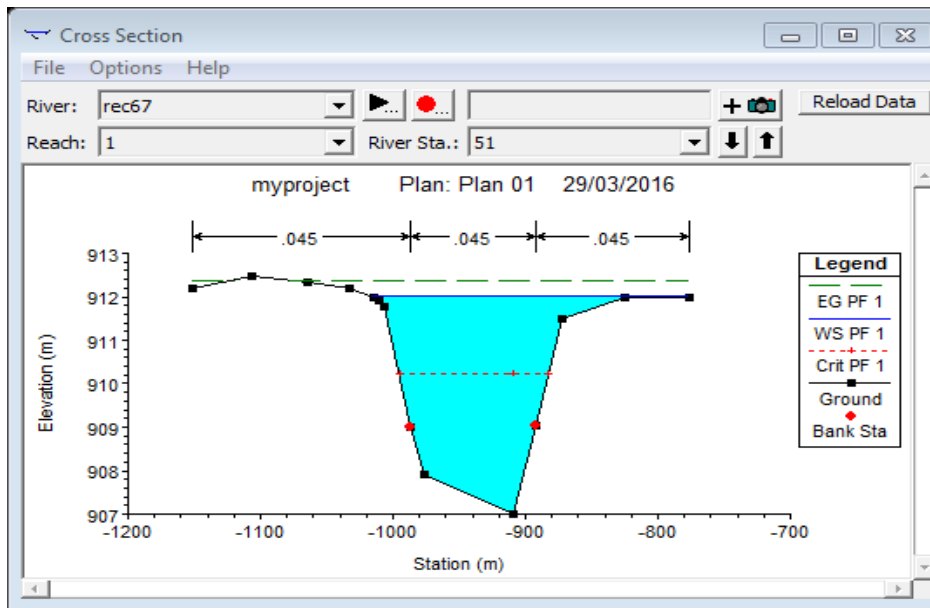
Cross section- Profil 53

Au niveau du profil 53, on remarque qu'il y a un débordement au niveau de la rive droite.

$$\text{On a : } h_{53} = 914,04 - 909,61 = 4,43\text{m} \quad ; \quad h_{53+0,5} = 4,93\text{m}$$

D'après ces résultats, on doit donc prévoir une canalisation jusqu'à la hauteur de 5m.



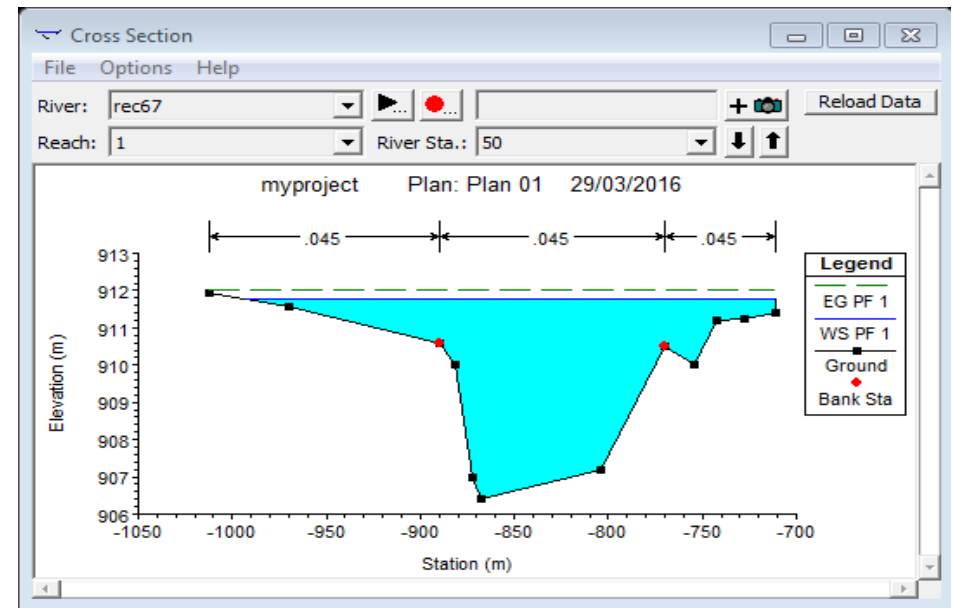


Cross section- Profil 51

Au niveau du profil 51, on remarque qu'il y a un débordement au niveau de la rive droite.

$$\text{On a : } h_{51} = 912,02 - 907 = 5,02\text{m} \quad ; \quad h_{51+0,5} = 5,52\text{m}$$

D'après ces résultats, on doit donc prévoir une canalisation jusqu'à la hauteur de 6m.



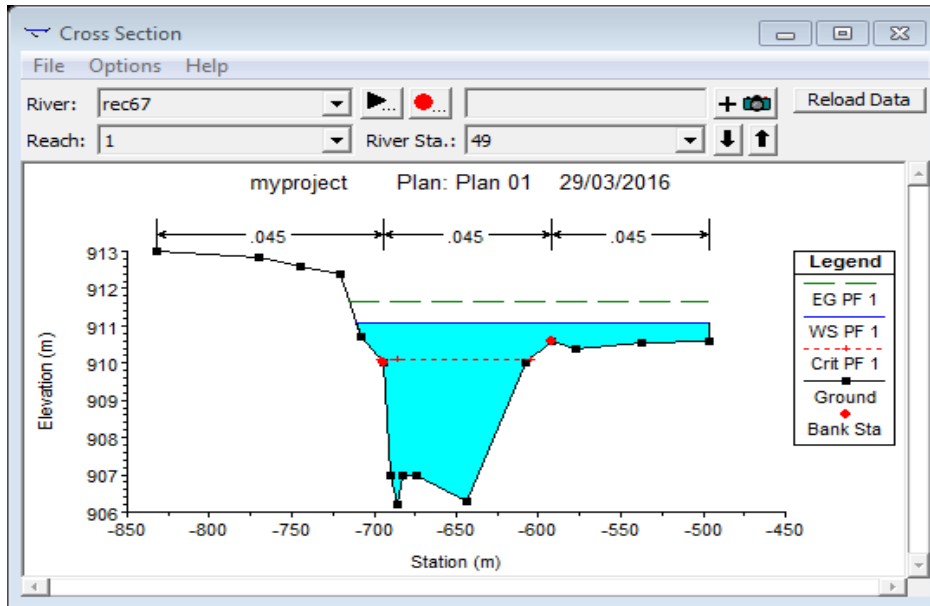
Cross section- Profil 50

Au niveau du profil 50, on remarque qu'il y a un débordement au niveau de la rive droite.

$$\text{On a : } h_{50} = 911,79 - 906,43 = 5,36\text{m} \quad ; \quad h_{50+0,5} = 5,86\text{m}$$

D'après ces résultats, on doit donc prévoir une canalisation jusqu'à la hauteur de 6m.



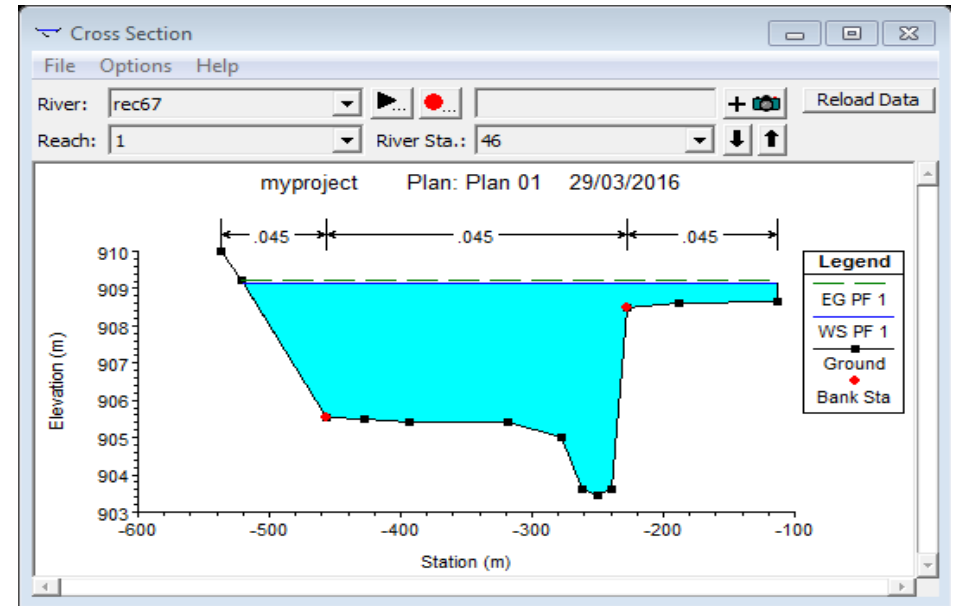


Cross section- Profil 49

Au niveau du profil 49, on remarque qu'il y a un débordement au niveau de la rive droite.

$$\text{On a : } h_{49} = 911,08 - 906,20 = 4,88\text{m} \quad ; \quad h_{49+0,5} = 5,38\text{m}$$

D'après ces résultats, on doit donc prévoir une canalisation jusqu'à la hauteur de 6m.



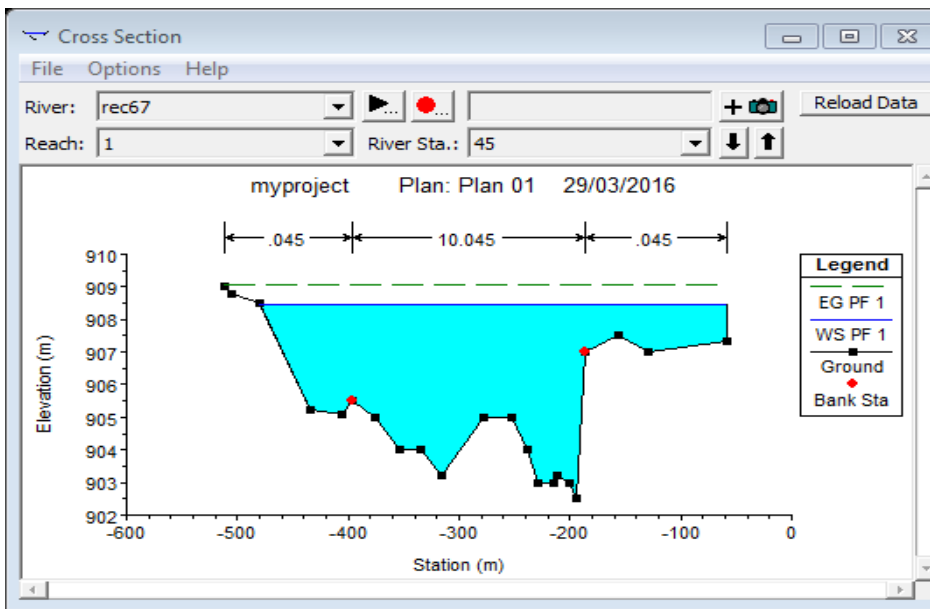
Cross section- Profil 46

Au niveau du profil 46, on remarque qu'il y a un débordement au niveau de la rive droite.

$$\text{On a : } h_{46} = 909,16 - 903,46 = 5,7\text{m} \quad ; \quad h_{46+0,5} = 6,2\text{m}$$

D'après ces résultats, on doit donc prévoir une canalisation jusqu'à la hauteur de 6,5m.



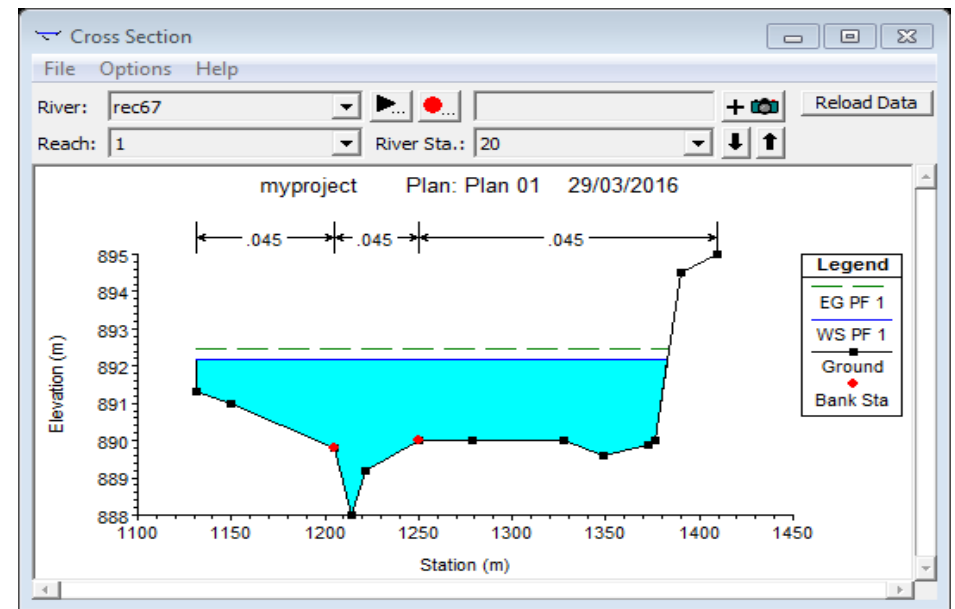


Cross section- Profil 45

Au niveau du profil 45, on remarque qu'il y a un débordement au niveau de la rive droite.

On a : $h_{45} = 908,46 - 902,5 = 5,96\text{m}$; $h_{45+0,5} = 6,46\text{m}$

D'après ces résultats, on doit donc prévoir une canalisation jusqu'à la hauteur de 6,5m.



Cross section- Profil 20

Au niveau du profil 20, on remarque qu'il y a un débordement au niveau de la rive gauche.

On a : $h_{20} = 892,19 - 888 = 4,19\text{m}$; $h_{20+0,5} = 4,69\text{m}$

D'après ces résultats, on doit donc prévoir une canalisation jusqu'à la hauteur de 5m.



Annexe 6: Aménagement de missour

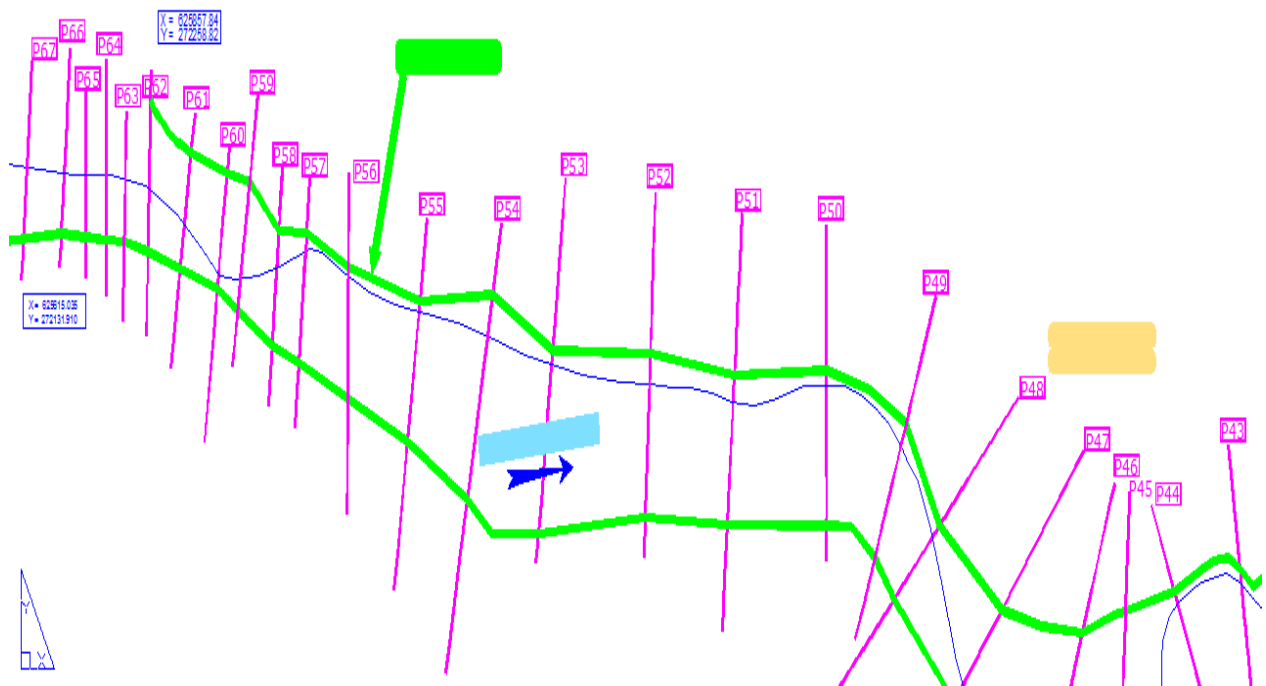


Figure 31: Aperçu d'un tronçon de profils en travers au long de l'oued Chouf Cherg

Annexe 7 : Résultat de l'étude de stabilité des murs en gabion

1) Du profil 67 à 65, 59 à 52 et 48 à 18 on a :

- La hauteur du mur à construire est de 5m.

De plus et d'après le résultat du calcul d'affouillement par la méthode de SOGREAH, on trouve :

- La hauteur de fondation est 2m.

En se basant sur ces résultats, on vérifie la stabilité de ces murs à l'aide du logiciel GEO 05 Gabions qui a pour objectif de vérifier la stabilité des murs construits à partir de cages remplies de roche (gabions).



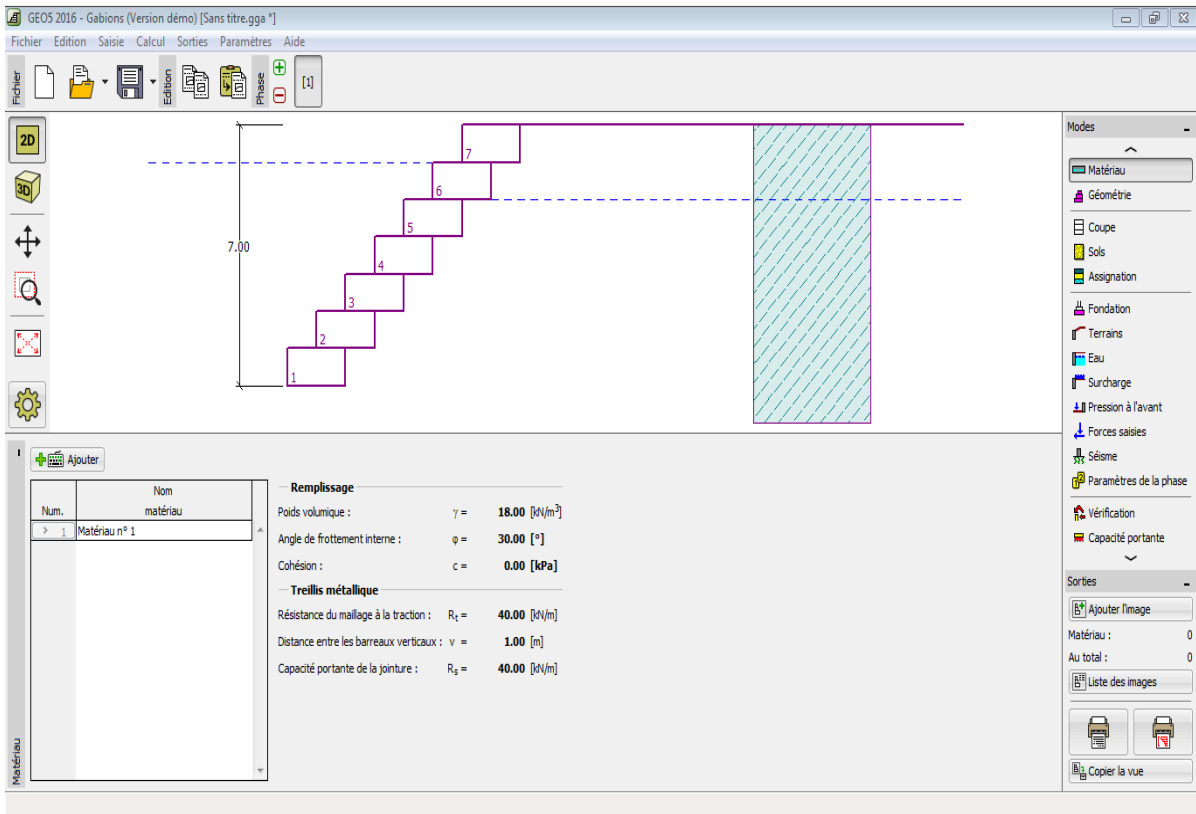


Figure 32: Fenêtre GEO 05 Gabions- Matériau- Mur de 5m

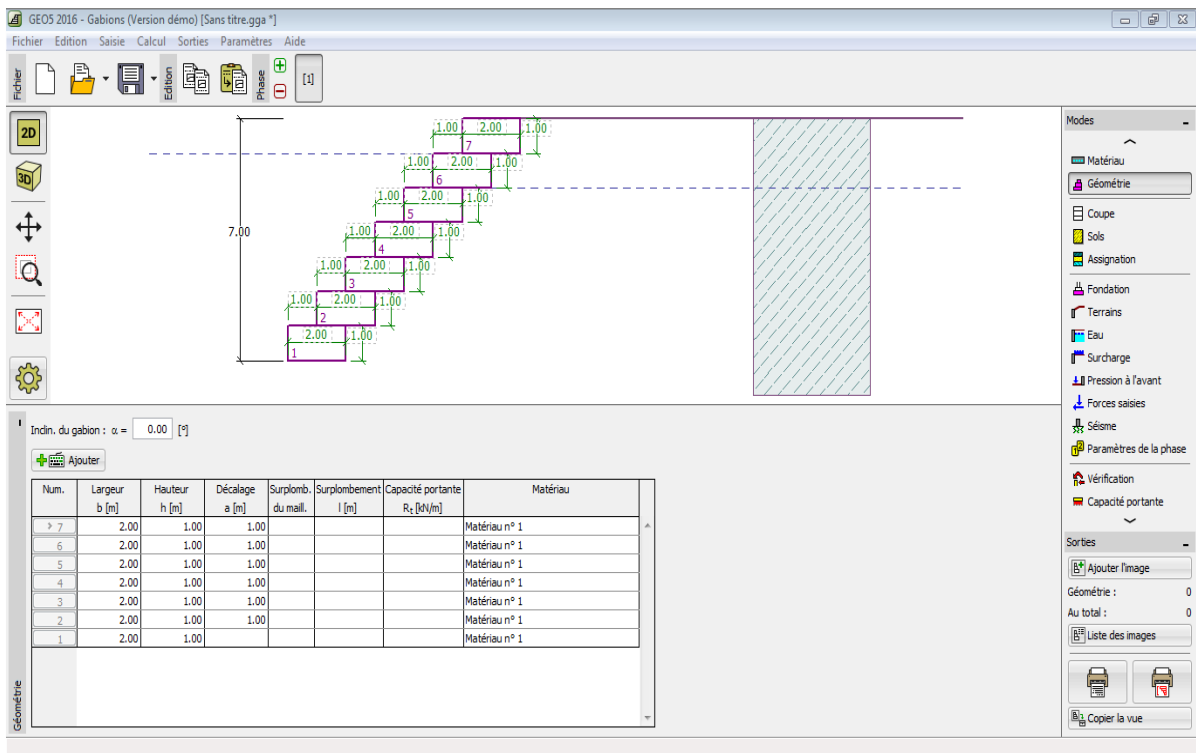


Figure 33: Fenêtre GEO 05 Gabion- Géométrie du mur de 5m

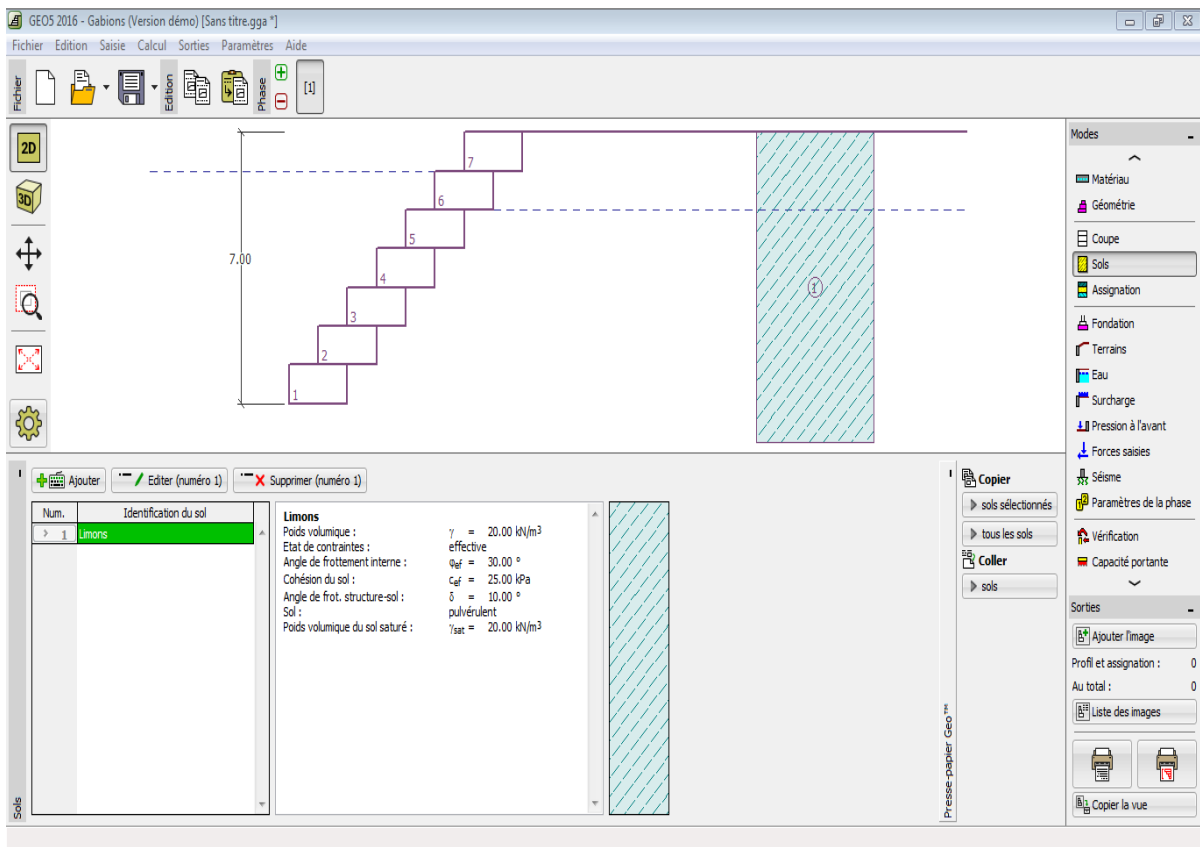


Figure 34: Fenêtre GEO 05 Gabions- Sols- Mur de 5m

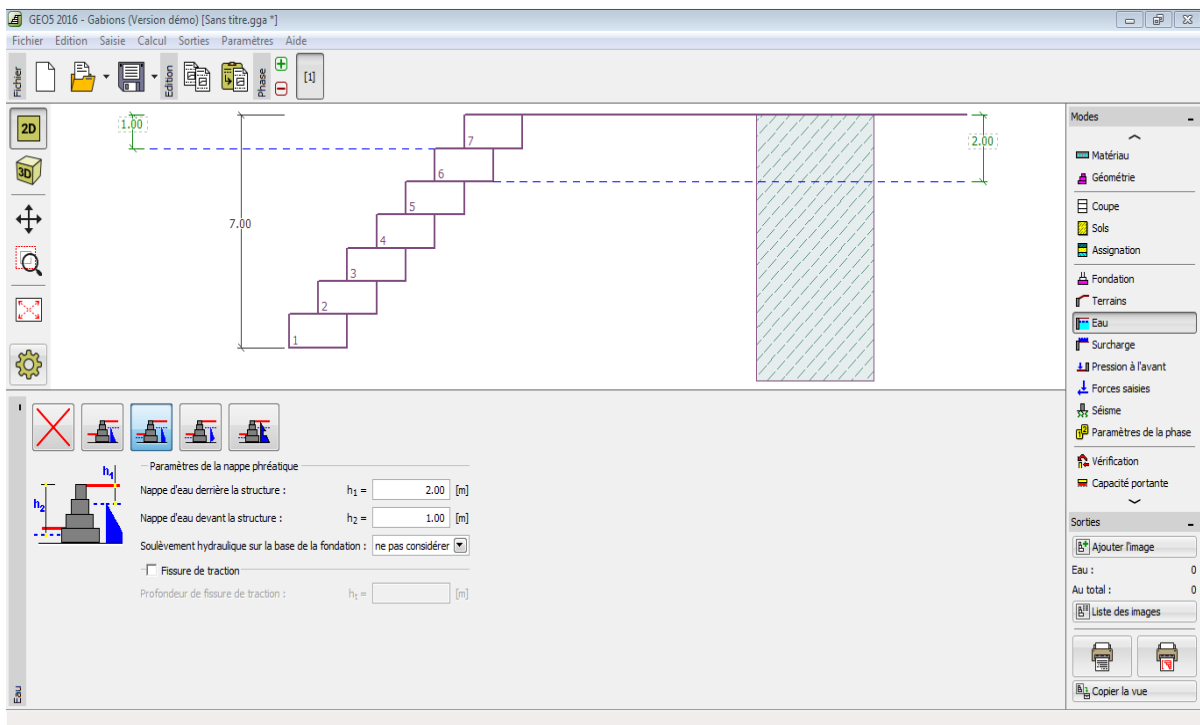


Figure 35: Fenêtre GEO 05 Gabions- Eau- Mur de 5m

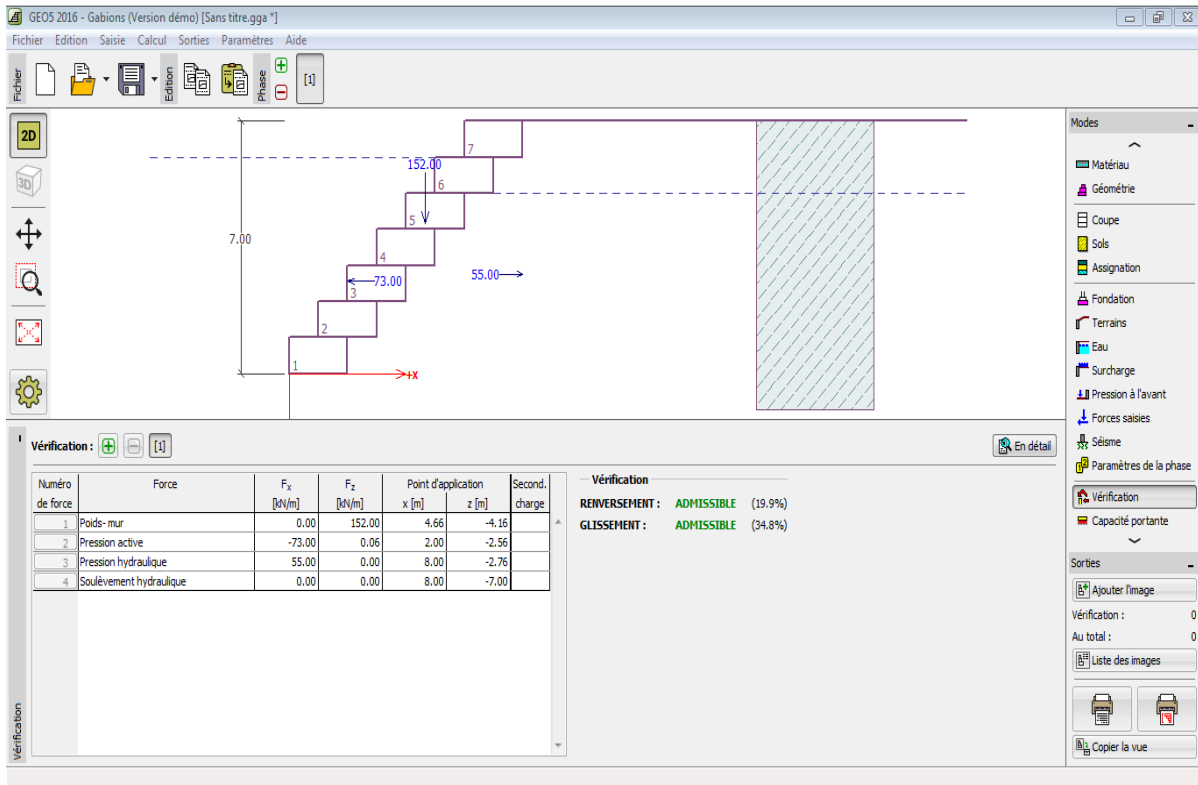


Figure 36: Fenêtre de vérification de la stabilité du mur de 5m

✓ On arrive donc à conclure que la stabilité au **renversement** et au **glissement** du mur en gabions de 5m de hauteur est **vérifiée**, donc le mur est stable.

2) Du profil 64 à 63 on a :

➤ La hauteur du mur à construire est de 5,5m.

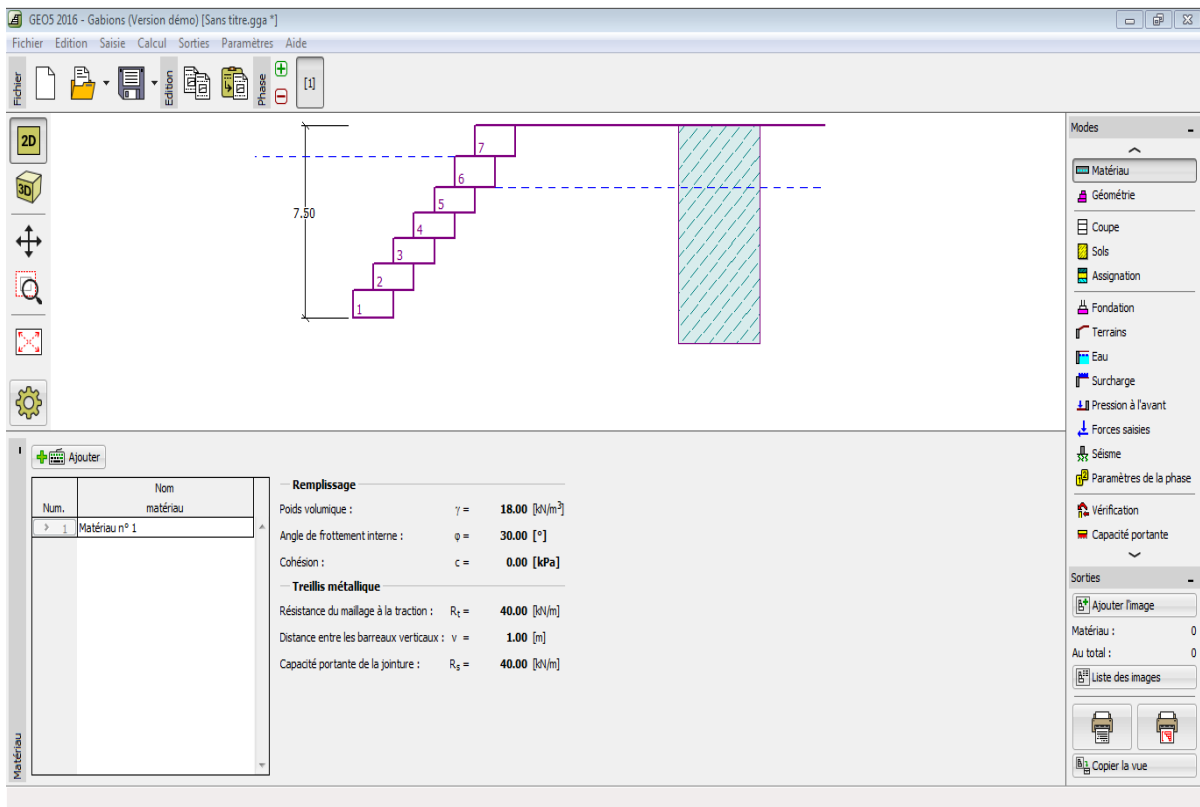


Figure 37: Fenêtre GEO 05 Gabion- Matériau- Mur de 5,5m

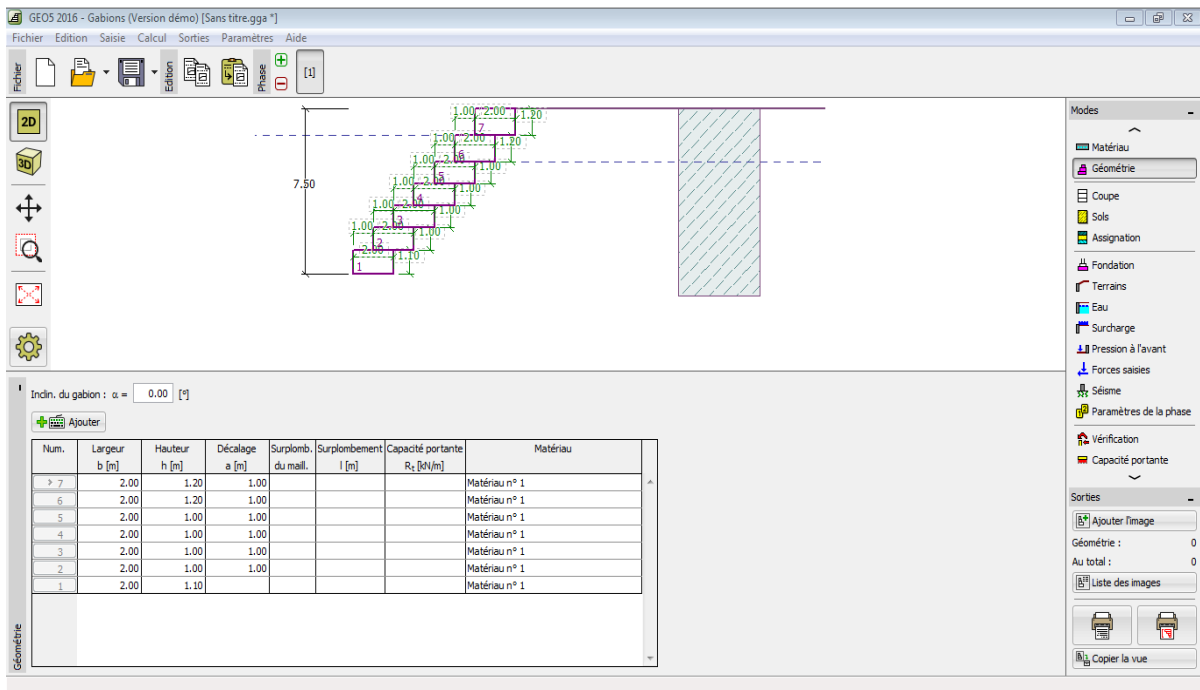


Figure 38: Fenêtre GEO 05 Gabions- Géométrie du mur de 5,5m

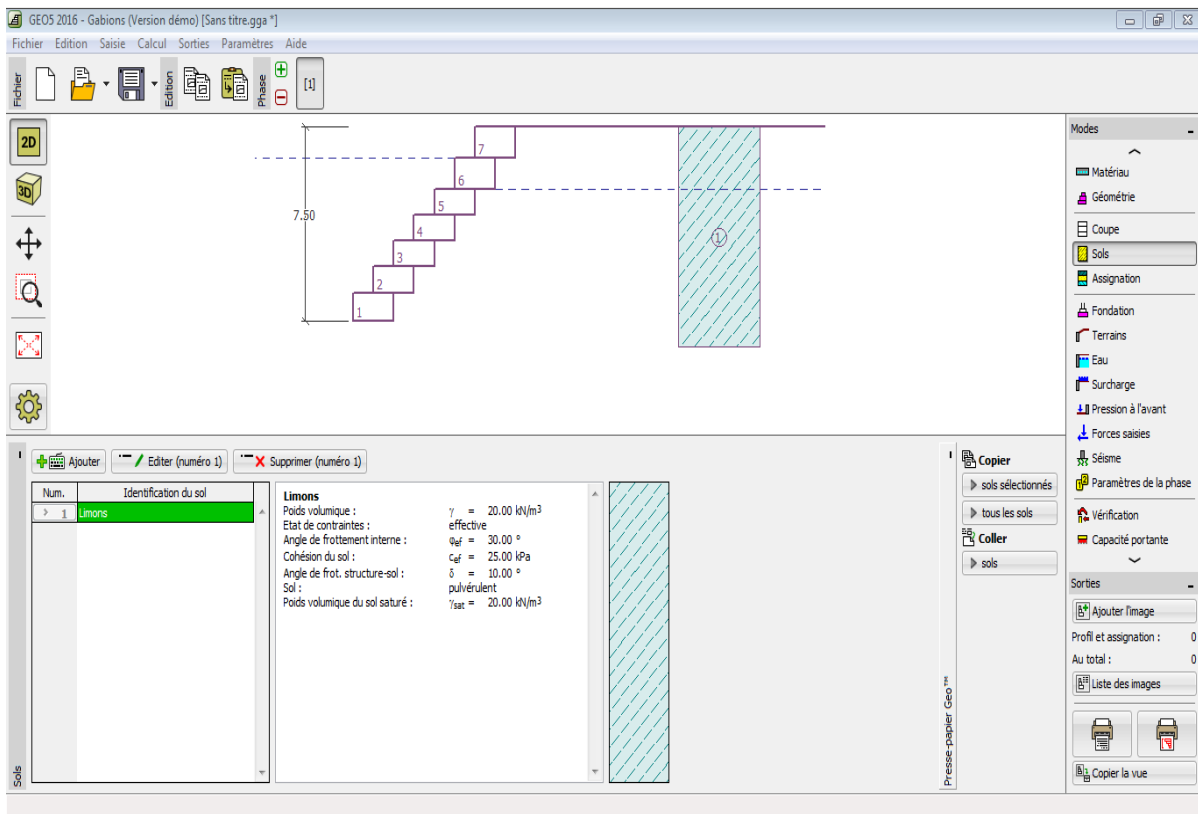


Figure 39: Fenêtre GEO 05 Gabions- Sols- Mur de 5,5m

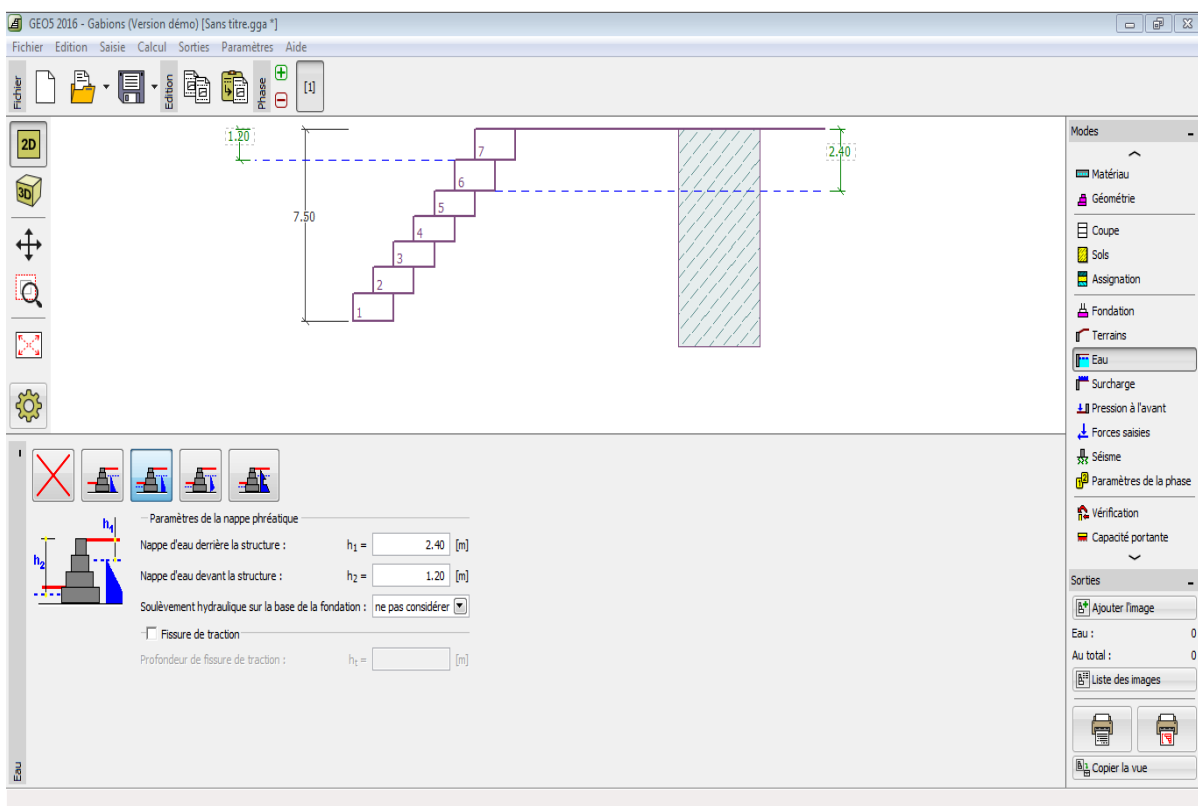


Figure 40: Fenêtre GEO 05 Gabions- Eau- Mur de 5,5m

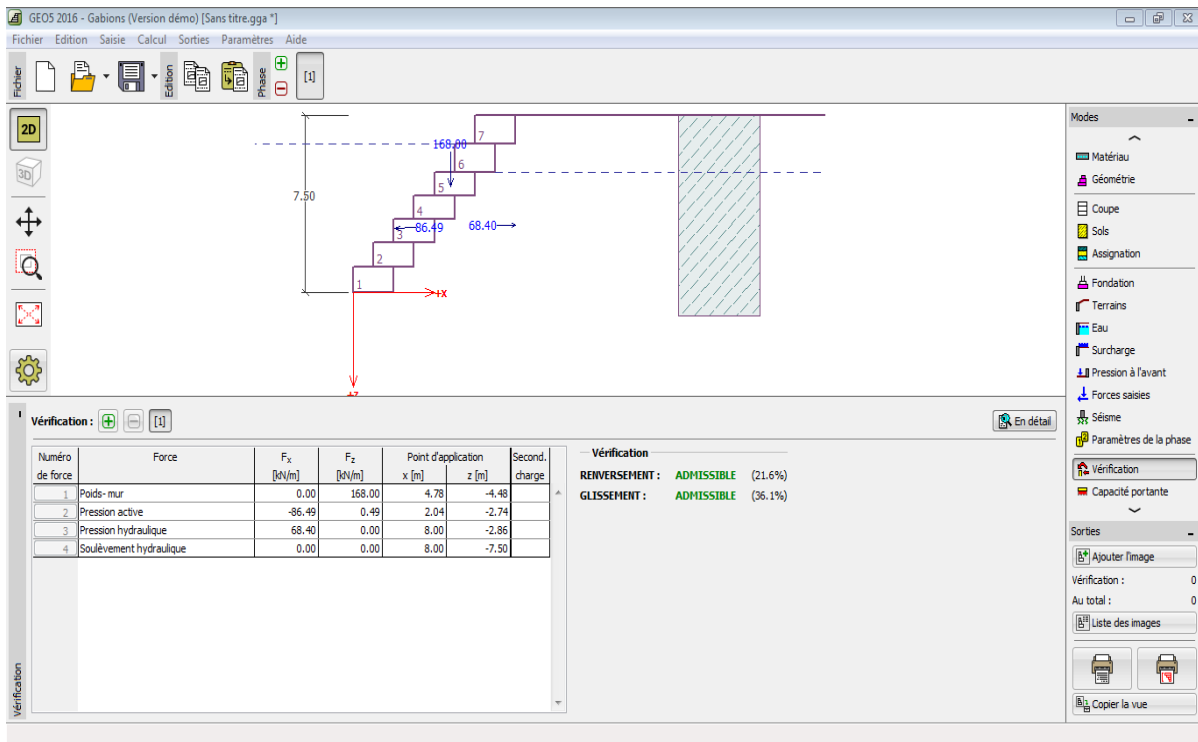


Figure 41: Fenêtre de vérification de la stabilité du mur de 5,5m

✓ On arrive donc à conclure que la stabilité au **renversement** et au **glissement** du mur en gabions de 5,5m de hauteur est **vérifiée**, donc le mur est stable.

3) Du profil 51 à 47 on a :

- La hauteur du mur à construire est de 6m.

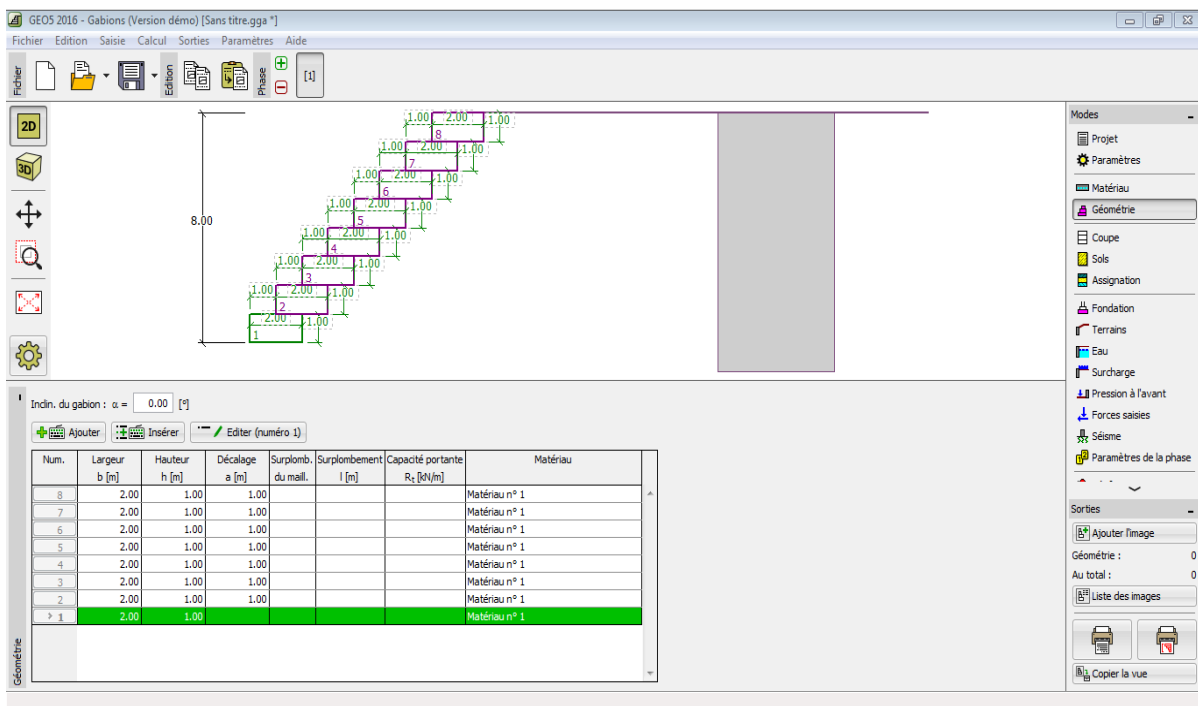


Figure 42: Fenêtre GEO 05 Gabions- Géométrie du mur de 6m

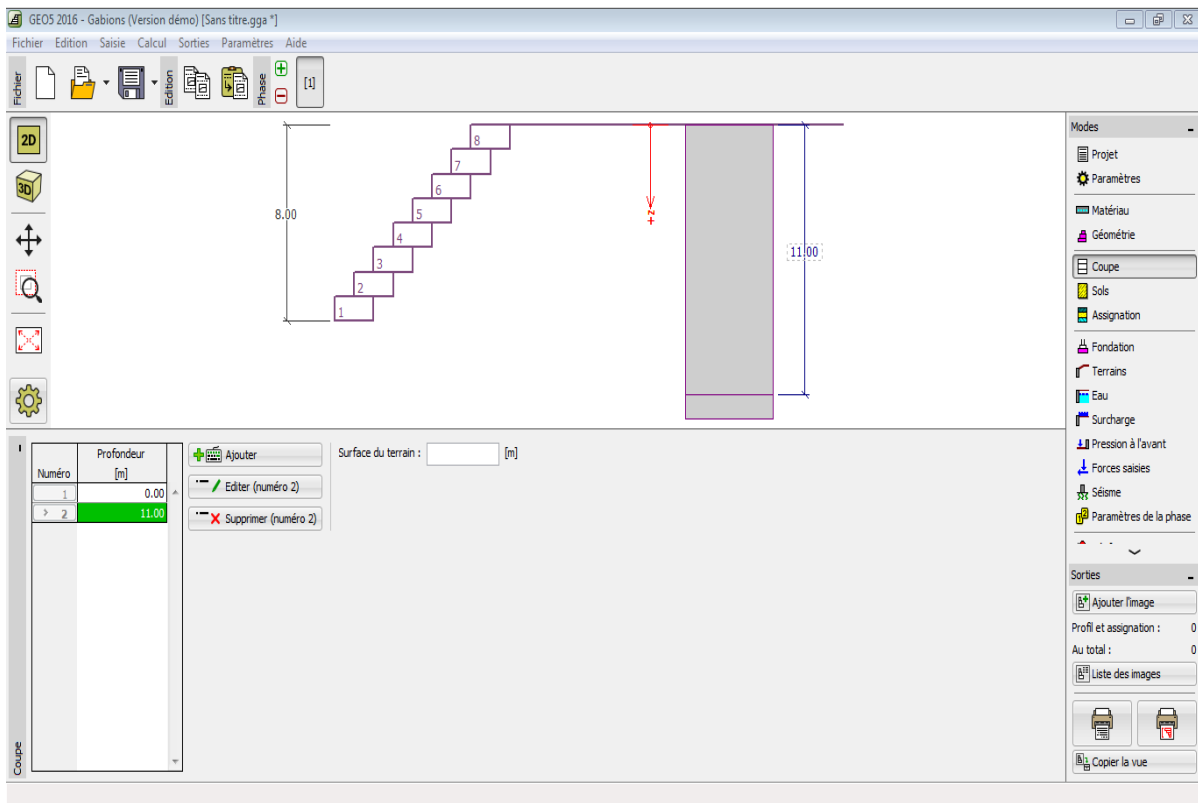


Figure 43: Fenêtre GEO 05 Gabions- Coupe du mur de 6m

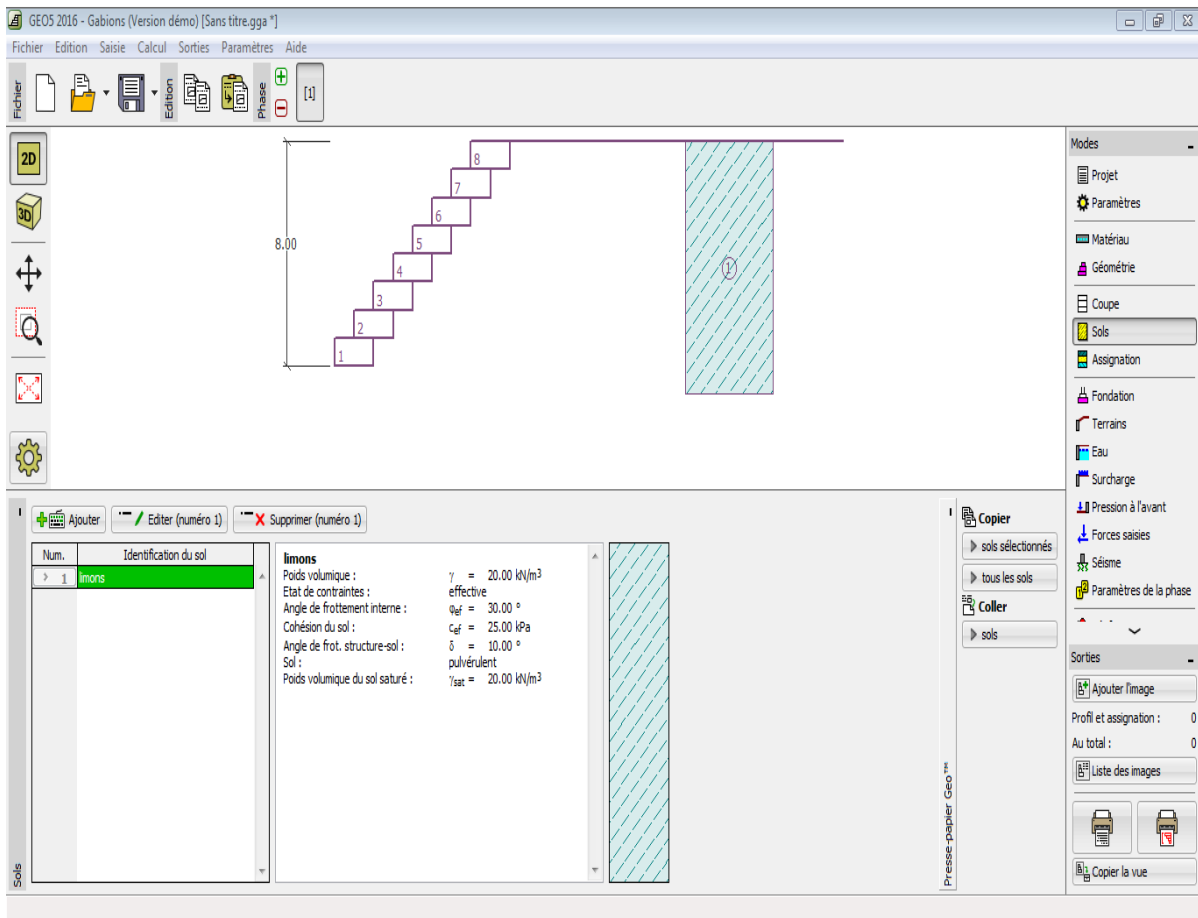


Figure 44: Fenêtre GEO 05 Gabions- Sols- Mur de 6m



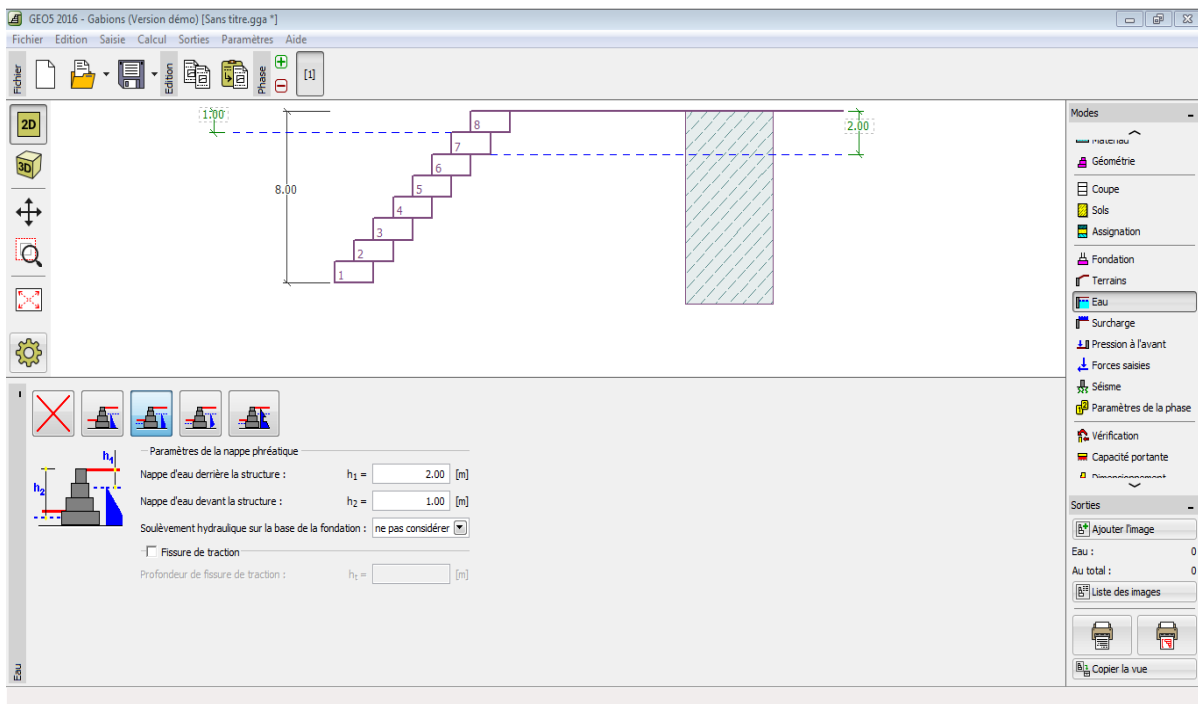


Figure 45: Fenêtre GEO 05 Gabions- Eau- Mur de 6m

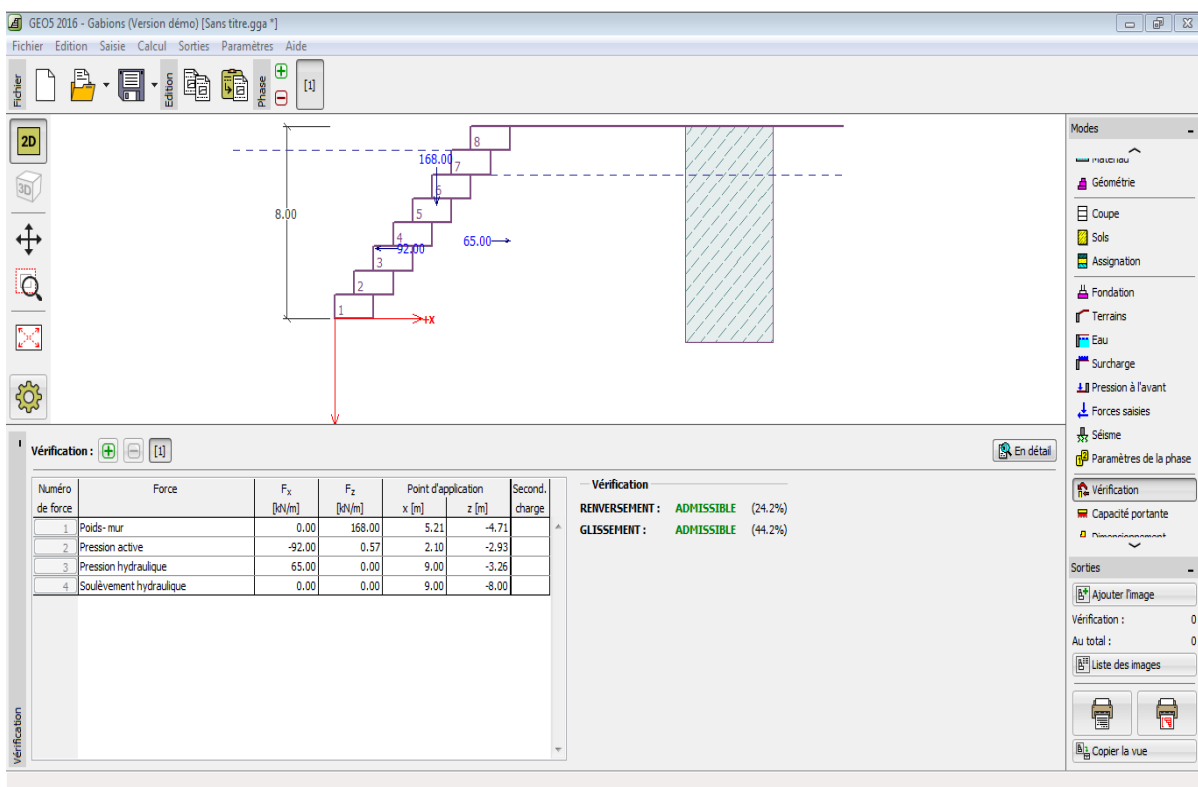


Figure 46: Fenêtre de vérification de la stabilité du mur de 6m

- ✓ On arrive donc à conclure que la stabilité au **renversement** et au **glissement** du mur en gabions de 6m de hauteur est **vérifiée**, donc le mur est stable.

4) Pour le profil 60 et du profil 46 à 45 :

➤ La hauteur du mur à construire est de 6,5m.

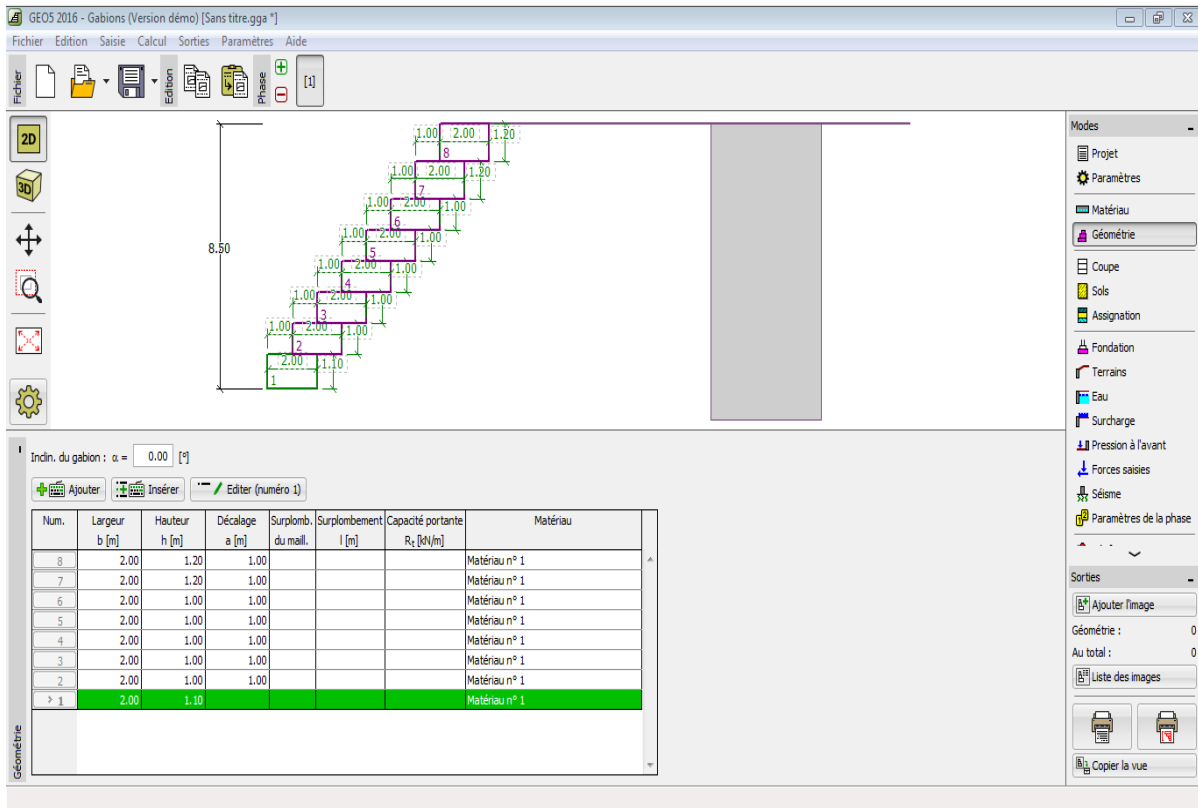


Figure 47: Fenêtre GEO 05 Gabions- Géométrie du mur de 6,5m

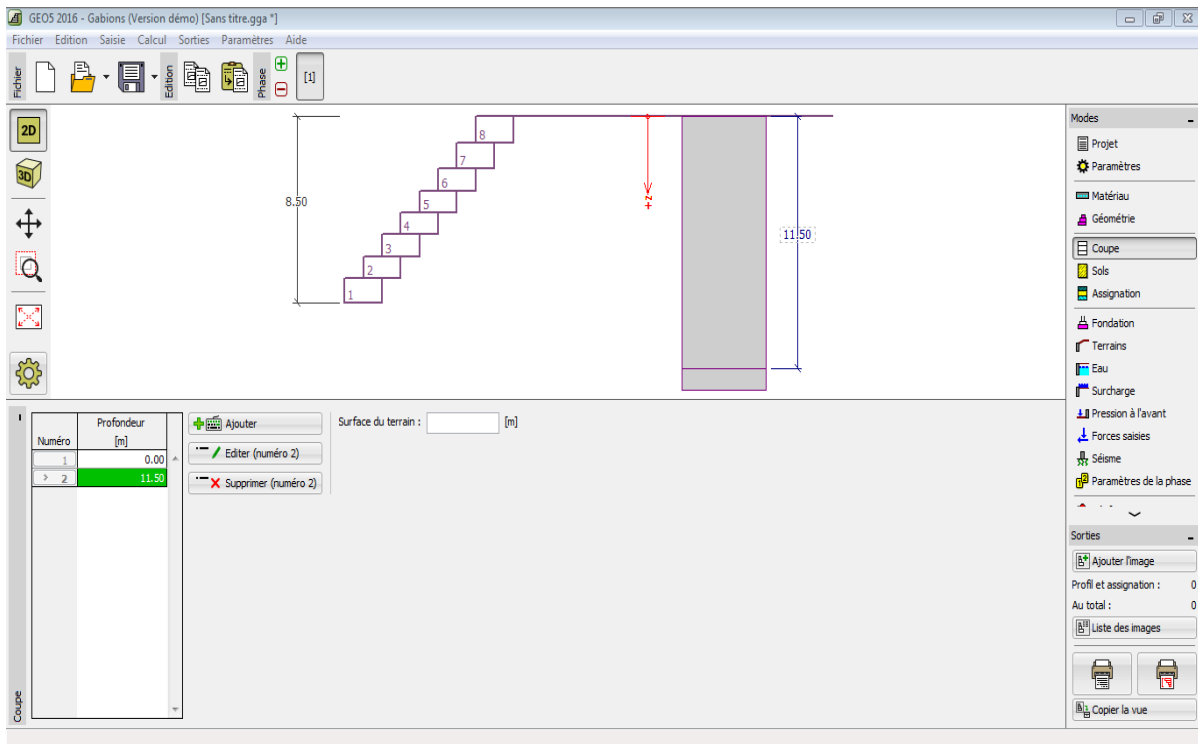


Figure 48: Fenêtre GEO 05 Gabions- Coupe du mur de 6,5m

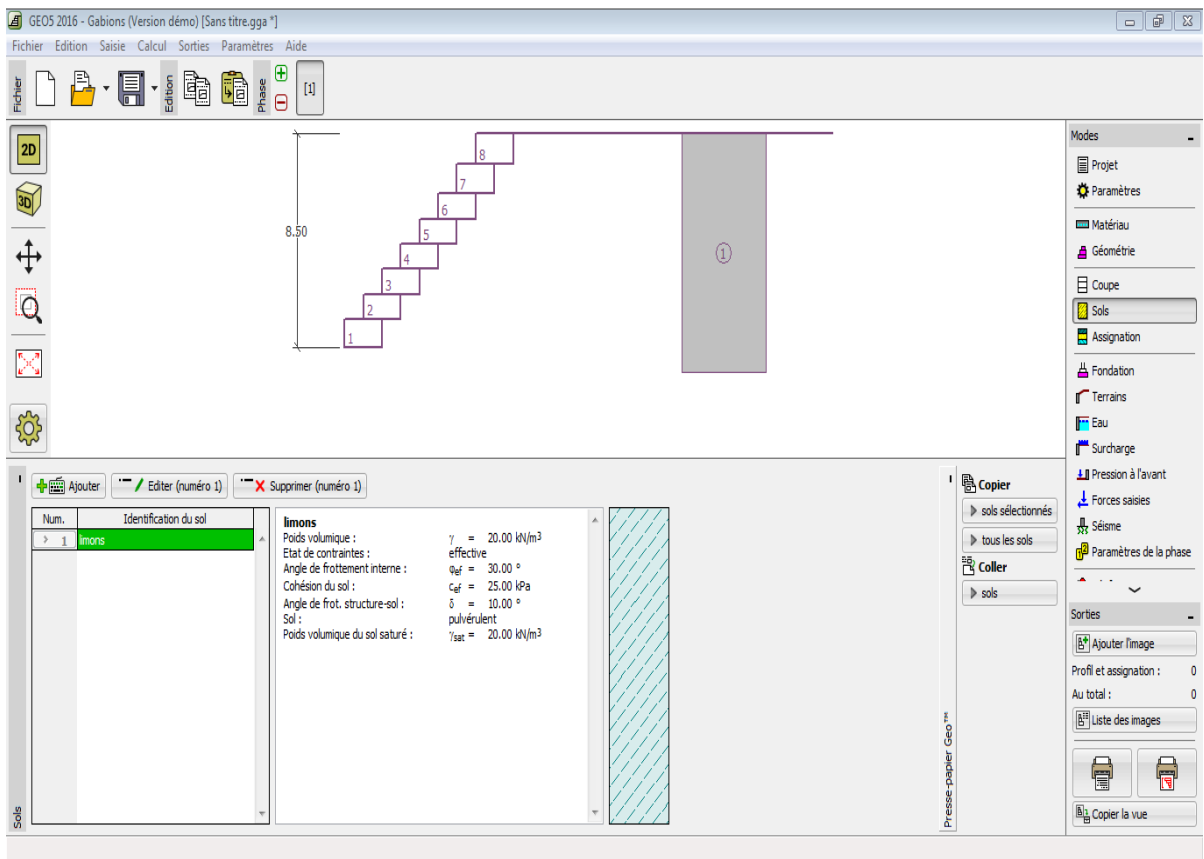


Figure 49: Fenêtre GEO 05 Gabions- Sols- Mur de 6,5m

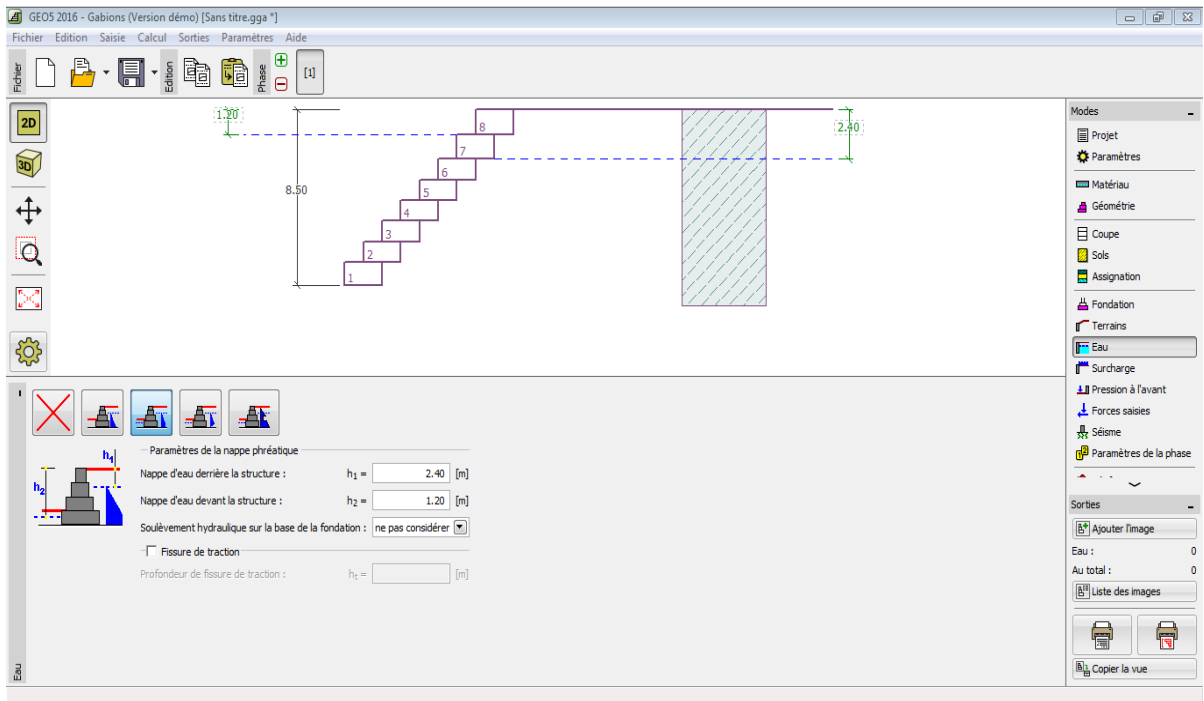


Figure 50: Fenêtre GEO 05 Gabions- Eau- Mur de 6,5m



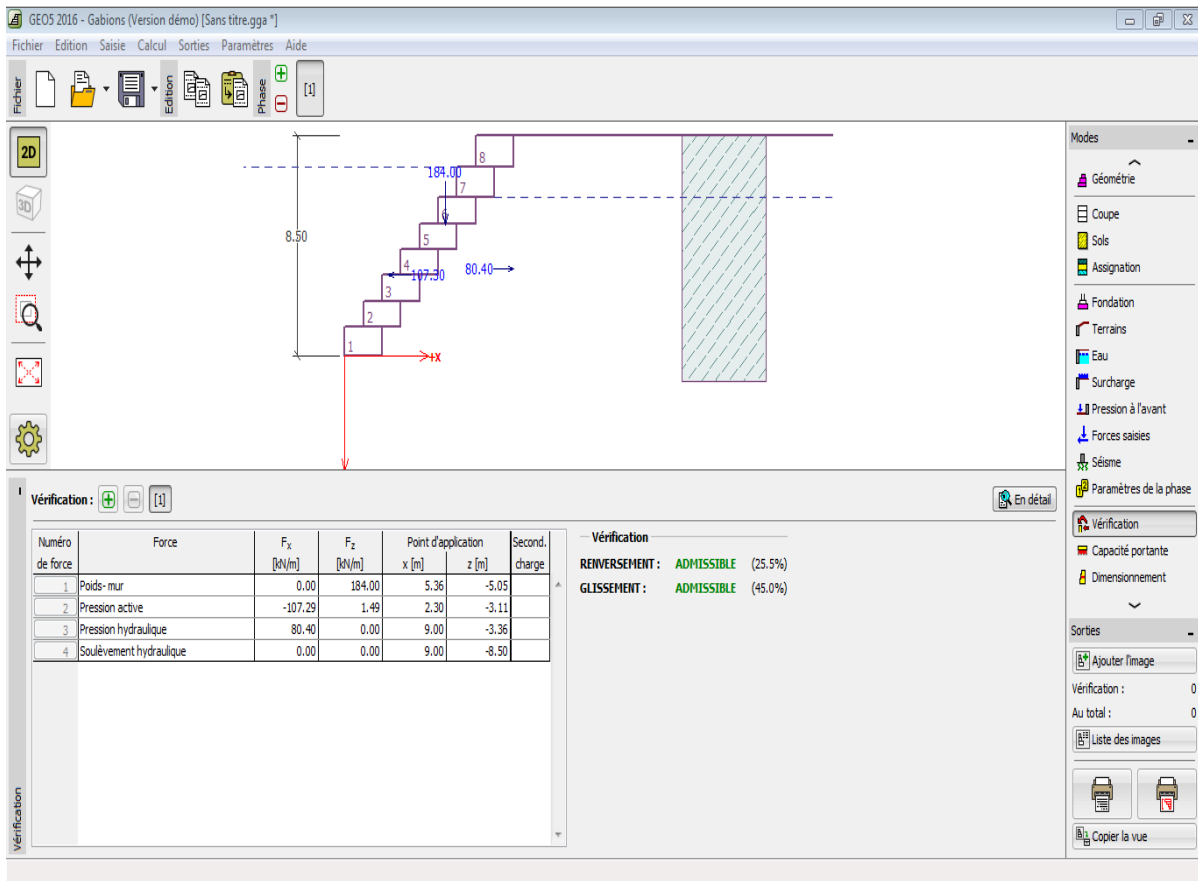


Figure 51: Fenêtre de vérification de la stabilité du mur de 6,5m

- ✓ On arrive donc à conclure que la stabilité au **renversement** et au **glissement** du mur en gabions de 6,5m de hauteur est **vérifiée**, donc le mur est stable.

Annexe 8: Photos de l'oued Chouf Cherg



Figure 52: Aperçu global de l'oued Chouf Cherg



Figure 53: Aperçu d'un tronçon de l'oued Chouf Cherg



Figure 54: Dégâts de crues antérieures- problème d'affouillement



Figure 55: Dégâts de crues antérieures- charriages grossiers



Figure 56: Vue du pont au niveau amont de l'oued Chouf Cherg



Figure 57: Aperçu des murs en gabion