

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

ECOLE NATIONALE SUPERIEUR DE SCIENCE DE LA MER ET L'AMENAGEMENT DU  
LITTORAL



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
D'INGENEIEUR D'ETAT EN SCIENCES DE LA MER  
OPTION : GESTION ET PROTECTION DU LITTORAL**

**Thème :**

***Conception et aménagement d'Oued El  
Hachem menaçant le port centre prévu à El  
Hamdania W.de Tipaza***

Présenté par :

**Sadok Fatma**

**Tebiremt souha**

Soutenue publiquement le 24 juin 2025, devant le jury composé de :

Mme FEZAA.N	Professeur	Présidente	(ENSSMAL)
Mme ABDEDDAIM.H	MCB	Promotrice	(ENSSMAL)
Mme KERAGHEL .M	MCA	Examinatrice	(ENSSMAL)

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

ECOLE NATIONALE SUPERIEUR DE SCIENCE DE LA MER ET L'AMENAGEMENT DU  
LITTORAL



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER 2 EN GESTION ET PROTECTION DU LITTORAL  
OPTION : GESTION ET PROTECTION DU LITTORAL**

**Thème**

***Conception et aménagement d'Oued El  
Hachem menaçant le port centre prévu à El  
Hamdania W.de Tipaza***

Présenté par :

**Sadok Fatma**

**Tebiremt souha**

Soutenue publiquement le 24 juin 2025, devant le jury composé de :

Mme FEZAA.N                      Professeur                      Présidente                      (ENSSMAL)

Mme ABDEDDAIM.H              MCB                                  Promotrice                      (ENSSMAL)

Mme KERAGHEL .M              MCA                                  Examinatrice                      (ENSSMAL)

## REMERCIEMENTS

Au bout de ce travail, et avant tout remerciements, nous rendons grâce à Allah le Tout-puissant de nous avoir donné la santé, le courage et la volonté, pour accomplir ce modeste travail.

Un immense merci à notre promotrice, *Mme. Abdeddaim Hakima* pour tous les précieux conseils et informations qu'elle nous a fournis et qui ont contribué à compléter le sujet de notre étude sous tous ses aspects.

Nous exprimons également notre profonde reconnaissance à l'ensemble des membres du jury, d'avoir accepté d'examiner cette mémoire. Je vous remercie du temps que vous m'avez consacré et pour l'ensemble de vos remarques pour améliorer ce manuscrit, en effet, je ne vous remercierai jamais assez.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à l'ensemble des enseignants et intervenants de l'ENSSMAL pour la qualité de leurs enseignements et leur accompagnement constant tout au long de notre formation. Leur engagement, leur rigueur et leur disponibilité ont grandement contribué à l'enrichissement de nos compétences et à notre progression académique.

Nous adressons une reconnaissance particulière à *Mme. Keraghel M* pour la qualité de sa formation en systèmes d'information géographique (SIG) ainsi que pour les efforts qu'elle a déployés afin de faciliter notre accès à la plateforme Education. Nos remerciements s'adressent également à *M. Othmani H* pour la pertinence et la richesse de ses enseignements en aménagement du littoral et en géologie du fond marin, mais aussi pour la passion qu'il a su transmettre et qui a renforcé notre attachement à notre spécialité. Enfin, nous remercions vivement *Mme. Fezaa N* pour la valeur de ses apports pédagogiques et pour son investissement constant à rendre l'information accessible de manière claire et structurée.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce mémoire.

Merci beaucoup pour tous vos efforts.

## **DEDICACE**

*Je dédie ce modeste travail*

*À Moi-même, Pour avoir tenu bon malgré les doutes, les nuits blanches et les moments de découragement. Ce parcours n'a pas été facile, mais tu y es arrivée.*

*À ma grand-mère, Paix à son âme,*

*Ton amour reste vivant dans mon cœur; Que Dieu t'accorde Sa miséricorde et t'ouvre les portes du paradis.*

*À ma chérie la prunelle de mes yeux, au cœur qui bat, à celle dont les prières sincères ont été le secret de ma réussite. Ma chère mère.*

*À celui qui m'a appris à donner sans attendre, à celui dont je porte le nom avec fierté, à celui que Dieu a doté de prestige et de dignité, mon cher père.*

*À mes sœurs Amina et Soumia,*

*Vous êtes formidables ! Le temps passe si vite, et j'aimerais tant pouvoir le ralentir pour profiter encore davantage de nos précieux moments ensemble.*

*À tous les membres de ma famille et en exception « khalto » et « Walid »*

*À cette personne restée dans l'ombre, Vous vous reconnaîtrez. Votre présence discrète mais essentielle, vos paroles au bon moment et votre soutien silencieux ont été d'une aide précieuse, particulièrement dans les périodes les plus difficiles. Merci, du fond du cœur.*

*À tous mes amis spécialement : binomti souha, Meriem ch, Maroua, Fatem*

*Toute la promotion 2020*

*C'est à eux que je dédie ce travail, qu'Allah m'aide et vous aide à faire le bien.*

***Fatma Sadok***

## **DEDICACE**

*Merci Allah « mon dieu » de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire " Ya Kayoum".*

*Je dédie ce modeste travail à moi-même,*

*À celle qui n'a jamais cessé de croire, de lutter et d'avancer, même quand le chemin était obscur.*

*À ma mère, qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, Habiba.*

*A mon père, écolier de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger Mohammed.*

*A mon frère Hani, et mes sœurs Maroua, jouli, Ahlem maria, A notre adorable petit youyou, alaa, sijoud.*

*A tous mes amis, spécialement binomti Maissa, Zoubida, faten, Costa, hamza.*

*Toute la promotion2020.*

*A tous ceux qui m'aiment. Je dédie ce travail.*

***Souha Tebiremt***

## RESUME

Ce mémoire porte sur l'étude hydrologique et l'aménagement d'Oued El Hachem, pour protéger le port centre prévu à El Hamdania en Algérie. Il débute par une présentation détaillée de plusieurs thématiques à savoir (géomorphologique, hydrographique, climatique, hydrométrique, ...) du bassin versant, en utilisant des outils comme ArcGIS et Google Earth pour les analyser. L'étude statistique des précipitations extrêmes, réalisée à l'aide du logiciel HYFRAN-PLUS, permet d'évaluer les débits de crue potentiels pour différentes périodes de retour. Ces analyses fournissent une base de données pour la conception de mesures de gestion des eaux pluviales afin de réduire les risques d'inondation.

Face aux risques liés à l'écoulement de l'oued, plusieurs solutions d'aménagement ont été envisagées. L'étude propose notamment différentes variantes de déviation de l'Oued El Hachem, reposant sur la construction de canaux artificiels, en tranchée ouverte ou enterrés, avec des sections géométriques variées (trapézoïdales ou rectangulaires).

La modélisation de la variante retenue a été réalisée à l'aide d'Excel et du logiciel HEC-RAS, tandis que les plans techniques ont été élaborés avec AutoCAD. Cette démarche vise à garantir l'efficacité hydraulique des ouvrages et leur intégration harmonieuse dans le projet global de développement portuaire. Elle permet également de définir avec précision les caractéristiques géométriques et hydrauliques nécessaires à une gestion optimale des écoulements.

**Mots clés :** écoulement a surface libre, canaux, bassin versant, réseau hydrographique, protection du port, modélisation du cours d'eau.

## المخلص

تتناول هذه الأطروحة الدراسة الهيدرولوجية وتطوير وادي الهاشم لحماية مركز الميناء المخطط له في الحمداية بالجزائر. يبدأ بعرض تفصيلي لعدة مواضيع (جيومرفولوجية، هيدروغرافية، مناخية، هيدرومترية،...) لمستجمعات المياه، باستخدام أدوات مثل ArcGIS و Google Earth لتحليلها. تتيح الدراسة الإحصائية لهطول الأمطار الغزيرة، التي تم إجراؤها باستخدام برنامج HYFRAN-PLUS، تقييم تدفقات الفيضانات المحتملة لفترات عودة مختلفة. توفر هذه التحليلات قاعدة بيانات لتصميم تدابير إدارة مياه الأمطار للحد من مخاطر الفيضانات.

وفي مواجهة المخاطر المرتبطة بتدفق الوادي، تم النظر في العديد من الحلول التنموية. وتقترح الدراسة على وجه الخصوص أشكالاً مختلفة للانحراف عن وادي الهاشم، تعتمد على بناء قنوات اصطناعية، في خنادق مفتوحة أو مدفونة، ذات مقاطع هندسية متنوعة (شبه منحرفة أو مستطيلة).

تم تنفيذ نمذجة البديل المختار باستخدام برنامجي Excel وHEC-RAS، في حين تم تطوير الخطط الفنية باستخدام AutoCAD. ويهدف هذا النهج إلى ضمان الكفاءة الهيدروليكية للهياكل وتكاملها المتناغم في مشروع تطوير الميناء الشامل. كما يسمح بالتعريف الدقيق للخصائص الهندسية والهيدروليكية اللازمة لإدارة التدفق الأمثل.

**الكلمات المفتاحية:** التدفق السطحي الحر، القنوات، مستجمعات المياه، الشبكة الهيدروغرافية، حماية الموانئ، نمذجة المجاري المائية.

## ABSTRACT

This thesis focuses on the hydrological study and development of Oued El Hachem, to protect the planned port center in El Hamdania in Algeria. It begins with a detailed presentation of several themes (geomorphological, hydrographic, climatic, hydrometric, ...) of the watershed, using tools like ArcGIS and Google Earth to analyze them. The statistical study of extreme precipitation, carried out using the HYFRAN-PLUS software, makes it possible to evaluate the potential flood flows for different return periods. These analyses provide a database for the design of stormwater management measures to reduce flood risks.

Faced with the risks associated with the flow of the wadi, several development solutions have been considered. The study proposes in particular different variants of deviation from the Oued El Hachem, based on the construction of artificial channels, in open trenches or buried, with varied geometric sections (trapezoidal or rectangular).

The modelling of the selected variant was carried out using Excel and HEC-RAS software, while the technical plans were developed with AutoCAD. This approach aims to ensure the hydraulic efficiency of the structures and their harmonious integration into the overall port development project. It also allows the precise definition of the geometric and hydraulic characteristics necessary for optimal flow management.

**Keywords:** free-surface flow, canals, watershed, hydrographic network, port protection, watercourse modeling.

## LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Situation géographique du port centre (El Hamdania)</i> .....	22
<i>Figure 2 : Oued El Hachem (photo prise en avril 2025)</i> .....	23
<i>Figure 3 : Délimitation du bassin versant de Oued El Hachem sur MNT (N 36 E 002)</i> ....	24
<i>Figure 4 : Carte d'altimétrie du Bassin versant d'Oued El Hachem</i> .....	26
<i>Figure 5 : Carte hypsométrique du bassin versant de Oued El Hachem</i> .....	27
<i>Figure 6 : Courbe Hypsométrique</i> .....	28
<i>Figure 7 : Carte des pentes du bassin versant de Oued El Hachem</i> .....	29
<i>Figure 8 : Carte d'occupation du sol (reliefs) du bassin versant de Oued El Hachem</i> .....	30
<i>Figure 9 : Classification réseau hydrographique du Bassin versant de Oued El Hachem</i>	31
<i>Figure 10 : Carte de Densité de Drainage du Bassin versant de Oued El Hachem</i> .....	33
<i>Figure 11: Carte climatologique du bassin versant de Oued El Hachem</i> .....	35
<i>Figure 12: Graph d'évolution annuelle de la température dans la zone d'étude (1995–2015)</i> .....	36
<i>Figure 13 : Carte de précipitation du bassin versant de Oued El Hachem</i> .....	37
<i>Figure 14 : Carte d'érosion du bassin versant de Oued El Hachem</i> .....	38
<i>Figure 15 : Ajustement des pluies annuelles selon la loi de GEV par l'Hyfran Plus (Method of moments)</i> .....	41
<i>Figure 16 : Ajustement des pluies annuelles selon la loi de Weibull (2 paramètres) par l'Hyfran Plus</i> .....	42
<i>Figure 17 : Ajustement des pluies annuelles selon la loi de log Pearson type III (LP3) par l'Hyfran Plus</i> .....	42
<i>Figure 18 : Comparaison graphique entre les trois lois par l'Hyfran Plus</i> .....	43

<b>Figure 19</b> : Carte lithologique du bassin versant d'oued el Hachem.....	47
<b>Figure 20</b> : Canaux naturels et artificiels.....	52
<b>Figure 21</b> : Carte des trois variantes de déviation d'Oued El Hachem.....	53
<b>Figure 22</b> : Vue en plan, profil en long et section en travers de la variante 1 .....	57
<b>Figure 23</b> : Forme trapézoïdale du canal (voir annexe C).....	57
<b>Figure 24</b> : Vue en plan, profil en long et section en travers de la variante 2 .....	57
<b>Figure 25</b> : Vue en plan, profil en long et section en travers de la variante 3 .....	58
<b>Figure 26</b> : Vue en plan de la variante retenue.....	62
<b>Figure 27</b> : Illustration d'ouvrage d'entrée (le dessin technique voir l'annexe A).....	63
<b>Figure 28</b> : Illustration du canal projeté (le dessin technique voir l'annexe A).....	64
<b>Figure 29</b> : Illustration du Pont projeté (CW109) (le dessin technique voir l'annexe A) ..	65
<b>Figure 30</b> : Illustration de la jonction canal - pont (le dessin technique voir l'annexe A)	66
<b>Figure 31</b> : Ouvrage de sortie de la variante retenue (le dessin technique voir l'annexe A) .....	67
<b>Figure 32</b> : Tracé en plan de l'oued El Hachem après simulation .....	69
<b>Figure 33</b> : Section en travers typique d'ouvrage d'entrée.....	69
<b>Figure 34</b> : Section en travers d'ouvrage de sortie .....	70
<b>Figure 35</b> : Section en travers du pont projeté .....	70
<b>Figure 36</b> : Profil de simulation de la ligne d'eau (du début de l'ouvrage jusqu'à la fin) ..	70

## LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Altitudes caractéristiques (en mètre) du bassin versant d'Oued El Hachem .....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 2 : Classification des cours d'eau selon l'ordre de STRAHLER.....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 3 : Tableau récapitulatif des descripteurs géomorphologiques du bassin versant .....</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 4 : Température annuelle de la zone d'étude.....</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 5 : Pluviométrie de la zone d'étude.....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 6 : Critères de comparaison des lois statistiques (GEV, LP3, Weibull) .....</i>	<i>44</i>
<i>Tableau 7 : Type de ruissellement du bassin versant.....</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 8: Tableau récapitulatif des paramètres pluviométriques et hydrométriques .....</i>	<i>48</i>
<i>Tableau 10 : comparaison des 3 variantes proposées .....</i>	<i>59</i>
<i>Tableau 11 : Tableau récapitulatif des caractéristique géométriques et hydraulique de la variante retenue.....</i>	<i>68</i>
<i>Tableau 12 : Devis quantitatif estimatif de la variante retenue.....</i>	<i>73</i>

## **LISTE D'ABREVIATIONS**

**ENSSMAL** : Ecole nationale supérieure de science de la mer et l'aménagement du littoral.

**BV** : Bassin versant

**DQE** : Un Détail Quantitatif Estimatif

**SIG** : Système d'information géographique

**IFN** : Inventaire Forestier National

**ASTGTM** : Aster Global Demtile Map

**BNEDER** : Le Bureau Nationale d'Etudes pour le Développement Rural

**MNT** : Le modèle numérique du terrain

**UTM** : La projection transverse universelle de mercator

**WGS 84** : Système géodésique mondial 1984

**HYFRAN PLUS** : Hydrological frequency analysis plus decision support system

**Hydro-Québec** : Produit, transporte et distribue de l'électricité au Québec

**CRSNG** : Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada

**INRS** : Institut national de recherche et de sécurité

**GEV** : Valeurs extrêmes généralisée

**P3**: Pearson type III

**LP3**: Log Pearson type III

**AIC** : Critère information d'Akaike

**BIC** : Critère d'information de bayésien

**ANBT** : Agence Nationale des Barrages et transferts d'ingénierie et construction

**I.N.R.H** : Institut nationale de Recherche halieutique

**CW109** : Chemin de wilaya 109

## **LISTE DES SYMBOLES**

**Kc** : Indice de compacité de Gravilius

**P** : Périmètre du bassin versant (Km)

**S** : Surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>)

**Leq** : Longueur équivalente (Km)

**leq** : Largeur équivalente (Km)

**Ig** : Indice de pente globale (%)

**D** : Distance séparant les altitudes ayant 5% et 95% de la surface du bassin versant (m)

**Tc** : Temps de concentration (heure)

**Lp** : Longueur du thalweg principal (km)

**Hmoy** : Altitude moyenne (m)

**Hmin** : Altitude minimale (m)

$\sum li$  : Longueur totale du réseau hydrographique (km)

**l**: Vraisemblance maximisée

**k** : Nombre de paramètres libres dans le modèle

**n** : le nombre d'observations

$\overline{P_{an}}$  : Pluie moyenne annuelle (mm)

$\Sigma P_i$  : Somme des précipitations annuelles observées (mm)

**P<sub>jmax%</sub>**: Pluie journalière maximale de fréquence (mm)

**P<sub>jmax</sub>**: Pluie journalière maximale (mm)

**CV** : Coefficient de variation de la série pluviométrique

**$P_{tc\%}$** : Pluie de courte durée (mm)

**$T_c$** : Temps de concentration (h)

**I**: Intensité des pluies (mm/h)

**$Q_{\max}$** : Débit maximal (m<sup>3</sup>/s)

**Cr**: Coefficient de ruissellement

**P**: Précipitation (mm)

**E**: Écoulement (mm)

**$D_f$** : Déficit (mm)

**T**: Température moyenne annuelle (°C)

**Ta**: Taux d'abrasion (T/km<sup>2</sup>/an)

**Le**: Lamme d'eau écoulée (mm)

$\gamma$ : Masse volumique moyenne des sédiments (T/m<sup>3</sup>)

**Al**: Apport moyen annuel (m<sup>3</sup>)

**b**: Largeur du fond du canal (m)

**B**: Largeur au miroir (m)

**$R_h$** : Rayon hydraulique (m)

**V**: La vitesse moyenne (m/s)

**$S_m$** : La section (surface) mouillée d'un canal (m<sup>2</sup>)

**I**: Pente du radier

**$P_m$** : Périmètre mouillée d'un canal (m)

**Hs**: L'énergie spécifique (m)

**Fr**: Nombre de Froude

**g**: Accélération due à la gravité (m/s<sup>2</sup>)

**K**: Coefficient de STRICKLER

**H<sub>n</sub>** : Hauteur d'eau normale (m)

**H<sub>c</sub>** : Hauteur d'eau critique (m)

**y<sub>h</sub>**: Profondeur du fluide

**L**: Pouvoir évaporant

## TABLE DES MATIERES

<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>8</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>10</b>
<b>LISTE D'ABREVIATIONS</b> .....	<b>11</b>
<b>LISTE DES SYMBOLES</b> .....	<b>12</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>17</b>
<b>CHAPITRE I : Contexte général et analyse hydrologique du site d'étude</b> .	<b>20</b>
I.1 Introduction .....	21
I.2 Cadre géographique.....	21
I.3 Cadre géomorphologique .....	22
I.3.1 Délimitation du bassin versant .....	22
I.3.2 Descripteurs géomorphologiques .....	24
I.4 Cadre climatique .....	35
I.4.1 Température .....	36
I.4.2 Précipitations.....	37
I.5 Cadre pluviométrique et hydrométrique .....	39
I.5.1.2 Validation du modèle statistique.....	43
I.5.1.3 Résultats et discussion .....	44
I.5.2 Analyse des caractéristiques pluviométriques du bassin versant .....	45
I.5.3. Résultats des Débits de Crue .....	48
I.5.4 Composantes du bilan hydrologique .....	49
I.6 Conclusion.....	50
<b>CHAPITRE II : Propositions des solutions d'aménagement d'Oued El Hachem</b> .....	<b>51</b>
II .1 Introduction.....	52
II .2 proposition des variantes de déviation d'Oued El Hachem .....	53
II .2.1 Calcul hydraulique .....	53
II .2.2 Présentation sommaire des variantes.....	56

II .3 Comparaison des variantes proposées de déviation d'Oued El Hachem.....	59
II .4 Conclusion .....	60
<b>CHAPITRE III : Modélisation de la variante retenue.....</b>	<b>61</b>
III .1 Introduction .....	62
III .2 Description de la variante retenue (choisie) .....	62
III .3 Modélisation de la variante avec logiciel HECRAS .....	62
III .3.1 Modélisation d'ouvrage d'entrée .....	63
III .3.2 Modélisation du canal .....	64
III .3.3 Modélisation du pont projeté .....	64
III .3.4 Vérification du remous de la jonction canal – pont .....	65
III .3.5 Modélisation d'ouvrage de sortie .....	66
III .4 Simulation avec logiciel HEC RAS .....	69
III .5 Conclusion.....	71
<b>CHAPITRE IV : Devis quantitatif et estimatif.....</b>	<b>72</b>
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>74</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>76</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>80</b>
Annexe A : Température et pluviométrie de la zone d'étude .....	81
Annexe B : Ouvrages de la variante retenue (choisie).....	82
Annexes C : Classification des matériaux .....	89
Annexes D : Paramètres géométriques des canaux.....	90

---

***INTRODUCTION  
GENERALE***

---

Les ports sont des infrastructures vitales pour le commerce maritime, le développement économique, et les échanges internationaux. Toutefois, ces infrastructures côtières sont de plus en plus exposées à des risques naturels et anthropiques, notamment ceux liés aux oueds, ces cours d'eau temporaires ou permanents capables de transporter d'énormes quantités d'eau, de sédiments et de débris en très peu de temps. Ces phénomènes peuvent provoquer l'inondation, l'érosion des berges, l'ensablement des bassins portuaires et déstabiliser les fondations des ouvrages côtiers. C'est précisément le cas du port centre d'El Hamdania, un projet stratégique situé à proximité immédiate de plusieurs oueds, notamment d'oued El Hachem, qui constitue aujourd'hui une menace réelle pour l'intégrité et le fonctionnement futur du port centre. Lors des fortes précipitations, ce cours d'eau peut inonder les zones techniques, réduire la profondeur des bassins par dépôt de sédiments et accélérer la dégradation des structures. Comme l'explique **Chachoua (2010)**, la gestion des crues dans ces contextes nécessite une approche intégrée, mêlant solutions hydrauliques et aménagement du territoire. De son côté, **Mohammed (2012)** a démontré, à travers l'analyse du bassin versant de l'oued El Hachem, que la télédétection et les SIG permettent d'identifier les zones les plus vulnérables à l'érosion, ce qui est essentiel pour planifier des actions de protection ciblées.

Des exemples dans le bassin méditerranéen (Tanger Med, Béjaïa, delta du Rhône) montrent également, selon **Bergaoui (2001)**, **Chikhi et al. (2017)** et **Plan Bleu (2019)**, qu'il est crucial d'intégrer les risques liés aux oueds dès la phase de conception des infrastructures portuaires.

Confrontée à cette problématique, la présente étude a pour objectif d'analyser les risques hydrologiques et les enjeux liés à oued El Hachem sur le port d'El Hamdania, et d'identifier les principales menaces (érosion, inondations, ensablement) et d'évaluer les solutions techniques et spatiales les plus efficaces pour réduire leur impact. Le recours à des outils de modélisation hydraulique, de cartographie numérique et de suivi des bassins versants permettra de proposer une stratégie globale, durable et adaptée aux enjeux locaux.

L'étude s'articule autour de quatre chapitres principaux :

## INTRODUCTION GENERALE

- Le premier chapitre présente le contexte général et l'analyse hydrologique du site d'étude.
- Le deuxième chapitre propose des solutions d'aménagement de l'oued El Hachem.
- Le troisième chapitre est consacré au dimensionnement de la variante choisie.
- Le quatrième chapitre synthétise les ouvrages annexes de la variante retenue avec un devis quantitatif et estimatif.

---

***CHAPITRE I : Contexte  
général et analyse hydrologique  
du site d'étude***

---

### I.1 Introduction

La wilaya de Tipaza fait partie de la région nord de l'Algérie fortement urbanisée. Son territoire couvre une superficie d'environ 1707 Km<sup>2</sup>, et se partage entre 10 daïras et 28 communes. Notre zone d'étude, plaine de l'oued El Hachem, fait partie de la daïra de Sidi Amar, commune de Menacer.

Dans ce chapitre, nous donnons un aperçu général sur la situation géographique de la zone d'étude, les caractéristiques générales du bassin versant, l'aspect climatologique et géomorphologique de la région et un aperçu sur la géologie et l'hydrogéologie de la zone d'étude.

### I.2 Cadre géographique

#### - Site d'El Hamdania

El Hamdania est une localité située dans la wilaya de Tipaza. Elle se trouve à environ 70 km à l'ouest d'Alger et à proximité de la mer Méditerranée. La région de Hamdania est connue pour son paysage varié, allant des plaines côtières aux collines intérieures. Sa position géographique en fait une zone stratégique, notamment en termes de développement agricole et touristique

Les coordonnées géographiques du site d'El Hamdania sont :

- Latitude Nord : 36°37'.14''
- Longitude Est : 2°15'3.63''

El Hamdania est limité par :

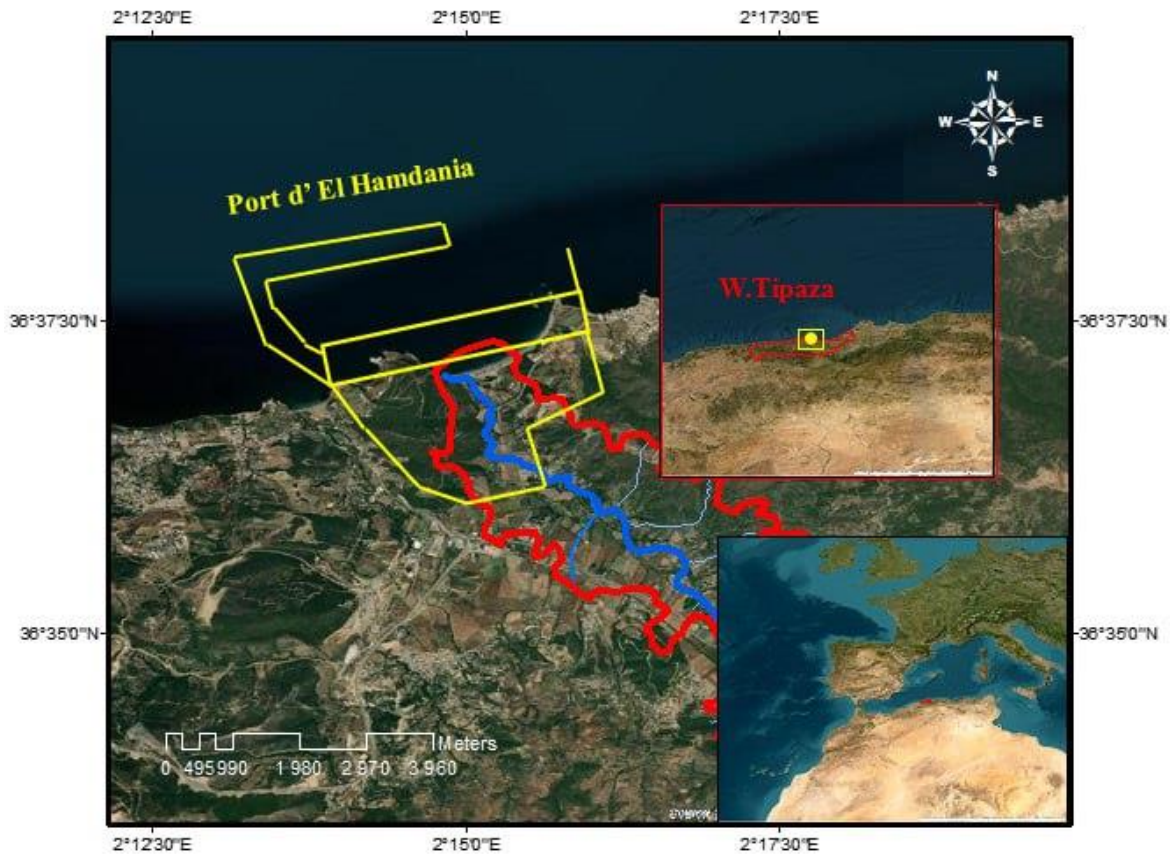
- Au nord par : la mer Méditerranée,
- Au sud par : la wilaya d'Aïn Defla,
- À l'est par : la wilaya d'Alger,
- À l'ouest par : la wilaya de Chlef.

#### - Port centre d'El Hamdania

Cette infrastructure portuaire est projetée pour un objectif d'avoir un futur méga port au niveau de la région d'El Hamdania la wilaya de Tipaza (voir la figure 1 ci-dessous).

Les coordonnées géographiques du port centre d'El Hamdania sont :

- Les coordonnées cartésiennes : 36° 37' 06'' de latitude Nord et 2° 14' 40'' de longitude Est
- UTM (zone 31) : WGS 84 : X=432 148 m ; Y= 4052763 m ; Z=48.80m



*Figure 1 : Situation géographique du port centre (El Hamdania)*

### I.3 Cadre géomorphologique

#### I.3.1 Délimitation du bassin versant

Un bassin versant est une unité hydrographique naturelle où toutes les précipitations tombant dans cette zone s'écoulent vers un même exutoire, généralement un cours d'eau, un lac ou un océan (Chorley, 1978). Il est délimité par des lignes de crête qui forment une frontière naturelle séparant les eaux qui s'écoulent vers différents bassins (Ward & Robinson, 2000). Le bassin versant de l'Oued El-Hachem est située dans la wilaya de Tipaza, à mi-chemin entre le chef-lieu de la wilaya de Tipaza et la ville de Cherchell. Elle fait partie de l'Atlas tellien et se trouve au pied du versant sud du massif de Chenoua. La plaine alluviale de l'Oued El-Hachem est longue en moyenne de 9500 m et large en moyenne de 800 m. Elle longe la route nationale Alger - Cherchell, ses deux extrémités sont matérialisées par le village de Sidi Amar au sud et le rétrécissement du massif du Chenoua au niveau de Bordj Ghobrini qui s'ouvre sur la mer. La limite Sud-Est est matérialisée par l'envoyage de calcaires méridionaux du djebel Tabaraned et le village de Sidi Amar à l'Ouest (voir la figure 2).

## CHAPITRE I : Contexte général et analyse hydrologique du site d'étude

Le bassin versant de l'Oued El-Hachem, ou bassin du « côtiers algérois » est localisé à 70 km à l'Ouest d'Alger, à proximité de la ville de Cherchell dans une zone montagneuse dominée par les monts du Braz. La zone d'étude s'étend depuis la montagne de Boumâad au sud (1417 m) jusqu'à la Méditerranée au Nord, elle est comprise entre les latitudes 36°24'40'' et 36°37' 30'' Nord et les longitudes 2°7' 40'' et 2°21'35'' Est.



*Figure 2 : Oued El Hachem (photo prise en avril 2025)*

La délimitation du bassin versant de l'oued El Hachem a été réalisée en plusieurs étapes. Pour commencer, un Modèle Numérique de terrain (MNT) avec une résolution de 30m exploités dans le cadre de notre étude thématique des différentes cartes ont été obtenus via la plateforme UNITES STATES GEOLOGICAL SURVEY USGS Earth Explorer correspondant au produit ASTGTM (ASTER GLOBAL DEMTILE MAP). Ce MNT a été utilisé pour étudier la topographie et repérer les zones de drainage. Ensuite, la création automatique du bassin a été effectuée grâce aux outils hydrologiques disponibles dans les logiciels SIG, comme ArcGIS on a utilisé la version 10.4.1, et en se basant sur les données recueillies au niveau de la Direction Générale des Forêt (Alger). Cette base de données est fournie par le Bureau Nationale d'Etudes pour le Développement Rural (BNEDER), dans le cadre du deuxième Inventaire Forestier National (IFN 2010) de toutes les wilayas de l'Algérie, qui offre une base de données concernant plusieurs thématiques. Ces outils permettent de dessiner les lignes de partage des eaux en s'appuyant sur l'altitude et la direction des écoulements, ce qui facilite une délimitation précise du bassin versant (voir la figure 3 ci-dessous).

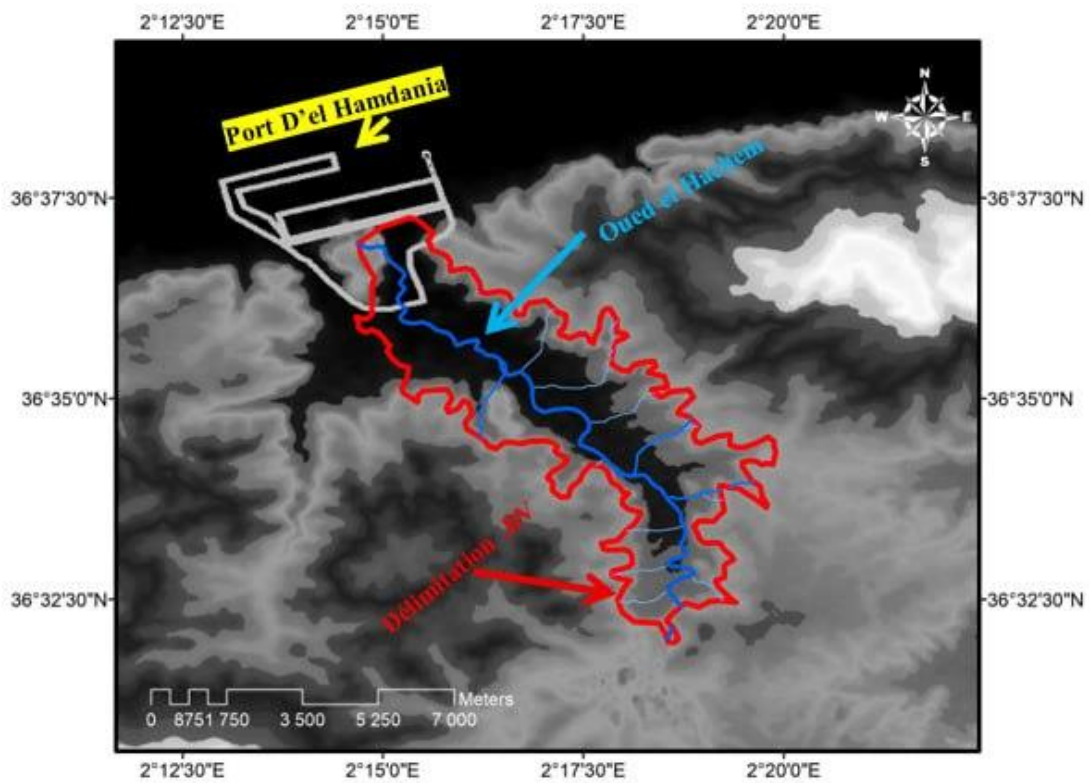


Figure 3 : Délimitation du bassin versant de Oued El Hachem sur MNT (N 36 E 002)

### La superficie « S » et Périmètre « P »

Ces paramètres ont été réalisés grâce à l'utilisation d'un Modèle Numérique de terrain (MNT) traités sous forme de vecteurs dans le système d'information géographique ArcGIS version 10.4.1.

Les résultats indiquent que le bassin versant a une superficie de 25.56 km<sup>2</sup> et un périmètre de 44.3 km.

### I.3.2 Descripteurs géomorphologiques

#### Indice de compacité de Gravilius

En 1914, le professeur Gravilius (Allemand), a proposé le coefficient de compacité, il l'a défini comme le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface

$$kc = \frac{p}{2\sqrt{\pi * S}} = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (1)$$

**Kc** : Indice de compacité de Gravilius

**P** : Périmètre du bassin versant (Km)

## CHAPITRE I : Contexte général et analyse hydrologique du site d'étude

**S** : Surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>)

Si  $K_c=1.12$  Le bassin versant de forme carrée

Si  $K_c=1$  Le bassin versant de forme circulaire

Si  $K_c>1.12$  on a bassin de forme allongée ;  $K_c$  est toujours  $\geq 1$

Cet indice nous indique la forme du bassin versant. Si le bassin versant est de forme allongée, il nous permet de se faire une idée sur le débit de pointe qui sera amorti en arrivant à l'exutoire.

### Rectangle équivalent

Le bassin versant peut-être assimiler à un rectangle équivalent, de dimension équivalente de longueur  $L$  et de largeur  $l$  qui ont été déterminées à l'aide des deux formules suivantes :

$$L_{eq} = \frac{K_c \sqrt{S}}{1.12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12^2}{K_c} \right)} \right] \quad (2)$$

$$L_{eq} = \frac{K_c \sqrt{S}}{1.12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12^2}{K_c} \right)} \right] \quad (3)$$

Où :

**Leq** : Longueur équivalente (Km) ;

**leq** : Largeur équivalente (Km).

### Altimétrie

L'altimétrie du bassin versant de l'Oued El Hachem présente un paysage avec des altitudes allant de 0 à 200 mètres, ce qui affecte la façon dont l'eau s'écoule et les sédiments se déplacent. Ce paysage est illustré à travers la carte altimétrique (voir la figure 4), où se trouve les zones plus hautes, en amont, captent les eaux de pluie, tandis que les zones plus basses, près de l'exutoire, peuvent être sujettes aux inondations. Cette configuration favorise l'infiltration de l'eau, ce qui est crucial pour alimenter les nappes souterraines. Cependant, il est important de gérer les risques d'inondation et de surveiller le transport des sédiments, surtout si le barrage de Boukourdane est présent. Une gestion durable et une surveillance régulière sont essentielles pour protéger les ressources en eau et les écosystèmes locaux.

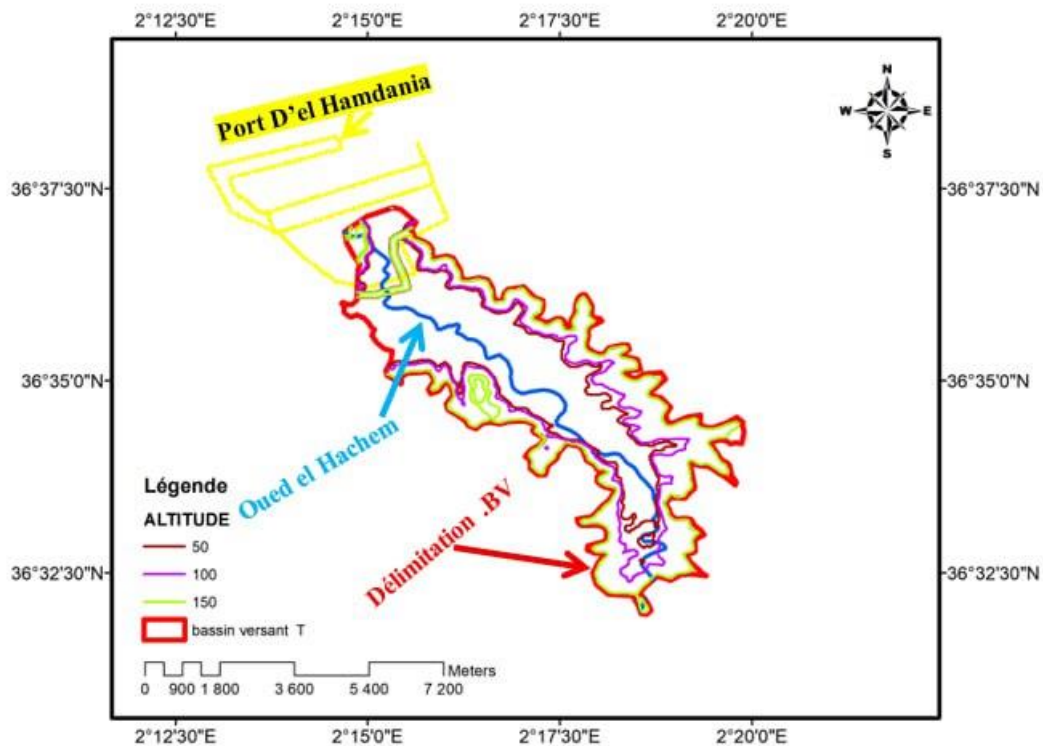


Figure 4 : Carte d'altimétrie du Bassin versant d'Oued El Hachem

### Hypsométrie

Le bassin versant objet de cette étude comporte plusieurs plages d'altitudes allant des plus basses de 7m aux plus élevées de 200 m. Le centre du bassin est marqué par des altitudes moyennes (voir la figure 5 ci-dessous).

La courbe hypsométrique représente la répartition du pourcentage de la surface cumulée du bassin en fonction de son altitude. Elle donne un bon résumé des distributions altimétriques et topographiques. L'allure des courbes hypsométriques permet de déterminer le degré de

## CHAPITRE I : Contexte général et analyse hydrologique du site d'étude

maturité ou d'évolution cyclique du relief. De forme concave, la courbe indique que le bassin est en état de maturité. Au contraire, les bassins versants sont immatures, jeunes, ou en cours de soulèvement si la courbe est convexe (voir la figure 6 ci-dessous).

La courbe hypsométrique a été réalisée pour déterminer les altitudes caractéristiques, dans l'objectif de calculer l'indice de pente globale (voir le tableau 1 ci-dessous).

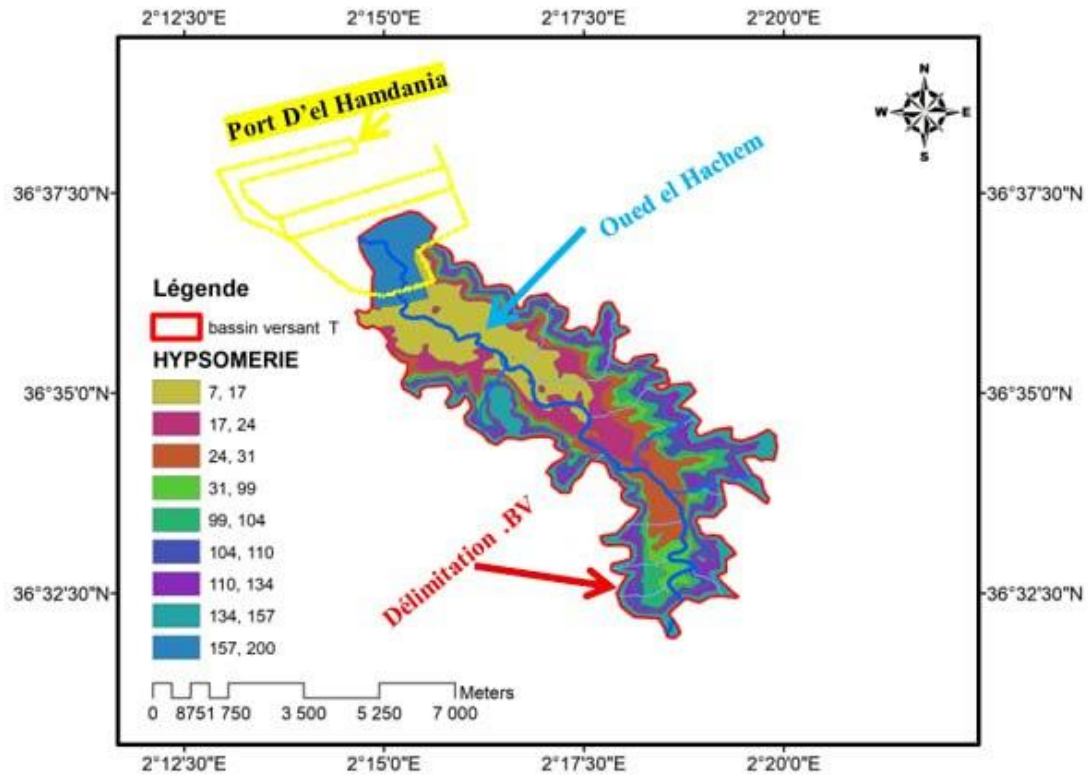


Figure 5 : Carte hypsométrique du bassin versant de Oued El Hachem

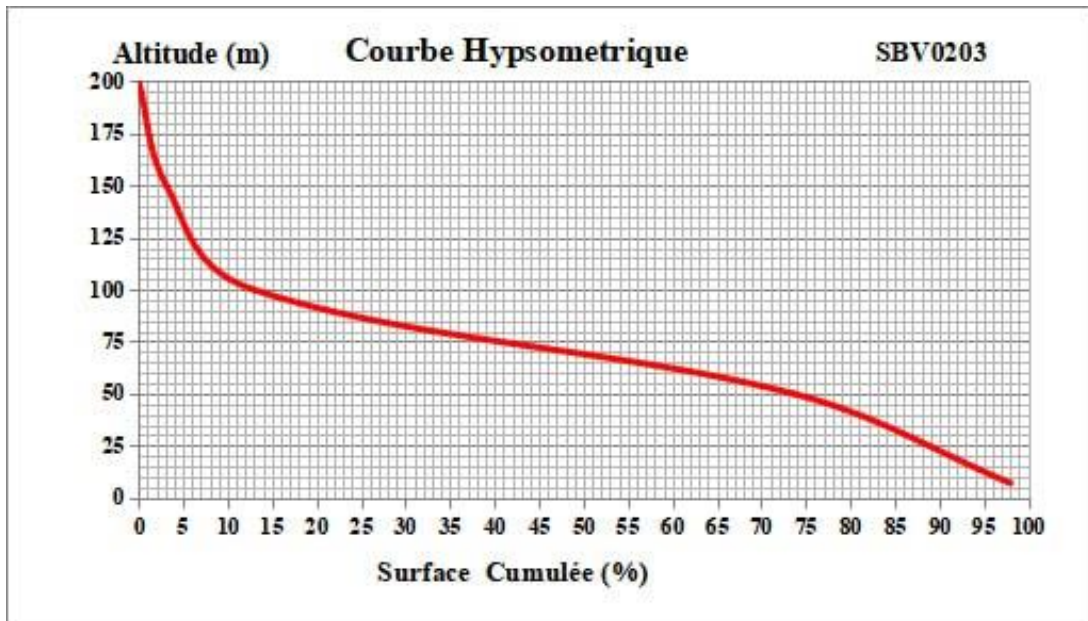


Figure 6 : Courbe Hypsométrique

Tableau 1 : Altitudes caractéristiques (en mètre) du bassin versant d'Oued El Hachem

Altitude de fréquence H5% =	130
Altitude médiane de fréquence H50% =	70
Altitudes de fréquence H95% =	14
$D = H5\% - H95\%$	116
Altitude maximum	200
Altitude minimum	7
Altitude Moyenne	103,5

### Indice de pente globale ( $I_g$ )

La formule la plus simple et la plus rapide pour calculer l'indice de pente globale  $I_g$  est :

$$I_g = \frac{D}{L_{eq}} \quad (4)$$

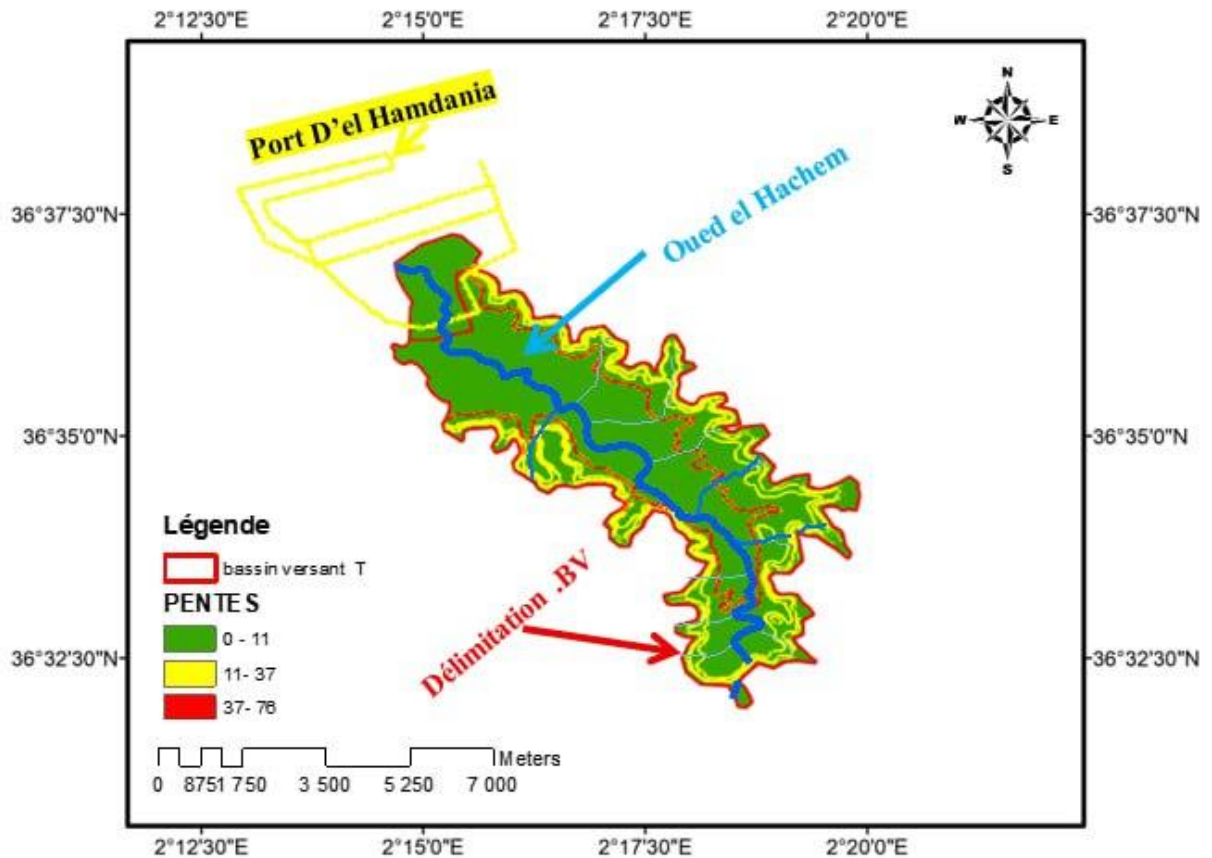
Où :

$I_g$  : Indice de pente globale (%) ;

**D** : Distance séparant les altitudes ayant 5% et 95% de la surface du bassin versant (m).

### Pentes

Le bassin versant englobe les différentes pentes qui varient entre 0% jusqu'à 76% ou on peut trouver la partie basse du bassin est caractérisée par des pentes (0-11%), ni-en moins la partie limitrophe se distingue avec des pentes plus importante (37-76%) (voir la figure 7).



*Figure 7 : Carte des pentes du bassin versant de Oued El Hachem*

### Relief

Le relief constitue un facteur clé influençant l'écoulement des eaux, l'érosion des sols, ainsi que la concentration des apports vers l'exutoire.

La carte ci-dessous (voir la figure 8 ci-dessous) représente les formes des reliefs et l'occupation du sol au sein du bassin versant d'Oued El Hachem. On y distingue plusieurs types de reliefs : les zones agricoles, les forêts, les maquis arborés, les parcours, ainsi que les plans d'eau.

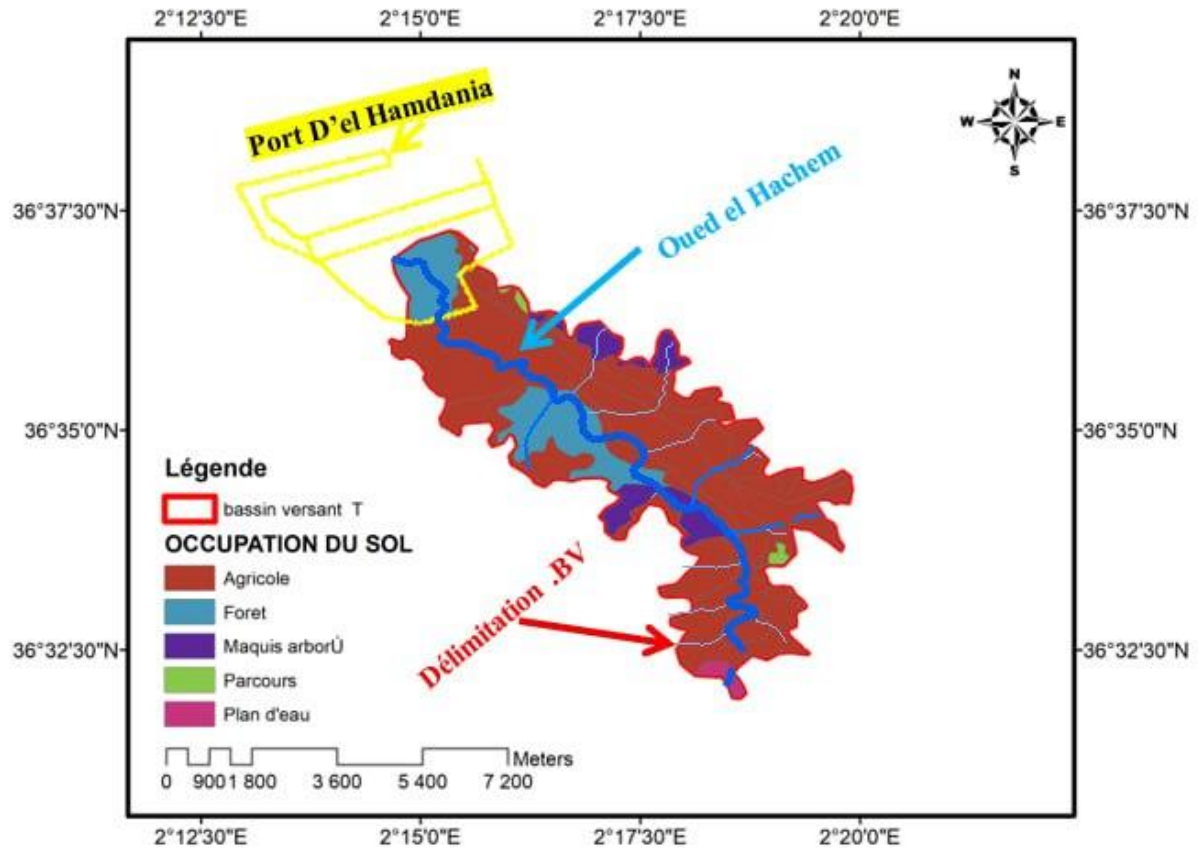


Figure 8 : Carte d'occupation du sol (reliefs) du bassin versant de Oued El Hachem

### Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est l'ensemble hiérarchisé et structuré des chenaux (cours d'eau) qui assurent le drainage superficiel, permanent ou temporaire, d'un bassin versant ou d'une région.

L'analyse du réseau hydrographique de l'Oued El Hachem montre un bassin de type dendritique, et de forme très allongée avec une structure hiérarchisée qui converge vers un exutoire contrôlé par un barrage situé en aval, qui joue un rôle crucial dans la régulation des débits d'eau et influence la dynamique sédimentaire, présence d'une nappe phréatique pourrait être influencée par l'infiltration des eaux issues du ruissellement et des cours d'eau, notamment dans les zones de forte perméabilité (voir la figure 9 ci-dessous).

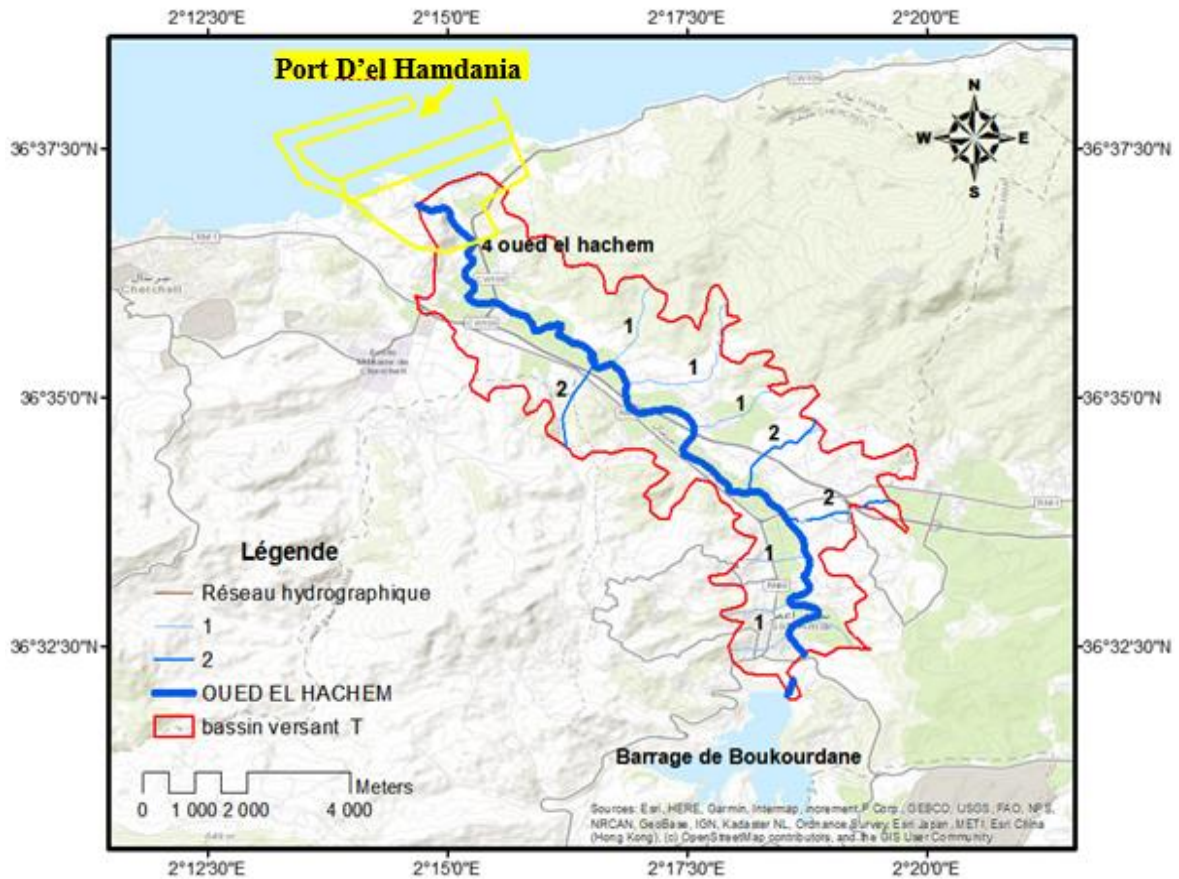


Figure 9 : Classification réseau hydrographique du Bassin versant de Oued El Hachem

### Classification de STRAHLER

Le tableau présente une classification des cours d'eau selon l'ordre de STRAHLER, qui est une méthode utilisée pour hiérarchiser les segments d'un réseau hydrographique en fonction du nombre de leurs affluents, les différentes classifications des cours d'eau numérotés montrent que l'Oued El Hachem est une rivière d'ordre 4 qui rassemble des affluents moins importants (voir le tableau 2).

Tableau 2 : Classification des cours d'eau selon l'ordre de STRAHLER

Ordre de cour d'eau	Nombre	Longueur (km)	Nature
1	10	24,886	OUED TEMPORAIRE
2	3	15,666	OUED TEMPORAIRE
4	1	16,349	OUED PERMANENT

### Temps de concentration $T_c$ (heure)

Le temps de concentration caractérise le temps nécessaire à une particule d'eau provenant de la partie du bassin versant la plus éloignée hydrologiquement de l'exutoire pour parvenir à celui-ci. Pour cela, il est difficile de l'obtenir expérimentalement avec des mesures de terrain, il a été estimé par la formule empirique de *GIANDOTTI II* si après :

$$T_c = \frac{1.5 * L_p + 4 * \sqrt{S}}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad (5)$$

Où :

**$T_c$**  : Temps de concentration (heure)

**$L_p$**  : Longueur du thalweg principal (km)

**$H_{moy}$**  : Altitude moyenne (m)

**$H_{min}$**  : Altitude minimale (m)

- Si  $S < 10 \text{ km}^2$  (Petit bassin),  $0.5 < T_c < 2$  heures
- Si  $10 < S < 100 \text{ km}^2$  (Bassin moyen),  $2 < T_c < 6$  heures
- Si  $S > 100 \text{ km}^2$  (Grand bassin),  $T_c > 6$  heures

Le temps de concentration obtenu, égal à 5,69 heures, traduit un délai de réaction modéré du bassin versant face aux précipitations. Cette durée indique que les eaux issues des zones les plus éloignées mettent environ 6 heures pour atteindre l'exutoire. Ce comportement hydrologique reflète une capacité d'infiltration et de stockage intermédiaire, contribuant à l'étalement du débit de crue. Ce paramètre est essentiel pour la conception et la gestion des ouvrages de régulation des écoulements.

### Densité de Drainage

La densité de drainage est un paramètre utilisé pour décrire le potentiel de drainage du bassin versant, elle varie de  $1 \text{ km}^{-1}$  à  $87 \text{ km}^{-1}$ .

Les zones les plus élevées ont une faible densité (du 1 au  $27 \text{ km}^{-1}$ ), et les zones basses ont une densité élevée traduit un ruissellement important dû à des sols imperméables ou une topographie accentuée, (du 50 au  $87 \text{ km}^{-1}$ ) (voir la figure 10 ci-dessous).

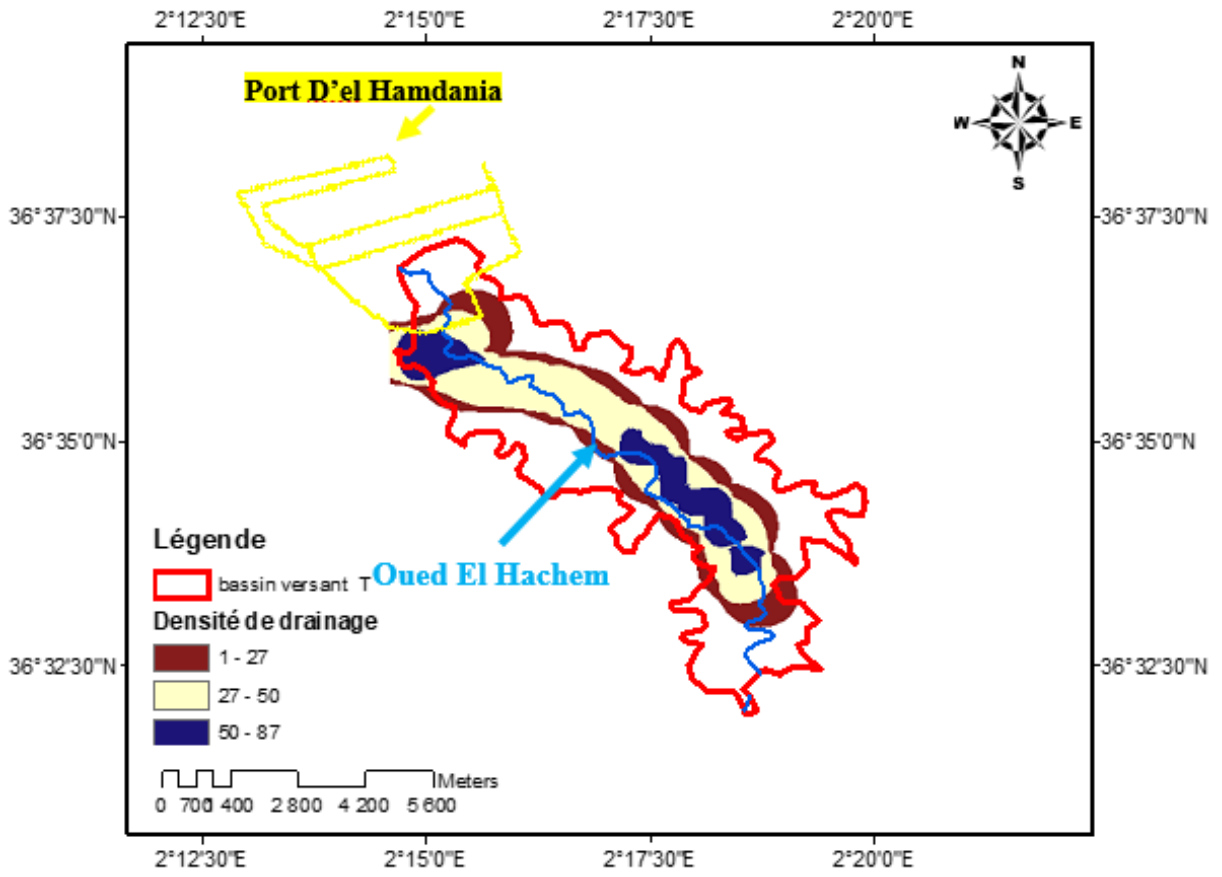


Figure 10 : Carte de Densité de Drainage du Bassin versant de Oued El Hachem

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des descripteurs géomorphologiques du bassin versant

N°	Paramètres		Symbole/Unité	Formule Référence	Valeur
1	Surface du bassin versant		S (Km <sup>2</sup> )	Arc Gis Version 10.4.1	25.56
2	Périmètre du bassin versant		P (Km)	Arc Gis Version 10.4.1	44.3
3	Altitude	Altitude minimum	H <sub>min</sub> (m)	Arc Gis Version 10.4.1	7
4		Altitude maximum	H <sub>max</sub> (m)	Arc Gis Version 10.4.1	200
5		Altitude moyenne	H <sub>moy</sub> (m)	$(H_{min}+H_{max}) / 2$	103.5
6		Altitude 95%	H <sub>.95%</sub> (m)	Courbe hypsométrique	14
7		Altitude 50%	H <sub>.50%</sub> (m)	Courbe hypsométrique	70
8		Altitude 5%	H <sub>.5%</sub> (m)	Courbe hypsométrique	130
9		Altitude D	D(m)		116
10	Indice de compacité de Gravelius		Kc	(Gravelius ,1914)	2.45
11	Rectangle équivalent	Longueur équivalente	L (Km)	(Gravelius ,1914)	20.93
12		Largeur équivalente	l (Km)	(Gravelius ,1914)	1.22
13	Indice de pente globale		Ig (%)	Puech	5.54
14	Dénivelée spécifique		Ds (m)	Biot, (1955)	28.02
15	Longueur du Thalweg principal		Lp (Km)	Arc Gis Version 10.4.1	16.34
16	Ordre du Thalweg principal		i	Classification de Strahler	4
17	Temps de concentration		Tc (heure)	Formule de Giandotti II	5.69
19	Somme des longueurs des cours d'eaux		Li(km)	Arc Gis Version 10.4.1	56.90

## I.4 Cadre climatique

L'étude climatologique du bassin versant de l'oued El Hachem est cruciale pour saisir l'impact des conditions météorologiques sur l'hydrologie, l'érosion et l'aménagement du territoire. Elle s'appuie sur l'analyse des principaux paramètres climatiques, comme la température, les précipitations.

Le site d'étude se situe dans une zone au climat sub-humide chaud (voir la figure 11), marqué par des précipitations modérées et des températures relativement élevées. Ces conditions climatiques entraînent une pluviométrie moyenne, qui influence directement sur l'écoulement des eaux et peut augmenter les risques d'érosion.

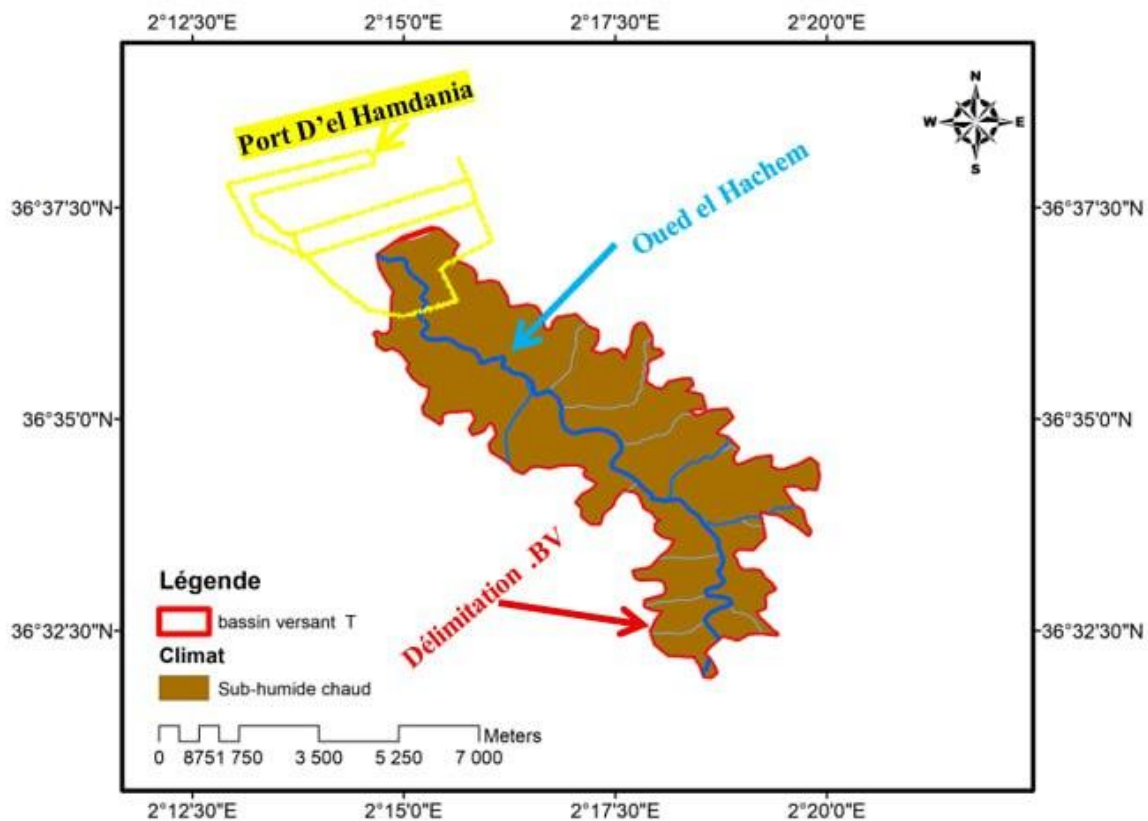


Figure 11: Carte climatologique du bassin versant de Oued El Hachem

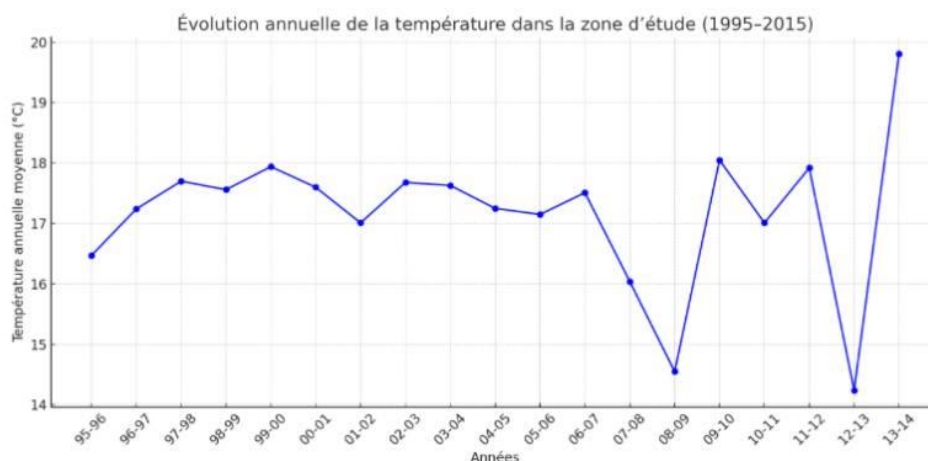
### I.4.1 Température

La température constitue un paramètre climatique fondamental influençant directement l'évaporation, la disponibilité de l'eau et les conditions environnementales de la zone d'étude. Le tableau suivant (voir le tableau 4) présente les valeurs annuelles moyennes de la température relevée au niveau du site du barrage Boukourdane sur une période de plusieurs années. Ces données permettent de mieux apprécier l'évolution thermique locale et d'analyser son impact potentiel sur les ressources en eau et l'aménagement du territoire.

*Tableau 4 : Température annuelle de la zone d'étude*

Années	Température	Années	Température
95-96	16.47	05-06	17.15
96-97	17.24	06-07	17.51
97-98	17.70	07-08	16.04
98-99	17.56	08-09	14.55
99-00	17.94	09-10	18.05
00-01	17.60	10-11	17.01
01-02	17.01	11-12	17.92
02-03	17.68	12-13	14.24
03-04	17.63	13-14	19.81
04-05	17.25	14-15	/

Source : Agence Nationale des Barrages et transferts d'ingénierie et construction « Site barrage Boukourdane »



*Figure 12: Graph d'évolution annuelle de la température dans la zone d'étude (1995-2015)*

### I.4.2 Précipitations

Les précipitations dans le bassin versant de l'oued El Hachem varient spatialement, avec des zones pouvant recevoir jusqu'à 700 mm/an de pluie (voir la figure 12).

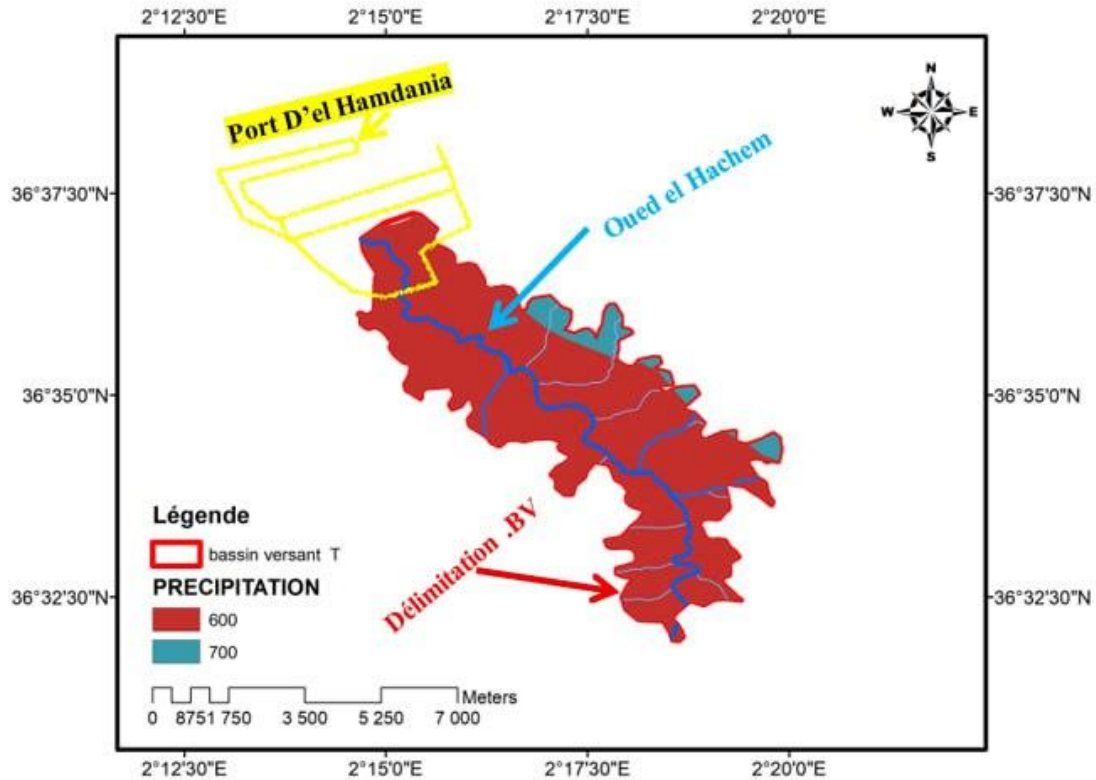


Figure 13 : Carte de précipitation du bassin versant de Oued El Hachem

### Érosion

L'érosion désigne l'ensemble des processus physiques, chimiques et biologiques responsables de la dégradation, du détachement et du transport des particules du sol ou de la roche par des agents naturels tels que l'eau, le vent, la glace ou la gravité. Lorsqu'elle est accentuée par les activités humaines, elle peut entraîner une dégradation importante des milieux naturels. Dans ce cadre, l'analyse de la carte d'érosion du bassin versant d'Oued El Hachem met en évidence une relative stabilité du bassin, traduisant une moindre susceptibilité à l'érosion. Cette stabilité peut s'expliquer par des facteurs tels que la couverture végétale, la nature lithologique, ou encore les aménagements présents dans la zone (voir la figure 13 ci-dessous).

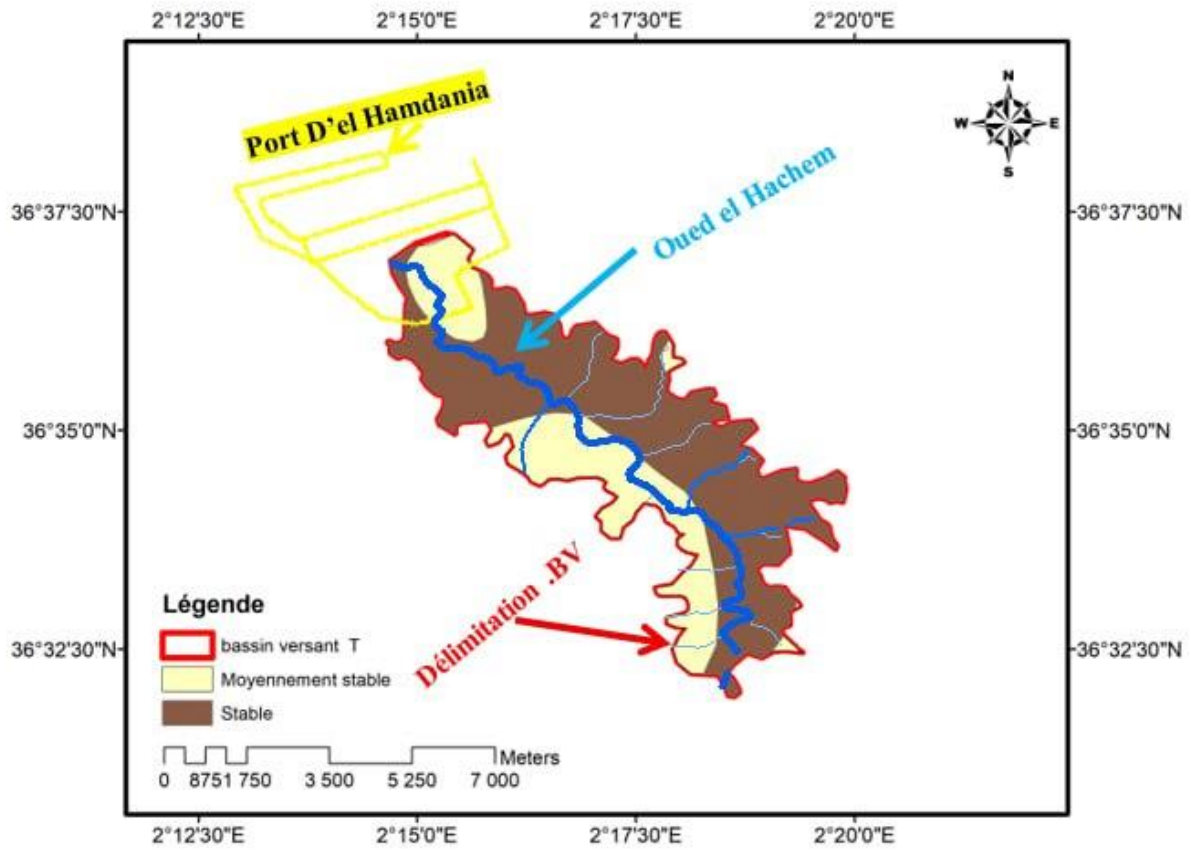


Figure 14 : Carte d'érosion du bassin versant de Oued El Hachem

### I.5 Cadre pluviométrique et hydrométrique

En se basant sur les données recueillies au niveau de l'ANBT (site du barrage boukourdane) sur 20ans d'observation, les pluies annuelles sont présentées dans le tableau 5

*Tableau 5 : Pluviométrie de la zone d'étude*

Années	Pluie $P_{an}$ (mm)	Années	Pluie $P_{an}$ (mm)
95-96	862.10	05-06	636.00
96-97	361.30	06-07	548.00
97-98	531.30	07-08	741.70
98-99	710.80	08-09	632.00
99-00	553.60	09-10	621.80
00-01	452.80	10-11	742.50
01-02	441.30	11-12	788.10
02-03	613.00	12-13	724.00
03-04	495.00	13-14	600.40
04-05	693.20	14-15	305.60

Source : Agence Nationale des Barrages et transferts d'ingénierie et construction « Site barrage Boukourdane »

#### I.5.1 Analyses statistiques des pluies

##### I.5.1.1 Présentation de Logiciel HYFRAN-PLUS

Le logiciel HYFRAN-PLUS (Hydrological Frequency Analysis Plus Decision Support System) a été développé pour effectuer des analyses fréquentielles en hydrologie, en particulier pour l'étude des événements extrêmes. Il est notamment utilisé pour analyser les précipitations journalières maximales annuelles, dans le cadre de l'analyse des crues. Ce logiciel permet d'ajuster différentes lois statistiques à des séries de données qui respectent certaines conditions : indépendance, homogénéité et stationnarité.

HYFRAN-PLUS a été conçu par l'INRS-Eau, en collaboration avec la division hydrologie du Service Hydraulique d'Hydro-Québec, dans le cadre de la chaire de recherche en hydrologie statistique Hydro-Québec/CRSNG, mise en place en 2002 à l'INRS-Eau.

Dans ce travail, HYFRAN-PLUS a été utilisé dans le but d'identifier la loi statistique la plus représentative de la distribution des précipitations journalières maximales annuelles, à partir de données enregistrées entre 1995 et 2014. Le choix de la loi d'ajustement est une étape

cruciale, car il influence directement l'estimation des périodes de retour des événements extrêmes.

Trois lois statistiques ont été testées dans cette étude :

- La loi des valeurs extrêmes généralisée (GEV) à trois paramètres,
- La loi Log-Pearson type III,
- La loi de Weibull à deux paramètres.

Les paramètres de ces lois ont été estimés à l'aide de la méthode des moments pondérés.

### **La loi de GEV (La distribution des valeurs extrêmes généralisées)**

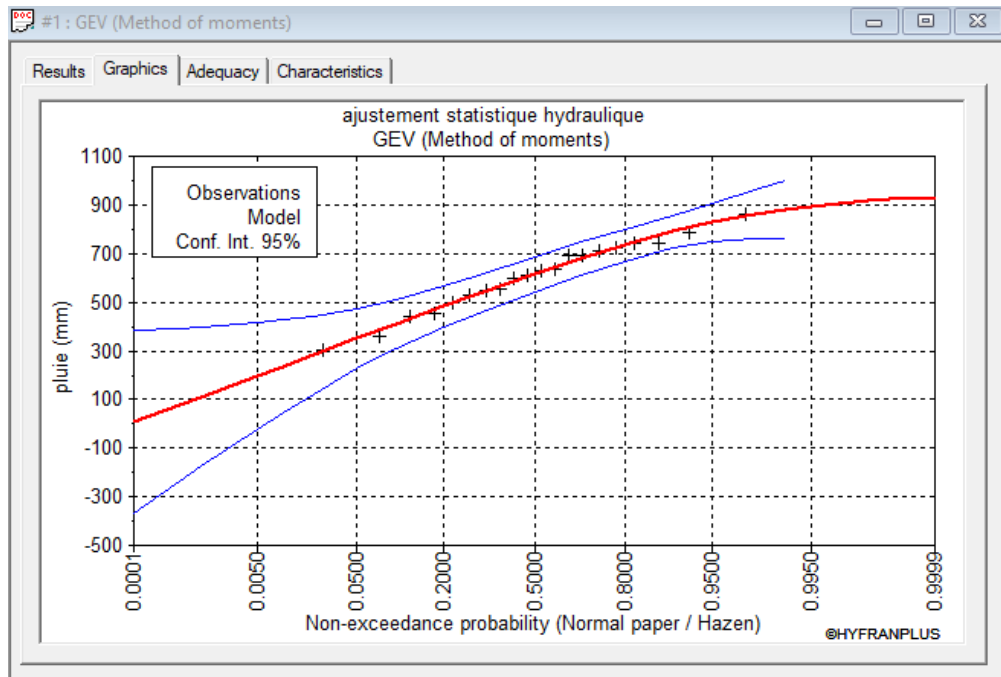
La distribution GEV (valeurs extrêmes généralisée) est une famille de lois de probabilité continues utilisée pour modéliser des événements extrêmes, comme les précipitations maximales. Elle est très utile en hydrologie ou dans d'autres domaines où l'on s'intéresse aux valeurs les plus élevées (ou les plus basses) observées.

Cette distribution regroupe en réalité trois types de lois : celles de Gumbel, Fréchet et Weibull. Chacune correspond à une façon différente dont les valeurs extrêmes peuvent se comporter, notamment en ce qui concerne les queues de distribution (c'est-à-dire comment se comportent les valeurs très grandes ou très petites). Grâce à cette flexibilité, la GEV est un outil très apprécié par les statisticiens et les spécialistes de la donnée pour analyser les phénomènes rares.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[ 1 - \frac{k}{\alpha} (x - u) \right]^{\frac{1}{k} - 1} \exp \left\{ - \left[ 1 - \frac{k}{\alpha} (x - u) \right]^{\frac{1}{k}} \right\} \quad (6)$$

Où :

- $u$  : Le paramètre de position
- $\alpha$  : Le paramètre d'échelle
- $k$  : Le paramètre de forme indique le comportement des extrêmes ou la forme de la distribution. On définit trois types de lois GEV :
  - $k = 0$ , loi à queue légère (ou distribution de Gumbel) ;
  - $k < 0$ , loi à queue lourde (ou distribution de Fréchet) ;
  - $k > 0$ , loi à queue bornée (ou distribution de Weibull).



*Figure 15 : Ajustement des pluies annuelles selon la loi de GEV par l'Hyfran Plus (Method of moments)*

### La loi de Weibull

Le logiciel HYFRAN-PLUS applique la distribution de Weibull à deux paramètres, couramment utilisée dans le domaine de l'hydrologie pour l'étude de fréquence des événements extrêmes comme les crues ou les précipitations abondantes.

La formule de la loi de Weibull est :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\gamma}\right)^k} \quad (7)$$

Où :

- $t \geq 0$  : variable aléatoire (par exemple, débit ou précipitation) ;
- $\gamma > 0$  : paramètre d'échelle ;
- $k > 0$  : paramètre de forme.

Cette formule sert à déterminer la probabilité qu'un événement hydrologique soit égal ou inférieur à une valeur donnée  $t$ .

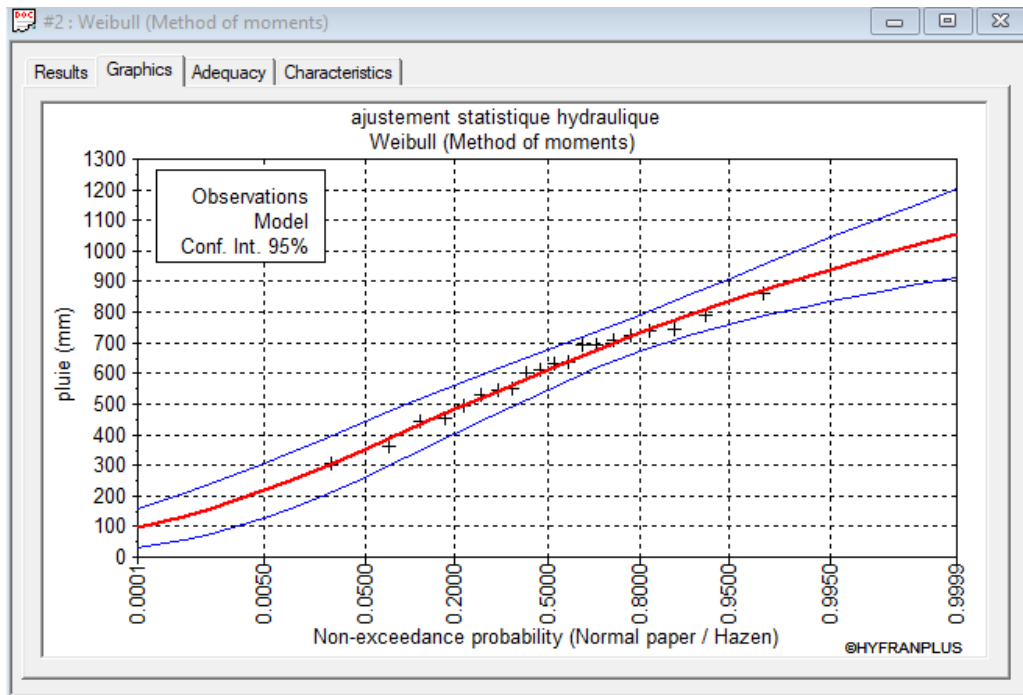


Figure 16 : Ajustement des pluies annuelles selon la loi de Weibull (2 paramètres) par l'Hyfran Plus

### La loi de log Pearson type III

La loi de log Pearson type III (LP3) utilisée pour ajuster un échantillon de données hydrologiques extrêmes. La distribution log Pearson de type III (LP3) décrit une variable  $x$  dont le logarithme  $y = \log x$  suit une distribution P3

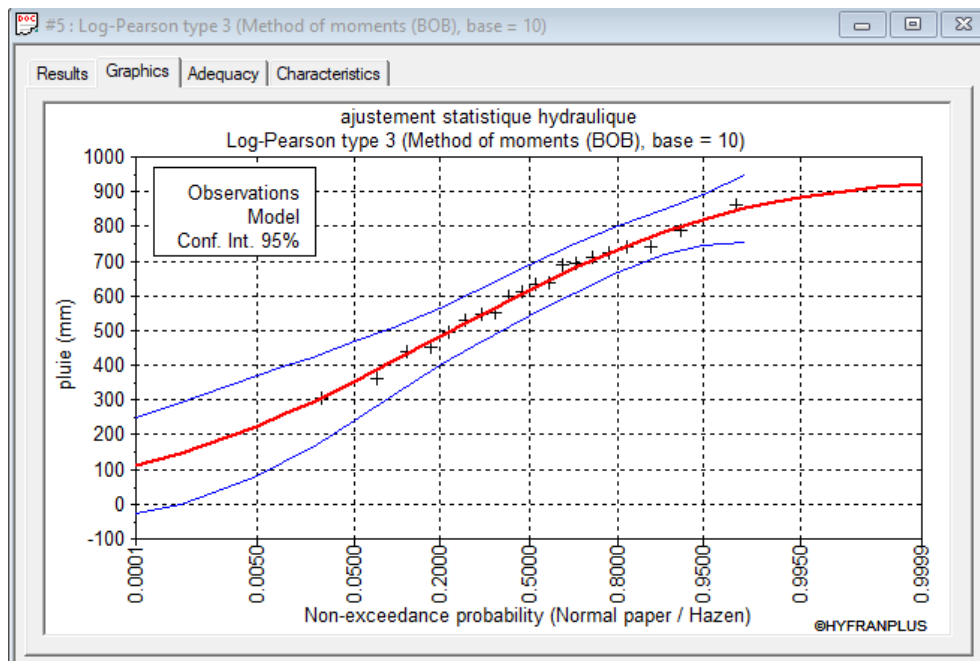


Figure 17 : Ajustement des pluies annuelles selon la loi de log Pearson type III (LP3) par l'Hyfran Plus

### I.5.1.2 Validation du modèle statistique

Il existe plusieurs méthodes pour comparer les lois de probabilité et choisir celle qui s'ajuste le mieux aux données. Parmi elles, l'observation visuelle des graphiques d'ajustement reste une étape importante, même si elle peut sembler simple. Elle permet d'avoir une première idée de la qualité de l'ajustement avant de passer à des tests plus techniques.

Ensuite, on peut utiliser des critères statistiques comme le critère d'information d'Akaike (AIC) ou le critère bayésien (BIC). Ces indicateurs permettent de comparer plusieurs modèles entre eux : plus leurs valeurs sont faibles, meilleur est l'ajustement du modèle aux données.

#### - Test visuel (graphique)

Après avoir intégré nos données dans le logiciel Hyfran plus, nous avons obtenu un graphique représentant annuelle de notre zone d'étude (voir la figure 17).

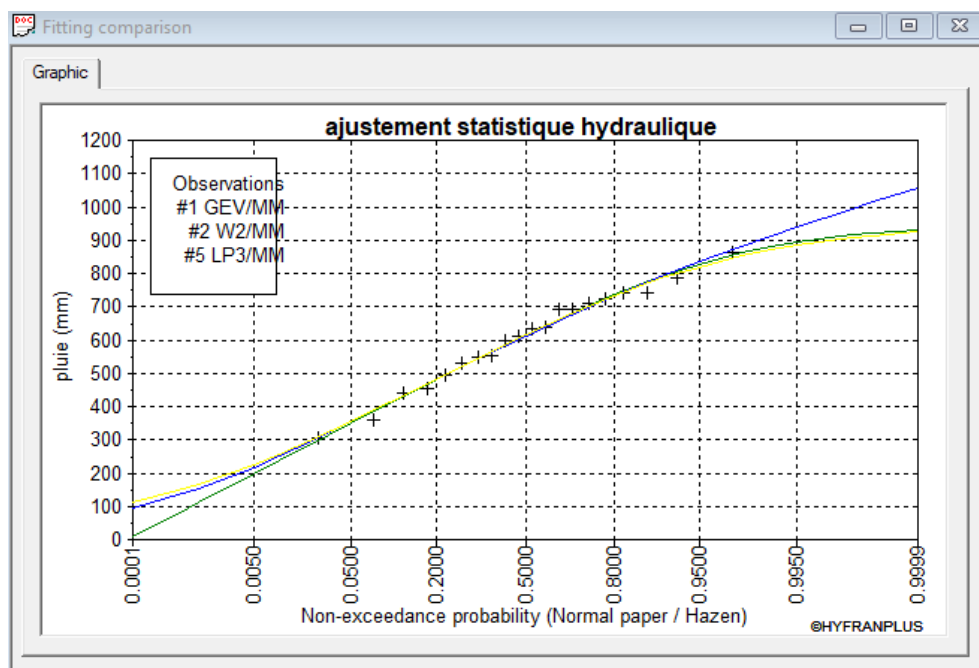


Figure 18 : Comparaison graphique entre les trois lois par l'Hyfran Plus

#### - Les critères d'informations

La sélection de la distribution statistique la mieux ajustée aux échantillons a été faite à l'aide de deux critères à savoir le critère d'Akaike (AIC) et le critère d'information bayésien (BIC). Ces deux critères permettent de choisir la loi la mieux ajustée en tenant compte de l'erreur d'estimation et de la parcimonie (nombre de paramètres à ajuster). La distribution pour laquelle les valeurs des deux critères sont les plus faibles est celle qui est sélectionnée. En

d'autres termes, il s'agit de déterminer le meilleur ajustement. En effet, le but de ces critères est de rechercher un compromis entre une paramétrisation suffisante pour bien ajuster une loi de probabilité aux observations, et une paramétrisation la moins complexe possible.

### Le critère d'Akaike (AIC)

Le critère d'information d'Akaike mesure la qualité de l'ajustement d'un modèle statistique. Il a été développé par Hirotugu Akaike en 1974. Dans le cas général, l'AIC est écrit comme suit :

$$AIC = -2 \log(l) + 2k \quad (8)$$

Le meilleur modèle repose sur la plus faible valeur de l'AIC (voir le tableau 6).

### Le critère Bayésien (BIC)

En statistique, le critère d'information bayésien (BIC), aussi appelé critère de Schwarz (1978), est utilisé pour choisir le meilleur modèle parmi plusieurs modèles possibles lorsqu'on cherche à ajuster des données. Il se base sur la fonction de vraisemblance du modèle et ressemble beaucoup au critère d'Akaike (AIC), avec quelques différences dans la façon dont il pénalise les modèles trop complexes. La formule du BIC est :

$$BIC = -2 \log(l) + k * \log(n) \quad (9)$$

Le meilleur modèle est celui possédant l'AIC le plus faible (voir le tableau 6).

**Tableau 6 :** Critères de comparaison des lois statistiques (GEV, LP3, Weibull)

Model	Nb param.	XT	P(Mi)	P(Mi   x)	BIC	AIC
Weibull (Method of moments)	2	913.072	50.00	78.11	260.239	258.247
Log-Pearson type 3 (Method of moments (BO	3	869.949	25.00	11.74	262.642	259.655
GEV (Method of moments)	3	881.876	25.00	10.14	262.935	259.948

### I.5.1.3 Résultats et discussion

- Le teste visuel montre des graphiques présentent les probabilité empiriques et théoriques des distributions des lois GEV, Weibull, et LP3 sur papier de probabilité normal. Visuellement on remarque que la loi de Weibull présente le meilleur ajustement de la variable des pluies annuelles.
- Les critères d'informations AIC et BIC des lois statistiques (GEV, Weibull, et LP3), permettent de comparer le degré d'ajustement. Les meilleurs ajustements correspondent aux plus faibles valeurs de ces statistiques, donc pour notre cas la loi

de Weibull est la mieux adaptée pour l'estimation des intensités moyennes maximales.

### I.5.2 Analyse des caractéristiques pluviométriques du bassin versant

#### Précipitation moyenne annuelle

En se basant sur les données d'une station pluviométrique pour le calcul de la pluie moyenne Annuelle.

Si on a la série suivante :

$$\overline{P_{an}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (10)$$

Ou :

$\overline{P_{an}}$  : Pluie moyenne annuelle (mm) ;

n : le nombre d'observations ;

$\Sigma P_i$  : Somme des précipitations annuelles observées (mm).

#### Pluie journalière maximale

D'après les publications du Ministère de l'Hydraulique (I.N.R.H Constantine 1985) « Analyse fréquentielle de pluies de l'Algérie – Synthèse régionale » sur les bassins versants algériens, la relation conseillée pour le calcul de la pluie journalière maximale du bassin versant en question (Hauts Plateaux Constantinois) est la suivante :

$$P_{j \max} = 0,0525 \cdot \overline{P_{an}} + 18,6 \quad (11)$$

#### Pluies journalières maximales fréquentielles

$$P_{j \max \%} = \frac{\overline{P_{j \max}}}{\sqrt{(CV)^2 + 1}} e^{u \sqrt{\ln[(CV)^2 + 1]}} \quad (12)$$

CV : Coefficient de variation de la série pluviométrique

$$CV = \frac{\text{Ecart type } (\sigma)}{\text{Moyenne } (\overline{P})}$$

**Pluie de courte durée**

Pour calculer la pluie de courte durée, on applique la formule de **MONTANARI** suivante :

$$P_{tc\%} = P_{jmax\%} \left[ \frac{t_c}{24} \right]^b \tag{13}$$

Où :

$$b = 1 + \frac{\log I_2 - \log I_1}{\log T_2 - \log T_1}; \quad I_2 = \frac{\overline{P_{jmax}}}{24}; \quad T_2 = 24h;$$

Selon la recommandation de l'ANRH les valeurs de :  $I_1 = 25 \text{ mm/h}$   $T_1 = 0.5 \text{ h}$

$$b = 1 + \frac{\log 2.10 - \log 25}{\log 25 - \log 0.5}$$

**Intensité des pluies :**

L'intensité des pluies est la quantité de pluie exprimée en millimètre par heure.

$$I = \frac{P_{tc}}{T_c} \tag{14}$$

Où :

$P_{tc\%}$ : Pluie de courte durée (mm) ;

$T_c$  : temps de concentration(h).

**Ruissellement**

Le coefficient de ruissellement peut être approché par les formules empiriques suivantes selon la nature du bassin versant, ( $Cr \leq 1$ ) (voir le tableau 7).

*Tableau 7 : Type de ruissellement du bassin versant*

Bassin versant rural
Formule de Maillet-Gauttier
$C_r = 0,6. [1 - 10^{-0,36.(\overline{P_{an}})^2}] \pm 10\%$
$\overline{P_{an}}$ : pluie moyenne annuelle (mm)
On doit ajuster le coefficient de ruissellement par $\pm 10\%$ pour des conditions de perméabilité du BV.

On considère que le bassin versant a une perméabilité faible  $Cr = 0.7$

### Discussion des résultats

Le bassin reçoit des précipitations importantes (606 mm/an) avec une bonne régularité interannuelle ( $CV = 0,24$ ). Les pluies extrêmes (max. 50,43 mm/j) correspondent aux normes des zones semi-arides. Cependant, l'intensité augmente fortement pour les événements rares (jusqu'à 10,69 mm/h pour 1000 ans). Compte tenu de la faible perméabilité du bassin ( $Cr = 0,7$ ), ceci entraîne un risque élevé de ruissellement et de crues.

### Formations lithologiques et perméabilité

La nature des formations lithologiques joue un rôle fondamental dans le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant, notamment en influençant l'infiltration, le ruissellement et la susceptibilité à la perméabilité. L'étude de la lithologie permet ainsi de mieux comprendre la structure du sous-sol et sa capacité à interagir avec les précipitations (voir la figure 18 ci-dessous).

L'analyse de la carte lithologique du bassin versant montre que la région est majoritairement constituée de sédiments meubles, notamment des alluvions et des sables. Ces formations, souvent peu cohésives, sont particulièrement sensibles à l'érosion hydrique et peuvent favoriser l'écoulement de surface, surtout en cas de fortes précipitations.

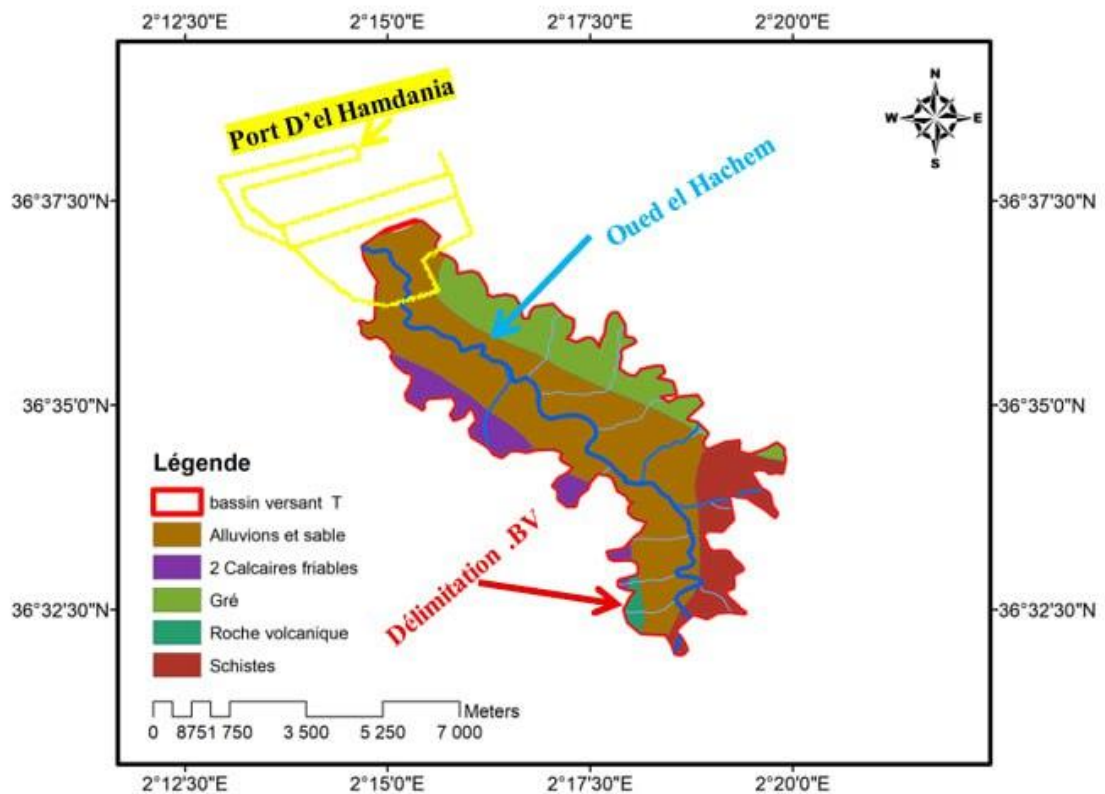


Figure 19 : Carte lithologique du bassin versant d'oued el Hachem

### I.5.3.1 Prédétermination des débits des crues

Les crues d'un bassin versant sont déterminées selon les conditions pluviométriques et morphométriques. Les crues de différentes fréquences qui peuvent se produire au niveau du bassin versant sont estimées par suivante formule empirique de TURRAZZA :

$$Q_{max} = \frac{C_r \cdot I \cdot S}{3,6} \quad (15)$$

Où :

$Q_{max}$  : Debit maximal (m3/s);

$I$  : Intensité des pluies (mm/h) ;

$C_r$  : Coefficient de ruissellement.

**Tableau 8:** Tableau récapitulatif des paramètres pluviométriques et hydrométriques

Période de retour (an)	2	5	10	20	50	100	1000
Variable de Gauss (u)	0	0.841	1.282	1.645	2.057	2.327	3.1
Cv	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Pjmax	50.43	50.43	50.43	50.43	50.43	50.43	50.43
Pjmax%	49.03	59.84	66.42	72.38	79.80	85.07	102.15
Exposant climatique (b)	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
Ptc% (mm)	29.20	35.63	39.55	43.10	47.52	50.65	60.83
I (mm/h)	5.13	6.26	6.95	7.57	8.35	8.90	10.69
Qmax(m3/s)	25.49	31.11	34.53	37.63	41.49	44.24	53.11

### I.5.3. Résultats des Débits de Crue

Les débits de crue varient considérablement en fonction de la période de retour :

- ✓ Pour une période de retour de 2 ans, le débit maximal est de 25.49m<sup>3</sup>/s.
- ✓ Pour une période de retour de 1000 ans, le débit maximal atteint 53.11m<sup>3</sup>/s.

Ces valeurs montrent une augmentation exponentielle du débit avec la période de retour, soulignant le potentiel de crues extrêmement violentes lors d'événements rares.

### I.5.4 Composantes du bilan hydrologique

La formule du bilan hydrologique en moyenne interannuelle se fonde sur l'équation de continuité et peut s'exprimer comme suit :

$$P = E + D_f \quad (16)$$

**P** : Précipitation (mm)

**E** : Écoulement (mm)

**D<sub>f</sub>** : Déficit (mm)

#### Déficit

Le calcul du déficit d'écoulement moyen annuel était l'objet de plusieurs chercheurs dont on peut choisir le calcul par la formule de **TURK**

$$D = \frac{\overline{P_{an}}}{\sqrt{0,9 + \frac{\overline{P_{an}}^2}{L^2}}}$$

**L**: Pouvoir évaporant ;

$$L = 300 + 25\overline{T^2} + 0,05\overline{T^3} ; L = 982.817$$

### I.5.5 Estimation des débits solides et liquides

#### Formule de TIXERONT

$$T_a = a \cdot l_e^{0.15}$$

Où :

**T<sub>a</sub>** : Taux d'abrasion (T/km<sup>2</sup>/an)

**a** : coefficient qui varie en fonction de la perméabilité du terrain ;

a = 350 (perméabilité moyenne) (voir l'annexe B) ;

**L<sub>e</sub>** : lame d'eau écoulée en (mm) ;  $L_e = 0,6 \cdot \overline{P_{an}} \left[ 1 - 10^{-0,36 \cdot \overline{P_{an}}^2} \right]$

#### Apports solides

$$A_s = T_a \cdot S / \gamma$$

Si on considère que le sol est constitué des alluvions,  $\gamma = 2.4 \text{ T/m}^3$ .

Les résultats montrent une charge sédimentaire non négligeable, liée à l'abrasion du sol.

Cela peut impacter la capacité des ouvrages hydrauliques à long terme, notamment en cas de

mauvais entretien.

### Apports liquides

$$A_l = L_e * S$$

L'apport liquide annuel (Al) est estimé à 9.3 Hm<sup>3</sup>, ce qui représente un volume important à prendre en compte dans la gestion hydrique du bassin versant

### I.6 Conclusion

Ce projet d'aménagement des oueds pour le port centre d'El Hamdania a permis d'analyser en détail les risques hydrologiques de la zone. L'étude a révélé des enjeux majeurs : intensité des pluies, ruissellement important et vulnérabilité aux crues. Les résultats obtenus imposent une étude pour trouver des solutions adéquates dans l'objectif de protéger le port centre.

Les données climatiques et hydrologiques ont été intégrées dès la conception pour garantir la durabilité du projet. Les recommandations clés. Des systèmes de drainage performants, une gestion rigoureuse des flux d'eau et des sédiments, et des infrastructures capables de résister aux événements extrêmes.

---

***CHAPITRE II : Propositions  
des solutions d'aménagement  
d'Oued El Hachem***

---

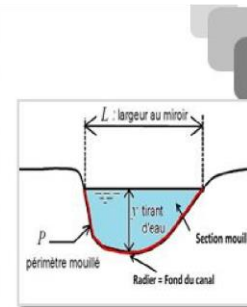
### II .1 Introduction

Dans le cadre du projet du port Centre de Hamdania, ce chapitre propose plusieurs solutions pour dévier le cours de l'oued El Hachem, dont la présence constitue un risque majeur pour la sécurité du site. La réussite de ce projet dépend en grande partie de la capacité à maîtriser ces risques hydrologiques, notamment les crues et l'érosion. Parmi les solutions étudiées, l'aménagement de canaux artificiels se présente comme une option efficace. Un canal est un système d'écoulement à surface libre, soumis à la pression atmosphérique (Graf et Altinakar, 2000). On distingue :

- Les canaux naturels, comme les oueds.
  - Les canaux artificiels, construits par l'homme, de formes variées (trapèze, rectangle, etc.).
- L'objectif est d'identifier la variante de déviation la plus adaptée, en tenant compte des contraintes techniques, environnementales et économiques du site.



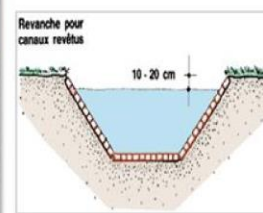
*Canal naturel*



*Section en travers du canal naturel*



*Canal artificiel en cours de réalisation*

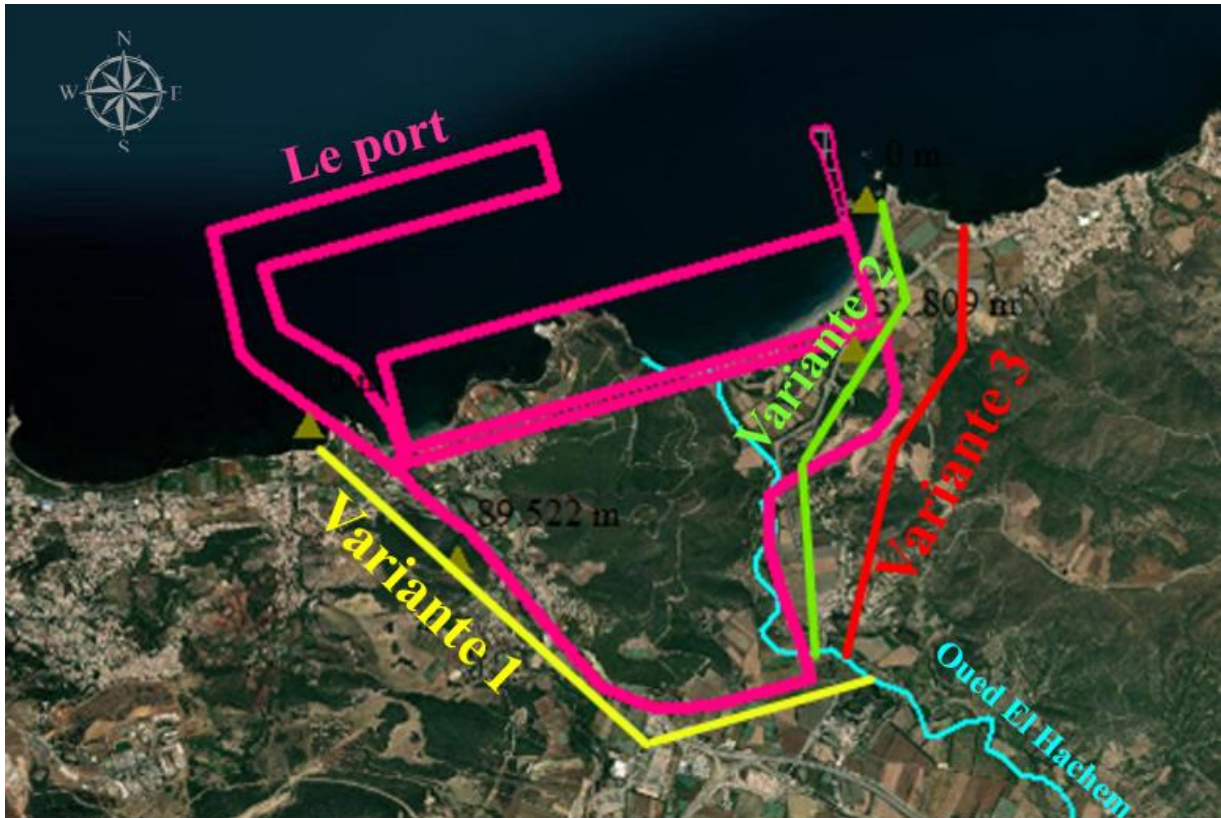


*Section en travers du canal artificiel*

*Figure 20 : Canaux naturels et artificiels*

### II.2 proposition des variantes de déviation d'Oued El Hachem

Les différentes variantes de déviation de l'oued El Hachem sont illustrées à la figure 20, qui superpose les trois tracés sur une image satellite. Chaque option est représentée par une couleur distincte : la Variante 1 en jaune, la Variante 2 en vert et la Variante 3 en rouge. Cette représentation permet une visualisation claire et comparative des solutions envisagées, facilitant ainsi l'évaluation des choix techniques et géographiques.



*Figure 21 : Carte des trois variantes de déviation d'Oued El Hachem*

#### II.2.1 Calcul hydraulique

Dans notre étude Chaque variante adopte un type de canal artificiel bien précis, choisi en fonction des contraintes techniques et des particularités de l'environnement traversé.

##### **Surface mouillée d'un canal S (la section mouillée)**

La surface d'un canal est la section perpendiculaire à son axe. Si le canal est de forme cylindrique ou prismatique, l'axe du canal est parallèle à la génératrice du cylindre ou aux arêtes du prisme.

On appelle section mouillée d'un canal la portion de la section du canal limitée par les parois du canal et la surface libre.

### Périmètre mouillé d'un canal P

Le périmètre de la section mouillée qui inclut les parois solides mais ne comprend pas la surface libre. Est la longueur de la zone de contact entre l'eau et le canal au sein de la section mouillée.

### Rayon hydraulique $R_h$

On appelle rayon hydraulique  $R_h$ , le quotient de l'aire de la section mouillée S et du périmètre mouillé P :

$$R_h = \frac{S_m}{P_m}$$

Ou :

$S_m$  : Section mouillée ( $\text{km}^2$ ) ;

$P_m$  : périmètre mouillé (km).

Pour une surface donnée d'écoulement, plus le périmètre mouillé est grand, plus le rayon hydraulique est faible. Comme le périmètre mouillé est une mesure de la surface de contact sur laquelle se fait le frottement, on peut interpréter le rayon hydraulique comme un indice de la performance de la section d'écoulement.

### Largeur du fond du canal

La largeur de la section mouillée au niveau du fond du canal est appelée largeur au radier, représentée par b.

### Largeur au miroir

La largeur de la section mouillée à la surface libre est appelée largeur au plan d'eau. On la dénote généralement par B.

### Pente d'un canal

On définit la pente d'un canal comme étant la tangente de l'angle d'inclinaison du lit par rapport à l'horizontale. Comme cet angle est généralement très petit, la pente est, en pratique, numériquement égale à l'angle donné en radians.

### Profondeur ou Tirant d'eau (m)

Profondeur d'eau c'est la hauteur d'eau au-dessus du point le plus bas de la section perpendiculaire à l'écoulement. On la dénote souvent par  $y$ .

### La vitesse moyenne (m/s)

La vitesse moyenne de l'écoulement dans une section  $V$  (m/s) est le rapport du débit  $Q$  à la section normale de l'écoulement.

### Débit $Q$ (m<sup>3</sup>/s)

Dans une section est défini comme étant le volume du liquide écoulé à travers cette section pendant une unité de temps.

$$Q = V \cdot S_m = \frac{1}{n} R h^{2/3} I^{1/2} \cdot S_m$$

$V$  : La vitesse moyenne (m/s)

$I$  : Pente du radier

### Charge $H$

La charge  $H$  d'un canal dans une section est donnée par :

$$H = Z + \left(\frac{v^2}{2} \times g\right)$$

Où :

$g$  : Accélération due à la gravité (m/s<sup>2</sup>)

$Z$  : La côte à la surface est le niveau du lit du canal par rapport à un plan horizontal de référence fixe. Donnée par :

$$Z = Z_f + y$$

### L'énergie spécifique $H_s$

L'énergie spécifique  $H_s$  dans une section est :

$$H_s = y + \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Où :

### L'énergie spécifique critique Hsc

L'énergie spécifique critique Hsc dans une section est :

$$H_{sc} = \frac{3}{2} \times y_c$$

Où :

### Nombre de Froude Fr

Le Nombre de Froude, noté Fr, représente l'effet des forces de gravité, il est donné par :

$$F_r = \frac{\text{vitesse de l'écoulement}}{\text{vitesse des ondes des surface}} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y_h}}$$

Où :

$$y_h = \frac{\text{section mouillée}}{\text{la largeur au miroir}} = \frac{S_m}{B};$$

Il permet de définir la nature d'un écoulement à surface libre, tel que :

- $Fr < 1$  : Ecoulement fluvial (subcritique)
- $Fr = 1$  : Ecoulement critique
- $Fr > 1$  : Ecoulement torrentiel (supercritique)

### Pertes de charge linéaire

$$J = \frac{Q^2}{K^2 \cdot S_m^2 \cdot R^{4/3}}$$

Où :

K : Coefficient de STRICKLER définit par :

$$K = \frac{1}{n};$$

n : Coefficient Rugosité (il dépend du matériau de revêtement du canal).

### II .2.2 Présentation sommaire des variantes

Trois principales variantes de déviation de l'oued El Hachem ont été envisagées, chacune adaptée aux contraintes du site :

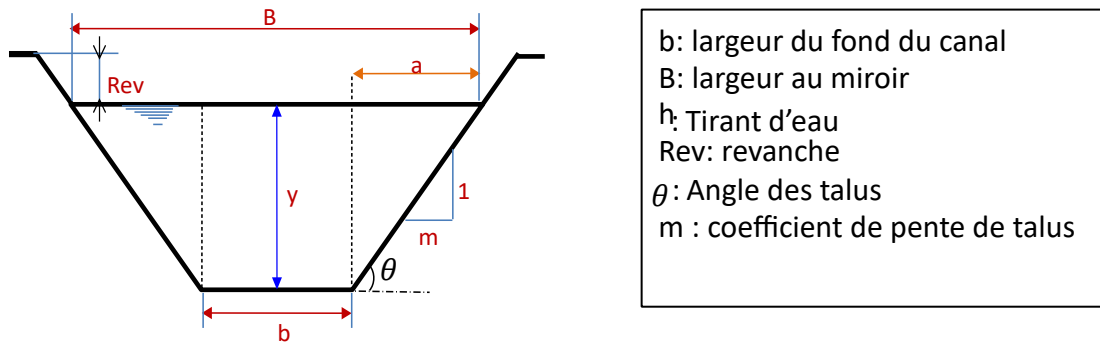


Figure 22 : Forme trapézoïdale du canal (voir annexe C)

**Variante 01 : Canal en béton armé de Section Trapézoïdale (à ciel ouvert)**

La première variante consiste à dévier Oued El Hachem vers l'ouest du port (voir la figure n°21), cette variante comporte la mise en place d'un canal à ciel ouvert en béton armé avec une section trapézoïdale (voir la figure n°22), où la pente des talus est de 1.5 m avec hauteur de 2m et un largeur du fond de 6m avec une pente de 0.2%.

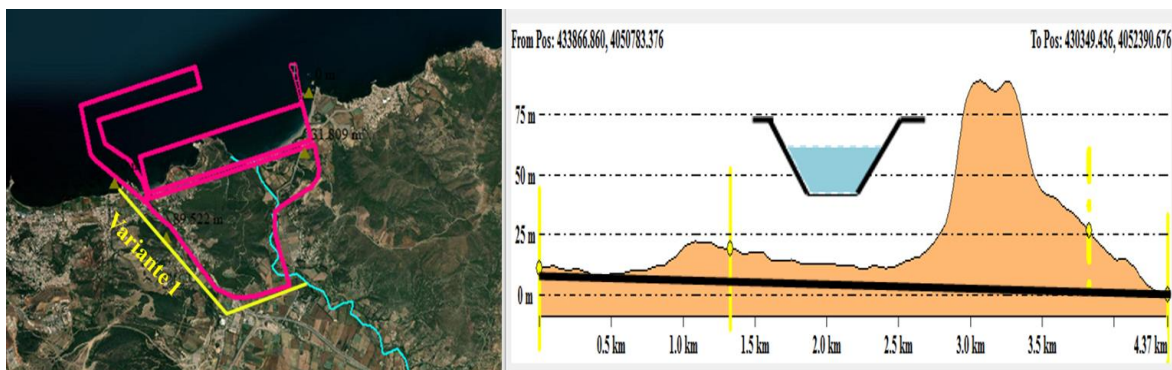


Figure 23 : Vue en plan, profil en long et section en travers de la variante 1

**Variante 02 : Canal en béton armé de Section rectangulaire (sous terrain)**

La deuxième variante consiste à dévier Oued El Hachem vers l'Est du port (voir la figure 23), par le biais d'un canal en béton armé sous terrain au-dessous de la zone portuaire et logistique du port et avec une section rectangulaire, de hauteur de 2m et de largeur du fond 6m (soit 3 x 2 x2).

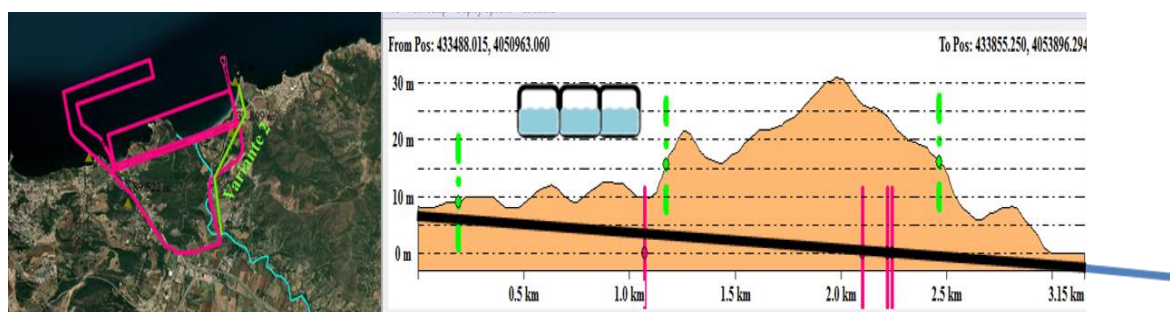


Figure 24 : Vue en plan, profil en long et section en travers de la variante 2

### Variante 03 : Canal en béton armé de Section Trapézoïdale (à ciel ouvert)

Dans cette variante, dévier Oued El Hachem à la partie Est du port par le biais d'un canal à ciel ouvert en béton armé avec une section trapézoïdale où la pente des talus est  $m= 1.5$  avec hauteur de 2m et un largeur du fond de 6m avec une pente de 0.2% (voir la figure 24).

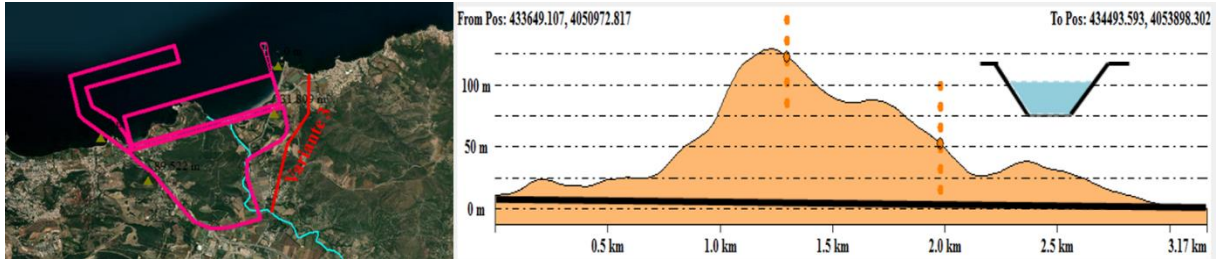


Figure 25 : Vue en plan, profil en long et section en travers de la variante 3

II .3 Comparaison des variantes proposées de déviation d'Oued El Hachem

Tableau 9 : comparaison des 3 variantes proposées

Descripteur	Unité	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Longueur	Km	4.37	3.15	3.17
Pente longitudinale	%	0.2	0.3	0.2
Section transversale « Largeur totale »	m	12.00	6.00	12.00
Déblai	m <sup>3</sup>	6*10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	25.10 <sup>5</sup>
Remblai	m <sup>3</sup>	5.10 <sup>3</sup>	50.10 <sup>3</sup>	4.10 <sup>3</sup>
Ouvrages annexes : Ponts ou autres		Réalisation de 01 pont au chemin de wilaya CW109 (pont d'accès au port au même temps)	Souterrain pas de pont.	Réalisation d'un pont (chemin de wilaya109)  Pont d'accès au port
Impact sur l'environnement	-	Un tracé de 10 mètres qui défigurait le paysage.  Présente une barrière au animaux terrestres.	Une rupture souterraine est très difficile à localiser et à réparer. Peut entraîner des affaissements de terrain ou des effondrements de surface.  Nécessité de créer des puits d'accès, regards techniques.	Un tracé de 10 mètres qui défigurait le paysage.  Modification locale du régime hydraulique, qui peut affecter la végétation riveraine et les espèces qui en dépendent.  A cause de l'excavation de la montagne peut provoquer des sédimentations au niveau de la plage  Endommager le Sites archéologiques.

Sédimentation	-	Sédimentation possible dans le canal.  Présente risque d'envasement	Sédimentation dans la partie aval du canal car il est partiellement submergé (soit environ la moitié de sa hauteur intérieure)	Sédimentation possible dans le canal. A cause de l'excavation de la montagne peut provoquer des sédimentations au niveau de la plage.
Maintenance	-	L'accès direct au canal facilite les opérations de curage, de surveillance et d'entretien.	Difficile en raison de Facées limité aux canal et ponts difficile car la partie aval du canal est partiellement submergée par le niveau de la mer	Accès facile pour l'entretien du canal ouvert.
Risque	-	Risque d'obstruction des ponts.  Peuvent être sensibles à la pollution provenant de diverses sources, ce qui affecte la qualité de l'eau et la santé de l'écosystème.	Risque d'obstruction à l'entrée du canal si des débris sont entraînés depuis l'amont lors d'une crue soudaine.  Accumulation de dépôts organiques provoque une production d'acides alors la dégradation du béton	Risque d'obstruction des ponts.  Peuvent être sensibles à la pollution provenant de diverses sources, ce qui affecte la qualité de l'eau et la santé de l'écosystème.

## II .4 Conclusion

Après avoir étudié et comparé les différentes solutions possibles pour dévier l'oued El Hachem, la Variante 1 s'est révélée être la plus pertinente. Car elle propose un canal trapézoïdal à ciel ouvert, simple à réaliser, facile à entretenir et avec un impact environnemental relativement faible. Contrairement aux autres options, cette solution limite les risques majeurs, notamment en cas de crues, tout en restant accessible pour d'éventuelles interventions. Même si un léger risque de sédimentation existe, il peut être géré sans difficulté.

---

***CHAPITRE III :***  
***Modélisation de la***  
***variante retenue***

---

### III .1 Introduction

Dans ce chapitre, nous procéderons à la modélisation de la variante retenue, à savoir la Variante 1, sélectionnée à l'issue d'une analyse comparative des différentes options de déviation de l'oued El Hachem. Cette solution prévoit la réalisation d'un canal à ciel ouvert accompagné d'ouvrages annexes. L'objectif est de déterminer les dimensions optimales du canal et de ses structures associées, en prenant en compte les caractéristiques hydrauliques, topographiques et environnementales du site, ainsi que d'établir les profils en long et en travers du tracé.

### III .2 Description de la variante retenue (choisie)

La conception se compose de plusieurs ouvrages annexes à savoir l'ouvrage d'entrée, canal, ouvrage de jonction canal - pont et ouvrage de sortie.

Un canal en béton armé à ciel ouvert de section trapézoïdale, et la réalisation d'un pont (au niveau du chemin de wilaya CW109) (Voir la figure 25).



Figure 26 : Vue en plan de la variante retenue

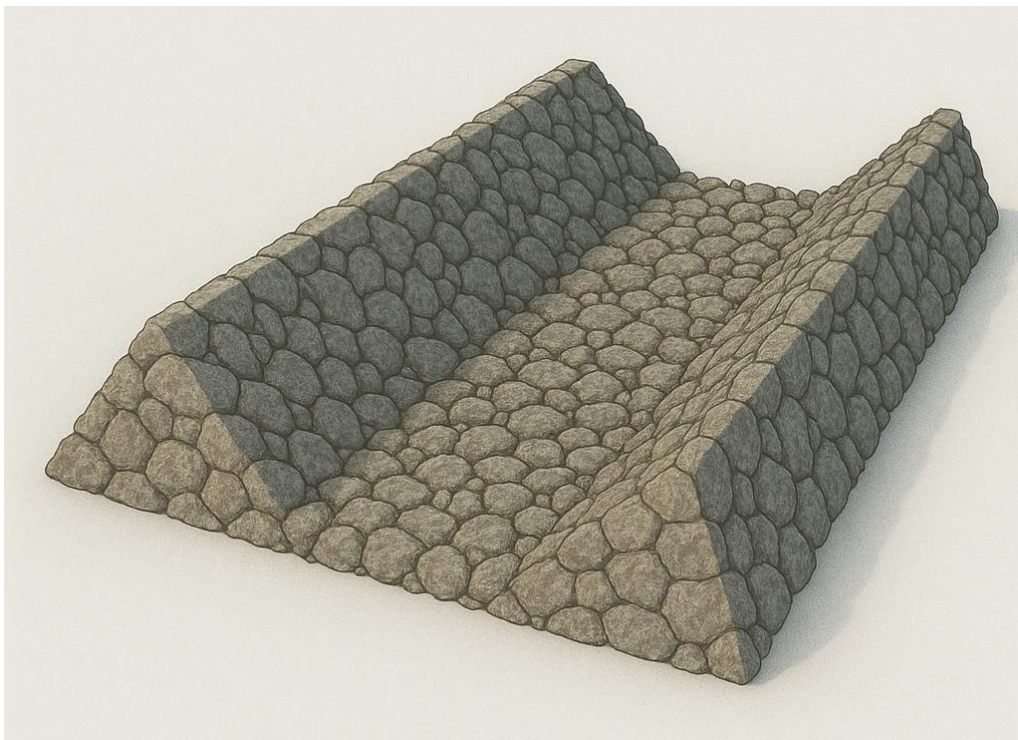
### III .3 Modélisation de la variante avec logiciel HECRAS

Logiciel développé et distribué gratuitement par (l'Hydrologie Engineering Center de l'US Army Corps of Engineers), HEC-RAS (Version 6.5) est un logiciel de simulation d'écoulements dans les cours d'eau et les canaux. Le modèle utilisé jusqu'à la version 5.0 était

unidimensionnel, ce qui signifie qu'il n'existait pas de modélisation directe des variations hydrauliques dues aux changements de forme de la section transversale, à la présence de coudes ou autres aspects d'un écoulement 2D ou 3D. Depuis la version 5.0, il est possible de réaliser des modélisations 1D ou 2D de la rivière et des plaines d'inondation. (*Hydroblog - Le blog des hydrauliciens s. d.*)

### III .3.1 Modélisation d'ouvrage d'entrée

L'ouvrage d'entrée marque le début du canal aménagé a une forme trapézoïdale de 8,00 m de largeur avec des talus inclinés à 1.5, conçu pour capter les eaux de l'oued. Il présente une pente du radier de 0.002002, une hauteur d'eau normale de 1,7326 m, et un débit de 44,24 m<sup>3</sup>/s. La vitesse moyenne est modérée à 2,41 m/s, et le régime d'écoulement est fluvial ( $Fr = 0,652$ ), ce qui assure une entrée fluide et maîtrisée des eaux. L'ouvrage est réalisé en enrochement, à l'aide de gabion a été choisi pour sa solidité et sa bonne résistance à l'érosion. (Voir la figure 26).



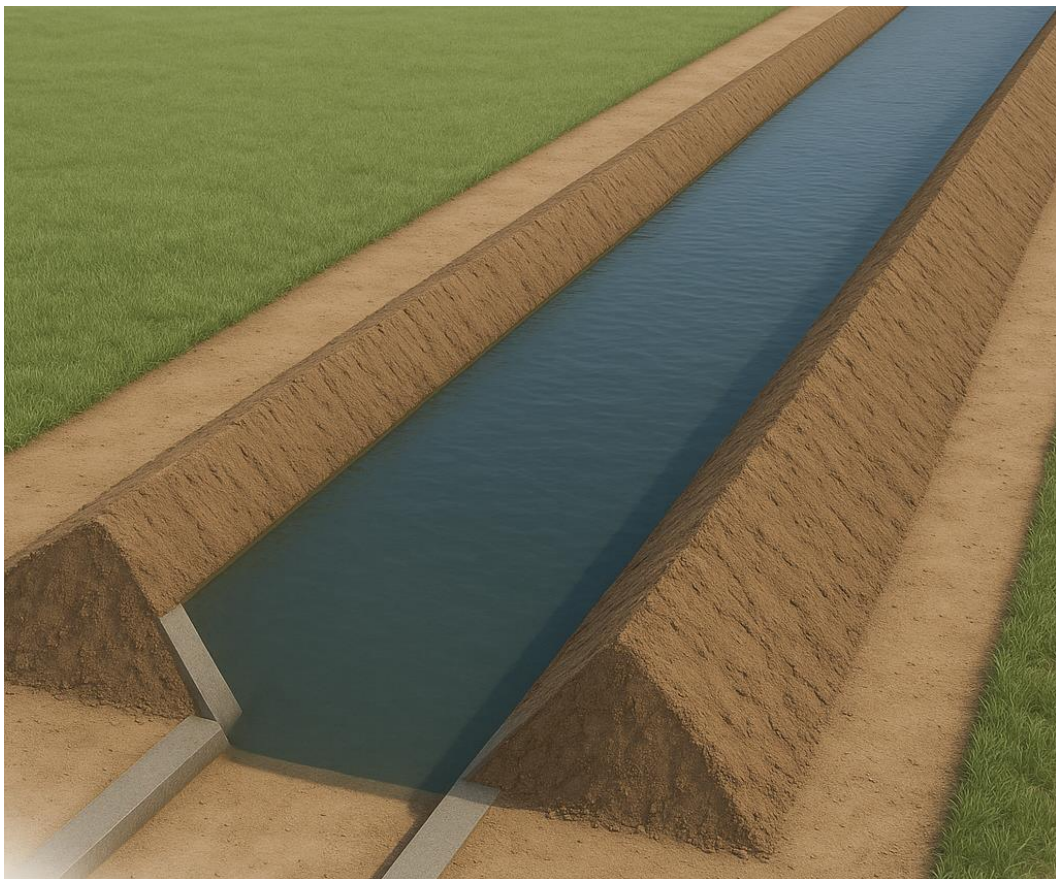
*Figure 27 : Illustration d'ouvrage d'entrée (le dessin technique voir l'annexe A)*

### III .3.2 Modélisation du canal

Un canal en béton armé à ciel ouvert de section trapézoïdale avec une largeur de la base du canal 6 mètre et pente des talus de 1.5 et de largeur des talus de 3 mètres de chaque côté.

Le canal de liaison est également trapézoïdal, plus étroit (6,00 m) mais plus rapide ( $V = 3,62$  m/s) avec une pente similaire (0,002). Il présente une hauteur d'eau de 1,48 m pour transporter le même débit. Le nombre de Froude est légèrement supérieur à 1 ( $Fr = 1,068$ ), ce qui indique un régime torrentiel localisé.

La variante se représente d'un canal d'une longueur de 4,37 km et présentant une pente longitudinale de 0,4 %, offre un écoulement gravitaire efficace, tout en limitant les besoins en infrastructures hydrauliques complexes (voir la figure 27).



*Figure 28 : Illustration du canal projeté (le dessin technique voir l'annexe A)*

### III .3.3 Modélisation du pont projeté

Un pont est un ouvrage surélevé, réalisé sur place, qui permet à une voie de communication de traverser un obstacle, qu'il soit naturel (comme une rivière, un oued, une vallée) ou artificiel (comme une route, une voie ferrée ou un canal).

Notre étude consiste un pont canal qui sera implanté au niveau du chemin de wilaya CW109, une route qui sera partiellement traversée par le canal. En plus de sa fonction hydraulique, cet ouvrage jouera aussi le rôle de pont d'accès principal au futur port Centre d'El Hamdania. Il aura donc une double utilité : permettre l'écoulement sécurisé des eaux du canal tout en assurant la continuité de la circulation routière vers la zone portuaire.

L'ouvrage projeté est un pont en béton armé, de type rectangulaire, comportant quatre ouvertures de  $2,00 \times 2,00$  m, il reprend la largeur de 8,00 m avec une pente identique (0.002002), mais affiche une vitesse d'écoulement de 3,66 m/s, ce qui reste élevé. La hauteur d'eau est de 1,5109 m et le régime reste proche de la critique ( $Fr = 0,951$ ) (voir la figure 28).



*Figure 29 : Illustration du Pont projeté (CW109) (le dessin technique voir l'annexe A)*

### III .3.4 Vérification du remous de la jonction canal – pont

Cette jonction montre comment le passage entre le canal trapézoïdal et le pont rectangulaire a été aménagé. Cette transition joue un rôle très important pour assurer la bonne circulation de l'eau à travers l'ouvrage, sans créer de perturbations comme des remous ou des pertes d'énergie

À l'approche du pont, la forme du canal change progressivement : on passe d'une section trapézoïdale à une section rectangulaire droite, correspondant à la géométrie du pont. Cette adaptation est pensée pour guider le flux d'eau vers l'intérieur du pont de manière fluide et sans brusques changements de direction ou de largeur (voir la figure 29 ci-dessous)

Le fond du canal et du pont suit une pente régulière de 0.002002, ce qui permet de maintenir une vitesse d'écoulement stable. En aval du pont, la section peut à nouveau s'élargir, afin de rejoindre la forme originale du canal et éviter les effets de concentration ou d'érosion.



*Figure 30 : Illustration de la jonction canal - pont (le dessin technique voir l'annexe A)*

#### **Vérification du remous à l'entrée du pont**

La charge spécifique à la section du canal :  $H_s=2.153$  m

La charge spécifique à l'entrée du pont de section  $4 \times (2 \times 2)$  m<sup>2</sup> :  $H_s=2.194$  m

La variation de la charge spécifique à la section de transition « Canal-Pont »

$$\frac{\partial H_{st}}{\partial x} = 0.041 \text{ m.}$$

La hauteur normale pour la section du pont  $Y_n=1.51$  m

$$\frac{\partial H_{st}}{\partial x} + Y_n = 0.041 + 1.510 = 1.55 \text{ m ; La hauteur du pont } H_{\text{pont}} = 2 \text{ m}$$

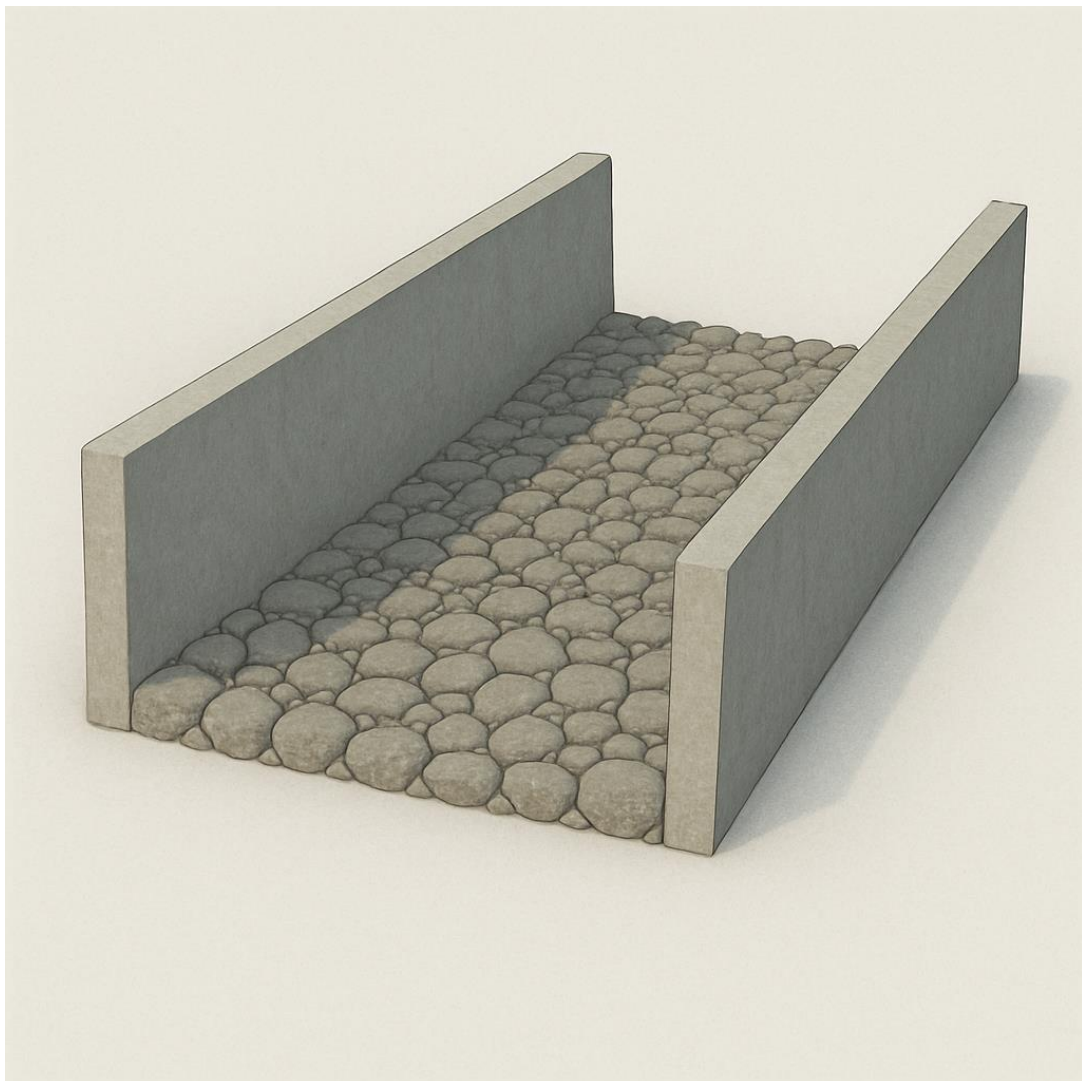
Donc l'exhaussement de 4,1 cm est supporté par le pont tel qu'il est conçu, et peut véhiculer le débit de projet (44.24m<sup>3</sup>/s).

#### **III .3.5 Modélisation d'ouvrage de sortie**

L'ouvrage de sortie du canal adopte une section rectangulaire à ciel ouvert, protégée par un revêtement en enrochement de type gabion a une largeur de 16,00 m, destiné à restituer les eaux vers l'aval en dissipant l'énergie. Grâce à sa grande largeur, la vitesse moyenne diminue à 2,17 m/s, et la hauteur d'eau chute à 1,2756 m. Le régime redevient fluvial ( $Fr = 0,613$ ), assurant une évacuation stable.

### CHAPITRE III : Modélisation de la variante retenue

Sa fonction principale est de jouer le rôle de filtre terminal, en réduisant la vitesse d'écoulement des eaux avant leur déversement sur la plage en aval. Cette conception permet de limiter les impacts hydrauliques directs sur le littoral, -contribuant ainsi à sa protection contre l'érosion et à la préservation de l'équilibre du milieu récepteur, En plus de sa fonction hydraulique principale, l'ouvrage de sortie, conçu comme une structure ouverte donnant sur la plage, pourrait aussi avoir un usage secondaire. Grâce à son accessibilité et à ses espaces ouverts, il pourrait être utilisé de façon informelle par les baigneurs, par exemple comme zone de rinçage ou de passage en revenant de la mer. Même si cet usage n'est pas prévu à l'origine, il montre l'intérêt de penser les ouvrages hydrauliques en lien avec leur environnement social et littoral (Voir la figure 30).



*Figure 31 : Ouvrage de sortie de la variante retenue (le dessin technique voir l'annexe A)*

**Tableau 10 :** Tableau récapitulatif des caractéristique géométriques et hydraulique de la variante retenue

Paramètres	Unité	O Entrée	Canal	Pont	O. Sortie
Largeur du canal (b)	m	8.00	6.00	8.00	16.00
Pente du radier (I)	/	0.002002	0.002002	0.002002	0.002002
Pente des talus	/	1.5	1.5	0	0.0
Longueur	m	10.00	4340	10.00	10.00
Coefficient de Strickler (K)	/	45	77	77	45
Coefficient de rugosité (n)	/	0.02	0.013	0.013	0.022
Surface mouillée(s)	m <sup>2</sup>	18.36	12.23	12.09	20.41
Périmètre mouillé(p)	m	14.25	13.36	11.02	18.55
Rayon hydraulique (Rh)	m	1.29	1.08	1.10	1.10
Vitesse moyenne(v)	m/s	2.41	3.62	3.66	2.17
Débit(Q)	m <sup>3</sup> /s	44.24	44.24	44.24	44.24
Hauteur d'eau normale (Hn)	m	1.7326	1.4865	1.5109	1.2756
Hauteur d'eau critique (Hc)	m	1.34	1.545	1.461	0.920
L'énergie spécifique (Hs)	m	2.028	2.153	2.194	1.515
Nombre de Froude (Fr)	/	0.652	1.068	0.951	0.613

### III .4 Simulation avec logiciel HEC RAS

La simulation réalisée avec HEC-RAS confirme que :

- L'ouvrage inséré dans le modèle permet de canaliser les flux sans générer de remontée dangereuse du niveau d'eau.
- Aucun phénomène de submersion, ni surcharge hydraulique, n'a été détecté.
- Le système modélisé peut être considéré stable et fonctionnel dans les conditions simulées.

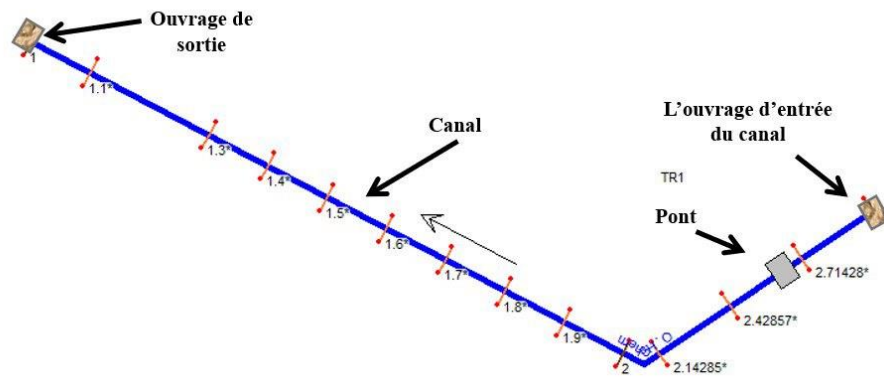


Figure 32 : Tracé en plan de l'oued El Hachem après simulation

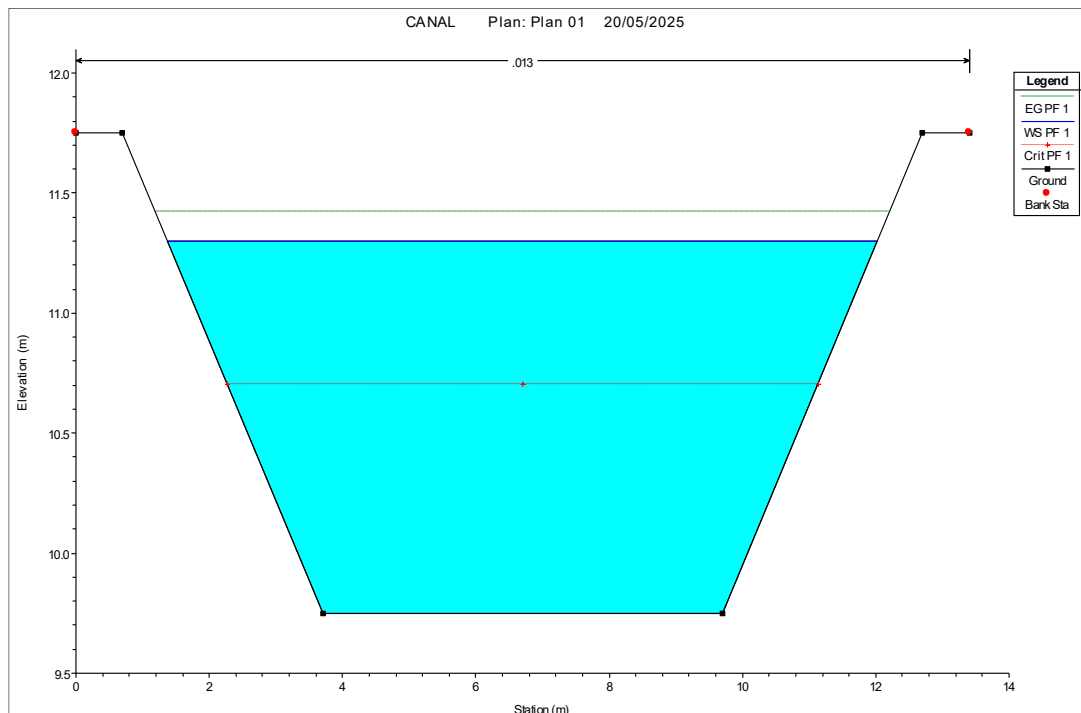


Figure 33 : Section en travers typique d'ouvrage d'entrée

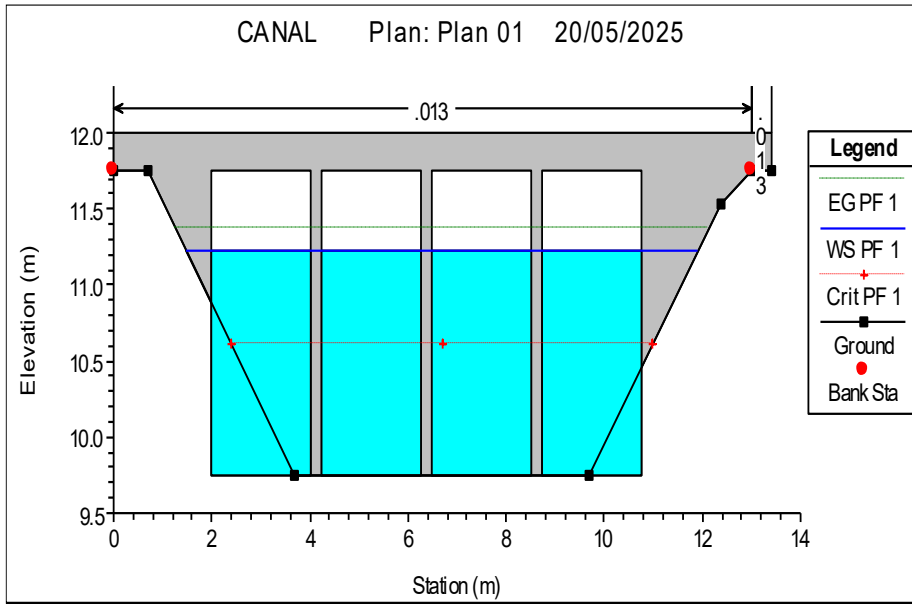


Figure 35 : Section en travers du pont projeté

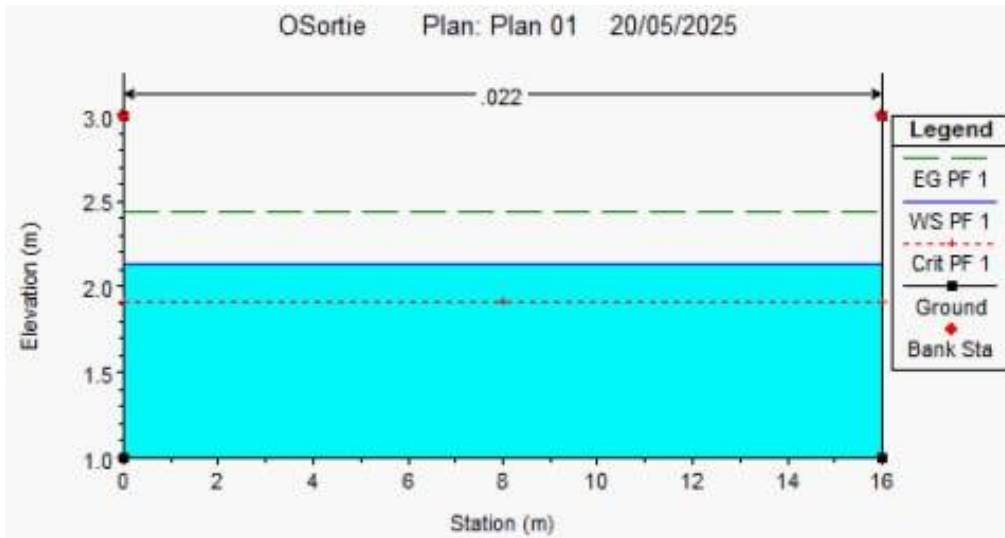


Figure 34 : Section en travers d'ouvrage de sortie

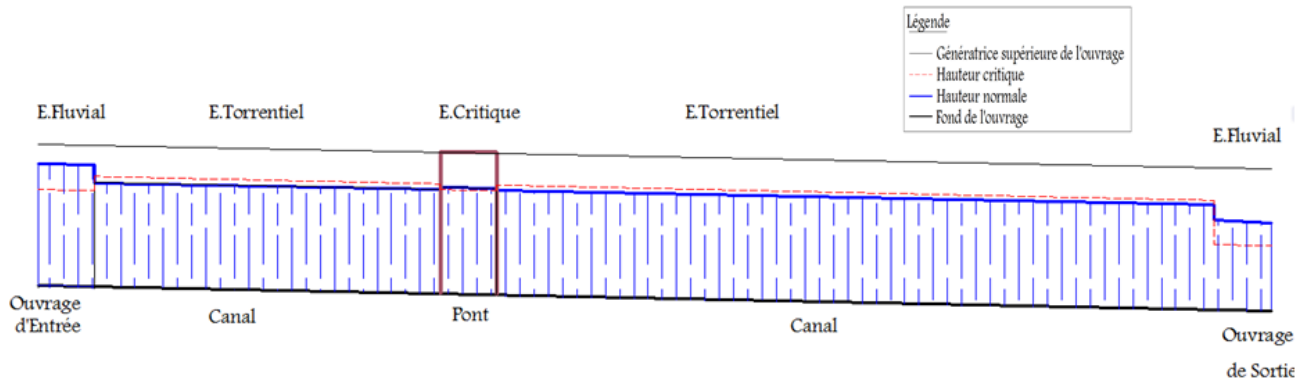


Figure 36 : Profil de simulation de la ligne d'eau (du début de l'ouvrage jusqu'à la fin)

### III .5 Conclusion

Ce chapitre a permis de définir les dimensions du canal à ciel ouvert en prenant en compte les caractéristiques du terrain et de l'environnement. La simulation hydraulique a montré que la conception respecte les règles d'écoulement à surface libre, ce qui assure un écoulement régulier et sécurisé pour le débit prévu. Les résultats confirment que le choix d'une section trapézoïdale et d'une bonne transition vers le pont est adapté. Ils rappellent aussi l'importance de bien stabiliser les berges pour garantir la solidité de l'ouvrage dans le temps. Cette étape est donc essentielle pour passer à la réalisation concrète du projet.

---

***CHAPITRE IV : Devis  
quantitatif et estimatif***

---

## Chapitre IV : Devis quantitatif et estimatif

*Tableau 11 : Devis quantitatif estimatif de la variante retenue*

N°	DESIGNATION	UNITE	QUANTITE	PRIX UNITAIRE	MONTANT
01	TERRASSEMENT				
01	Déblais	M <sup>3</sup>	1355674	800	108 453 918 4
02	Remblais	M <sup>3</sup>	1111	1500	166 588 8
03	Enrochement (ouvrage d'entrée et de sortie)	M <sup>3</sup>	171	2000	341 400
02	CONSTRUCTION				
01	Béton armé dosé à 350 kg/m <sup>3</sup> pour les ouvrages projetés (canal, pont et ouvrage de sortie)	M <sup>3</sup>	13110	40000	524 400 000
02	Béton de propreté dosé à 150kg/m <sup>3</sup>	M <sup>3</sup>	13110	15000	196 650 000
03	Barbacanes en PVC Ø40 mm	ML	3472	400	138 880 0
04	Joints d'étanchéité (2cm de largeur)	M <sup>2</sup>	291	500	145 390
Montant total en H.T...../					180 913 066 2
Montant T.V.A 19%...../					343 734 826
Montant total en T.T.C...../					215 286 548 8

Le montant des travaux de réalisation de la variante choisie est estimé à :

180 913 066 2,00 DA en (HT).

---

***CONCLUSION GENERALE  
ET PERSPECTIVES***

---

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'aménagement hydraulique du port Centre d'El Hamdania, situé à proximité de l'oued El Hachem, représente un véritable défi technique. Il s'agit de trouver un équilibre entre la protection des infrastructures, la maîtrise des écoulements et la préservation de l'environnement naturel. Ce mémoire a permis de montrer l'importance d'une approche globale, en combinant une analyse du contexte hydrologique, la modélisation des crues et le dimensionnement d'ouvrages adaptés.

Dans une première étape, un diagnostic complet du bassin versant de l'oued El Hachem a été réalisé à savoir (altimétrie, relief, lithologie, pentes...) via ARC GIS. L'étude des caractéristiques géographiques, climatiques et hydrologiques a mis en évidence une forte variabilité des pluies, provoquant un débit important de 44.24 m<sup>3</sup>/s, et des risques d'inondation vers la zone portuaire. L'analyse fréquentielle des crues a montré que des débits extrêmes peuvent survenir, ce qui nécessite des solutions d'aménagement efficaces et durables.

Par la suite, trois variantes de déviation de l'oued ont été proposées et comparées. La variante 1, qui repose sur un canal trapézoïdal à ciel ouvert (de base 6 m et de hauteur 2m), a été retenue. Elle se distingue par sa facilité de réalisation, sa bonne adaptation au terrain naturel, sa capacité hydraulique satisfaisante et son impact environnemental réduit. Elle permet aussi une maintenance plus simple.

Le dimensionnement détaillé de cette solution, appuyé par des modélisations et des simulations via HEC-RAS, a permis de confirmer que le canal est capable d'évacuer les crues prévues, sans provoquer d'inondation (vue sa faible pente). Plusieurs ouvrages ont été intégrés à cette solution à savoir un ouvrage d'entrée en gabion, une jonction pont-canal, pont et un ouvrage de sortie, afin d'assurer la continuité de l'écoulement et renforcer la sécurité globale du dispositif.

L'ouvrage de sortie, en particulier, ont été conçus pour réduire l'impact des eaux sur la plage et pour protéger le littoral contre l'érosion. L'ouvrage de sortie, par sa forme ouverte, peut aussi être utilisé de manière informelle par les usagers de la plage, par exemple comme point de passage ou de rinçage.

En perspective, ce travail pourrait être poursuivi par une étude approfondie de l'impact des solutions de protection portuaire sur la dynamique côtière et le milieu marin. En effet, toute intervention visant à sécuriser les installations portuaires face aux crues des oueds peut induire des modifications morphologiques du littoral, ainsi que des perturbations écologiques. Il serait donc pertinent d'évaluer, à moyen et long terme, les effets de ces aménagements sur les écosystèmes marins, la sédimentation et l'équilibre du trait de côte.

---

## ***BIBLIOGRAPHIE***

---

## **Bibliographie**

**Abdeddaim, Hakima (2018).** *Contribution à l'étude de l'influence de la structure du réseau hydrographique sur le risque hydrologique (cas des bassins de l'est de l'Algérie).* Thèse de doctorat, hydraulique. Biskra : Université de Biskra.

**Ammari, A. (2012).** *Vulnérabilité à l'envasement des barrages (cas du bassin hydrographique des côtiers algérois).* Thèse de doctorat, Biskra : Université Mohamed Khider – Biskra.

**Anctil, F., Rouselle, J., et al. (2005).** *Hydrologie, chemins de l'eau.* Québec : Presses Internationales Polytechnique.

**Bendjoudi, Hocine, et Hubert, Pierre (2002).** *Le Coefficient de Compacité de Gravelius: Analyse Critique d'un Indice de Forme des Bassins Versants.* *Hydrological Sciences Journal*, vol. 47, n°6, pp. 921–930. doi:10.1080/02626660209493000.

**chikhi, k., abdi, a., et al. (2017).** impact des crues d'oueds sur les infrastructures portuaires en algérie. *revue nature & technologie*, vol. 14.

**Chorley, R. (1978).** *Water, Earth, and Man: A Synthesis of Hydrology, Geomorphology, and Socio-Economic Geography.* London: Routledge.

**Graf, Walter H., et Altinakar, M. S. (2000).** *Hydraulique fluviale : écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple.* EPFL Press.

**Hachoua, Abdeldjalil (2010).** *Gestion de crue dans un bassin versant. Étude hydrologique, hydraulique et aménagement.* (Thèse de doctorat). Département d'hydraulique. Tlemcen : Université aboubakr belkaïd .

**J.P. Laborde (2000).** *Éléments d'hydrologie de surface.* Institut National Polytechnique de Lorraine, P. 249.

**Musy, A., et Higy, C. (1998).** *Hydrologie appliquée.* HGA, Bucarest : ed.

**Plan bleu (2019).** *Gestion intégrée des zones côtières et adaptation au changement climatique en méditerranée.*

**Réménérias, G. (1976).** *Hydrologie de l'ingénieur.* Paris: Eyrolles.

**Robinson, M. (2017).** *Hydrology: Principles and Processes.* London: IWA Publishing.

**Rucquoi, S. (2014).** *Méthode d'extraction d'indices géomorphologiques pour l'analyse du cheminement des eaux superficielles*. Rapport Cerema, non publié, pp. 1–31.

**Saad, BENNIS (2007).** *Hydraulique et hydrologie*. Bibliothèque et Archives nationales du Québec / Bibliothèque et Archives Canada. Imprimé au Canada. 2e édition. Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés : Presses , l'Université du Québec

**Tanger med port authority (TMPA) (s.d.).** *Études d'impact environnemental et de gestion des eaux pluviales*. Document institutionnel.

## **Webographie**

*Canal à ciel ouvert*. Tidjma.tn. [En ligne], [consulté le 27 avril 2025]. Disponible sur : <https://www.tidjma.tn/fr/glenv/open-channel/>

*Drainage-basin characteristics - Horton - 1932 - Eos, Transactions American Geophysical Union - Wiley Online Library*. [En ligne], [consulté le 17 mars 2025]. Disponible sur : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/TR013i001p00350>

*Hydroblog - Le blog des hydrauliciens*. [En ligne], [consulté le 21 mai 2025]. Disponible sur : <https://hydro-blog.com/>

*Hyfran plus – guide d'utilisation*. [En ligne], [consulté le 10 juin 2025]. disponible sur : [https://www.wrpllc.com/books/HyfranPlus/HYFRAN\\_PLUS\\_GUIDE\\_EV\\_13Janv2015\\_F](https://www.wrpllc.com/books/HyfranPlus/HYFRAN_PLUS_GUIDE_EV_13Janv2015_F)

HEC-RAS Guides and Tutoriels. (2023). [En ligne], [consulté le 20mai2025]. Disponible sur : <https://pubs.usgs.gov/wri/1985/4004/report.pdf>

*Modélisation statistique des pluies maximales annuelles – Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science – Érudit*. [En ligne], [consulté le 21 mai 2025]. Disponible sur : <https://www.erudit.org/fr/revues/rseau/2018-v31-n2-rseau03994/1051697ar/>

Saoud, Mohammed (s.d.). *Portail national de signalement des thèses*. [En ligne], [consulté le 21 février 2025]. Disponible sur : <https://www.pnst.cerist.dz/detail.php?id=899431>

Robinson, M. (2017). *Hydrology: Principles and Processes*. [En ligne], [consulté le 19 mars 2025]. Disponible sur : <http://archive.org/details/hydrologyprincip0000robi>

*Présentation HEC-RAS 1D/2D – Aqua Geosphere*. [En ligne], [consulté le 2 juin 2025]. Disponible sur :

[https://aquaegosphere.com/wp-content/uploads/2022/08/Presentation\\_HEC\\_RAS\\_1D\\_2D\\_2022](https://aquaegosphere.com/wp-content/uploads/2022/08/Presentation_HEC_RAS_1D_2D_2022)

*Simulation HEC-RAS 2D sur YouTube.* [En ligne], [consulté le 2 juin 2025]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=cQEhJPzvxVU>

<https://earthexplorer.usgs.gov>

---

# ***ANNEXES***

---

## Annexe A : Température et pluviométrie de la zone d'étude

*Tableau 12 : Température annuelle de la zone d'étude*

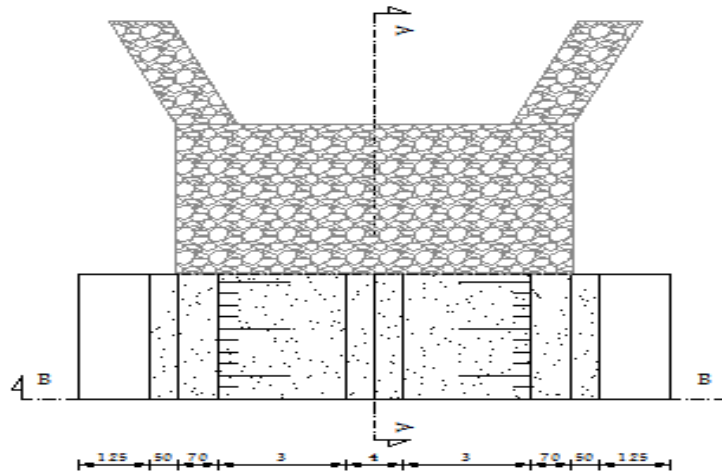
<b>Années</b>	<b>Température</b>	<b>Années</b>	<b>Température</b>
95-96	16.47	05-06	17.15
96-97	17.24	06-07	17.51
97-98	17.70	07-08	16.04
98-99	17.56	08-09	14.55
99-00	17.94	09-10	18.05
00-01	17.60	10-11	17.01
01-02	17.01	11-12	17.92
02-03	17.68	12-13	14.24
03-04	17.63	13-14	19.81
04-05	17.25	14-15	/

*Tableau 13 : Pluviométrie de la zone d'étude*

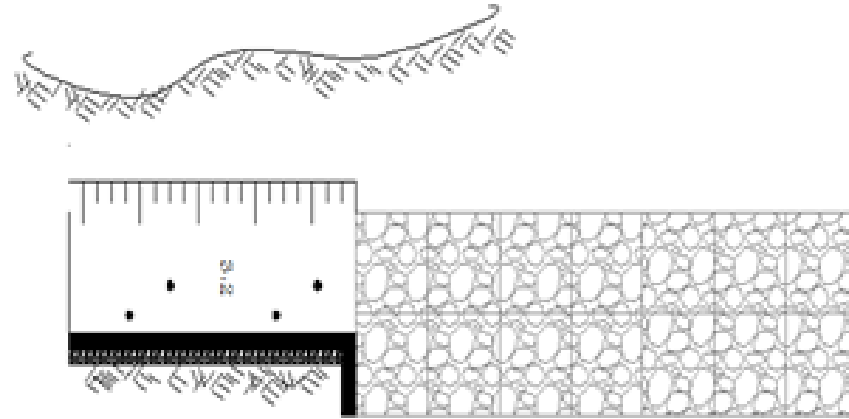
<b>Années</b>	<b>Pluie <math>P_{an}</math> (mm)</b>	<b>Années</b>	<b>Pluie <math>P_{an}</math> (mm)</b>
95-96	862.10	05-06	636.00
96-97	361.30	06-07	548.00
97-98	531.30	07-08	741.70
98-99	710.80	08-09	632.00
99-00	553.60	09-10	621.80
00-01	452.80	10-11	742.50
01-02	441.30	11-12	788.10
02-03	613.00	12-13	724.00
03-04	495.00	13-14	600.40
04-05	693.20	14-15	305.60

**Annexe B : Ouvrages de la variante retenue (choisie)**

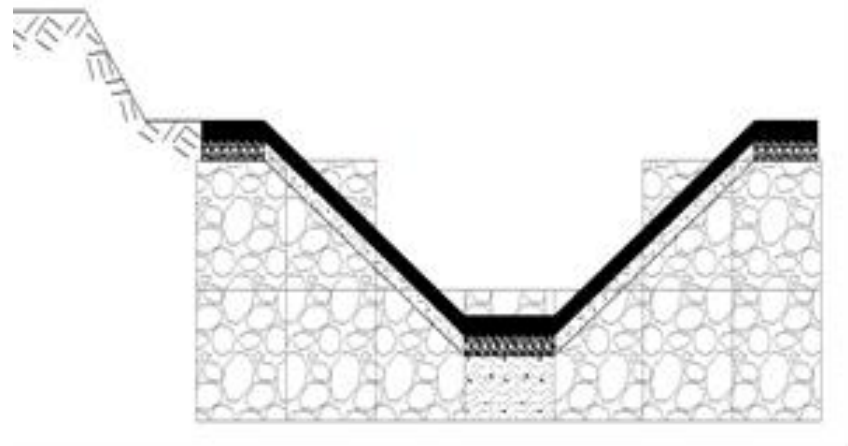
**- Ouvrage d'entrée**



**Vue en plan**

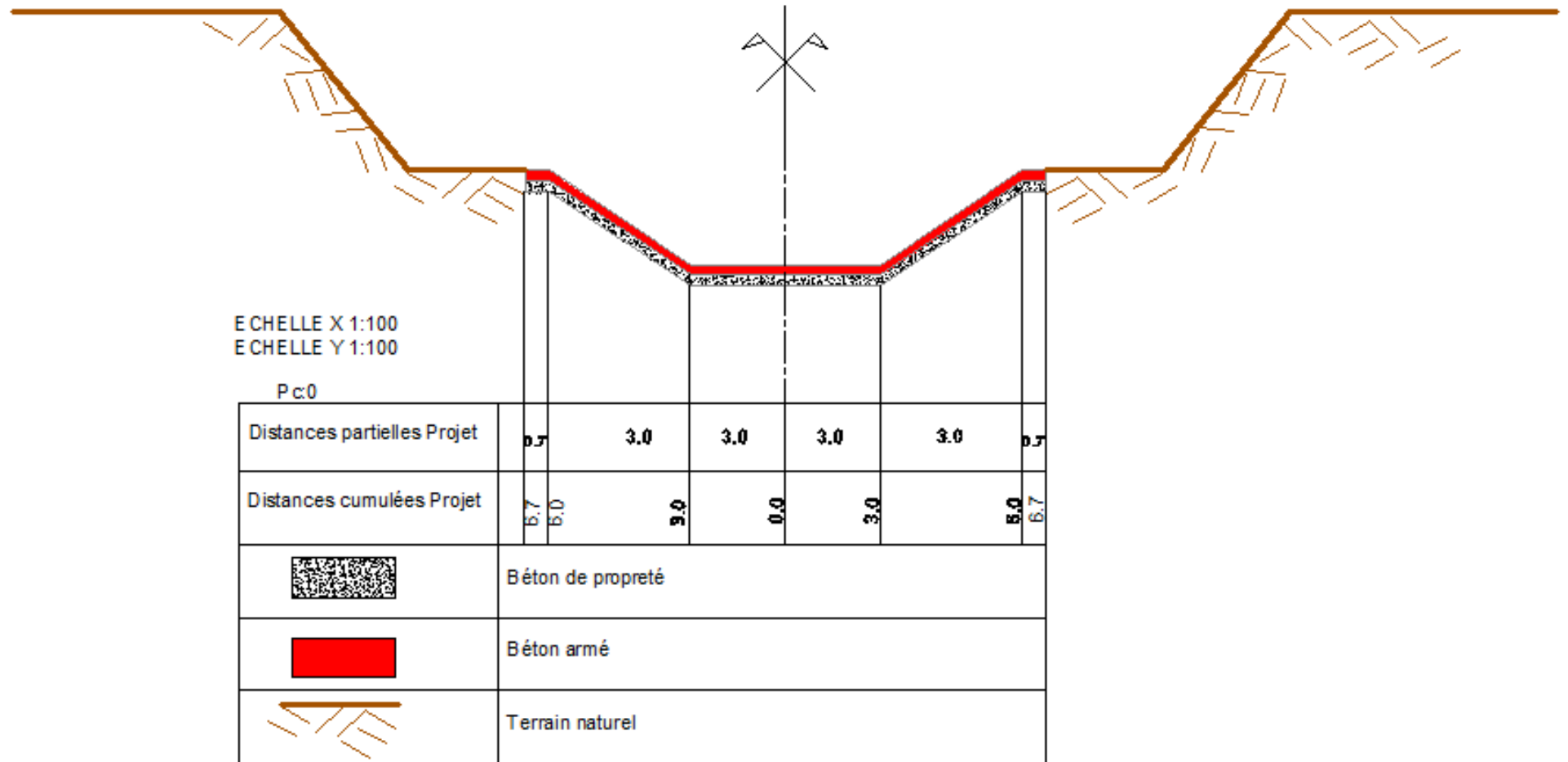


**Coupe A-A**



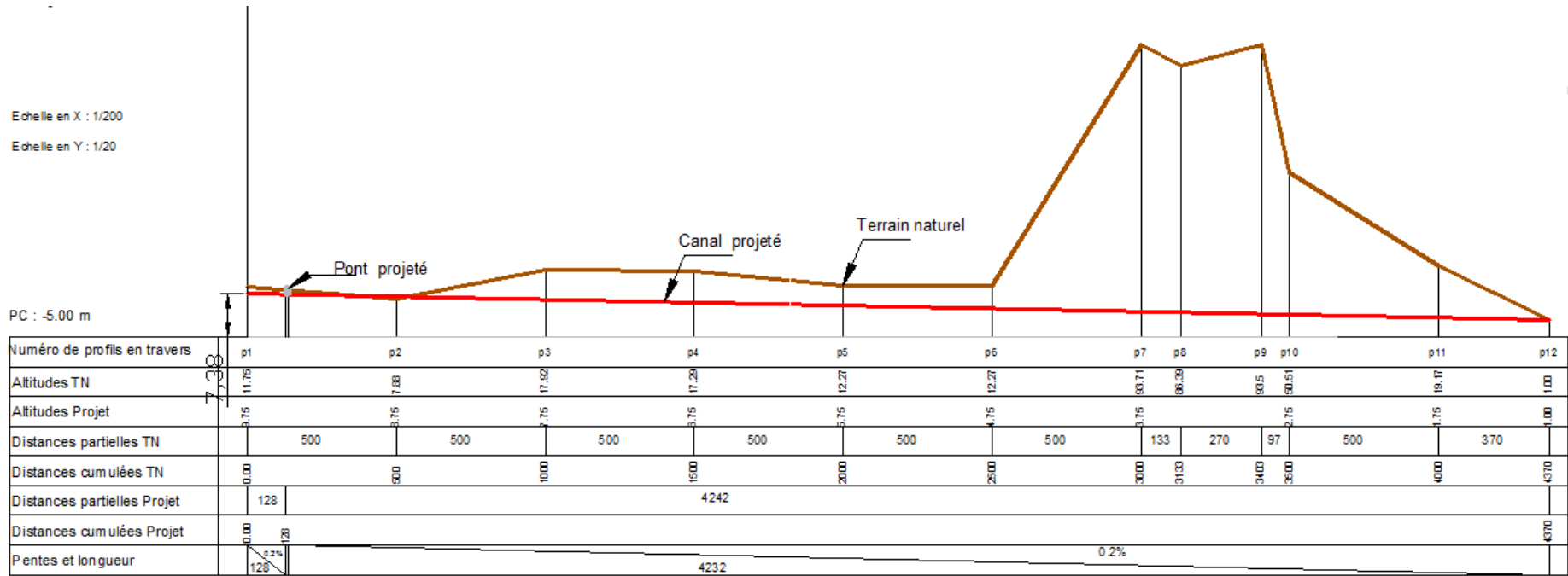
**Coupe B-B**

- Canal



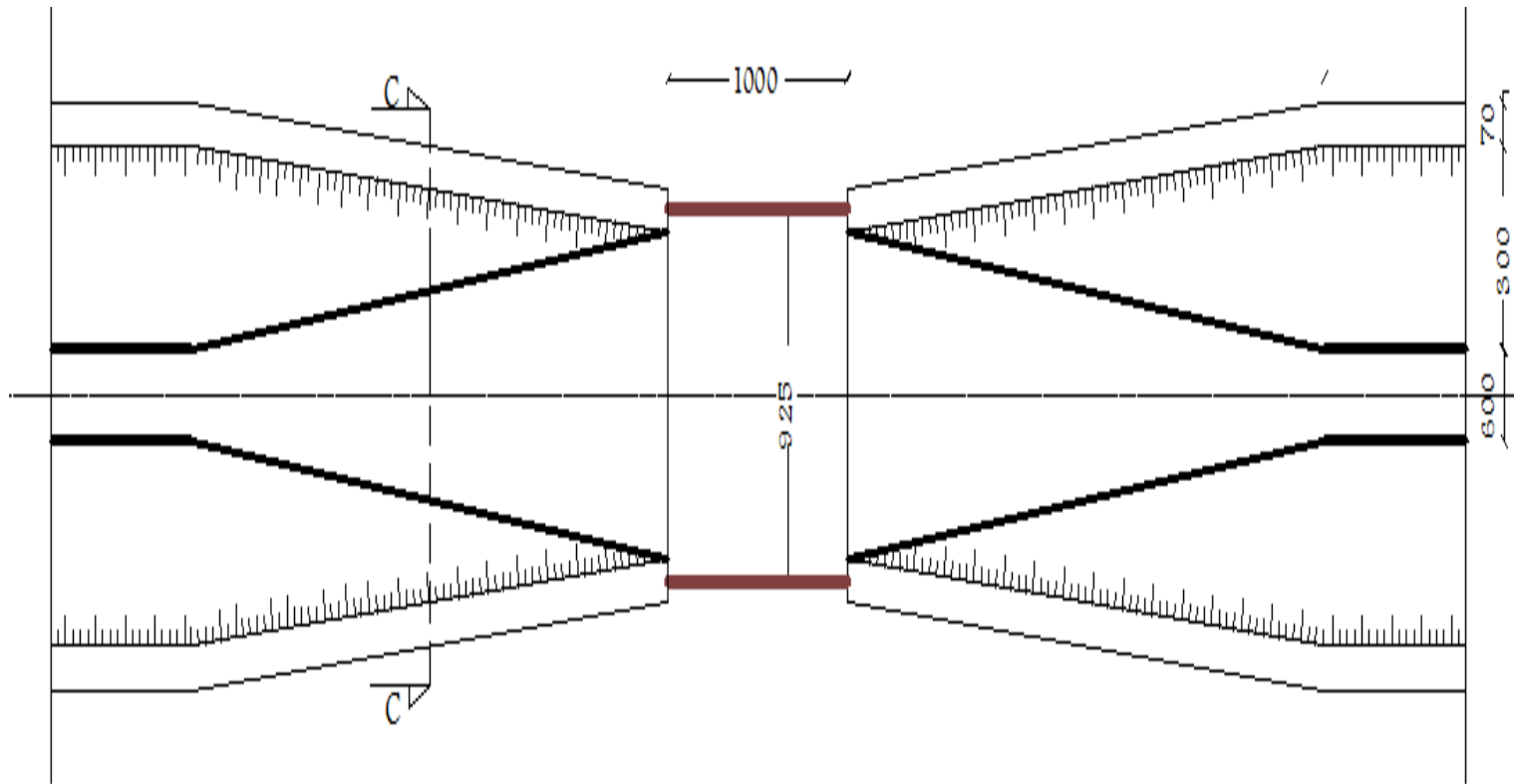
Profil en travers du canal projeté

Echelle en X : 1/200  
 Echelle en Y : 1/20

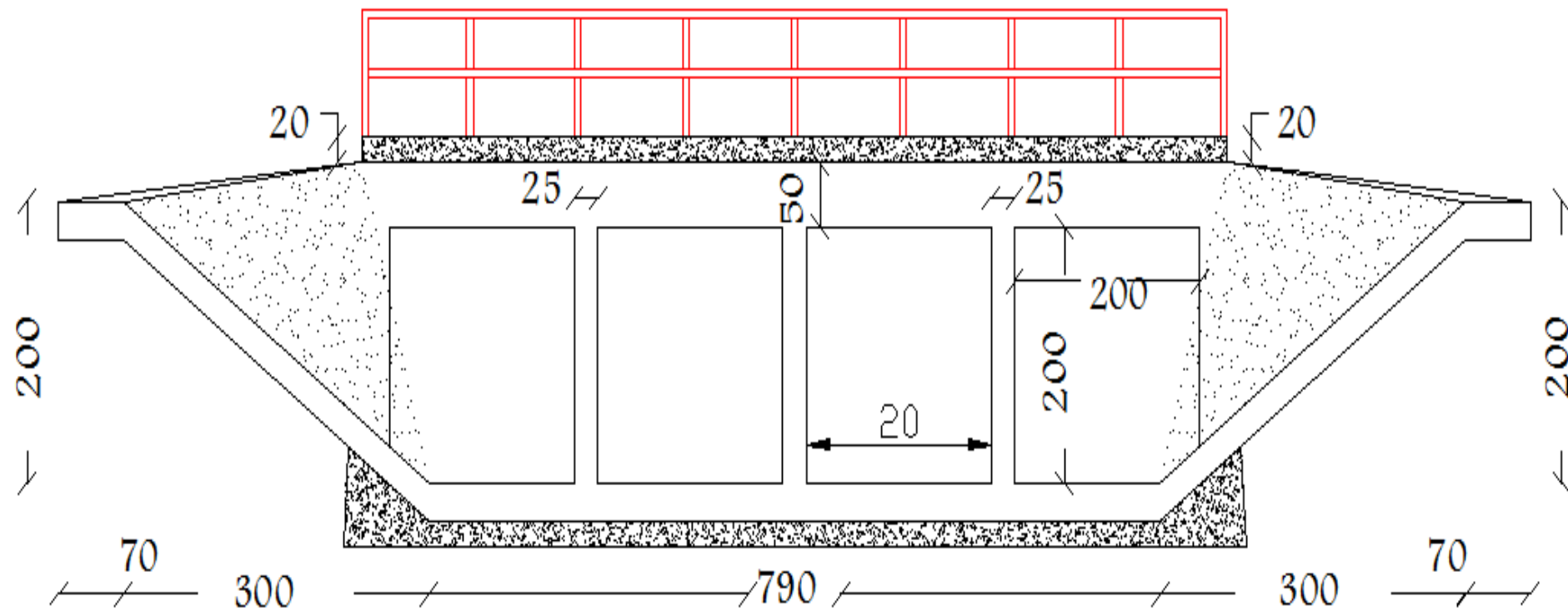


**Profil en long du canal projeté**

- Jonction canal -pont

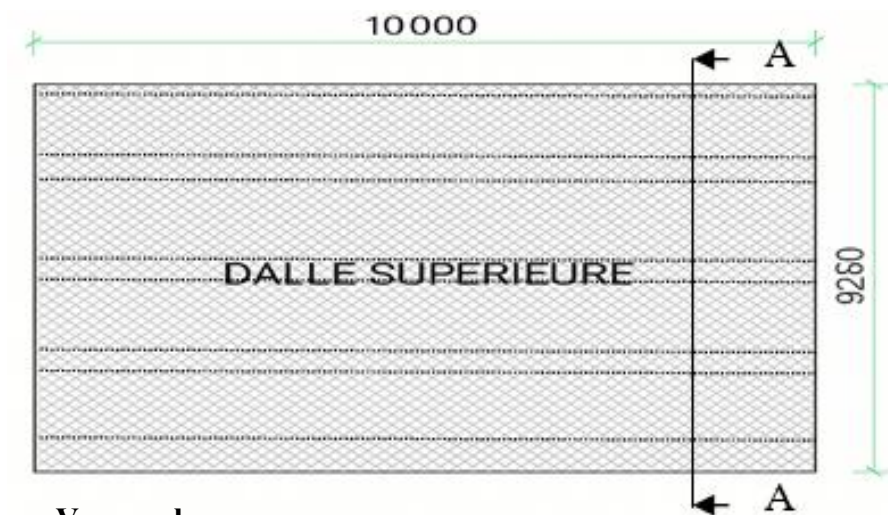


Vue en plan

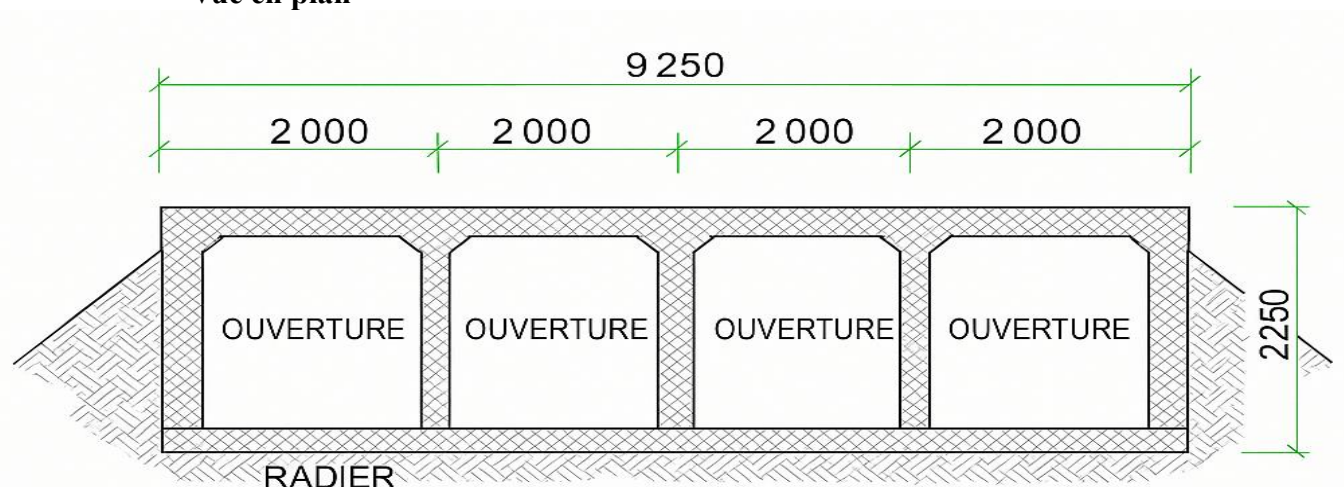


Coupe C-C

- Pont

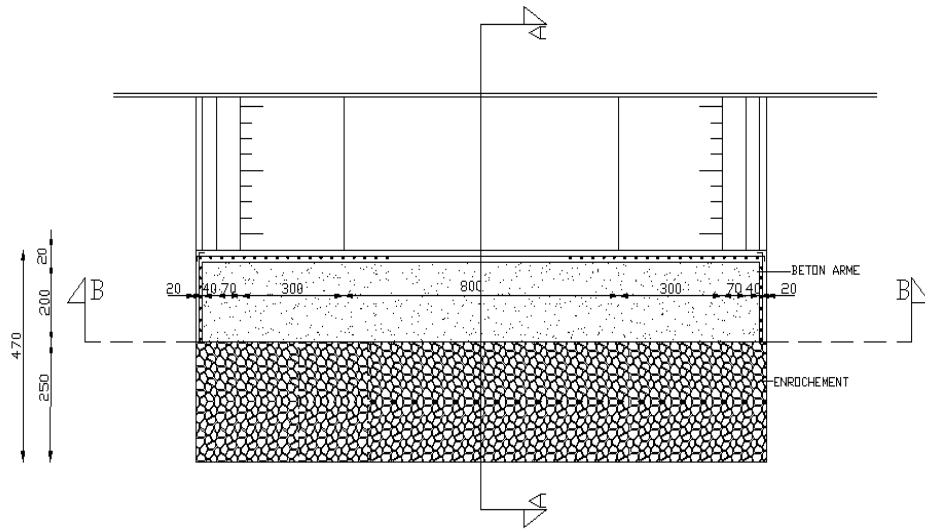


**Vue en plan**

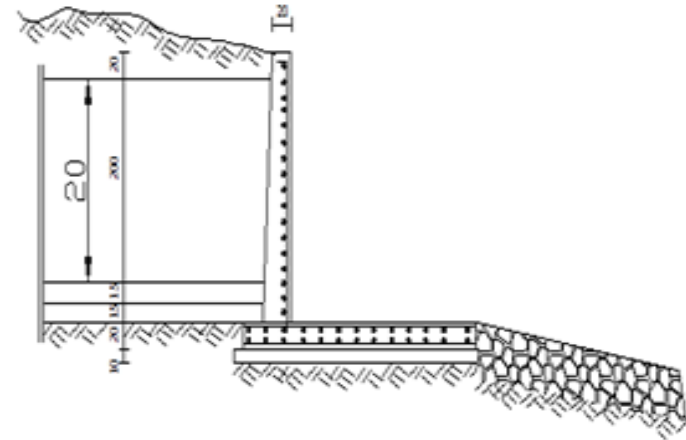


**Coupe AA**

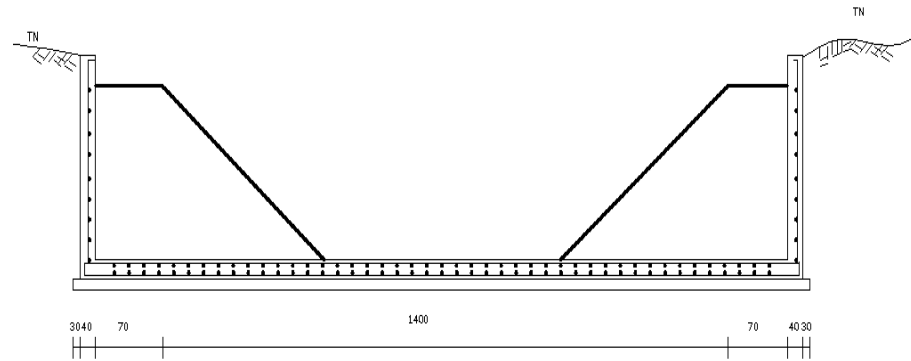
- Ouvrage de sortie



Vue en plan



Coupe A- A



Coupe B-B

## Annexes C : Classification des matériaux

- Les valeurs de la masse volumique des matériaux. « Classification utilisée dans le domaine maritime ».

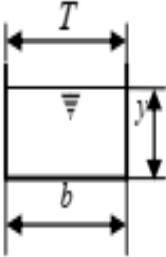
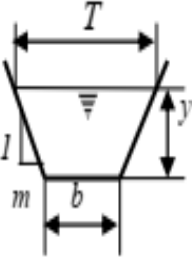
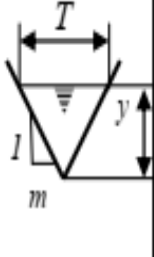
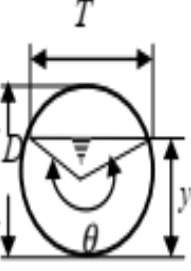
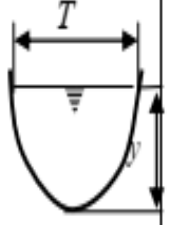
Matériaux	Diamètre des tamis ds	Masse volumique du matériaux (kg/m)
Ultrargiles	$<0.2\mu m$	2200
Argiles fines	$0.2\mu m-0.63\mu m$	2200
Argile	$0.63\mu m-2\mu m$	2200
Limons fins	$2\mu m-6.3\mu m$	2300
Limons moyens	$6.3\mu m-20\mu m$	2300
Limons grossiers	$20\mu m-63\mu m$	2300
Sables fins	$63\mu m-0.2mm$	2400
Sables moyens	$0.2mm-0.63mm$	2400
Sables grossiers	$0.63mm-2mm$	2400
Graviers fins	$2.0mm-6.3mm$	2500
Graviers moyens	$6.3mm-20mm$	2500
Graviers grossiers	$20mm-63mm$	2500
Galets	$63mm-200mm$	2650
Gros galets	$>200mm$	2650

- Classes de perméabilité

<b>Classes de perméabilité</b>	<b>lithologie</b>
Perméabilité Elevée	Grés, calcaires fissurés
Perméabilité Moyenne	Alluvions
Perméabilité Faible à Moyenne	Marno-calcaires, marnes

## Annexes D : Paramètres géométriques des canaux

- Éléments géométriques pour différentes sections des canaux (W. H. GRAF & M. S. ALTINAKAR, 2000)

Forme du canal					
Paramètres géométriques	<i>Rectangle</i>	<i>Trapèze</i>	<i>Triangle</i>	<i>Cercle</i>	<i>Parabole</i>
Section mouillée <i>A</i>	$by$	$(b+my)y$	$my^2$	$\frac{1}{8}(\theta - \sin\theta)D^2$	$\frac{2}{3}Ty$
Périmètre mouillée <i>P</i>	$b + 2y$	$b + 2y\sqrt{1+m^2}$	$2y\sqrt{1+m^2}$	$\frac{1}{2}\theta D$	$T + \frac{8y^2}{3T}^*$
Rayon Hydraulique <i>R<sub>h</sub></i>	$\frac{by}{b+2y}$	$\frac{(b+my)y}{b+2y\sqrt{1+m^2}}$	$\frac{my}{2\sqrt{1+m^2}}$	$\frac{D}{4}\left(1 - \frac{\sin\theta}{\theta}\right)$	$\frac{2T^2y}{3T^2+8y^2}^*$
Largeur au miroir <i>T</i>	$b$	$b + 2my$	$2my$	$D(\sin(\theta/2))$ ou $2\sqrt{y(D-y)}$	$\frac{3A}{2y}$
Profondeur hydraulique <i>y<sub>h</sub></i>	$y$	$\frac{(b+my)y}{b+2my}$	$\frac{y}{2}$	$\frac{D}{8}\left(\frac{\theta - \sin\theta}{\sin(\theta/2)}\right)$	$\frac{2}{3}y$