

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA

جامعة باجي مختار - عنابة



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT

كلية علوم الهندسة

DEPARTEMENT DE L'HYDRAULIQUE

قسم الري

## THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de  
DOCTORAT

Thème

*Réhabilitation des canaux de drainage : Cas de la zone de  
Bouteldja (W, EL Tarf)*

Option :  
HYDRAULIQUE  
Par

SENNAOUI Foued

Devant le Jury :

Qualité	Grade	Nom Prénom	Rattachement
Président	Pr.	MEKSAOUINE Mohamed	U-Badji Mokhtar-Annaba
Rapporteur	Pr.	BENABDESSELAM Tamara	U- Badji Mokhtar-Annaba
Co-Rapporteur	MCA	SAIHIA Abdallah	U-Badji Mokhtar-Annaba
Examineur	MCA	LAOUACHERIA Fares	U- Badji Mokhtar-Annaba
Examineur	Pr.	HEDDAM Salim	U-20 Août 1955 –Skikda
Examineur	MCA	ZEGHADNIA Lotfi	U-CM-Souk Ahras

Année: 2020

## **Remerciements**

*Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant pour tous ses dons, la force et la santé qu'il m'a accordé pour mener ce travail à terme.*

*D'abord, bien évidemment, je remercie du fond du cœur ma famille, en particulier mes parents, ma femme et mes enfants : Amani, Louay Ismail et Ikram, mes frères qui m'ont toujours encouragé pour que j'ai faits de suivre mes études et m'ont aidé à arriver à un des évènements les plus marqués de ma vie.*

*J'adresse mes remerciements et d'une façon particulière à mon directeur de la thèse au sein du laboratoire Sols et Hydraulique Madame **Benabdesselam Tamara**.*

*Je tiens tout d'abord à exprimer mes plus chaleureux remerciements à mon co-encadreur **Mr Saihia Abdallah** qui a proposé ce sujet de thèse et m'a accompagné tout au long de sa réalisation avec beaucoup d'intérêt et de disponibilité.*

*Je tiens à remercier aussi les responsables du laboratoire de LTP-EST d' Annaba, LNHC d'Ain Assel et le service de l'ONID d'El Tarf de m'avoir fourni plusieurs données et des résultats expérimentaux qui ont été indispensables pour mon travail.*

*Naturellement, mes remerciements vont ensuite aux membres de mon jury, et plus fort aux rapporteurs de ce travail.*

*Enfin, il me faut inévitablement remercier tous les amis les doctorants qui ont rendu ces années tellement agréables et tout particulièrement mes amis: Ahmouda Lamine ; Sebti Z ; Harizi Khaled ; Zoughi B, Harbi S ; Khemissi B ; Hocine B ; Aliouche Y ; Sabbar A.R ; Boukhari I ; Moussaoui O .*

**Sennaoui Foued**

## Résumé

En Algérie, les problèmes d'inondation et de transport sédimentaire se manifestent de façon critique dont la plaine de Bouteldja n'est pas épargnée. La plaine de Bouteldja à vocation agricole fait partie de la wilaya d'El Tarf, située au Nord Est d'Algérie. Malgré l'aménagement de cette plaine en 2006 dans le cadre d'un projet hydro-agricole par la création de réseaux de canaux de drainage à ciel ouvert en terre, elle subit jusqu'à présent la submersion des terres agricoles limitrophes. L'occurrence des submersions est accrue suite à l'absence d'entretien des canaux de drainage.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est i) d'estimer l'évolution morphologique des canaux de drainage en terre sous l'influence du processus du transport sédimentaire pour la période allant de 2006 jusqu'à 2018 et, également, mettre en évidence l'effet de cette évolution morphologique des canaux sur leur capacité hydraulique ; ii) la modélisation du transport solide afin de quantifier la charge sédimentaire et le dépôt de sédiments au fond des canaux ; iii) d'étudier les solutions pouvant améliorer le fonctionnement des canaux et leur suivi d'entretien ou réhabilitation. Un canal 03 qui fait partie du système de drainage a été choisi pour une représentation globale de cette étude. Pour analyser l'écoulement dans ce canal et modéliser le processus du transport solide, le modèle hydro-sédimentaire du logiciel HEC-RAS a été utilisé. Le modèle hydraulique a été calé aux hauteurs d'eau observées pendant les événements pluvieux qui se sont produits durant la période d'observation de 2017 à 2018, en ajustant le coefficient de rugosité de Manning ( $n=0,028$ ). Concernant le modèle sédimentaire, le modèle d'Engelund et Hansen (1967) décrivant le transport solide total dans le canal et le modèle de vitesse de sédimentation de Van Rijn (1984) ont donné des résultats plus proches aux données réelles mesurées sur la même période d'observation, conformément à la granulométrie des sédiments analysée du fond de canal. Le calage de ce modèle sédimentaire a été validé avec le critère de Nash=0.867 et de corrélation R égal à 0.956.

Les résultats des simulations réalisées ont montré que la capacité hydraulique du canal à l'état actuel a diminué par rapport à son état initial en raison d'évolution du fond de canal par le dépôt de sédiments et du coefficient de rugosité élevé. Les simulations réalisées ont permis d'estimer le volume moyen de dépôt de sédiments au fond du canal, cumulé depuis sa réalisation en 2006 jusqu'à la campagne de mesure menée en 2018. Ces simulations ont montré, également, que le fond sédimentaire dans le canal de drainage en terre, n'évolue pas uniquement lors des fortes crues mais aussi lors des événements pluvieux courants. Le calage des modèles a laissé apparaître que le changement de la géométrie du canal lors du processus

de transport sédimentaire dépend fortement de la granulométrie des sédiments et des paramètres hydrauliques. Pour améliorer le fonctionnement des canaux de drainage quelques solutions ont été proposées dont l'objectif est la diminution de volume des sédiments déposés, augmenter la stabilité des berges et la capacité d'écoulement. Dans cette étude également, on a proposé une approche qui permet d'effectuer le suivi et le diagnostic préliminaire de l'état des canaux de drainage de la zone d'étude sans avoir à se déplacer sur le site. Cette approche a été appliquée à l'étude de l'état des huit principaux canaux du système de drainage. Les résultats de cette application ont été confirmés lors des sorties sur le site.

**Mots-clés:** Modélisation, Drainage, Canaux, Transport sédimentaire, HEC-RAS, Réhabilitation, Entretien, Plaine de Boutheldja.

**Abstract**

In Algeria, the problems of flooding and sediment transport are manifested in a critical way which the Bouteldja plain is not spared. The agricultural plain of Bouteldja is part of the wilaya of El Tarf, located in the North East of Algeria. Despite the development of this plain in 2006 as part of a hydro-agricultural project by the creation of networks of open drainage canals in earth, it has so far been submerged by neighboring agricultural land. The occurrence of submersions is increased due to the lack of maintenance of the drainage canals.

In this context, the objective of this study is i) to estimate the morphological evolution of earth drainage canals under the influence of the solid transport process for the period from 2006 to 2018 and, also, to put highlight the effect of this morphological evolution of the canals on their hydraulic capacity; ii) solid transport modelling to quantify the sediment load and sediment deposition at the bottom of the canals; iii) to study solutions that can improve the functioning of the channels and their maintenance or rehabilitation monitoring. A channel 03 which is part of the drainage system was chosen for a global representation of this study. To analyze the flow in this canal and model the process of sediment transport, the hydro-sedimentary model of the HEC-RAS was used. The hydraulic model was calibrated to the heights of water observed during the rainy events that occurred during the observation period from 2017 to 2018, by adjusting the roughness coefficient of Manning ( $n=0.028$ ). Concerning the sedimentary model, the Engelund and Hansen model (1967) describing the total sediment transport in the channel and the sedimentation rate model of Van Rijn (1984) gave the results closer to the actual data measured over the same period of observation, in accordance with the particle size analysis of the bottom of the channel. The calibration of this sedimentary model was validated with the Nash criterion= 0.867 and correlation R equal to 0.956.

The results of simulations have shown that the hydraulic capacity of the channel in its current state has decreased compared to its initial state due to changes in the bottom of the canal by the deposition of sediment and the high roughness coefficient. The simulations carried out made it possible to estimate the average volume of sediment deposition at the bottom of the channel, accumulated since its completion in 2006 until the measurement campaign carried out in 2018. These simulations also showed that the sedimentary bottom in the earth drainage channel, not only evaluating during heavy floods but also during current rainy events. The calibration of the models revealed that the change in the geometry of the channel during the sediment transport process strongly depends on the particle size of the sediments and the hydraulic parameters. To improve the functioning of the drainage channels, some solutions have been proposed, the objective of which is to reduce the volume of sediment deposited, to increase the stability of the banks and the flow capacity. Also in this study, an approach was proposed that allows for the monitoring and preliminary diagnosis of the condition of the drainage canals in the study area without having to travel to the site. This approach was applied to studying the condition of the eight main canals of the drainage system. The results of this application were confirmed during site visits.

**Keywords:** Modelling, Drainage, Canals, Sediment Transport, HEC-RAS, Rehabilitation, Maintenance, Boutheldja Plain.

## ملخص :

تفاقم مشكلي الفيضانات ونقل الرواسب في الجزائر بصورة حرجة ، ولا سيما على مستوى سهل بوتلجة ، حيث يعد سهل بوتلجة الزراعي جزءاً من ولاية الطارف الواقعة شمال شرق الجزائر. بالرغم من تهيئة هذا السهل سنة 2006 في إطار المشروع المائي الزراعي وذلك بانجاز شبكات الصرف بقنوات مفتوحة ترابية، لكن مازالت هذه المنطقة حتى الآن تغمر أراضيها الزراعية بمياه الأمطار وهذا بسبب عدم صيانة قنوات الصرف. في هذا السياق ، تهدف هذه الدراسة إلى : (1) تقدير التطور المورفولوجي لقنوات الصرف الترابية تحت تأثير عملية النقل الرسوبي للفترة الممتدة من 2006 إلى 2018 ، وكذلك تسليط الضوء على تأثير هذا التطور المورفولوجي للقنوات على قدرتها الهيدروليكية ؛ (2) نمذجة النقل الصلب لتحديد كمية الرواسب وكذا ترسبها في قاع القنوات ؛ (3) دراسة الحلول التي يمكن أن تحسن شغل القنوات و مراقبتها قصد صيانتها أو إعادة تأهيلها.

تم اختيار قناة 03 التي هي جزءاً من نظام الصرف كتمثيل عام لهذه الدراسة ومن اجل تحليل التدفق ونمذجة عملية النقل الصلب في هذه القناة، استعملنا النموذج المائي الرسوبي لبرنامج (HEC-RAS).

حيث تم معايرة النموذج الهيدروليكي وفقاً لارتفاعات المياه التي لوحظت في الأحداث الممطرة خلال فترة المراقبة من 2017 إلى 2018، وذلك بضبط معامل الخشونة Manning ( $n=0.028$ ). أما فيما يتعلق بنموذج الرواسب أعطى نموذج (Engelund و Hansen 1967) لتحديد النقل الصلب ونموذج سرعة الترسيب في القناة (Van Rijn 1984) نتائج أقرب للمعطيات الحقيقية في الميدان، التي تم قياسها خلال نفس فترة المراقبة، وفقاً لتحليل حجم الحبيبات في قاع القناة وتحققنا من معايرة هذا النموذج الرسوبي باستخدام معيار ناش ( $Nash=0.867$ ) وعلاقة ( $R=0.956$ ).

أبدت نتائج المحاكاة التي أجريت أن السعة الهيدروليكية الحالية للقناة قد انخفضت مقارنة بالحالة الأولية بسبب التغيرات في قاع القناة نتيجة الترسبات ومعامل الخشونة العالي. كما سمحت لنا المحاكاة التي أجريت بتقييم متوسط حجم الرواسب في قاع القناة و المتراكم منذ انجازها عام 2006 حتى حملة القياسات الميدانية التي أجريت في عام 2018. أظهرت هذه المحاكاة أيضاً أن القاع الرسوبي في قناة الصرف، لا يتم تقييمه فقط أثناء الفيضانات الغزيرة ولكن خلال الأحداث الممطرة العادية أيضاً.

كشفت معايرة النماذج أن التغيير في شكل القناة أثناء عملية النقل الرسوبي يعتمد بشدة على حجم حبيبات الرواسب والخصائص الهيدروليكية. ولتحسين أداء قنوات الصرف، تم اقتراح بعض الحلول التي تهدف إلى تقليل حجم الرواسب المودعة، زيادة استقرار جوانب القناة وقدرة التدفق. كما تم اقتراح أيضاً في هذه الدراسة منهج يسمح بالمراقبة والتشخيص الأولي لحالة قنوات الصرف في منطقة الدراسة دون الحاجة إلى التنقل إلى الموقع. طبقنا هذا المنهج لدراسة حالة القنوات الثمانية الرئيسية لنظام الصرف وكانت نتائج هذا التطبيق محققة من خلال المراقبات الميدانية في الموقع.

**الكلمات المفتاحية:** النمذجة ؛ الصرف ؛ القنوات ؛ النقل الرسوبي ؛ HEC- RA ؛ إعادة التأهيل؛ الصيانة؛ سهل بوتلجة

## Table des matières

Remerciements	
Résumé – Abstract – ملخص .....	3
Liste des figures.....	11
Liste des tableaux.....	14
Liste des notations utilisées.....	15
Liste d'abréviations.....	16
<b>Introduction générale</b> .....	<b>18</b>
<b><u>Chapitre I : Description générale de la zone d'étude</u></b>	
<b>I.1</b> Caractéristiques physico-géographiques de la zone d'étude.....	<b>22</b>
<b>I.1.1</b> Introduction.....	22
<b>I.1.2</b> Situation géographique.....	22
<b>I.1.3</b> Caractéristiques topographique.....	23
<b>I.1.4</b> Géomorphologie.....	25
<b>I.1.5</b> Géologique.....	25
<b>I.1.6</b> Couverture végétale.....	27
<b>I.1.7</b> Réseaux hydrographiques.....	28
<b>I.1.8</b> Conditions climatiques.....	29
<b>I.2</b> Agriculture de la wilaya d'El Tarf.....	<b>33</b>
<b>I.2.1</b> Introduction .....	33
<b>I.2.2</b> La valorisation du potentiel agricole.....	33
<b>I.2.3</b> Conclusion.....	35
<b>I.3</b> Historique de drainage des terres agricoles de la plaine de Bouteldja.....	<b>35</b>
<b>I.3.1</b> Introduction .....	35
<b>I.3.2</b> Historique de drainage et son rôle.....	35
<b>I.3.3</b> Conclusion .....	37

## **Chapitre. II : Drainage et aménagement hydro-agricole**

<b>II.1</b>	Notion générale de drainage agricole.....	39
<b>II.1.1</b>	Introduction.....	39
<b>II.1.2</b>	Différents type de drainage agricole .....	40
<b>II.2</b>	Canaux de drainage agricole et leur envasement .....	42
<b>II.2.1</b>	Introduction.....	42
<b>II.2.2</b>	Conséquences de l'envasement dans les canaux .....	43
<b>II.2.3</b>	Techniques de limitation de l'envasement .....	43
<b>II.2.4</b>	Conclusion.....	43
<b>II.3</b>	Transport solide (envasement, sédimentation, comblement). .....	44
<b>II.3.1</b>	Introduction.....	44
<b>II.3.2</b>	Généralités sur l'envasement.....	44
<b>II.3.3</b>	Conclusion .....	47
<b>II.4</b>	Aménagement hydro-agricole.....	47
<b>II.4.1</b>	Introduction.....	47
<b>II.4.2</b>	Définition de la science de l'aménagement des cours d'eau.....	48
<b>II.4.3</b>	Principes de base.....	48
<b>II.4.4</b>	Aménagement hydro-agricole de la plaine d'El Tarf et Boutheldja.....	48
<b>II.5</b>	Diagnostic du réseau de drainage de la zone d'étude .....	50
<b>II.5.1</b>	Introduction .....	50
<b>II.5.2</b>	Diagnostics préalables des canaux de drainage de la plaine.....	49
<b>II.5.3</b>	Conclusion.....	56
<b><u>Chapitre. III Synthèse et théorie des modèles de l'écoulements et du transport sédimentaire</u></b>		
<b>III.1</b>	Revue bibliographique.....	59
<b>III.2</b>	Modèles numériques en hydraulique fluviale.....	60

<b>III.3</b>	Modèles à plusieurs classes granulométriques .....	61
<b>III.4</b>	Équations fondamentales pour le calcul d'écoulement et de transport sédimentaire ...	62
<b>III.4.1</b>	Conservation de la masse des sédiments et déformation du lit .....	62
<b>III.4.2</b>	Équation dynamique : débit solide et capacité de transport .....	62
<b>III.4.3</b>	Équation gouvernante d'écoulement.....	63
<b>III.5</b>	Mécanisme de transport solide .....	63
<b>III.5.1</b>	Modes de transport des sédiments .....	64
<b>III.5.2</b>	Étude des formations de fond : les dunes et les rides.....	65
<b>III.5.3</b>	Notions classiques de transport solide.....	66
<b>III.5.4</b>	Forces appliquées sur un grain posé au fond d'un canal.....	67
<b>III.6</b>	Formules de calcul de transport solide.....	69
<b>III.7</b>	Modélisation du transport sédimentaire .....	71
<b>III.7.1</b>	Modèles hydro- sédimentaires du HEC-RAS .....	72
<b>III.8</b>	Conclusion .....	74

**Chapitre IV : Modélisation hydro- sédimentaires dans le canal de drainage**

<b>IV.1</b>	Introduction .....	77
<b>IV.2</b>	Préparation des données et méthode .....	78
<b>IV.2.1</b>	Définition des données de base.....	78
<b>IV.2.2</b>	Étude expérimentale des propriétés de sédiment.....	78
<b>IV.2.3</b>	Mesures topographiques et géométrique .....	82
<b>IV.2.4</b>	Mesure expérimentale de la concentration des matières en suspension.....	83
<b>IV.3</b>	Modélisation hydro -sédimentaire des canaux de drainage.....	85
<b>IV.3.1</b>	Méthodologie.....	85
<b>IV.3.2</b>	Modélisation d'écoulement dans le du canal D03.....	86
<b>IV.3.2.1</b>	Etude de l'influence de l'évolution morphologique pour le fond du canal sur sa capacité d'écoulement .....	86

IV.3.2.2	Calage du modèle hydraulique de HEC-RAS.....	91
IV.3.3	Modélisation de transport sédimentaire dans le canal D 03.....	99
IV.3.3.1	Etude d'évolution de la couche sédimentaire dans le canal.....	99
IV.3.3.2	Calage et validation du modèle sédimentaire .....	102
IV.3.3.3	Estimation de l'épaisseur de sédiment empiriquement.....	105
IV.3.3.4	Estimation de volume sédimentaire expérimentalement.....	108
IV.4	Conclusion.....	109
IV.5	Étude de l'influence de déversement barrage Mexa sur le débordement aval de El l'oued Kebir.....	111
IV.5.1	Introduction.....	111
IV.5.2	Présentation du cas d'oued El Kebir.....	111
IV.5.3	Modélisation hydraulique d'oued E Kebir.....	113
IV.5.4	Conclusion.....	117
<b><u>Chapitre V : Solutions proposées pour améliorer le fonctionnement et le suivi des canaux de drainage</u></b>		
V.1	Introduction .....	119
V.2	Solutions proposées pour diminuer la charge sédimentaire dans les canaux de drainage.....	119
V.2.1	Etude de l'effet de la granulométrie sur la charge sédimentaire .....	120
V.2.2	Effet de nouvelle conception géométrique du canal étagé sur la sédimentation...	122
V.2.3	Conclusion et recommandations .....	124
V.3	Stratégie de la gestion et suivi de système de drainage.....	125
V.3.1	Introduction.....	125
V.3.2	Méthodologie de la gestion et suivi du réseau de drainage .....	125
V.3.3	Estimation du temps de concentration .....	128
V.3.4	Résultats d'application de la méthodologie de la gestion et suivi des canaux de drainage.....	131

V.4 Conclusion.....	136
V.5 Perspectives.....	137
<b>Conclusion générale</b> .....	139
<b>Références bibliographiques</b> .....	143
<b>Annexes</b> .....	151
<b>Annexe .1</b> Tableaux des valeurs du numéro courbe (CN) et coefficient de ruissellement .....	151
<b>Annexe .2</b> Ajustement des pluies journalières maximales à la loi Gumbel de la station météorologique « Lac des Oiseaux » pour la période d’observation de 2006 à 2017 .....	152
<b>Annexe .3</b> Résultats de calculs de la couche sédimentaire dans le canal par la formules de : <i>Engelund et Hansen et Ackers et White</i> .....	153
<b>Annexe .4</b> Photos prises pendant les mesures expérimentales de temps de concentration en utilisant les moyens rudimentaires : à droite, le jus de betterave et à gauche, petit morceaux de polystyrène.....	154
<b>Annexe .5</b> Publication internationale 1 .....	155
<b>Annexe .6</b> Publication internationale 2 .....	168
<b>Annexe .7</b> Communication internationale.....	177
<b>Annexe .8</b> Communication internationale.....	178
<b>Annexe .9</b> Communication nationale.....	179

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> situation géographique de la wilaya d’El Tarf et la plaine de Bouteldja .....	23
<b>Figure I.2</b> Carte topographique du bassin versant de l’oued El Kebir .....	24
<b>Figure I.3</b> Carte des pentes de la zone d’étude.....	24
<b>Figure I.4</b> Carte représentant les principaux ensembles morphologiques dans la wilaya d’El Tarf.....	25
<b>Figure I.5</b> Carte Géologique et Structurale Extrait de la carte géologique et structurale de la chaîne alpines d’Algérie orientale et des coffins Algéro-Tunisiens.....	26
<b>Figure I.6</b> Carte du couvert végétal.....	28
<b>Figure I.7</b> Carte des reseaux hydrographiques d’ensemble du bassin versant la mafragh.....	29
<b>Figure I.8</b> Répartition mensuelle moyenne de la pluviométrie ,évaporation, température ,période(2005-2016).....	31
<b>Figure I.9</b> Photos sur l’inondation Février 2012 a travers la wilaya d’El Tarf.....	32
<b>Figure I.10</b> Divers agricultures dans la zone d’étude .....	34
<b>Figure I.11</b> Les principales cultures rencontrées dans la région d’étude.....	34
<b>Figure I.12</b> La plaine de Boutheldja en 1962 a) et après 2006 b).....	36

<b>Figure II.1</b> Stagnation d'eau dans les terres agricoles.....	40
<b>Figure II.2</b> Conception réseau de drainage souterrain.....	41
<b>Figure II.3</b> Drainage de surface dans un champs agricole.....	41
<b>Figure II.4</b> Drainage par réseau hydraulique .....	42
<b>Figure II.5</b> Processus de l'envasement.....	45
<b>Figure II.6</b> Canal du système de drainage de la plaine Bouteldja envahi par les roseaux empêchant la bonne évacuation de l'eau .....	47
<b>Figure II.7</b> Photo satellitaire infra rouge de la zone d'étude. (Inondation février 2012) .....	51
<b>Figure II.8</b> Photo aérienne Inondations la plaine d'El Tarf, février 2012.....	52
<b>Figure II.9</b> Carte pédologique de la région d'El Tarf .....	53
<b>Figure II.9</b> Carte de perméabilité des zones inondables de la région d'El Tarf .....	53
<b>Figure II.11</b> Ouvrage de rejet passage busé sous digue menu par une vanne a clapet circulaire Ø1500mm .....	54
<b>Figure II.12</b> Gabarit de godet d'excavation utilisé lors des travaux de réalisation de projet des canaux de drainag .....	55
<b>Figure II.13</b> Canal D5 proche de Lac des oiseaux envahi par des végétation hydrophile (photole 25/03/2018).....	55
<b>Figure II.13</b> État du canal D3 durant l'année hydrologique.....	56
<b>Figure II.14</b> Variation de terres cultivées durant la période (2005-2016) .....	56
<b>Figure III .1</b> Section longitudinale d'un canal.....	63
<b>Figure III .2</b> Diagramme classique de Hjulstrom.....	64
<b>Figure III .3</b> Mode de transport. ....	64
<b>Figure III .4</b> Modes de transport des particules dans un canal.....	65
<b>Figure III.5</b> Les forces appliquées sur un grain posé au fond d'un canal.....	67
<b>Figure III .6</b> Diagramme de Shields : le paramètre de début de mouvement des particule ( $\tau^*$ ) et le paramètre de mobilité ( $d^*$ ) (Van Rijn, 1984) .....	69
<b>Figure III .7</b> Configuration de l'écoulement dans un canal.....	72
<b>Figure III .8</b> Modèles d'évolution du lit sédimentaire (HEC-RAS).....	74
<b>Figure IV.1</b> Localisation la zone d'étude à gauche et réseau de drainage à droite.....	78
<b>Figure IV.2</b> Diagramme triangulaire de classification texturale des sédiments, sur la base des proportions de sable, silt et argile. ....	80
<b>Figure IV.3</b> Variation des courbes granulométrique des sédiments déposés dans le canal.....	81
<b>Figure IV.4</b> Essai des caractéristiques physiques a l'aide de pycnomètre a l'air.....	81
<b>Figure IV.5</b> Méthode des mesures sur site (l'évolution du fond et la profondeur d'eau dans le canal) .....	83
<b>Figure IV.6</b> Tracé en plan du canal.....	83
<b>Figure IV.7</b> Organigramme de la méthodologie.....	86
<b>Figure IV.8</b> Sous-bassins du bassin versant du canal D 03.....	87
<b>Figure IV.9</b> Profil en long et les lignes d'eau dans le canal de géométrie initiale pour les trois débits.....	89
<b>Figure IV.10</b> Profil en travers de la section 05 avec les lignes d'eau pour les trois débits (géométrie initiale de la section).....	90
<b>Figure IV.11</b> Profils en long de la ligne d'eau dans le canal avec les paramètres	

géométriques des sections actualisés en 2017 pour les trois débits.....	90
<b>Figure IV.12</b> Débordement du canal pour le débit 4,97 m <sup>3</sup> /s (section 11). .....	91
<b>Figure IV.13</b> a) Hauteur d'eau observées et simulées dans les 12 sections du canal et b) les lignes d'eau correspondantes pour l'événement le 16/11/2017 (Q <sub>max</sub> =3,45 m <sup>3</sup> /s) .....	95
<b>Figure IV.14</b> a) Hauteur d'eau observées et simulées dans les 12 sections du canal et b) les lignes d'eau correspondantes pour l'événement le 20/12/2017 (Q <sub>max</sub> =1,40 m <sup>3</sup> /s) .....	96
<b>Figure IV.15</b> a)Hauteur d'eau observées et simulées dans les 12 sections du canal et b) les lignes d'eau correspondantes pour l'événement le 18/02/2018 (Q <sub>max</sub> =1,70 m <sup>3</sup> /s) .....	97
<b>Figure IV.16</b> Effet de la variation de la rugosité sur l'évolution de la hauteur d'eau dans le canal (évènement du : 16/11/2017; Q <sub>max</sub> =3,45 m <sup>3</sup> /s), (n) est le coefficient de Manning.....	98
<b>Figure. IV.17</b> Courbe de tarage dans la section aval du canal (section 0 ).....	98
<b>Figure IV.18</b> Taux de dépôt de sédiment (Ts) dans les sections transversales du canal (a) amont,(b) milieu, (c) aval pour la période de 2006 à 22/05/2017 .....	100
<b>Figure IV.19</b> Profils en long de sédimentation simulé sur la période de 11 ans (2006 - 2017) .....	101
<b>Figure IV.20</b> Profil en travers de la couche sédimentaire simulé sur la période de 11 ans (section 0) .....	101
<b>Figure IV.21</b> Variation du volume sédimentaire déposé le long du canal pour la période de 2006 à 2017.....	102
<b>Figure IV.22</b> Schéma d'un écoulement laminaire dans un canal.....	102
<b>Figure IV.23</b> Évolution le profil en travers du canal observé section amont .....	103
<b>Figure IV.24</b> Epaisseurs totales (hs) de la couche sédimentaire simulée et observée dans les 12 sections du canal pour la période de mesure de 22/05/2017 à 20/02/2018 .....	104
<b>Figure IV.25</b> Calage du modèle sédimentaire pour la période de mesure de 22/05/2017 à 20/02/2018.....	104
<b>Figure IV.26</b> Profil en long de sédimentation simulé sur la période de 22/05/2017 à 20/02/2018.....	105
<b>Figure IV.27</b> Corrélation de l'épaisseur de la sédimentation (hs) calculée par la formule d'Engelund et Hansen (1967) et mesurée pour la période de 2006 à 2017 .....	106
<b>Figure IV.28</b> Comparaison des épaisseurs de la sédimentation calculées par la formule d'Engelund et Hansen, simulées et observées pour la période de 2017 à 2018.....	107
<b>Figure IV.29</b> Evolution du fond du canal pendant les événements pluvieux selon les différentes approches d'estimation de l'épaisseur de la sédimentation.....	107
<b>Figure IV.30</b> Variation de débit solide en fonction de débit liquide.....	109
<b>Figure IV.31</b> Présentation la zone d'étude.....	112
<b>Figure IV.32</b> Variabilité interannuelle des débits moyens de l'oued El Kebir (station Ain Assel (1947-1998)) .....	113
<b>Figure IV.33</b> Sections transversales de l'oued El Kebir (HEC GéoRAS ) .....	113
<b>Figure IV.34</b> Profil en long et la ligne d'eau de oued El Kebir (Q= 14.83 m <sup>3</sup> /s) .....	114
<b>Figure IV.35</b> Profil en travers de la ligne d'eau de la section 12.....	115
<b>Figure IV.36</b> Profil en travers de la section 3 débordante avec endiguement pour Q=1345.6 m <sup>3</sup> /s .....	115
<b>Figure IV.37</b> La zone inondable a) sans déversement du barrage ; b) avec le déversement du barrage .....	116

<b>Figure V.1</b> Variation de volume sédimentaire au fond du canal pour 11 ans et une année.....	119
<b>Figure V.2</b> Variation de volume solide en fonction de diamètre médian (dm) de sédiment en amont et aval du canal.....	121
<b>Figure V.3</b> Aménagement du lit d'un cours d'eau .....	121
<b>Figure V.4</b> Ligne d'eau dans la section 05 du canal de profil transversal: <b>a)</b> étagé, <b>b)</b> trapézoïdal (géométrie initial) .....	122
<b>Figure V.5</b> Comparaison de la couche sédimentaire au fond du canal de profils en travers : a) étagé (nouvelle conception) et b) trapézoïdal (conception existante) .....	123
<b>Figure V.6</b> Comparaison de variation de volume sédimentaire (conception existante et nouvelle) .....	123
<b>Figure V.7</b> Localisation du réseau de drainage de la plaine de Bouteldja via HEC RAS, basé sur l'image Google Earth .....	124
<b>Figure V.8</b> Organigramme de la méthodologie de la gestion et suivi des canaux.....	127
<b>Figure V.9</b> Canaux du système de drainage de la plaine Bouteldja .....	130
<b>Figure V.10</b> Carte TIN de la zone d'étude. Présentation de la division des huit canaux principaux en sections transversales .....	131
<b>Figure V.11</b> Profils en long des huit canaux principaux du système de drainage : a) canal D01 ; b) canal D02 ; c) canal D03 ; d) canal D04 ; e) canal D05 ; f) canal D06 ; g) canal D07 et h) canal D08.....	134

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> Les coordonnées des stations météorologique .....	30
<b>Tableau I.2</b> Répartition mensuelle moyenne de la pluviométrie ,évaporation, température ,période(2005-2016) .....	31
<b>Tableau III.3</b> Formules de calcul de transport solide.....	70
<b>Tableau III.4</b> Domaine de validité des formules de transport.....	73
<b>Tableau III.5</b> Domaine de validité des formules de vitesse de sédimentation.....	74
<b>Tableau IV.6</b> Classification des sédiments selon la taille de grain.....	79
<b>Tableau IV.7</b> Résultats des essais du sol.....	80
<b>Tableau IV.8</b> Résultats des mesures topographiques <i>en date</i> du (22/05/2017) .....	82
<b>Tableau IV.9</b> Les valeurs des concentrations moyennes mesurées.....	84
<b>Tableau IV.10</b> Résultats d'estimation de débit de pointe décennal .....	89
<b>Tableau IV.11</b> Test de l'influence d'évolution du fond de canal sur sa capacité hydraulique .....	91
<b>Tableau IV.12</b> Pluies journalières et leurs durées (source : station pluviométrique Lac des Oiseaux) .....	92
<b>Tableau IV.13</b> Débits maximaux simulés et les résultats de la validation du modèle HEC-RAS pour les événements pluviaux de 22/05/2017 à 20/02/2018.....	94
<b>Tableau IV.14</b> Valeurs des débits liquides et solides lors des événements pluvieux pour la période d'observation de 2017 à 2018.....	108

<b>Tableau V.15</b> Variation de volume solide simulé en fonction de classe de sédiment.....	120
<b>Tableau V.16</b> Résultats de calcul de temps de concentration par quatre méthodes empiriques et les valeurs mesurées pour 8 principaux canaux du système de drainage .....	130
<b>Tableau V.17</b> Comparaison des temps de concentration ( $T_c$ ) des canaux à l'état initial et actuel, classement des canaux pour l'entretien prioritaire.....	135

### Liste des notations utilisées

*A* : Section mouillée  
*B* : Largeur supérieure du canal (m)  
*b* : largeur du fond du canal  
*C* : la concentration des matières en suspension(g/l)  
*CU* : Coefficient d'uniformité (ou de Hazen)  
*d* :Diamètre moyen arithmétique (d50)  
*d\** : Le diamètre adimensionnel d'une particule  
*f*:Coefficient de frottement de Darcy Weisbach  
*Fr* :Nombre de Froude  $Fr=U/(gh)^{1/2}$   
*g* : Accélération de pesanteur  
*he* : Profondeur de l'écoulement (tirant d'eau)  
*hs* : Epaisseur de la couche de sédiment au fond du canal  
*I*: Pente géométrique  
*Ks* :Coefficient de résistance de Manning-Strickler défini par  $Ks=21.1/d^{1/6}$   
*ks* :Rugosité du lit  
*k* :La perméabilité ( $m \cdot s^{-1}$ )  
*n* :Coefficient de frottement de Manning  
*p* :Porosité (%)  
*Q* :Debit ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )  
*q* :Débit unitaire ( $Q/b$ )  
*Qs* : Débit solide à l'équilibre  
*Ql* : Débit liquide  
*qs* : Débit solide unitaire ( $qs=Qs/W$ )  
*qs\** : La capacité de transport adimensionnelle  
*R* : Rayon hydraulique (après correction des effets de parois)  
*R\** :Nombre de Reynolds particulaire  $Re*=u*D/\nu$   
*s* : Densité relative  $s=(\rho_s-\rho)/\rho$   
*Ts* :Taux de sédimentation(%)  
 $\Delta t$  : l'intervalle de temps  
*U* :Vitesse moyenne( $m \cdot s^{-1}$ )

$u(z)$  : Vitesse moyenne à la cote  $z$   
 $u^*$  : Vitesse de frottement:  $u^* = (\tau_0/\rho)$   
 $V_s$  : Volume de sédiment ( $m^3$ )  
 $U_s$  : Vitesse de sédimentation ou de chute  
 $\gamma_h$  : poids volumique humide ( $g \cdot cm^{-3}$ )  
 $\gamma_s$  : Poids volumique spécifique des grains ( $g \cdot cm^{-3}$ )  
 $\gamma_d$  : Poids volumique sèche ( $g \cdot cm^{-3}$ )  
 $\tau^*$  : Paramètre de Shields  
 $\tau_0$  : la contrainte de frottement exercée par l'écoulement sur le fond  
 $\gamma_w$  : poids volumique de l'eau  
 $\rho_w$  : Masse volumique de l'eau ( $\rho_w = 1000 \text{ Kg} \cdot m^{-3}$ )  
 $\nu$  : est la viscosité cinématique  $\nu = 10^{-6} m^2/s$  si la température est  $20^\circ C$   
 $\mu$  : viscosité dynamique de l'eau  $\mu = \nu \cdot \rho_w (\text{Kg} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$

### **Abbréviation**

**ENHYD**: Bureau d'Etude Hydraulique Algérien sise à Constantine  
**DRE El Tarf** : Direction des ressources en eau (W) El Tarf  
**DSA** : Direction services agricoles de la Wilaya  
**HEC RAS**: Hydrologic Engineering Centers River Analysis System  
**LTP Est**: Laboratoire des Travaux Public de l'Est Annaba –Algérie  
**ENERGOPROJEKT** : Bureau d'étude Yougoslavie  
**ONID** : Office national d'irrigation et drainage Algérien  
**SIG** : Système d'Information Géographique  
**HEC HMS** : Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System  
**HEC RAS** : Hydrologic Engineering Center's River Analysis System  
**SCS** : Soil Conservation Service  
**TIN** : Triangular Irregular Network  
**CN** : Curve Number

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

Depuis l'indépendance (1962), l'économie algérienne est dépendante des hydrocarbures qui représentent la source principale de ses revenus. L'Algérie n'est pas parvenue à mettre en place une industrie d'équilibre ou de substitution pour combler le besoin alimentaire national et avoir une place au niveau international, elle est dépendante des importations. Durant les années 2000, l'Algérie est le premier importateur africain de denrées alimentaires, le secteur produits alimentaires importés représentant 20 % de la valeur du total des importations en 2008, soit un montant de 7,7 milliards de dollars (Bessaoud, 2019). A l'Est le pays dispose d'énormes potentiels en termes de parcelles agricoles irrigués par les bassins hydrographiques (El Kebir, Seybouse, Mellegue).

À partir de l'année 2004, le gouvernement a mis en place un plan national de développement agricole (PNDA) afin d'améliorer la sécurité alimentaire (Omari et al, 2012). L'agriculture est devenue l'une des priorités du pays. La région d'El Tarf (Nord Est d'Algérie) a bénéficié de projet d'aménagement hydro- agricole en 2006 par la reprise des réseaux de drainage de plus de 29 635ml et de l'endiguement de l'Oued El Kebir afin de lutter contre son débordement. La région d'El Tarf est constituée de plus de 60% des terres agricoles dans la plaine de Boutheldja. Tout développement agricole est sensé être accompagné par des travaux d'assainissement et/ou de drainage lorsque les sols sont lourds ou ne disposent pas d'un drainage naturel. L'absence de drainage ne doit pas être perçue uniquement comme un problème mineur mais un risque géré par les agriculteurs. Cela influe massivement au prix d'une réduction de la productivité des terres agricoles, des contraintes pour l'environnement et les écosystèmes. Une bonne connaissance et maîtrise du drainage sont donc des conditions de la durabilité de l'investissement pour le développement agricole (Hartani, 2001).

La gestion appropriée des sédiments dans les réseaux de canaux constitue l'un des défis majeurs des travaux dans l'amélioration de ces derniers. Une grande partie des budgets de maintenance et de réalisation étant dépensés annuellement sur l'enlèvement des sédiments déposés (Depeweg et Mendez, 2002). Avant d'entreprendre les travaux de réhabilitation du réseau de drainage, il est important de déterminer l'efficacité du système ancien par : le contrôle des écoulements de surface, le suivi de l'évolution morphologique du fond des canaux par la sédimentation, l'influence des inondations des terres agricoles pendant les crues (Brice M., 1998). A l'absence d'entretien, les canaux de drainage envahis par les herbes et le dépôt de sédiments, ne remplissent plus leur rôle initial et, par conséquent, l'occurrence de submersion des terres agricoles limitrophes augmente.

L'Algérie étant un pays touché par le phénomène d'érosion et de transport de sédiments dans les oueds de nombreuses études ont porté sur la quantification et la variabilité temporaire de la charge sédimentaire issue des bassins (Elahcene et al., 2013 ; Bouchelkia et al., 2014 ; Bouzeria et al., 2017), sur la sédimentation issue des bassins versants au niveau des barrages (Achite M., Meddi M. 2004 ; Bessenasse M., 2010 ; Bak L. et Dabkowski S.L. 2013 ; Remini B., 2015) et sur le transport sédimentaire dans les oueds (Terfous B. et al., 2001 ; Khanchoul K. et al., 2012 ; Zettam A. et al., 2017).

Certains chercheurs ont étudié les différents modes d'écoulement et le transport de sédiments dans les canaux d'irrigation et d'assainissement (Hushen L., 1993 ; Ochiere, 2015 ; Yang H.S, 2018, Ronald V et al, 2020). Williamson T.N. (2019), quant à lui, utilisait la télédétection afin d'améliorer la gestion des cours d'eau dans le système de drainage.

Les études de transport sédimentaire spécifiques aux canaux de drainage en terre sont très rares. La majorité des études est consacré au transport sédimentaire dans les cours d'eau, or dans un cours d'eau, les choses ne sont pas aussi simples qu'un écoulement en canal : le cours d'eau n'est pas régulière, les pentes sont localement plus fortes ou plus faibles, les lits.. etc (Roche et al., 2012). La quantification du transport sédimentaire dans les cours d'eau nécessite l'identification de plusieurs paramètres : nature et forme des grains, répartition des concentrations et des vitesses (Rickenmann et Recking, 2011 ; Malavoi et Recking, 2011). Plusieurs formulations ont été proposées afin d'estimer les quantités de sédiments transportées par le flux. Ces formulations ont été développées ou calibrées sur la base d'études expérimentales et donnent des résultats corrects.

Les processus de transport des sédiments dans les cours d'eau dépendent à la fois de paramètres hydrauliques, des caractéristiques physiques des bassins versants et des propriétés des sédiments (Braud et al, 2014). La connaissance de ces paramètres est essentielle en hydraulique fluviale et en modélisation hydraulique, en particulier pour les différents modèles de mécanique des fluides (modèles Navier Stokes, modèles Saint Venant etc.) décrivant également la propagation des écoulements dans les cours d'eau. Plusieurs modèles ont été développés dans la littérature, tels que des modèles empiriques, conceptuels et numériques pour la quantification du transport solide dans les cours d'eau (Bagnold B.A., 1966 ; Graf, W.H. et Suska L., 1987 ; Rodi W., 1993).

L'objectif principal de cette étude est la modélisation du transport sédimentaire dans les canaux de drainage afin d'estimer et quantifier l'évolution morphologique de ces canaux en

terre sous l'influence du processus du transport sédimentaire et du phénomène de sédimentation pour la période allant de 2006 jusqu'à 2018 et, également, mettre en évidence l'effet de cette évolution morphologique des canaux sur leur capacité hydraulique. Un canal 03 qui fait partie du système de drainage étudié a été choisi pour une représentation globale de cette étude. Cette étude est basée sur l'application des modèles du transport sédimentaire dans les cours d'eau et les simulations de ce processus via modèles hydro-sédimentaires du logiciel HEC-RAS.

Ce travail est présenté par le manuscrit comprenant cinq chapitres.

Le premier chapitre se rapporte à la description des caractéristiques naturelles de la plaine de Bouteldja et de l'historique de drainage des terres agricoles de la plaine.

Le second chapitre porte sur la notion générale de drainage des terres et l'aménagement hydro-agricole en général et, en particulier, de la plaine de Bouteldja. Aussi, dans ce chapitre sont présentées les étapes de diagnostic de l'état des canaux de drainage de la zone d'étude et les résultats issus de ce diagnostic.

Le troisième chapitre est consacré à la synthèse des modèles hydrauliques et des modèles du transport sédimentaire dans les cours d'eau afin de cerner les modèles qui peuvent être appliqués à la modélisation d'écoulement et du transport sédimentaire dans les canaux de drainage.

Dans le quatrième chapitre nous nous consacrons en premier lieu, à la définition des données de base recueillies lors des campagnes de mesures et de relevés topographiques sur le site et l'analyse granulométrique de sédiments, nécessaires à la suite de l'étude. Le canal d'essais (Canal 03) du système de drainage a été choisi pour la représentation globale de l'étude. En second lieu, l'étude portée sur la simulation d'écoulement et du transport sédimentaire dans ce canal via logiciel HEC-RAS afin d'estimer son évolution morphologique, quantifier le dépôt de sédiments au fond durant douze dernières années (de 2006 à 2018) et pour montrer que le dépôt de sédiments au fond du canal et son envahissement par les herbes ont causé la forte diminution de sa capacité hydraulique.

Dans le dernier chapitre on propose les solutions permettant améliorer le fonctionnement du canal et dont l'objectif est la diminution de volume des sédiments déposés, augmenter la stabilité des berges et la capacité d'écoulement. Également, dans cette partie d'étude on a élaboré une approche qui permet d'effectuer le suivi et le diagnostic préliminaire de l'état des canaux de drainage de la zone d'étude sans avoir à se déplacer sur le site.

**Chapitre I :**  
**Description générale de**  
**la zone d'étude**

## Chapitre I Description générale de la zone d'étude

### I.1 Caractéristiques physico-géographiques de la zone d'étude

#### I.1.1 Introduction

La présente étude portera sur la modélisation du transport sédimentaire et de ses effets sur les changements morphologiques dans les canaux de drainage, en particulier, le transport du fond qui provoque des changements significatifs sur la morphologie des canaux. Donc il est nécessaire d'illustrer la nature de la zone d'étude pour arriver aux points suivants :

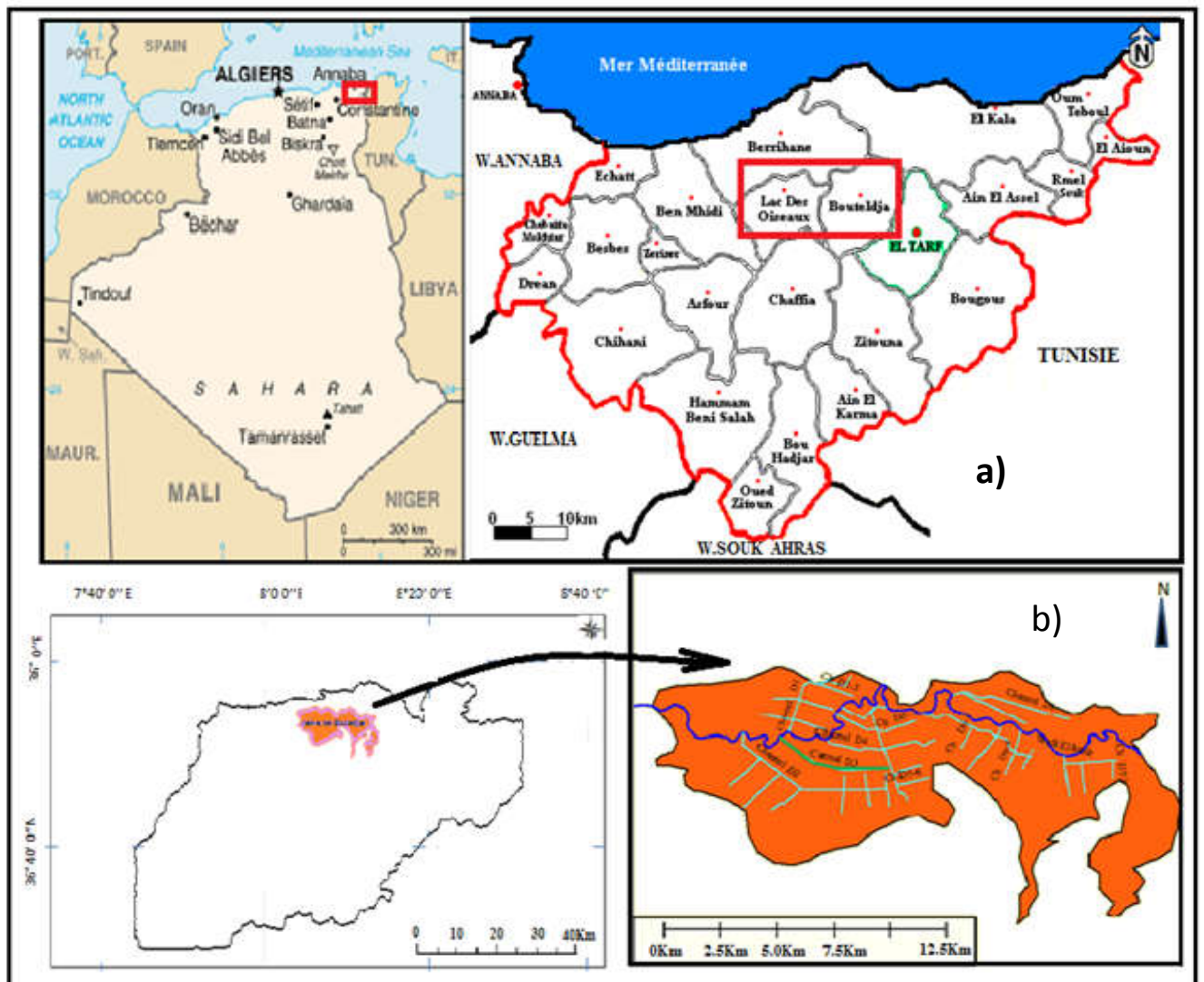
- analyser et choisir les modèles hydro-sédimentaires appropriés au processus de transport sédimentaire dans les canaux de drainage en terre de la zone d'étude ;
- quantifier et estimer l'évolution morphologique des canaux de drainage ;
- mettre en évidence l'influence de dépôt des sédiments dans les canaux de drainage sur l'inondation des terres agricoles ;
- proposer les solutions adéquates dans le cadre de réhabilitation de ces canaux

#### I.1.2 Situation géographique

La zone d'étude, la plaine de Bouteldja, fait partie de la wilaya d'El Tarf, wilaya à vocation agricole et fait partie du système hydraulique du bassin versant El Kebir et aux confins des barrages de Mexa et de Bounamoussa (Figure I.1).

La plaine couvre une superficie de 10572 ha dont environ 6425 ha de terres agricoles le reste étant une réserve de Biosphère.

La wilaya d'El Tarf s'étend sur la longitude  $7^{\circ} 45'$  à  $8^{\circ} 38'$  et la latitude  $36^{\circ} 20'$  à  $36^{\circ} 45'$ . Elle est délimitée au nord par les dunes de la mer Méditerranée, à l'est par la frontière tunisienne, à l'ouest par la wilaya d'Annaba, au sud par la wilaya de Souk Ahras (Figure I.1).



**Figure I.1** a) situation géographique de la wilaya d'El Tarf et b) de la plaine de Bouteldja

### I.1.3 Caractéristiques topographiques

La plaine de Bouteldja représente l'une des zones les plus importantes du territoire de la wilaya d'El Tarf, facile à l'accès par la route express RN44 qui longe les piedmonts du massif Bouabed. La topographie des lieux est pratiquement sans dénivelée importante, plate selon la carte (Figure I.2) et (Figure I.3). La Figure I.2 présente la carte topographique du bassin de l'oued El Kebir dont la plaine Boudeldja fait partie.

Les altitudes de la plaine sont comprises entre 0 - 31 m, rarement entre 5-30 m, la pente de terrain est en générale de 0.05 % et rarement de 1 à 5%.

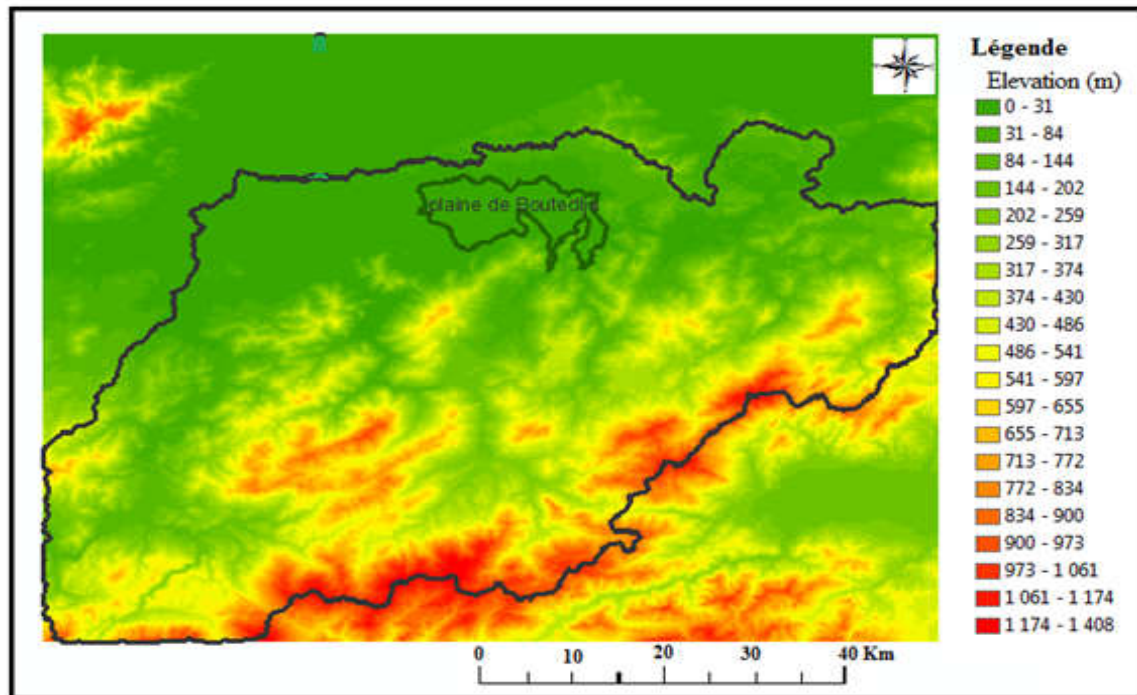


Figure I.2 Carte topographique du bassin versant de l'oued El Kebir (via Arc Map 10.5)

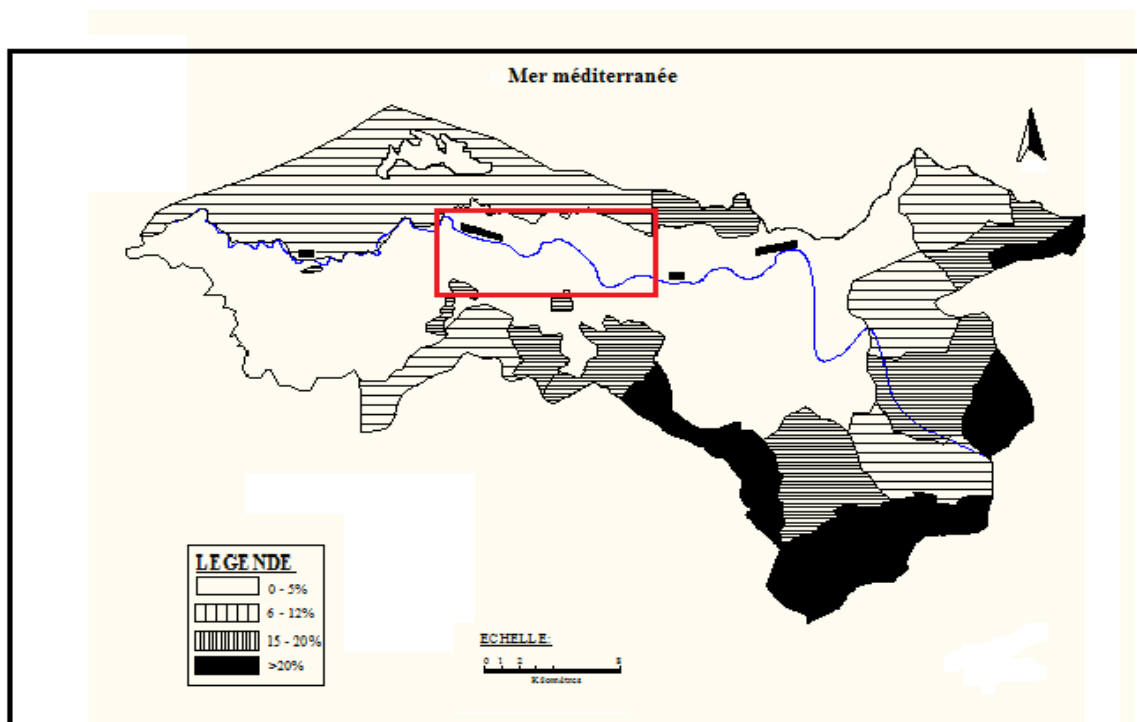
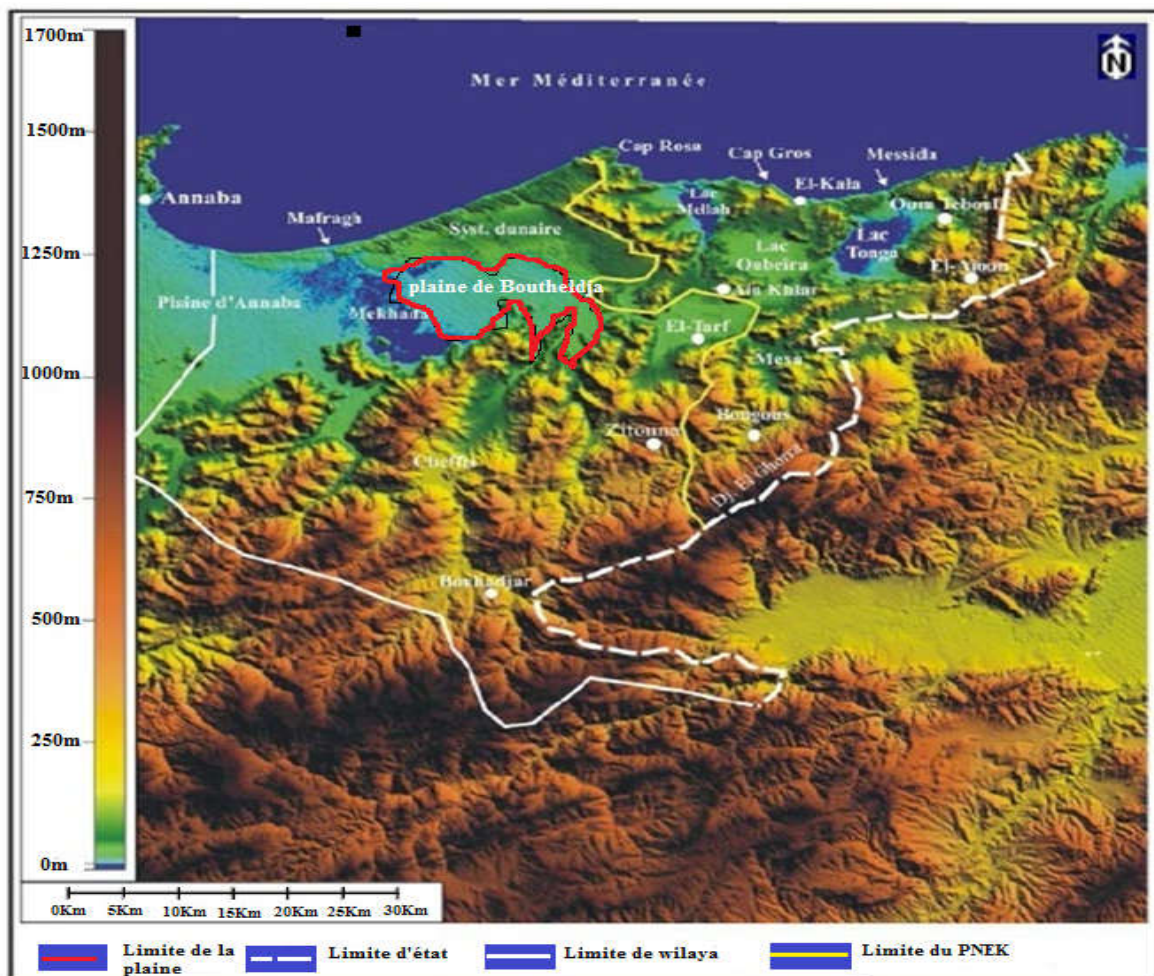


Figure I.3 Carte des pentes de la zone d'étude (Source : ENHYD, 2004)

### I.1.4 Géomorphologie

Du point de vue géomorphologique, l'aire de la wilaya d'El Tarf est constituée par quatre zones bien distinctes : la zone des plaines, la zone des dunes, la zone des marécages et la zone des collines et des montagnes (Figure I.4).

La région comprend deux grandes plaines couvrant deux communes celle d'El Tarf (plaine d'El Tarf et celle de Boutheldja (plaine de Bouteldja), ces deux plaines sont séparées par les gorges de l'oued El Kebir, limitées au Nord par une nappe de plateaux dunaire, à l'Est et au Sud par des collines et montagnes et à l'Ouest par des terrains marécageux (Figure I.4).



**Figure I.4** Carte représentant les principaux ensembles morphologiques dans la wilaya d'El Tarf. (Extrait d'image SRTM modifié)

### I.1.5 Géologique

La plaine s'inscrit dans les auréoles du prolongement oriental de la chaîne numidique de direction générale N/NE-S/SW. Son sous-sol est essentiellement constitué de terrains sédimentaires s'étageant de l'Éocène au Néo-Pléistocène, à forte proportion de roches plus ou moins perméables (Figure I.5).

On distingue deux terrains sédimentaires différents :

- Le complexe argilo- gréseux du Numidien représentant la nappe Numidienne.
- Les dépôts du Quaternaire qui sont d'origines différentes.

Ainsi, deux grands ensembles lithologiques se distinguent :

- Le complexe argilo-gréseux du Numidien Tertiaire a base marneuse du Secondaire constituant le substratum général de la région.
- Les remblaiements du Quaternaire qui eux seuls constituent un système géologique.

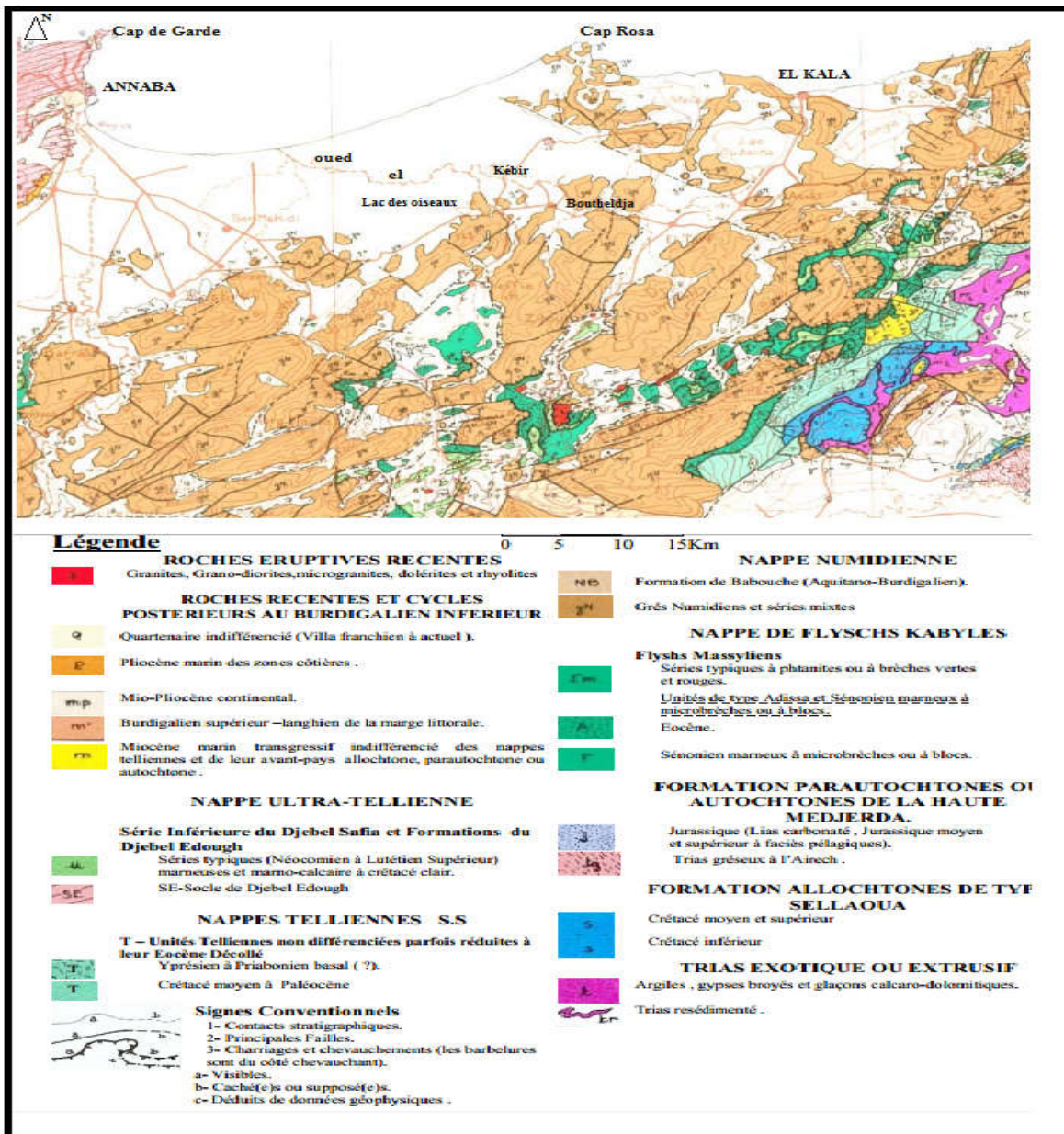


Figure I.5 Carte Géologique et Structurale. Extrait de la carte géologique et structurale des chaînes alpines d'Algérie orientale et des coffins Algéro-Tunisiens (1/500.000)

### I.1.6 Couverture végétale

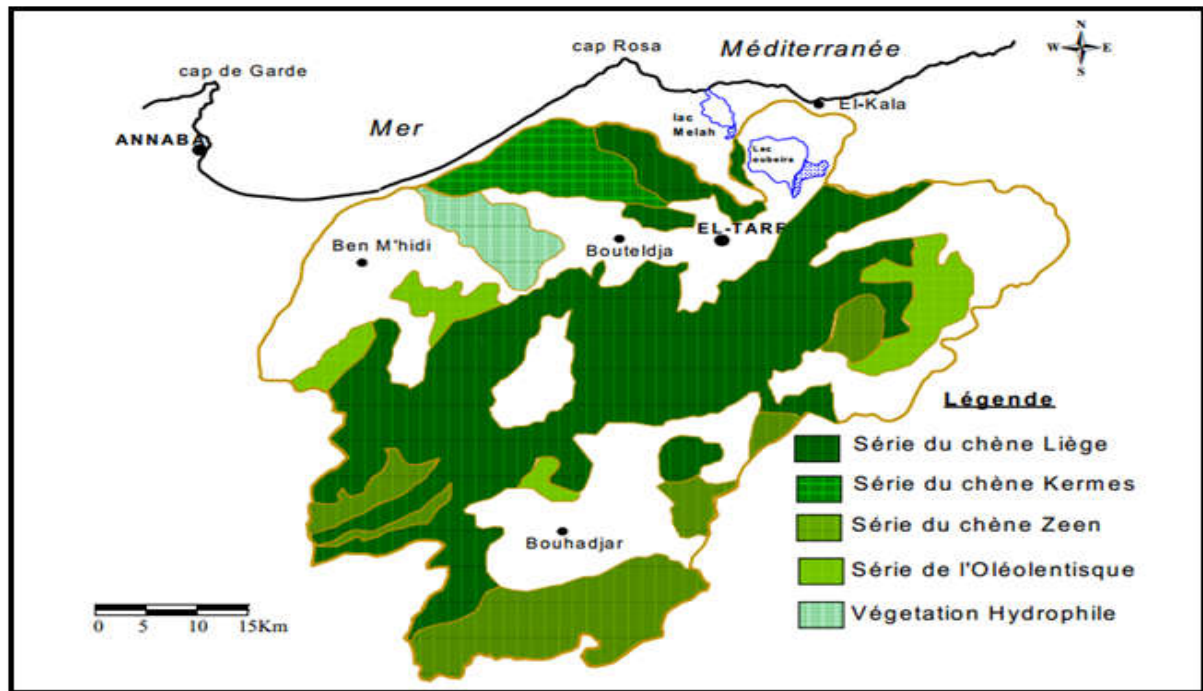
La région de la wilaya d'El Tarf est classée dans la réserve mondiale de la biodiversité, Le site a reçu une protection légale avec sa désignation comme Parc National par le décret N° 83-462 du 23 juillet 1983. Le parc a été inscrit comme réserve de la biosphère en 1990. Une évaluation du Comité consultatif de l'UNESCO en 2002 a estimé que la réserve répondait dans l'ensemble aux critères exigés et que son fonctionnement était satisfaisant. Le PNEK, avec ses près de 80 000 km<sup>2</sup> est l'un des plus grands parcs nationaux d'Algérie.

Le développement de la couverture végétale dépend de la combinaison des facteurs physico-géographiques tels que le climat, le relief, la lithologie et l'action humaine qui s'impose par la mise en culture des terres. Pour cela, il est nécessaire de connaître les différents types de végétaux et leur répartition dans l'aire d'étude.

La couverture végétale de la région (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**I,6) est représentée par une dominance des peuplements forestiers qui occupent une superficie de l'ordre de 167777 ha avec un pourcentage de 60 % de la superficie de la wilaya d'El Tarf (d'après le plan d'aménagement de la wilaya d'El Tarf, 2001).

Cette étendue de végétation abrite des espèces floristiques où on compte entre 600 et 700 espèces. On a 63 % de ce patrimoine est représenté par divers peuplements, alors que 37% seulement sont constitués de maquis qui couvre les bas fond inter dunaire et la surface des dunes au Nord - Ouest de la région.

La figure I.6 indique l'absence de la couverture végétale sur la plaine de Boutheldja puisque ces terres sont vouées à l'agriculture et dont le sol est susceptible à l'érosion par le ruissèlement superficiel due à la précipitation.

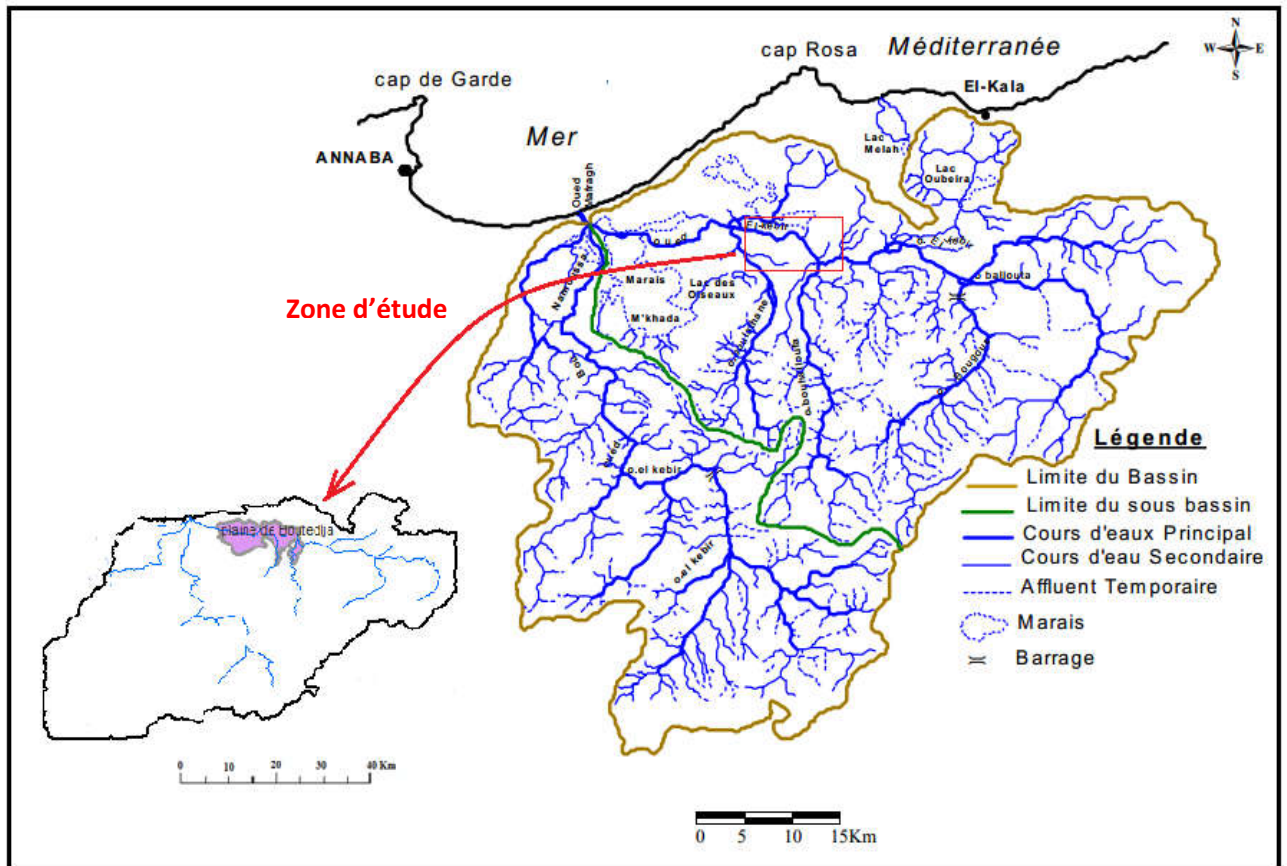


**Figure I.6** Carte du couvert végétal de la wilaya d'El Tarf. (Source : l'ANRH, Constantine)

### I.1.7 Réseaux hydrographiques

L'oued El Kebir est le cours d'eau le plus important de la plaine de Bouteldja avec ses affluents Guergour, Bouredim, Bouhalloufa et Boulatane. El Kebir, avant de se jeter dans la mer, reçoit les eaux de l'oued Bounamoussa et un certain nombre de plus petits cours d'eau, formant ainsi l'oued Mafragh (Figure I.7).

La plaine est située aux abords du lit de l'oued El Kebir et subissait dans le passé les inondations provoquées par le débordement de l'oued pendant les fortes crues. Actuellement la situation s'est améliorée après l'endiguement de l'oued en 2006.



**Figure I.7** Carte des réseaux hydrographiques d'ensemble du bassin versant de la Mafragh. (Arc MAP 10.5)

### I.1.8 Conditions climatiques

#### a) Pluviométrie

Le climat de la région d'étude est de type méditerranéen, marqué par deux saisons: l'une froide et humide s'étalant d'octobre à avril, l'autre chaude et sèche allant du mois de mai à septembre.

La zone d'étude fait partie de la région considérée comme la plus humide d'Algérie. Le régime des pluies se caractérise par des pluies abondantes, souvent des averses en hiver, qui diminuent presque régulièrement au printemps et atteignent finalement un total de quelques millimètres par mois en été.

Pour mieux représenter la variabilité mensuelle et saisonnière des pluies de la zone d'étude, les données de trois stations météorologiques les plus proches ont été utilisées. Ces stations sont : Aïn El Assel, située à l'est de la zone d'étude, Barrage Cheffia au sud et à l'ouest, Lac Des Oiseaux (la plus proche de la zone d'étude parmi ces stations) (Tableau 1).

La partie Est et Sud de la zone est un peu plus humide (Ain El Assel, 916,38mm /an, Cheffia, 803,63mm /an) par rapport à la partie Ouest (Lac des Oiseaux, 674,82 mm/an).

Le cumul annuel moyen pour trois stations est égale 798,28 mm. Concernant la répartition saisonnière de pluies, en été le total de pluie est le plus faible 25,66 mm qui fait 3% du cumul annuel, en hiver le total de pluies atteint 43% (334,8mm) du cumul annuel avec le mois février le plus arrosé. Ceci est pour la période d'observation de 11 ans (de 2005 à 2016) (Tableau I.2, Figure I.2)

**Tableau I.1.** Coordonnées des stations météorologiques. (Source: ANRH, Constantine, ANBT, Cheffia)

Stations pluviométriques	Coordonnées Lambert (m)			La période d'observation
	X	Y	Z	
Ain El Assel	1005.447	399.828	35	2005-2016
Barrage Cheffia	977.150	381.300	170	2005-2016
Lac des Oiseaux	984.202	400.5	6	2005-2016

La répartition saisonnière des précipitations favorise l'accroissement des plantes type hydrophile dans le fond des canaux de drainage surtout au cours de la saison hivernale et diminué dans la saison estivale.

### **b) Température**

Les observations recueillies sur la période (2005-2016) donnent une température moyenne annuelle pour les trois stations de 19,24 °C. Le mois de février est le plus froid avec une basse température qui atteint 12,80 °C, pour les mois de juillet et août les températures dépassent les 25°C (Tableau I.2 et Figure I.8).

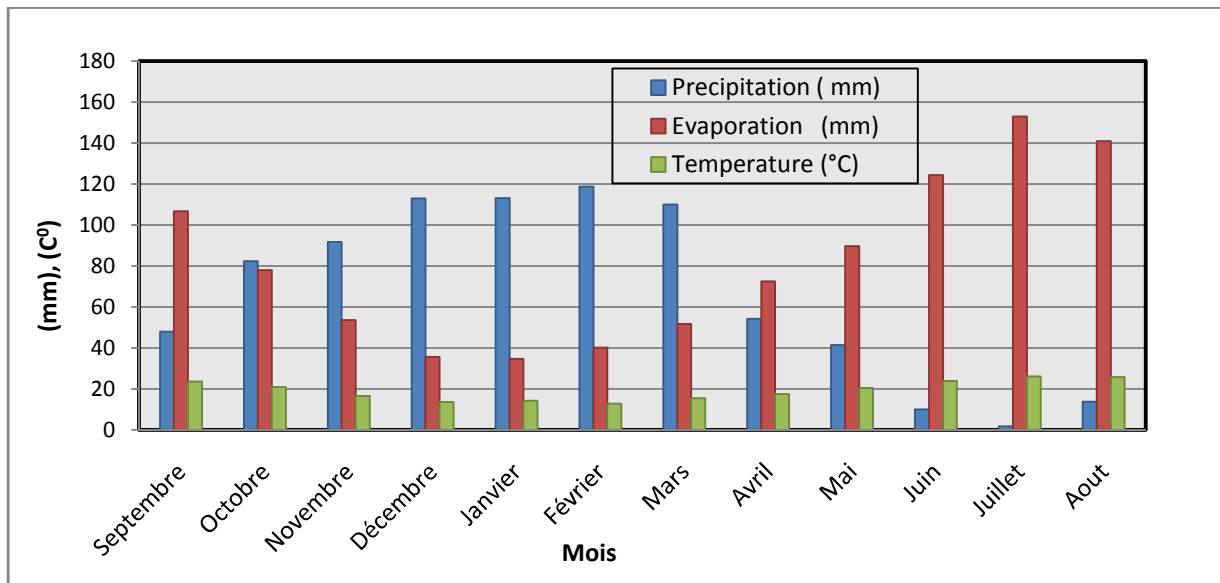
### **c) Évaporation**

Les pointes inférieures et supérieures de l'évaporation moyenne mensuelle relevées des trois stations pour la période (2005-2016) ont été au cours du mois de juillet avec **152,98mm** et au mois de janvier avec **34,61mm**.

Le tableau I.2 et le graphe de la Figure I.8 représentent les valeurs des facteurs climatiques cités.

**Tableau I.2.** Répartition mensuelle moyenne de la pluviométrie, évaporation et températures pour la période d'observation de 2005 à 2016 à partir des données des stations : Ain El Assel, Barrage Cheffia et Lac des Oiseaux

Mois	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout
Précipitation (mm)	48.03	82.40	91.67	112.92	113.14	118.79	109.93	54.15	41.35	10.05	1.79	13.82
Évaporation (mm)	106.79	77.95	53.65	35.65	34.61	40.12	51.72	72.44	89.63	124.44	152.98	140.97
Température (°C)	23.55	21.00	16.63	13.62	14.24	12.80	15.43	17.47	20.42	23.86	26.08	25.75



**Figure I.8** Répartition mensuelle moyenne de la pluviométrie, évaporation et températures pour la période (2005-2016)

**d) Autres facteurs climatiques**

L'analyse des suites des facteurs climatiques nous donne les informations suivantes :

- La vitesse du vent est très uniforme, elle varie de 3,1 à 3,5 m /s.
- L'humidité relative moyenne varie entre 71 et 79%, le minimum entre 43 et 53% et le maximum entre 92 et 96%.
- Le nombre d'heures d'insolation atteint le minimum moyen en Janvier avec 4,4 heures/jour et le maximum en juillet avec 11,4 heures/jour.

*d) Crue historique*

On voudrait bien toucher le thème des crues, car la wilaya d'El Tarf est connue par ses inondations répétées généralement chaque année et parfois plus d'une fois par an. On peut citer celles des années 1973, 1984, 1985, 2003, 2005, 2009, 2012. La plus forte crue récente est celle de 23 février 2012. Dans cette crue la pluviométrie a été particulièrement considérable. Le mois de février à lui seul a enregistré plus de 300 mm. Durant cette période cette forte pluviométrie a engendré des inondations à travers toute la région (plaine d'El Tarf et plaine de Boutheldja, jusqu'à la plaine d'Annaba (wilaya voisine) et a provoqué beaucoup des dégâts aux différents ouvrages et aux cultures, la Figure I.9 illustre quelques endroits inondés.



**Figure I.9** Photos sur l'inondation de février 2012 à travers la wilaya d'El Tarf  
(source : photos DRE, El Tarf)

## I.2 Agriculture de la wilaya d'El Tarf

### I.2.1 Introduction

Notre sujet a des objectifs qui concernent le domaine d'agricole de la wilaya; tant pour la mise en valeur des terres, que pour le rendement de production agricole, et pour la protection et exploitation rationnelle de ces terres. A cette importance il est nécessaire d'identifier les différentes zones de cultures de la région. La vocation réelle et principale de la wilaya est l'agriculture. Celle-ci est caractérisée par une grande variété: cultures maraîchères, agrumes, vignes, pomme de terre et principalement la tomate. D'un autre sens la politique de l'état encourage l'agriculture à se transformer en véritable moteur de la croissance économique globale de la région. Ceci grâce à une intensification de la production dans le domaine des filières agroalimentaires stratégiques et également à la promotion d'un développement intégré de tous les territoires ruraux.

### I.2.2 La valorisation du potentiel agricole

La wilaya d'El Tarf par sa vocation agricole, son savoir faire et des conditions pédoclimatiques est un important pôle agricole dans l'Est Algérien. Les pratiques culturelles récéncés sont les suivantes :

- \* La plaine de Bounamoussa est caractérisée par des cultures maraîchères, industrielles, fourragères et arboricoles ainsi que l'élevage bovin.
- \* Les terres de l'arrière pays où domine la céréaliculture associée à l'élevage bovin. En outre, il y a eu lieu l'émergence de labels ; tels le concentré de tomate, les vignobles des coteaux de Boutheldja et du périmètre de Bounamoussa (Figure I.10). Nous ajoutons aussi le melon de Bouteldja. Les principales cultures rencontrées (d'après les services agricoles de la Wilaya d'El Tarf) sont illustrées dans la (Figure I.11). Toute fois, pour élargir la SAU (surface agricole utile) la direction des services agricoles envisage dans une vision globale :
  - La récupération et l'amélioration des terres marginales
  - L'extension des superficies irriguées.
  - Le développement de l'arboriculture et de la viticulture respectivement dans les piémonts et les zones montagneuses. Cependant, près de 20000 Ha, soit environ 28% de la surface agricole utile (SAU) sont sujet à de fréquente inondations se prolongeant parfois au delà du mois d'Avril d'où environ 7500 Ha de perte de surface de cultures variées (DSA d'El-Tarf, 2000) .



Figure I.10 Divers agricultures dans la zone d'étude

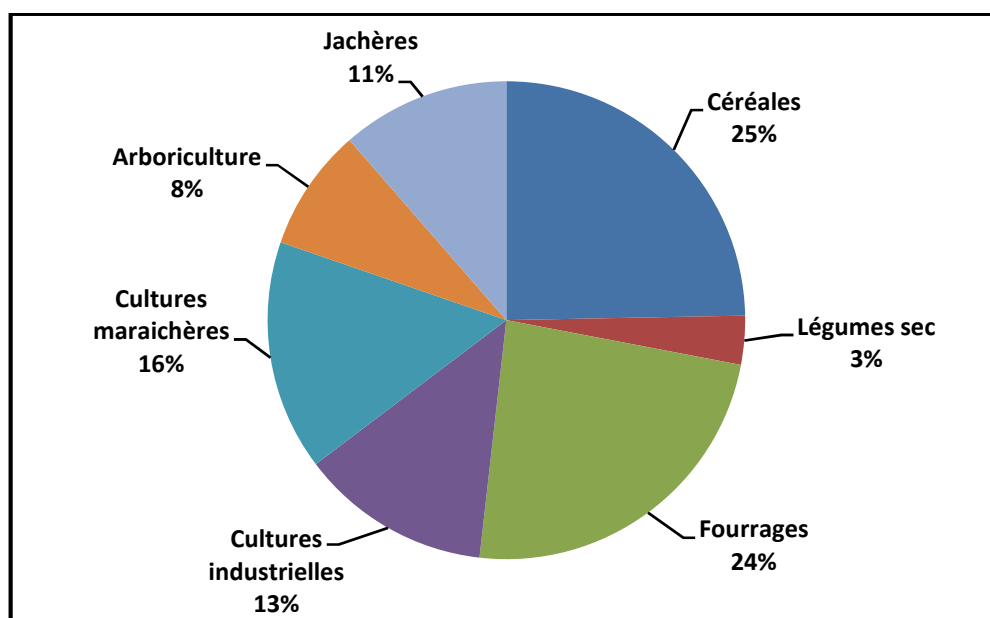


Figure I.11 Les principales cultures rencontrées dans la région d'étude (DSA d'El-Tarf, 2010)

Selon la Figure I.12 des principales cultures dans la région d'étude les légumes secs et l'arboriculture représentent les pourcentages les plus faibles. Ceci est dû à la submersion des terres agricoles durant la saison hivernale. Une partie de l'apport d'eau est infiltré dans le sol pendant les averses et absorbé par les racines particulièrement des agrumes qui assurent leur développement tout en diminuant le ruissellement.

### **I.2.3 Conclusion**

La richesse région avec importantes ressources agricoles d'un côté et la dégradation des terres agricoles par les inondations d'autre côté. Elle permet de retourner à la mise en valeur de ces terres par la conception d'une technique d'aménagement hydro-agricole ce qu'on appelle « drainage agricole » destiné à réduire ou supprimer l'excès d'eau sur des parcelles qui en sont affectées. Ce dernier apporte des avantages certains en termes de régularité des rendements, facilité d'intervention sur les parcelles et choix des variétés. Il permet une meilleure exploitation des terres agricoles, en régularisant, diversifiant et sécurisant la production. Il donne ainsi à l'exploitant une plus grande faculté d'adaptation à l'évolution de l'environnement économique de son exploitation et favorise la qualité de toutes les productions.

## **I.3 Historique de drainage des terres agricoles de la plaine de Bouteldja**

### **I.3.1 Introduction**

Une bonne connaissance et maîtrise du drainage sont des conditions de la durabilité de l'investissement pour le développement agricole. Il importe donc de mettre en place des outils et des compétences pour faire face au déficit du développement agricole et rural. Tout autant que la recherche de l'historique de drainage est très utile aux tendances évolutives du système.

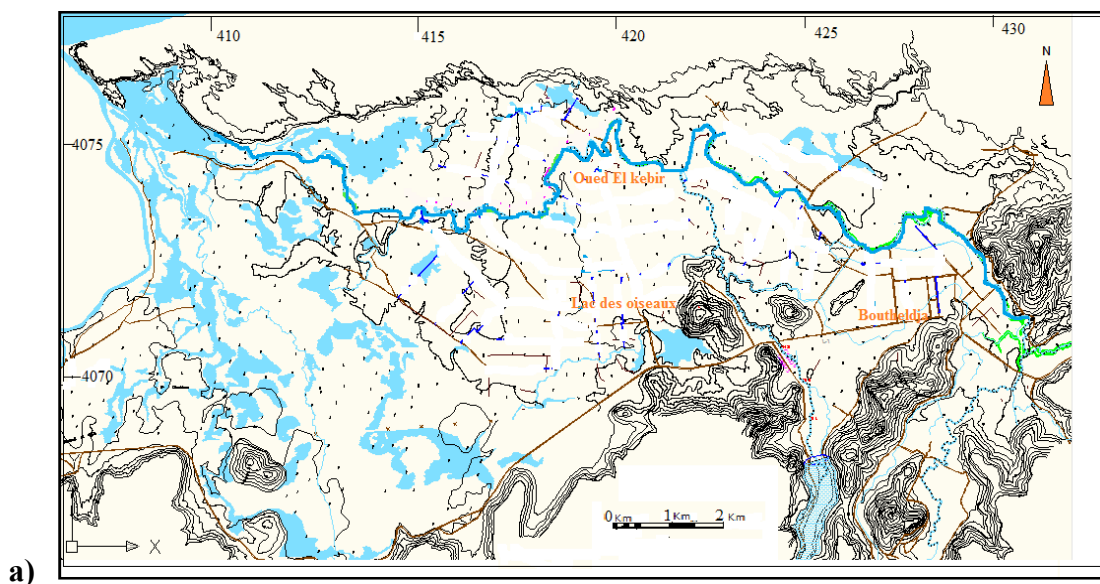
A ce titre, un sujet approprié est à envisager impliquant différents intervenants afin de pouvoir faire face à cette situation qui n'est pas appréhendée avec l'urgence que nécessite la vitesse actuelle de dégradation (surtout dans les régions de l'Est du pays) et donc de réduction des surfaces agricoles utiles, permettant aussi, l'orientation, la décision et la consolidation de la recherche au développement et de la vulgarisation en matière de drainage.

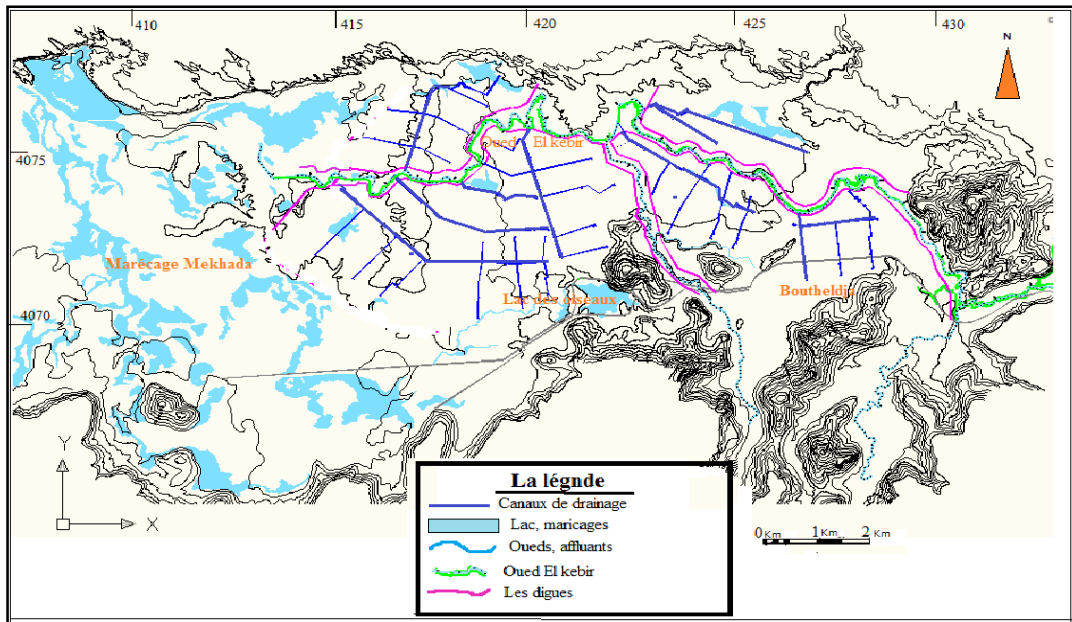
### **I.3.2 Historique du drainage et son rôle**

Avant l'indépendance de l'Algérie, la plaine de Boutheldja et El Tarf offrent une production agricole considérable, avec le simple drainage tertiaire réalisé manuellement par les agriculteurs et les cours d'eau naturels qui débouchent dans l'Oued El Kebir, ce dernier se jette directement dans la mer Méditerranée au niveau de la Mafragh (embouchure).

Pendant la colonisation, la France a aménagé ces plaines par la création des fossés et gardé le réseau hydrographique pour développer l'agriculture dans cette région. D'après les habitants de la région, chaque année avant la première pluie d'automne les français ont utilisé des explosifs pour curer la Mafragh encombré par le sable de mer et de matériaux solides, par ce que la Mafragh est l'exutoire final du réseau hydrographique de la région et qui pose actuellement un grand problème en offrant un obstacle naturel à l'écoulement.

Depuis 1962 jusqu'à 1990 l'agriculture dans cette zone, a connue l'importante production rentable dans tout les types des cultures. Après, cette zone a été aménagée en 2006 dans le cadre d'un projet hydro-agricole par la création de réseaux des canaux de drainage à ciel ouvert en terre et la réalisation des digues sur les berges de l'Oued El Kebir (Figure I.12). L'abandonnement d'entretien des canaux de drainage durant presque 11 ans, la zone souffre de graves inondations notamment celle de Février 2012. Les superficies des terres agricoles emblavées ont été inondées et détruites par les eaux stagnantes plus de 12 jours et jusqu'à présent subissent la submersion par les fortes pluies. Enfin on constate que le drainage perde son rôle par l'abandonnement de l'homme, et ce n'est que l'entretien et la réhabilitation du système de drainage peuvent aider à résoudre ce problème.





b)

Figure I. 12 La plaine de Bouheldja en 1962 a) et après 2006 b) (Source : ENHYD, 2004)

### I.3.3 Conclusion

En Algérie la plupart des périmètres sont touchés par les problèmes des inondations et la salinisation à cause d'une déficience en matière de drainage. Surtout le drainage tertiaire « drainage à la parcelle » qu'il faudra réhabiliter. Les grands réseaux existent et sont périodiquement entretenus. Le drainage à la parcelle implique directement les façons culturales : résoudre en partie les problèmes d'engorgement des parcelles. De ce fait la réhabilitation des façons culturales, pratiquées périodiquement à des intervalles réguliers préalablement définis en fonction des sols et des cultures en place, est une nécessité vitale pour les sols. Par ailleurs, l'association des réseaux de drainage aux réseaux hydrographiques est une règle admise par tous les aménageurs.

**Chapitre II :**  
**Drainage et aménagement hydro-**  
**agricole**

## **Chapitre II. Drainage et aménagement hydro-agricole**

### **II.1 Notion générale de drainage agricole**

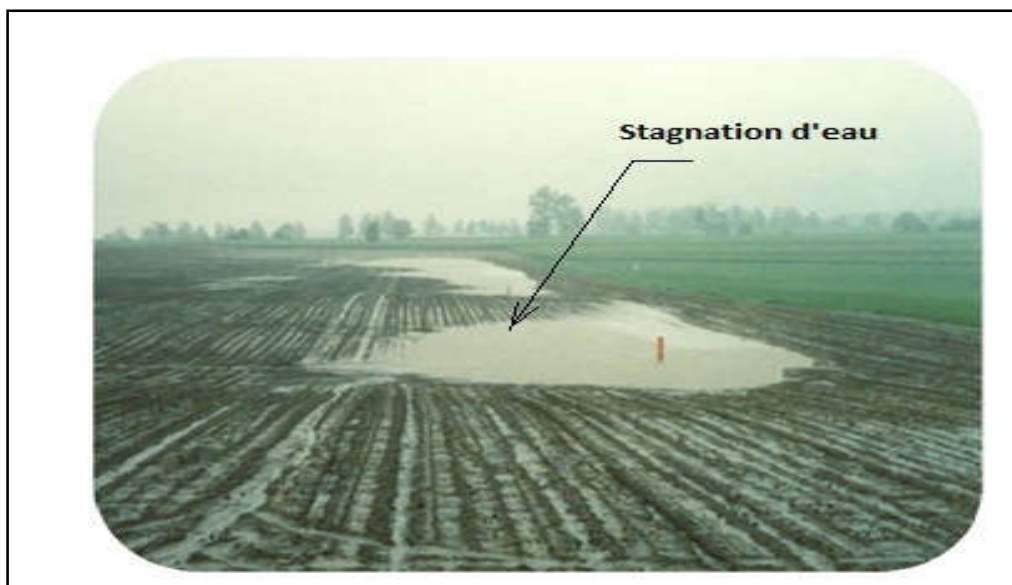
#### **II.1.1 Introduction**

La gestion de l'eau est le facteur de production le plus important en agriculture. Un excès d'eau aura pour conséquence l'anoxie des plantes (manque d'oxygène), des maladies et la pourriture des racines. Le drainage devra éliminer les surplus d'eau sans causer des problématiques et le mauvais drainage est à la base de la dégradation des terres agricoles. Dans plusieurs aménagements hydro-agricoles, la combinaison du système de drainage inadéquat et l'utilisation excessive de l'eau d'irrigation est la racine des problèmes de drainage.

Selon (Savoie V., 2009), le drainage englobe diverses techniques d'assainissement qui assurent l'élimination des eaux excédentaires du sol. Cela permet de cultiver et d'obtenir une production suffisante et de qualité sans causer des problématiques d'érosion et de submersion des terres en terrain plat (plaine). Par conséquent, les inondations et la connaissance du mouvement de l'eau sur et dans le sol est essentiel pour trouver les solutions aux problèmes de drainage.

Par exemple, si la nappe phréatique se tient haute, le drainage souterrain devrait être une solution à privilégier. Par contre, s'il y a un écoulement hypodermique, il faudrait utiliser des tranchées filtrantes ou des rigoles d'interception pour résoudre ce problème. Enfin, si après une pluie, de nombreuses zones humides ou de petites dépressions où l'eau stagne (Figure II.1), il faudrait envisager le drainage de surface. Ce dernier comporte trois phases essentielles :

- Collecte ou captage des eaux excédentaires pluviales.
- Acheminement d'eau par système de réseau de collecteur, canaux, fossés.
- Restitution au réseau hydrographique et exutoire.



**Figure II.1** Stagnation d'eau sur les terres agricoles

### II.1.2 Différents type de drainage agricole

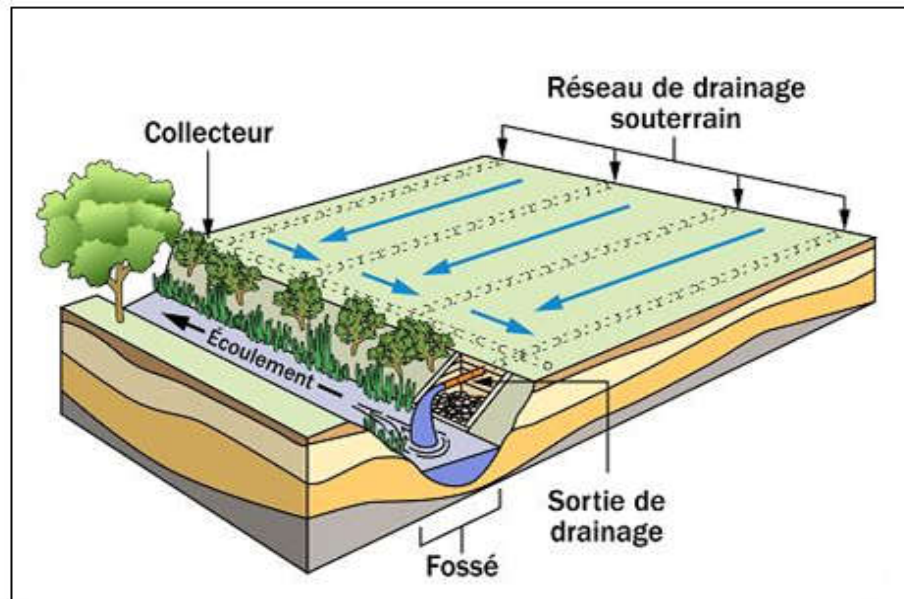
Le drainage agricole comprend 3 types essentielles :

- ✓ le drainage souterrain
- ✓ le drainage de surface
- ✓ le réseau hydraulique.

Les quels utilisés, ils sont tous importants dans l'aménagement d'un champ agricole.

#### a. Le drainage souterrain

Le drainage souterrain est une technique d'assainissement qui a pour but d'évacuer l'eau gravitaire du sol et d'abaisser la nappe phréatique à un niveau optimal. En pratique, on devrait réaliser un drainage souterrain lorsque la nappe phréatique se situe au courant de l'année à moins de 0,7 mètre de la surface du sol. La Figure II.2 représente un réseau de drainage souterrain.



**Figure II.2** Conception de réseau de drainage souterrain (Source : OMAFRA, Québec)

**b. Le drainage de surface**

Le drainage de surface vise plutôt à éliminer toutes accumulations des eaux de surface ainsi que l'écoulement hypodermique dans un délai raisonnable pour les plantes (moins de 24 heures). En pratique, on devrait réaliser un drainage de surface pour éliminer les petites dépressions et irrégularités du sol qui créent des zones humides néfastes aux cultures. Ce type de drainage est assuré par fossés ou canaux à ciel ouvert (Figure II.3).



**Figure II.3** Drainage de surface dans un champ agricole (Source : MAPAQ, Québec)

### c. Le drainage par réseau hydraulique

Le réseau est l'ensemble des structures hydro agricoles que l'on doit réaliser dans un champ pour évacuer de façon sécuritaire le surplus d'eau d'un champ. Il est souvent oublié dans l'aménagement des terres agricoles. Il comprend les cours d'eau, fossés, canaux, voies d'eau, raies de curage, avaloirs, rigoles, tranchées et/ou puits filtrants (Figure II.4).

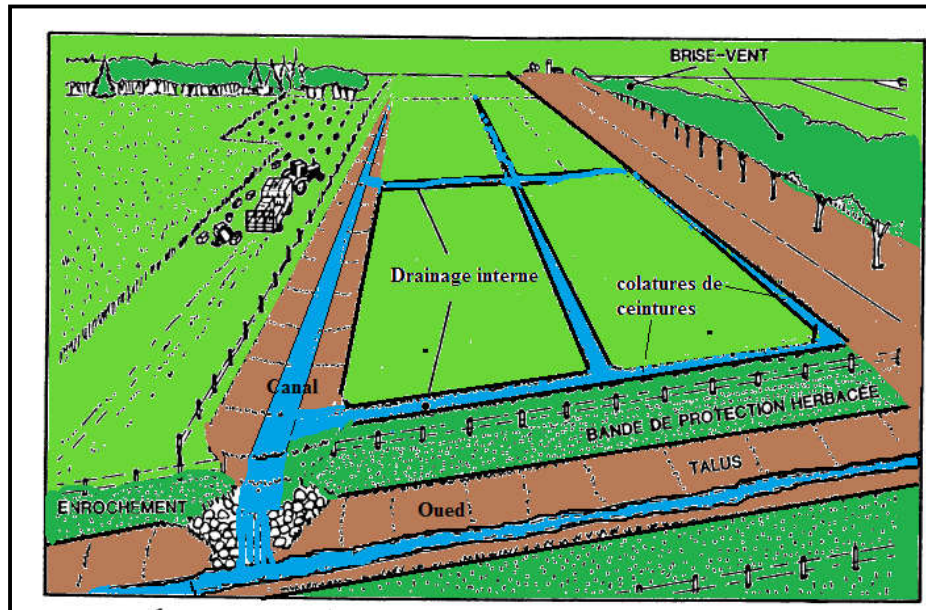


Figure II.4 Drainage par réseau hydraulique (Source : MAPAQ - Centre du Québec)

## II.2 Canaux de drainage agricole et leur envasement

### II.2.1 Introduction

La présence de sédiments dans les canaux au-delà de certaines limites constitue un frein à la fonction hydraulique et peut entraîner des crises dystrophiques. Leur retrait par curage à la pelle mécanique, bacs déverseurs, drague, devient alors un impératif. Le suivi du taux d'envasement rend compte de la vitesse d'envasement et permet de mieux planifier les programmes d'intervention. Ce taux peut représenter un bon indicateur de l'état du milieu et de ses fonctionnalités hydrauliques, biologiques et économiques.

La sédimentation excessive influe souvent sur les performances des canaux de drainage. Plusieurs auteurs ont relevé une relation directe entre la formation de la couche de sédiments dans les canaux et leur capacité hydraulique. Des études menées aux Philippines ont montré

que les pertes peuvent aller jusqu'à 30% en 10 ans et 50% en 15 ans pour les canaux en terre et peuvent donc avoir des effets économiques et sociaux considérables (Walinford, 1993 ; Heede et Rinne, 1990).

### **II.2.2 Conséquences de l'envasement dans les canaux**

Chaque année le fond vaseux des canaux de la zone d'étude évolué et se consolide avec occupation d'un volume considérable de la section du canal, s'il y a pas d'entretien exhaussé et réduise leurs sections les capacités d'écoulement se réduisent et apparaissent des risques d'inondation des terrains riverains. Une grande partie de budget de maintenance et de réalisation disponibles étant dépensés annuellement sur l'enlèvement des sédiments déposés (Depeweg et Mendez, 2002).

### **II.2.3 Techniques de limitation de l'envasement**

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour lutter contre l'envasement des canaux de drainage. Les meilleures sont celles qui limitent l'introduction de particules solides dans le canal, elles sont qualifiées de techniques "actives". Mais vue l'impossibilité d'éliminer complètement l'apport et le transport solide dans le canal, des travaux de curage doivent être alors entrepris périodiquement.

### **II.2.4 Conclusion**

La gestion appropriée des sédiments dans le réseau des canaux constitue l'un des défis majeurs des travaux d'amélioration, Ce dernier fait l'objet toujours d'un important investissement humain et financier en raison du travail de curage à réaliser périodiquement sur le réseau hydraulique par l'enlèvement des sédiments déposés. La sédimentation peut avoir des effets physiques et financiers importants. La situation est différente d'un site à un autre. Dans certains sites la sédimentation n'est pas un facteur limitant, dans d'autres, le dépôt est important et les dépenses de réhabilitation sont conséquentes. La maintenance doit faire l'objet d'une programmation et d'une régulation appropriée pour garder l'efficacité à moindre coût.

## II.3 Transport solide (envasement, sédimentation, comblement)

### II.3.1 Introduction

Le transport solide constitue par son importance un problème moyen en Algérie (dégradation des sols agricoles, alluvionnement des retenues). L'estimation de volume de sédimentations dans les canaux et leur durée d'accumulation interannuelle par conséquent l'évolution des lits des canaux nécessite une bonne connaissance des apports solides, donc on distingue trois phases pendant le déroulement du phénomène :

- *phase d'érosion*
- *phase de transport*
- *phase de dépôt ou sédimentation.*

Le transport solide depuis quelques années, représente un enjeu majeur dans les études hydrauliques. L'enjeu est tout d'abord économique puisque la connaissance du transport solide permet à la fois de gérer et d'optimiser la gestion des réseaux hydrauliques. De plus, l'enjeu est devenu environnemental car un oued ne doit que très peu modifier son transport sédimentaire, sa température, et sa constitution afin de garantir la continuité écologique et ainsi pouvoir permettre aux organismes vivants de se reproduire et de grandir (*Bonometti et al, 2010*).

### II.3.2 Généralités sur l'envasement

#### 1) *L'envasement*

##### **Qu'est-ce qu'une vase ?**

Le nom de vase est la désignation d'une large famille de sédiments fins, argileux, plus ou moins organiques, pouvant atteindre des teneurs en eau importantes. Elles contiennent une phase minérale dont la granulométrie s'étend des sables, aux argiles et aux colloïdes, une phase organique et une phase liquide. La vase peut se présenter aussi bien à l'état de suspension (Crème de Vase) que de sol cohérent (sédiment cohésif) présentant alors un caractère plastique, compressible et thixotropique. Une vase est généralement constituée des trois classes : argile, limon, sable fin (*Bessenasse, 2010*). L'envasement est un processus dans lequel des particules de natures différentes cessent progressivement d'être transportées par l'eau et se déposent sous forme de strates. Les dépôts meubles, laissés par ce facteur d'érosion sur les terrains qu'elles recouvrent accidentellement ou de façon permanente, sédimentent et se consolident. Ils se composent de particules organiques et minérales qui ont été emportées

par l'eau, et qui se déposent en strates successives par gravité. L'importance du phénomène d'envasement dépend de facteurs climatiques, écologiques, géomorphologiques et hydrologiques (Rampon, 1990). L'origine de l'envasement se trouve dans le dépôt de particules solides sur le lit d'un cours d'eau. Elles sont transportées, par charriage ou en suspension, pour se déposer dès que le débit devient faible. Leur mise en place se fait en trois étapes présentées sur la Figure II.5.

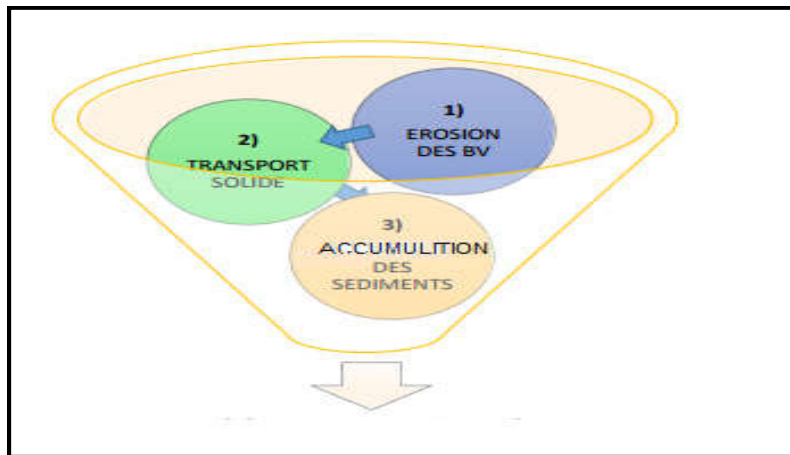


Figure II.5 Processus de l'envasement (Rampon, 1990)

### a) Érosion des bassins versants

L'érosion hydrique correspond à la séparation entre la particule et son support, sans inclure le transport et la sédimentation, même s'il se produit toujours un micro-transport. Ce matériau érodé est transporté plus ou moins rapidement jusqu'aux cours d'eau. Il comprend des particules fines en suspension, des sédiments grossiers charriés, et de la matière dissoute. Dans les régions humides et semi-arides, ce sont les crues d'automne qui causent le plus d'érosion.

### b) Transport solide

Une fois ce matériau solide arrivé dans les cours d'eau, il sera transporté par la force du courant. Les concentrations des sédiments sont proportionnelles aux cours d'eau et à l'importance des débits. Une proportion importante de ces sédiments sera piégée dans les retenues des barrages et sera transmise aux canaux.

### c) Accumulation des sédiments

Une fois l'eau arrivée aux zones à faible vitesse les sédiments commencent à se déposer, se tasser diminuant ainsi progressivement la capacité hydraulique du canal. La variation latérale de la vitesse des eaux de surface, entraîne une variation latérale du niveau de la vase déposée le long du canal. La vitesse est très faible au contact de la berge, elle croît pour atteindre une valeur maximale dans l'axe du canal. On remarque des dépôts plus importants aux berges par rapport au centre.

#### 2) *Sédimentation*

Le sédiment est la matière qui, après avoir été en suspension dans un liquide, se termine dans le fond par sa plus grande gravité. Ce processus est connu sous le nom de sédimentation. La sédimentation se produit lorsque l'accumulation des particules déposés après transportés par l'écoulement d'un cours d'eau.

Le mouvement des particules dans le cours d'eau dépend des caractéristiques physiques des grains (forme, taille, densité), du degré de cohésion du matériel du fond et de la capacité de l'eau à le mouvoir et à transporter ces particules. Les sables sont plus facilement érodables que les argiles par exemple. Les particules les plus fines nécessitent des vitesses d'écoulement plus fortes en fonction de leur cohésion; une fois libres, les particules fines tendent à être transportées en suspension. Les particules les plus grossières nécessitent des vitesses plus fortes en fonction de leur poids et de leur taille. Quand la vitesse de l'écoulement décroît et devient inférieure à la vitesse de mise en mouvement, le processus de sédimentation se met en place dans le canal.

Il existe trois types de comportement des particules pour le sédiment :

- ✓ Sédiments non cohésifs
- ✓ Sédiments cohésifs
- ✓ Sédiments mixtes.

#### 3) *Comblement*

Le comblement est un autre rôle physique dans les canaux et les ouvrages par le remblaiement. Ceci entraîne l'accroissement des végétations avec l'accumulation des sédiments, les embâcles à cause de l'abandonnement total de ces derniers. La figure II.6

représente un comblement d'un canal de drainage par les roseaux empêchant la bonne évacuation de l'eau dans la plaine Bouteldja.



**Figure II.6** Canal du système de drainage de la plaine Bouteldja envahi par les roseaux empêchant la bonne évacuation de l'eau (*source* : photo prise par l'auteur en 2016)

### II.3.3 Conclusion

Le transport sédimentaire dans les canaux est sans doute le domaine de l'hydraulique le plus mal connu. La plus part des lois de transport applicable en rivières ont été établies en canaux expérimentaux en régime uniforme (Herouin, 1998), or l'écoulement n'est jamais uniforme dans la nature. Entre autre, dans la négligence de ce domaine dans la littérature, nous présentons notre travail par une approche sur les conséquences des sédiments dans les canaux de drainage et leur réhabilitation par la modélisation.

## II.4 Aménagement hydro-agricole

### II.4.1 Introduction

Un projet d'aménagement agricole est une des étapes dans l'étude d'un plan de gestion des eaux pluviale et des eaux souterraines. Le suivi de l'érosion et de la sédimentation sont une problématique liée à la surveillance et l'entretien. C'est dans ce sens que l'aménagiste propose des solutions complètes et adéquates pour un aménagement agricole. Répondre aux besoins des agriculteurs encourage constamment à augmenter le rendement des terres cultivées et par conséquent leur priorité.

#### **II.4.2 Définition de l'aménagement des cours d'eau**

C'est une science qui consiste à entretenir et aménager les cours d'eau afin de maintenir leurs différentes fonctionnalités pour différents usages et de conserver leur bon état écologique, hydraulique. Dans ce sens l'efficacité d'un cours d'eau dépend de nombreux facteurs : la vitesse d'écoulement, la sinuosité, le débit, pente, section ....etc.

#### **II.4.3 Principes de base**

Dans tout projet d'amélioration des cours d'eau, l'étude et la géométrie doivent être effectués en respectant les principes suivants :

- La section du cours d'eau doit être suffisante pour évacuer l'eau sans provoquer d'inondation ou de dégâts.
- Tout aménagement ne devra pas provoquer d'érosion dans le lit du cours d'eau ou sur les berges par conséquent modifie de la section d'écoulement, la perte des terrains riverains, le transport de sédiments, l'ensablement ou l'envasement de la partie en aval du cours d'eau.
- Les talus du cours d'eau et la section d'écoulement devront être les plus conformes possibles pour que le cours d'eau conserve ses règles de débits et volumes de versement.
- Les coûts de construction et d'entretien devront être minimisés.

#### **II.4.4 Aménagement hydro-agricole de la plaine d'El Tarf et Boutheldja**

Les tronçons de réseau de drainage confiés aux paysans rencontrent souvent un manque d'entretien. Depuis que la gestion des périmètres est confiée aux usagers, les agriculteurs sont maintenant responsables de la maintenance des infrastructures hydrauliques tertiaires (Vandersypen et al, 2007). Puisque les fonds et l'attention des paysans sont majoritairement dirigés vers l'irrigation, plusieurs périmètres irrigués ont des systèmes de drainage défectueux (Smedema et Ochs, 1998). Les drains bouchés demandent régulièrement l'investissement de fonds pour le curage alors que ce problème pouvait être évité par un simple entretien continu. La nonchalance habituelle de la négligence en maintenance est devenue une habitude de construire-négligence-reconstruire. Cela entraîne des contraintes budgétaires qui ne peuvent pas être une option pour le futur (Huppert et al, 2003). Le succès des projets d'irrigation et de drainage est fortement lié à la création d'un environnement favorable. Cette réussite attire les

agriculteurs à s'engager et à continuer les activités proposées (Schultz et De Wrachien 2002). Plusieurs études ont pris en compte les problèmes de drainage et l'ont associé à l'irrigation (Vandersypen et al, 2007; Daniele De Wrachien et Feddes, 2004; Schultz et De Wrachien, 2002; Smedema et al, 2000 ; Aslam H. et al, 2019).

Toutefois, par nos recherches bibliographiques, il semble que sur le point de vue du paysan agriculteur (le premier concerné), la problématique du drainage est importante et reste insuffisamment exploré. Ainsi pour inciter ces paysans à entretenir les drains, il est d'une importance capitale de connaître leurs perceptions individuelles du réseau de drainage et de ce qui les inciterait à s'engager personnellement dans la maintenance de ces derniers. D'où l'intérêt de cette étude qui cherche à mettre en évidence la simulation du transport sédimentaire par conséquent l'évolution du fond des canaux de drainage et l'effet de la modélisation sur la réhabilitation de ces derniers.

Les plaines de Bounamoussa et d'El Kebir de la wilaya d'El Tarf ont bénéficié en cours de l'année 2006 de projets hydro-agricoles. Ces projets comprennent l'irrigation, l'assainissement et la protection contre les crues. L'aire d'étude de projets est constituée de la plaine de l'oued El Kebir et de ses principaux affluents. Il s'étend depuis l'aval de barrage Mexa à l'est jusqu'au confluent des oueds Kebir- Est et Mafragh qui se jette dans la mer. La longueur totale du cours d'eau d'El Kebir, traversant le périmètre d'El Tarf, représente 60 km environ.

Actuellement, suite aux projets entrepris en 2006, le drainage de la zone d'étude (plaine de Bouteldja) se fait par un réseau des canaux ouverts avec une longueur totale de 29635 ml. Les canaux débouchent en général par gravité dans l'oued El Kebir.

Pour la protection de ce réseau contre la submersion, des digues ont été construites. L'établissement de ces digues comprendra les travaux de faucardement et de curage de l'oued El Kebir et de ses affluents principaux.

### **1. Les conséquences de cet aménagement**

Jusqu'à présent la plaine de Boutheldja subie la submersion des terres agricoles par les eaux pluviales. Les causes peuvent être :

- L'absence d'entretien par curage des canaux de drainage depuis leur réalisation.

- Le mal ordonnancement des travaux tel que l'implantation de l'endiguement au niveau d'oued El Kebir de part et d'autre avant le curage et le recalibrage de l'oued El Kebir.

## **2. Conclusion**

Les aménagements hydro-agricoles semblent être un des moyens de modifier ces perspectives, en raison des avantages multiples qu'ils présentent : d'une part, ils permettent de protéger une partie des cultures contre les aléas climatiques et de diversifier les cultures ; d'autre part ils participent dans la mise en valeur des terres agricoles. Dans l'ensemble, l'entretien et la réhabilitation des aménagements hydro-agricoles restent un mot clé dans le développement durable de la région.

## **II.5 Diagnostic du réseau de drainage de la zone d'étude**

### **II.5.1 Introduction**

La plupart des concepteurs de réseau de drainage n'examinent pas et n'évaluent pas les performances de leur conception sur terrain. Selon Brice M. (1998), avant d'entreprendre les travaux de réhabilitation du réseau de drainage, il est important de déterminer l'efficacité du système ancien par le contrôle des écoulements de surface, et plus précisément l'évolution morphologique du fond des canaux.

### **II.5.2 Diagnostics préalables des canaux de drainage de la plaine**

Un bon diagnostic commence tout d'abord par la consultation, lorsque disponible des documents suivant :

- les photographies aériennes, infrarouges pour localiser les zones de mauvais rendement
- les relevés topographiques afin de localiser les zones potentielles de mauvais drainage (dépression, écoulement hydrodermique, etc.).
- Carte de sol et perméabilité : afin d'évaluer le potentiel et la limite des sols.

L'analyse de cette information donne la possibilité de savoir si le problème est agronomique ou dû au drainage.

Dans ce contexte, nous avons pu obtenir d'après Agence Spatiale Algérienne et Ministère des Ressources en eau la photo satellitaire infra rouge de la zone d'étude pendant et après

l'inondation de février 2012 (Figure II.7 et Figure II.8). Cette inondation a été causée par les fortes pluies et durant cet événement la hauteur de pluie journalière avait atteint 104 mm.

Cette image nous a permis de cerner des zones dépressionnaires reconnaissables par la couleur bleu qui montre qu'il y a une certaine hauteur de submersion (Figure II.7).

Pour avoir plus de détails on a fait une enquête d'après les agriculteurs sur l'événement du février 2012. Selon eux, l'eau excédentaire a été évacuée dans le délai plus au moins raisonnable sur toutes les parcelles sauf celles adjacentes à l'oued El Kebir et au Lac des Oiseaux dont la submersion a duré six jours (Figure II.8). Ils ont souligné que même pour les événements pluvieux plus courants que celui de février 2012, la stagnation d'eau sur les parcelles adjacentes à l'oued El Kebir est devenue plus prolongée après l'endiguement de l'oued. D'après ces renseignements on a pu conclure que jusqu'à ce moment les canaux de drainage remplissaient plus au moins leur rôle de drainage de surface.



**Figure II.7** Photo satellitaire infra rouge de la zone d'étude (Inondation février 2012). La zone d'étude est délimitée par le trait en vert. (Source : Agence Spatiale Algérienne et Ministère des ressources en eau)



**Figure II.8** Photo aérienne Inondations de la plaine d'El Tarf avant et après l'inondation de février 2012. (Source: Agence Spatiale Algérienne et Ministère des ressources en eau ; Actes de l'Atelier).

Selon la carte pédologique de la région d'El Tarf (Figure II.9), le sol de la région d'étude est un sol de marécages imperméable ou de mauvaise imperméabilité par endroit (Figure II.10). Cette propriété du sol justifie le bon choix de drainage par les canaux ouverts (drainage de surface)

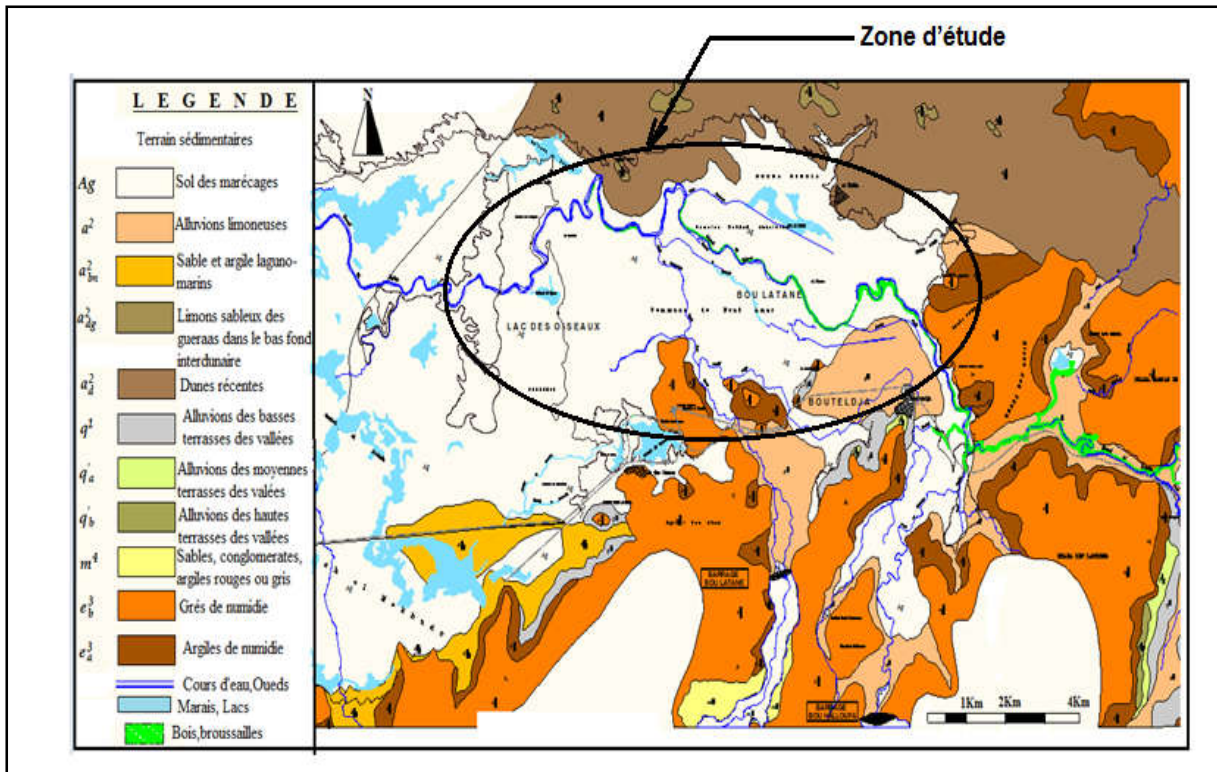


Figure II.9 Carte pédologique de la région d'El Tarf (Source : ENHYD, 2004)

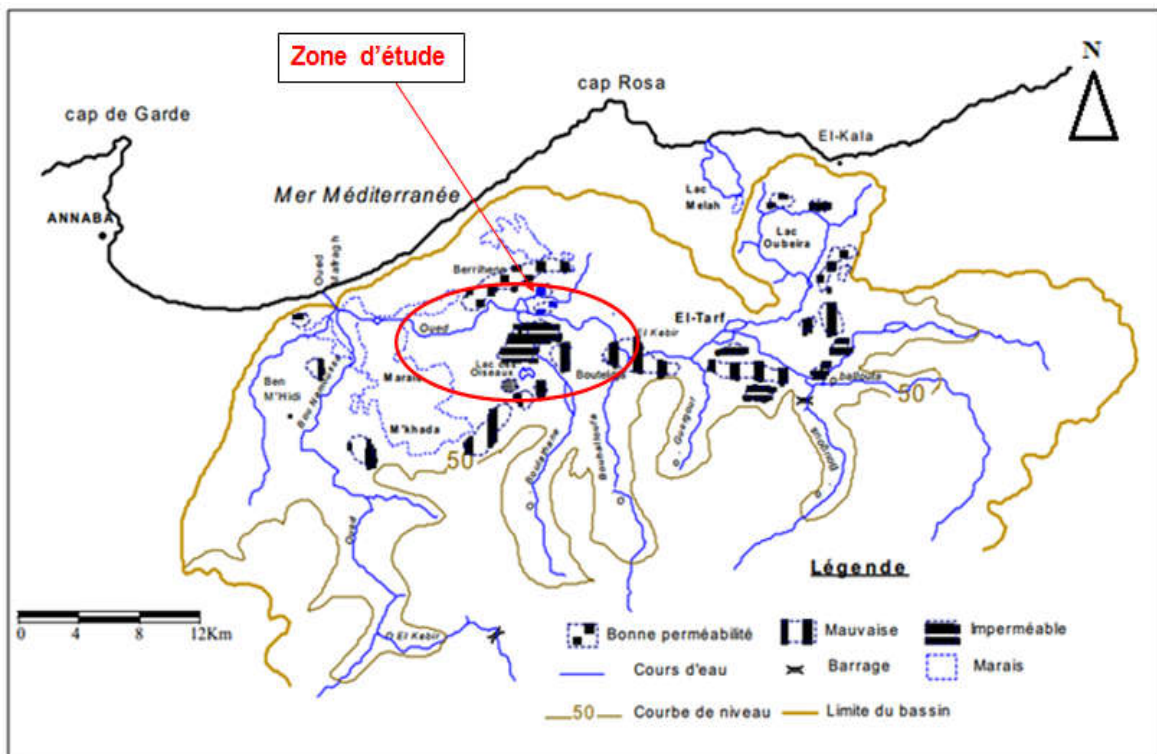


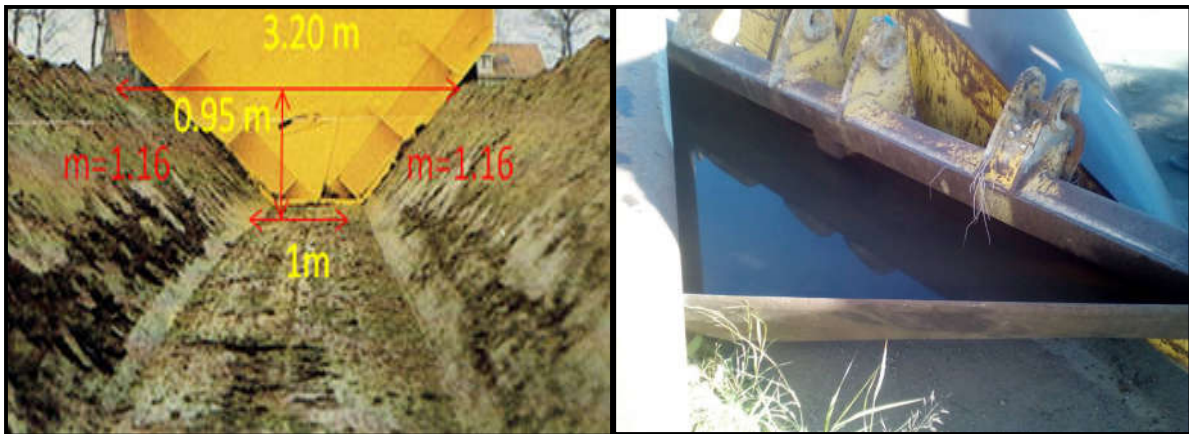
Figure II.10 Carte de perméabilité des zones inondables de la région d'El Tarf (Source: Labar S., 2003)

A l'étape suivante et dans le but de bien comprendre l'état du système de drainage, nous avons effectué en 2017-2018 des sorties sur terrain pour pouvoir diagnostiquer en temps réel l'état de ces canaux. Lors de ces sorties les constatations suivantes ont été enregistrées :

- Les canaux de drainage existants sont en terre de forme trapézoïdale avec pente très faible et contre pente dans quelques tronçons selon notre campagne de levé topographique par l'appareil topographique *Leica TS 06* et de nivellement par un niveau *Leica Na7*. Ces canaux débouchent dans l'oued El Kebir et oued Boulathane et sont équipés d'ouvrages de rejet, passage busé et passage en dalot sous digue (Figure II.11).
- Lors de la campagne de levé topographique et de nivellement on a remarqué que les dimensions des éléments géométriques de sections transversales des canaux ne correspondent pas aux celles du projet d'étude qu'on a consulté afin de connaître les pentes et la géométrie initiale des canaux. Suite aux recherches entamées d'après l'ONID (Office National d'Irrigation et Drainage Algérien) il s'est avéré que lors de travaux de la réalisation des canaux en 2006, l'excavateur avait utilisé un engin de godet dont les dimensions n'étaient pas en conformité avec celles imposées par le projet d'étude. Par exemple, la pente des talus a été réalisée avec  $m=1,16$  au lieu de 1,5 selon l'étude (Figure II.12). Ceci est très important pour la suite de notre étude car, dans certains cas, elle se base sur la géométrie initiale des canaux. D'autre part, la capacité hydraulique d'écoulement dans les canaux réalisés est inférieure à celle projetée.



**Figure II.11** Ouvrage de rejet, passage busé sous digue muni d'une vanne à clapet circulaire ( $\text{Ø}1500\text{mm}$ ), (photo prise en 2017)



**Figure II.12** Gabarit de godet d'excavation utilisé lors des travaux de réalisation de projet des canaux de drainage (*source* : Entreprise Hydro-Aménagement, Alger, 2006).

- Les canaux sont colmatés par le dépôt solide et l'accroissement des herbes au niveau de fond et berges. (Figure II.13)



**Figure II.13** Canal D05 proche de Lac des Oiseaux envahi par des végétations hydrophiles (*source* : photo prise le 25/03/ 2018)

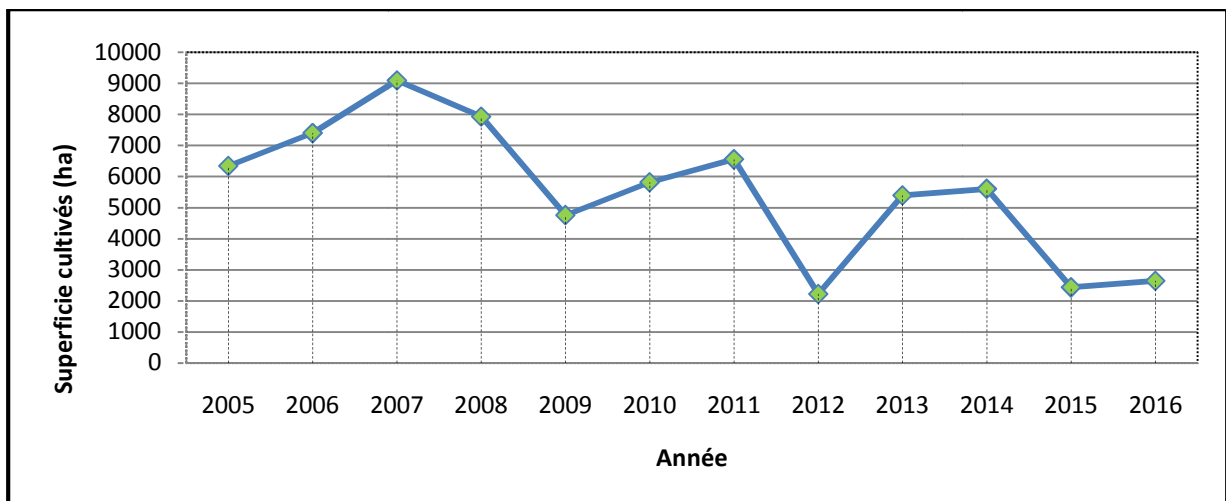
- Les canaux de drainage du site d'étude sont remplis d'eau de pluie durant les saisons d'hiver et du printemps et sèche pendant les saisons de l'été et automne (Figure II.14). D'autre part, la répartition saisonnière des précipitations favorise l'accroissement des plantes type hydrophile dans le fond des canaux surtout au cours de la saison hivernale et diminue dans la saison estivale.



**Figure II.14** État du canal D3 du système de drainage durant l'année hydrologique

Selon le service de DSA d'El Tarf les travaux de curage ou d'entretien quelconque des canaux de drainage n'ont pas été réalisés depuis leur réalisation.

L'absence d'entretien des canaux de drainage a laissé les empreintes sur l'activité agricole. D'après la courbe de la Figure II.14 qui représente la variation des terres cultivées durant la période 2005-2016, on constate que juste après la réalisation de drainage en 2006 la surface cultivée augmentait jusqu'à l'année 2008, depuis on observe une tendance à la diminution à cause de l'absence de curage des canaux de drainage.



**Figure II.14** Variation de terres cultivées durant la période 2005-2016. (Source: DSA, El Tarf, 2017)

### **II.5.3 Conclusion**

Il est du devoir de l'aménagiste et de l'hydrologue d'entamer un diagnostic préalable avant toute opération de réhabilitation du système de drainage. Le plus important est d'examiner et d'évaluer la performance de leur conception pour assurer la durabilité du système sans dégâts et submersion des terres agricoles. La maintenance du réseau de drainage agricole est sans doute de ne jamais l'abandonner, que ce soit de la part de l'agriculteur ou les services concernés.

Le diagnostic de l'état des canaux de drainage effectué en 2017-2018 a montré que les canaux sont fortement encombrés par le dépôt sédimentaire et des herbes suite à l'absence de travaux de curage depuis leur réalisation. On a constaté également que lors des travaux de réalisation des canaux en 2006 les dimensions des sections transversales n'ont pas été respectées par rapports aux dimensions projetées. Les canaux réalisés ont la moindre capacité hydraulique qui devait avoir selon le projet. Tous ses facteurs ont un certain effet sur l'écoulement et le processus du transport sédimentaire dans les canaux de drainage. Enfin le recours à la modélisation numérique s'avère nécessaire pour mieux comprendre ce genre de problème qui constitue une interface entre l'écoulement et le transport sédimentaire dans les canaux du système de drainage. Cela nécessite le recours aux modèles des écoulements et du transport sédimentaire, afin de mettre en place un modèle capable de calculer les quantités sédimentaires.

**Chapitre III :**  
**Synthèse et théorie des modèles**  
**d'écoulement et du transport**  
**sédimentaire**

## **Chapitre III. Synthèse et théorie des modèles de l'écoulement et du transport sédimentaire**

### **III.1 Revue bibliographique**

Les processus de transport sédimentaires dans les cours d'eau dépendent à la fois des paramètres hydrauliques, des caractéristiques physiques des bassins versant et des propriétés de sédiments (Braud et al, 2013). La connaissance de ces paramètres est donc essentielle en hydraulique fluviale et la modélisation hydraulique, en particulier aux différents modèles de la mécanique des fluides (modèles de Navier Stokes, modèles de Saint Venant 1D et 2D, etc. ...) décrivant aussi la propagation des écoulements dans les cours d'eau. Plusieurs modèles ont été développés dans la littérature, tels que les modèles empiriques, conceptuels et numériques pour la quantification du transport sédimentaires dans les rivières et dans les canaux Bagnold, 1966; Rodi, 1981; Graf, 1987). Donc il est nécessaire de se rendre à l'utilisation à la modélisation du transport sédimentaires qui devient actuellement un instrument incontournable.

Plusieurs recherches ont été étudiés au sujet de l'écoulement et la sédimentation dans les bassins versants et barrages (Bessenasse M, 2010 ; Lukasz B, 2013 ; Remini B, 2015) et d'autres les ont étudiés dans les canaux de différentes formes (Husheng Lin, 1993 ; Cherif EL Amine, 2010; Malavoi, J-R and Recking, 2011; Ochiere H.o, 2015 ; Yang ho Song 2018 ; Hyung S. K, 2019).

En Algérie, de nombreux chercheurs ont développé des relations liant le transport solide aux facteurs géomorphologiques et climatologiques pour certains bassins algériens (Achite et Meddi, 2005 ; Touaibia et al, 2001 ; Belarbi et al., 2018).

Dans les années 1950, plusieurs méthodes de recherche ont été principalement basées sur l'observation et la modélisation physique. Les premières tentatives d'application de modèles mathématiques associées à des modèles expérimentaux issus d'essais au laboratoire se sont intéressées à l'étude du transport solide dans les rivières et leurs processus morphologiques. En 1970, les recherches se sont intensifiées et élargies pour établir de nouvelles méthodes. Depuis, les modèles de Cunge (1986) et Wu (2002) ont été appliqués à des études de transport sédimentaire dans les rivières. Plus récemment, de nombreux modèles de Van Rijn (1986), Wang et Wu (2004), Jia et Wang (1999), Wu (2000) et d'Aslam H. et Andrew E. (2019) ont été développés pour simuler les processus du transport sédimentaire et des

changements morphologiques dans les canaux, à la fois en laboratoire et en terre nature.

La quantification du transport sédimentaire dans les cours d'eau et canaux est une tâche de grande importance en hydraulique fluviale. Dans ce contexte, de nombreuses recherches ont été effectuées permettant de résoudre de nombreuses problématiques autour du développement des modèles de transport complexes (Plecha et al, 2011). Les phénomènes d'écoulement et du transport sédimentaires dans les canaux en terre sont caractérisés par la présence de la turbulence, par la variation de la surface libre, par le changement du lit, par l'interaction de phase, etc. Les problèmes de conception et de maintenance des canaux stables dans le sol alluvions sont fondamentaux pour tous les réseaux de drainage et d'irrigation. La recherche des principales caractéristiques des canaux stables a commencé avec les travaux de Kenneth Y.H. Smith 1986. Par la suite, différentes théories ont été développées, ils ont été utilisées partout dans le monde, tous supposent que les conditions d'écoulement sont uniformes et stables. Benkhaled et Remini, (2003) ; Demmak (1982) ; Meddi *et al* (1998) ; Xi Wei *et al* (2019) ont développé des modèles d'estimations de débit solide en fonction de concentration des sédiments en suspension et de débit liquide sur la base de mesure directe du taux d'envasement des barrages ainsi que les mesures de concentration au droit des stations hydrométriques.

### III.2 Modèles numériques en hydraulique fluviale

La compréhension physique et la simulation numérique avec des modèles mathématiques de l'écoulement de l'eau et du transport de sédiments dans les cours d'eau, ont fait beaucoup de progrès au cours des dernières années. Ces progrès ont conduit à une augmentation de l'utilisation de ces modèles numériques, mais ceci a soulevé de nouvelles interrogations au niveau de la recherche. Pour la modélisation du transport sédimentaire, deux modèles mathématiques peuvent être utilisés pour décrire l'écoulement diphasique eau/sédiment. Le premier est le modèle à deux fluides considérant l'eau et les sédiments comme deux fluides. Il établit la continuité, et la dynamique des équations pour chaque phase. Le second est le modèle de diffusion décrivant le mouvement des particules de sédiments à un phénomène de diffusion dans le flux de l'eau. Il établit donc les équations de continuité et de mouvement pour le mélange eau/sédiment et l'équation de transport (diffusion) pour les particules de sédiments.

Les progrès et les nouvelles approches proposées au cours des dernières années ont prescrits

des améliorations. Beaucoup de modèles ont été établis pour répondre aux différents problèmes rencontrés dans la nature, notamment la simulation du transport sédimentaires non cohésifs et cohésifs, l'élargissement du canal et méandres, la rugosité, la turbulence, la présence de végétation. D'autre part, de nombreux modèles tridimensionnels (3D), bidimensionnels (2D), et unidimensionnels (1D) ont été développés afin de prendre en compte la phase solide de l'écoulement. Les modèles 1D simulent l'écoulement et le transport sédimentaire dans le sens de l'écoulement d'un canal (section droite). Ils sont utilisés pour des études de sédimentation à long terme dans les rivières, les réservoirs, estuaires, etc. Dans le cas où la variation verticale des paramètres hydrodynamiques dans un cours d'eau est suffisamment petite, un modèle 2 D peut décrire de façon approximative les paramètres par une profondeur moyenne. Il existe 2 types de modèles bidimensionnels : les modèles bidimensionnels verticaux (2DV) tel que celui proposé par Van Rijn (1993) et les modèles bidimensionnels horizontaux (2DH) tel que celui de Struiksmas and Crosato (1989). Le modèle 2DV a été appliqué pour la première fois pour le calcul de la sédimentation et la migration d'une tranchée dans un canal de laboratoire. Le modèle 2DH conçu pour le calcul de l'évolution du fond dans les canaux (Wang and Wu, 2004), pour le calcul de la répartition du transport sédimentaires dans les rivières.

### **III.3 Modèles à plusieurs classes granulométriques**

Afin de surmonter les limitations des modèles simples, plusieurs auteurs ont proposé des descriptions plus complètes des compartiments sédimentaires (Karim et Kennedy, 1982). Dans chacun de ces compartiments, la composition granulométrique est décrite comme une combinaison d'un nombre fini de courbe granulométrique de base. Au niveau de chaque couche granulométrique du lit se font les échanges entre les sédiments et l'écoulement. Cette couche change d'épaisseur et de composition en fonction de l'évolution des débits solides (Dreano et al, 2008). Ces modèles sont donc intrinsèquement conservatifs au niveau d'une classe granulométrique. Ils permettent de rendre compte des phénomènes liés à la granulométrie étendue que sont le tri granulométrique et le pavage. De plus, ces modèles offrent l'avantage de supposer pour chaque classe granulométrique un mode de transport spécifique. Il est indéniable que ce type de modèle apparaît conceptuellement plus proche des phénomènes physiques.

### III.4 Équations fondamentales pour le calcul d'écoulement et de transport sédimentaire

Le transport sédimentaire et le débit d'eau sont interdépendants et ne peuvent pas être séparés. Pour un phénomène unidimensionnel sans modification de la forme de la section, cette relation peut être décrite par les équations 1, 2, 3, 4.

Beaucoup de modèles ont été établis pour répondre aux différents problèmes rencontrés dans la nature, notamment la simulation du transport sédimentaire non cohésifs et cohésifs, l'élargissement du canal et méandres, la rugosité, la turbulence, la présence de végétation, etc. (Gharbi M, 2016). Les modèles de transport sédimentaire sont très diverses et toujours démarrent par la résolution des équations unidimensionnels de base Saint-Venant équation (1) pour la phase liquide et la loi de conservation de la masse des sédiments et déformation du lit par l'équation bidimensionnels d'Exner (Equation (4) pour la phase solide.

Nous présentons ci-dessous les équations unidimensionnelles de Saint-venant

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = ql \quad (\text{III.1})$$

Avec  $ql$  : débit latéral

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t} \left( \frac{Q^2}{S} \right) + gS \frac{\partial h_e}{\partial x} - gS \frac{\partial h_f}{\partial x} + gS J = 0 \quad (\text{III.2})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial x} + g \frac{\partial h_e}{\partial x} - gS \frac{\partial h_f}{\partial x} = g(I - J) \quad (\text{III.3})$$

Avec. I: la pente du fond et J: la perte d'énergie donnée par la formule  $J = \frac{Q^2}{K^2 S^2 R^3}$  où  $K$  est le coefficient de Strickler et  $R$  est le rayon hydraulique.

#### III.4.1 Conservation de la masse des sédiments et déformation du lit

La conservation de la masse de la phase solide est traduite par l'équation d'Exner suivante :

$$(1 - p) \frac{\partial h_f}{\partial t} + \frac{\partial Q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{sy}}{\partial y} = 0 \quad (\text{III.4})$$

Où  $p$  : porosité du fond,  $\partial h_f$  : variation du fond,  $\partial Q_{sx}$ ,  $\partial Q_{sy}$  : variation de débit solide dans le sens  $x$  et dans le sens  $y$ .

#### III.4.2 Équation dynamique : débit solide et capacité de transport

Pour chaque type de sédiment, on doit distinguer le débit solide observé en volume par unité de largeur noté  $q_s$  (5), et la capacité de transport de l'écoulement en volume par unité de largeur notée  $q_s^*$ , appelé également débit solide à saturation. Le débit solide n'est pas nécessairement égal à la capacité de transport, en particulier s'il n'y a rien à transporter. Le débit solide est égal à la capacité de transport lorsque le taux d'érosion est égal au taux de dépôt (les taux sont ici des débits par unité de temps).

$$q_s = q_s^* (d, \tau^*) \quad (III.5)$$

### III.4.3 Équation gouvernante d'écoulement

Pour analyser le débit liquide nous avons retenu la formule de Manning-Strickler (6)

$$U = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (III.6)$$

Avec  $U$ : la vitesse d'écoulement,  $n$ : coefficient de rugosité de Manning qui dépend de la nature des parois des canaux ;  $1/n = k$  (coefficient de Strickler),  $R$ : rayon hydraulique,  $I$ : la pente du fond. (Figure III.1)

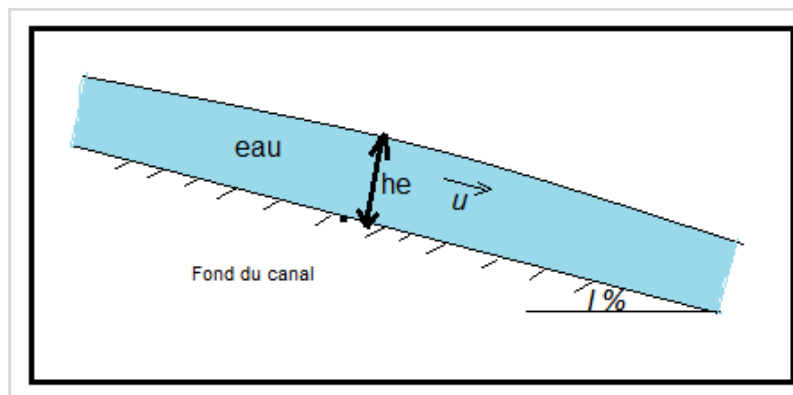


Figure III.1 Section longitudinale d'un canal (source : Mendez, 1998)

### III.5 Mécanisme de transport solide

Le transport solide constitue par son importance un problème moyen en Algérie (dégradation des sols agricoles, alluvionnement des retenues). L'estimation du volume de sédimentation dans les canaux et leur durée d'accumulation interannuelle soit par conséquent l'évolution des lits des canaux qui nécessite une bonne connaissance des apports solides. Donc on distingue trois phases pendant le déroulement du phénomène : phase d'érosion, phase de

transport et phase de dépôt ou sédimentation, Hjulström (1935) illustre bien le comportement des particules en fonction de leur taille et la vitesse du courant (Figure.28).

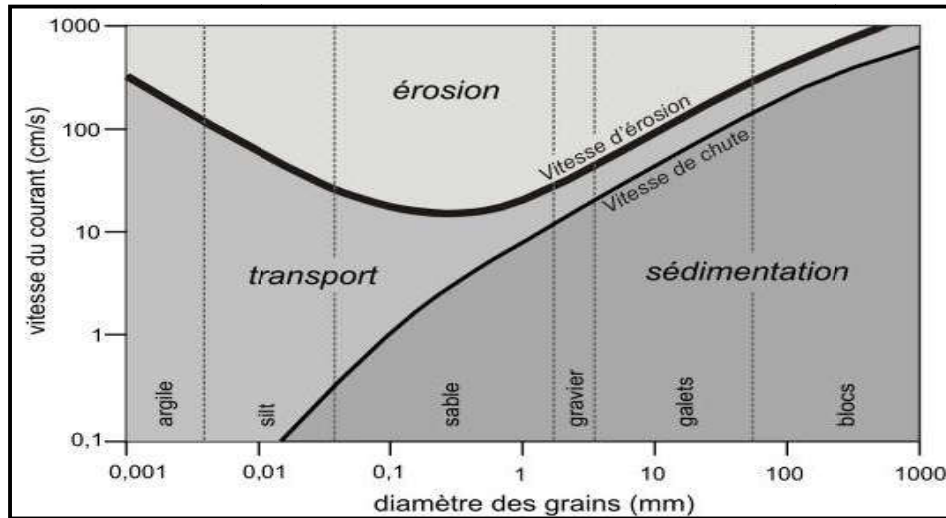


Figure III.2 Diagramme classique de Hjulstrom (1935)

### III.5.1 Modes de transport des sédiments

Les sédiments sont transportés selon la Figure III.3, soit :

- \* par **charriage** : les particules restent en contact étroit avec le fond et se déplacent en glissant, roulant ou sautant. Ce mode de transport concerne les particules relativement grandes (supérieures au millimètre).
- \* en **suspension** : les particules restent occasionnellement en contact avec le fond. Elles se déplacent par bonds et restent souvent entourées d'eau. Ce mode de transport concerne les particules relativement fines.
- \* en **charge dissoute** : les particules ne sont jamais en contact avec le fond et se déplacent en étant emportées avec l'écoulement. Ceci concerne les éléments très fins.

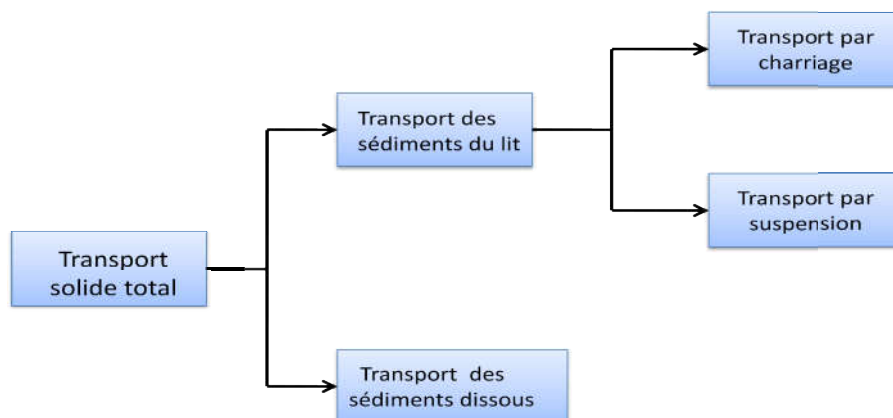
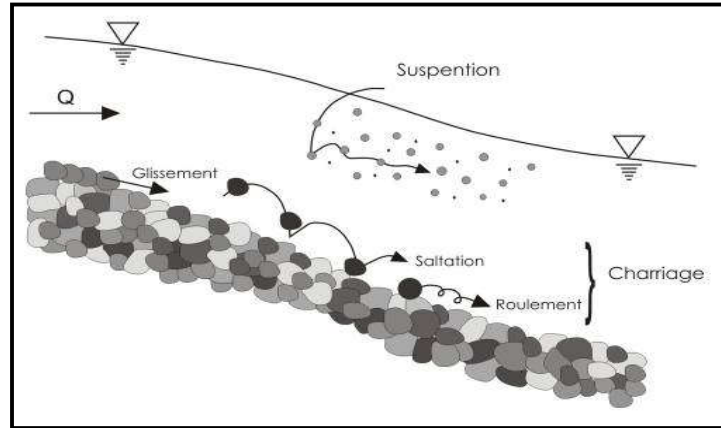


Figure III.3 Mode de transport solide (source : Mendez, N, 1998)

Il existe différents modes de transport sédimentaire dans les cours d'eau selon Recking (2006), elles dépendent essentiellement de la morphologie des cours d'eau et des terrains traversés (Figure III.4).



**Figure III.4** Modes de transport des particules dans un canal (*source* : Recking, 2006)

### III.5.2 Étude des formations de fond : les dunes et les rides

La compréhension de la dynamique des reliefs formés au niveau des fonds des canaux est encore limitée en raison du couplage complexe entre l'hydrodynamique, le transport sédimentaire, l'évolution des formations de fond, et la dépendance en temps ainsi que la variabilité spatiale. Plus généralement, les formes de fond peuvent être différentes (rides, dunes, anti dunes... etc) en fonction des caractéristiques de l'écoulement (Andreotti et al., 2009). Plusieurs études se sont intéressées à l'étude de la dynamique des formations de fonds. Au Japon (Kakinoki et al, 2006 ; Hyung, S. K et al, 2019) ont réalisé l'expérience sur la formation de bancs de sable et leurs processus d'évolution dans un écoulement transitoire en fonction des deux processus. Les observations ont révélé quelques résultats notables, sur l'effet des conditions d'écoulement transitoire (contraintes de cisaillement, érosion, dépôt, etc.) sur le mécanisme de développement de banc de sable. Tuijnder (2010) a cherché à identifier une relation entre la géométrie des dunes et le volume de sédiments mobiles. Il a étudié l'influence du transport sédimentaire sur la formation des dunes, en proposant une loi pour déterminer les dimensions des dunes. À partir de la formation de ces dunes il a montré que ceci influence directement la rugosité du fond. (Charru et al, 2004; Lajeunesse et al, 2010) ont réalisé des études expérimentales dont l'objectif est d'étudier l'influence de la distribution des tailles de grains sur le transport par charriage, dans la configuration simple d'un lit de sédiment composé de deux tailles de sable uniquement (Recking et al, 2008). Il est à noter que la rugosité est un paramètre clé dans la modélisation du transport sédimentaire dans les cours d'eau, a un effet considérable sur les quantités de sédiments transportées ainsi que sur les changements morphologiques au niveau des canaux.

### III.5.3 Notions classiques de transport solide

#### 1) Capacité de transport

Le débit solide est le volume de matériaux granulaires transporté par le courant par unité de temps. Il s'exprime en m<sup>3</sup>/s. Nous présenterons par la suite des formules empiriques d'estimation de débit solide. Pour une vitesse donnée, le cours d'eau a une capacité de transport solide, liée à l'énergie de l'eau. Le cours d'eau transporte toujours autant de matériaux qu'il est capable de transporter, à condition bien sûr que ces matériaux soient disponibles sur place, c'est-à-dire sur le fond ou sur les berges. Dans cette situation, le tronçon de cours d'eau considéré en équilibre dynamique si le débit solide entrant égale au débit solide sortant. On dit aussi que le taux d'érosion est égal au taux de dépôt. Si le débit solide sortant est inférieur, il y a dépôt dans le tronçon considéré, si le débit solide sortant est supérieur il y a érosion du fond ou des berges dans le tronçon considéré. La capacité de transport adimensionnelle est donnée par l'équation suivante :

$$qs^* = \frac{qs}{\sqrt{(s-1)g.d^3}} \dots\dots\dots (III.7)$$

Où : qs est le débit solide spécifique en (m<sup>3</sup>/s) par mètre de largeur de lit. s : densité relative des grains (s = 2.65), d : diamètre du grain

**2) Diamètre d'une particule**

Le diamètre adimensionnel d'une particule d\* (appelé aussi le paramètre de mobilité) représente l'influence de la gravité, de la densité et de la vitesse

$$d^* = d \left( (s - 1) \frac{g}{\nu^2} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (III.8)$$

Où  $\nu$  est la viscosité cinématique  $\nu = 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s si la température est 20°C.

**3) Vitesse de sédimentation ou de chute**

Pour déterminer  $U_s$  (vitesse de chute) nous pouvons considérer le bilan des forces auquel est soumise une particule solide dans un fluide au repos. Nous constatons alors qu'elle se déplace une certaine vitesse, qui atteint une valeur limite lorsque la résistance que le liquide lui oppose devient égale à son poids apparent, Pour une particule de forme sphérique de diamètre d, nous pouvons évaluer  $U_s$  à l'aide la formule de Stokes.

$$U_s = \frac{(\gamma_s - \gamma) \cdot g \cdot d^2}{18\mu} \dots\dots\dots (III.9)$$

**III.5.4 Forces appliquées sur un grain posé au fond d'un canal**

En ce qui concerne la connaissance des conditions de l'écoulement dans lesquels est produit le déplacement des particules du lit, plusieurs études ont cherché à mettre en relation les forces de résistance et de mise en mouvement. La force tractrice a été, et elle reste encore, un paramètre de choix dans l'étude du transport de fond. En fonction de la force qui s'exerce sur le fond parallèlement à la ligne de charge du lit, elle est capable de mettre en mouvement les matériaux de fond. Pour étudier la possibilité de mise en mouvement d'un grain, considérons les différentes forces auxquelles il soumit (Figure III.5).

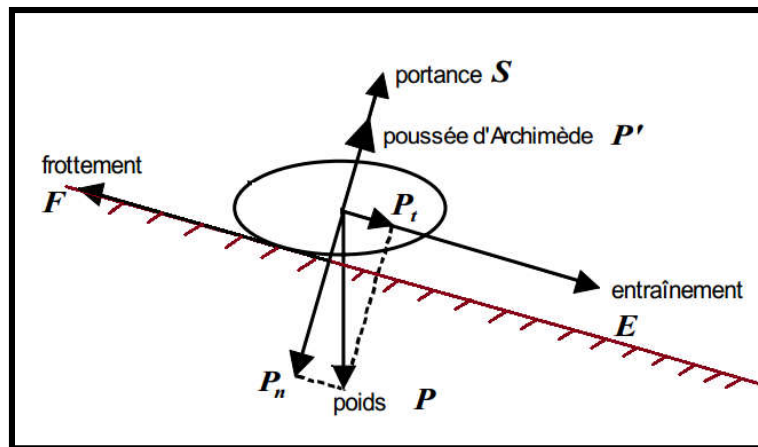


Figure III.5 Les forces appliquées sur un grain posé au fond d'un canal

- Si la particule est sphérique de diamètre  $d$ , son poids est :

$$P = \pi \gamma_s d^3 / 6$$

- La force de frottement engendrée par la composante normale du poids immergé :

$$F = \pi (\gamma_s \cos \alpha - \gamma) d^3 \operatorname{tg} \varphi / 6$$

- La force d'entraînement due à l'écoulement est proportionnelle à la section du grain

$$E = b \tau_0 d^2, \text{ où } b \text{ étant un coefficient de la forme et } \tau_0 \text{ contrainte tractrice.}$$

- La portance de la forme :  $S = c d^2 u^3 / 2g$ , où  $u$  étant la vitesse de l'eau au voisinage du fond et  $c$  un autre coefficient de forme du grain.

Au seuil de mise en mouvement la somme des forces par rapport  $x=0$  on a  $E = F - Pt$

$$E = b \tau_0 d^2 = \pi [(\gamma_s \cos \alpha - \gamma w) \operatorname{tg} \varphi - \gamma_s \sin \alpha] d^3 / 6$$

Où  $b \cdot \tau_0 \cdot d^2 = \pi \cdot (\gamma_s - \gamma w) \cdot d^3 \cdot \operatorname{tg} \varphi / 6$  si  $\alpha$  est petit:

$$\tau_0 = \pi \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot (\gamma_s - \gamma w) \cdot d \cdot (6 \cdot b)$$

Cette égalité sous forme adimensionnelle :

$$\frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma_w).d} = \frac{\pi}{6} \cdot b. \text{tg } \varphi$$

Où  $\tau_0 = \gamma_w.R.i$       d'où  $\tau^* = \frac{\tau_0}{(s-1).d} = \frac{R.i}{(s-1).d}$

Le premier terme est classiquement appelé paramètre de *Shields*. En 1936 Shields a proposé l'adimensionnels des forces motrices (rapport de force entre force de frottement du fluide et la force du poids submergé par des sédiments). Le nombre obtenu est appelé « Nombre de Shields »,

Noté  $\tau^*$  ou  $\theta$  :  $\tau^* = \frac{\tau_0}{(s-1).d} = \frac{R.i}{(s-1).d}$  (III.10)

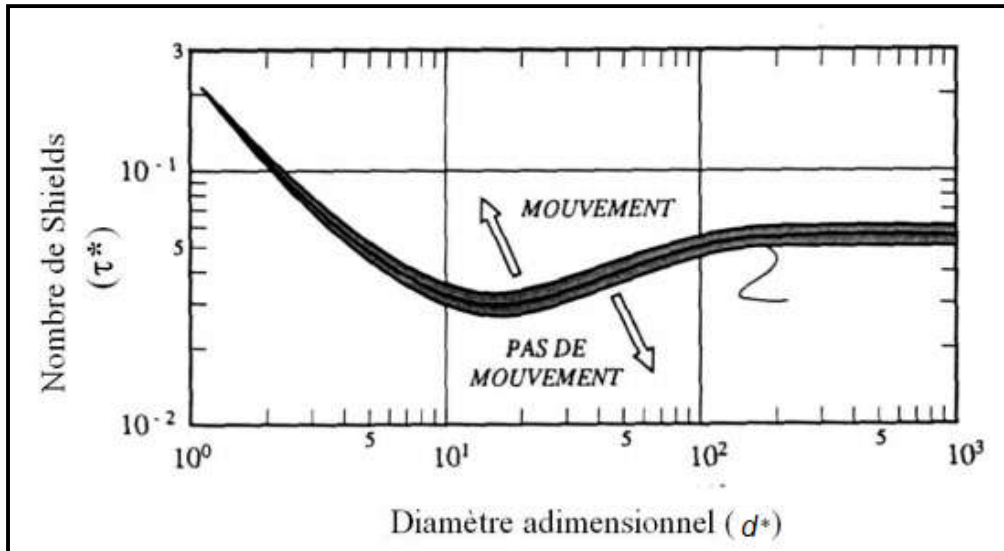
Où  $\tau_0$ : la contrainte de frottement exercée par l'écoulement sur le fond ;  $R$  : Rayon hydraulique ;  $s$  : densité relative des grains  $\approx$  (2.6 à 2.75) et  $d$  : diamètre du grain.

Shields a montré expérimentalement en 1936 que pour une granulométrie uniforme, la loi de mise en mouvement des grains pouvait s'exprimer par une simple relation entre  $\tau^*$  et le nombre de Reynolds du grain :  $R^* = U^*.d/\nu$

$$U^* = \sqrt{\tau_0/\rho_w} = \sqrt{g.R.i} \quad \text{(III.11)}$$

$U^*$ : est la vitesse de frottement près de fond et  $\rho_w$  la masse volumique de l'eau.

En 1984, Van Rijn propose une nouvelle méthode pour le calcul de la contrainte de cisaillement critique en se basant sur le diagramme de Shields (Figure III.6).



**Figure III.6** Diagramme de Shields : le paramètre de début de mouvement des particules ( $\tau^*$ ) et le paramètre de mobilité ( $d^*$ ) (Van Rijn, 1984)

Selon Ramette (1981), une classification pratique de la nature du mouvement (charriage ou suspension) par rapport aux formes du fond est la suivante :

- Pour  $\tau^* < 0,027$  : le grain de diamètre  $d$  est au repos, le fond est plat.
- Pour  $0,027 < \tau^* < 0,047$  il y apparition des tous premiers mouvements, mais pas assez pour générer un débit solide.
- Pour  $0,047 < \tau^* < 0,062$  : le grain est charrié sur fond plat.
- Pour  $0,062 < \tau^* < 0,25$  : le grain est charrié par dune.
- Pour  $0,25 < \tau^* < 2,5$  : le grain transporté par dunes en suspension.
- Pour  $\tau^* > 2,5$  : le grain est transporté en suspension sur fond plat.

### III.6 Formules de calcul de transport solide

Il n'y a pas de formule universelle de transport solide (Degoutte G, 2012) pour calculer le transport solide. Il existe plusieurs formules empiriques, mais la difficulté réside d'abord dans le choix d'une formule appropriée parmi les dizaines de formules disponibles, chacune étant contrainte à des conditions d'utilisation, à priori strictement limitées à celles qui ont prévalu lors de leur validation. Le premier paramètre exploré est celui concernant le domaine d'application des différentes formules de transport selon le mode de transport, soit charriage, soit suspension ou total limité par la contrainte de cisaillement du fond (paramètre de Shields ( $\tau^*$ ) et la taille de sédiment ( $d$ )). Parmi les formules disponibles on peut citer les suivantes : Smart et Jaeggi (1983), Schoklitsch (1962), Parker (1982), Van Rijn (1984), Engelund et

Hansen (1967) , Ackers et White (1973), Recking (2008). Le Tableau III.3 présente ces formules.

**Tableau III.3.** Formules de calcul de transport solide

Auteurs	Formules	Mode et domaine de validation
Formule de Smart et Jaeggi (1983)	$qs = 2.5 \cdot i^{0.6} \cdot q \cdot \left(i - \frac{dm}{12.1 \cdot y}\right)$	Transport par charriage, sable, sable fin
Formule de Parker (1982)	$qs = 11.2 \cdot \sqrt{g(s-1) \cdot d50^3} \cdot \frac{(\theta - 0.03)^{4.5}}{\theta^3}$	Transport par charriage, pente $\geq 1\%$
Formule de Schoklitsch (1962)	$qs = \frac{2.5}{s} \cdot i^{1.5} \cdot (q - qc)$ $qc = g^{0.5} \cdot 0.21 \cdot dr^{1.5} \cdot i^{-1.12} \quad dr = d_{16}$	Transport par charriage, pente $\leq 1\%$
Formule de Van Rijn (1984)	$qs = 0.053 \cdot \sqrt{g \cdot (s-1) d50^3} \cdot \frac{T^{2.1}}{D^{*0.3}}$ $d^* = dm \cdot \left[\frac{g}{v^2} \left(\frac{ys}{y} - 1\right)\right]^{1/3} \quad T = \frac{U_*^2 - U_{c*}^2}{U_{c*}^2}$ $U_* = \sqrt{g} \cdot \frac{u}{18 \log \left(\frac{4R}{d_{90}}\right)}$	Transport par suspension, limon; argile; sable fin
Formule de Recking (2008)	$qs = 14 \cdot \sqrt{g \cdot (s-1) d50^3} \tau_*^{2.45}$ $\tau_* = \frac{\tau_0}{(s-1) \cdot d} = \frac{R \cdot i}{(s-1) \cdot d} \quad s = \frac{ys}{yw}$	Transport par charriage, sable et gravier
Formule d'Engelund et Hansen (1967)	$qs = 0.05 \cdot k^2 \cdot R^{1/3} \cdot \sqrt{\frac{(s-1)}{g} d50^3} \cdot \tau_*^{5/2}$	Transport total, argile, sable. Avec pente faible
Formule d'Ackers et White (1973)	$qs = 0.025 \cdot \frac{q \cdot d35}{H} \left(\frac{Fgr}{0.17} - 1\right)^{1.5}$ $Fgr = \frac{1}{\sqrt{g \cdot (s-1) d35^3}} \left( \frac{u}{\sqrt{32 \cdot \log \left(\frac{10H}{d35}\right)}} \right)$	Transport total, sable fin, sable grossier, gravier

La plupart de ces formules donnent le transport solide sous forme un débit. Méndez (1998), de manière discrète, trouve le changement du fond pendant un pas de temps  $\Delta t$  en utilisant l'équation de continuité pour le transport sédimentaire:

$$h_s = \frac{(Q_{s(i+1)} - Q_{si})}{(1-p) B \cdot \Delta x} \cdot \Delta t \quad (\text{III.12})$$

Où  $h_s$  : épaisseur de sédimentation (m),  $B$  : largeur du fond (m)

### III.7 Modélisation du transport sédimentaire

La quantification du transport sédimentaire dans les canaux est une tâche de grande importance hydraulique fluviale. Dans ce contexte, de nombreuses recherches ont été effectuées permettant de résoudre de nombreuses problématiques autour du développement des modèles de transport complexes (Plecha et al, 2011). Les phénomènes d'écoulement et du transport des sédiments sont caractérisés par la présence de la turbulence, par la variation de la surface libre, par le changement du lit, par l'interaction de phase, etc. À l'heure actuelle, la plupart des modèles de transport sédimentaire ont adopté les hypothèses suivantes :

- Faible concentration des sédiments de telle sorte que l'interaction entre le flux et le mouvement des sédiments peut être négligée. Par conséquent, les équations de l'écoulement et d'advection diffusion des sédiments peuvent être résolues séparément.
- Le changement du lit est beaucoup plus lent que le mouvement des flux. Par conséquent, à chaque pas de temps le débit peut être calculé en supposant un lit « fixe ».
- Le mécanisme d'érosion et de dépôt en matière de lit est pris en compte par l'introduction de facteurs de correction de la capacité non uniforme de la formule de la capacité de transport de sédiment (Hergault, 2011). Généralement, les charges totales dans les directions longitudinales et transversales sont divisées en transport par charriage et transport en suspension :

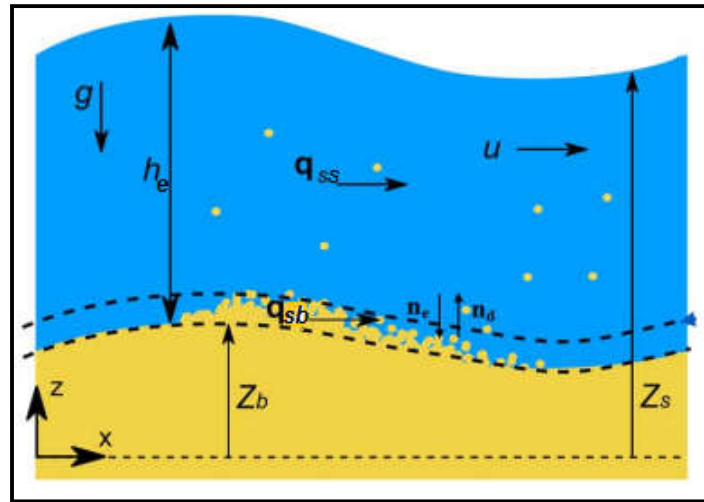
$$q_{st} = q_{sb} + q_{ss} \quad (\text{III.13})$$

Où  $q_{st}$  est le transport de sédiments total selon la direction,

$q_{ss}$  est le transport de sédiments en suspension selon la direction

$q_{sb}$  est le transport de sédiments par charriage selon la direction

La Figure III.7 nous renseigne sur la configuration de l'écoulement dans un canal.



**Figure III.7** Configuration de l'écoulement dans un canal

Différents logiciels ont alors été créés afin de pouvoir étudier non seulement l'hydraulique mais également le transport sédimentaire des cours d'eau. Parmi eux, on retrouve le logiciel HEC-RAS qui, outre les calculs d'écoulement permet d'étudier le charriage et la suspension des sédiments.

### III.7.1 Modèles hydro- sédimentaires du HEC-RAS

Dans ce paragraphe on teint à présenter les modèles hydro- sédimentaires du HEC-RAS car ce code de calcul est utilisé ultérieurement dans notre étude pour les simulations d'écoulement et du transport sédimentaire dans les canaux de drainage.

Le logiciel HEC RAS est un code de calcul unidimensionnel (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System).

Dans ce logiciel, les écoulements dans les cours d'eau sont modélisés de manière simplifiée par les équations de Saint Venant 1D, permettant de simuler l'évolution dans le temps et dans l'espace de l'axe hydraulique du cours d'eau des deux variables le débit  $Q$  et le niveau de la surface libre. Ce code fait l'hypothèse d'une répartition homogène des vitesses sur la section de l'écoulement. Ce logiciel résout les équations de Saint Venant 1D par la méthode de différences finies pour la simulation des écoulements à surface libre. Une description de ces équations est donnée dans le paragraphe III.4.1

HEC RAS permet des calculs de la ligne d'eau en régime permanent et non permanent. Il traite aussi des cas des écoulements de régime fluvial, torrentiel ou mixte.

Il permet aussi de modéliser le transport sédimentaire dans les rivières et des cours d'eau moindres. HEC RAS trouve ses domaines d'application pour la simulation des crues, la

simulation de la gestion des retenues d'eau et étude du transport des polluants, etc (Gary, 2010).

Concernant le transport sédimentaire, le logiciel HEC-RAS permet de modéliser à la fois le **charriage** et la **suspension**. Pour cela, il propose de définir trois fonctions :

- une fonction de transport solide ;
- une fonction d'évolution du lit sédimentaire ;
- une fonction de vitesse de sédimentation.

### 1) La fonction de transport

La fonction de transport estime la capacité de transport solide d'après les paramètres hydrauliques et granulométriques. Le logiciel propose sept formules différentes dont le domaine de validité dépend du type de sédiment (en pratique de la taille médiane des sédiments) et parfois du type de transport (charriage ou suspension) ou encore des caractéristiques plus particulières. Nous avons regroupé dans le Tableau III.4 ci-dessous les domaines de validité de chacune des formules. La plupart de ces formules sont données dans le Tableau III.3.

**Tableau III.4.** Domaine de validité des formules de transport solide

Formule	Type de sédiment	Remarque
Ackers & White	Sable et fin graviers	-
Engelund & Hansen	Argile et sable	Suspension prédominante
Toffaletti	Sable	Grande rivière
Wilcock	Sable et graviers	-
Laursen	Sable et vase	-
Peter - Meyer	Gravier uniforme	Uniquement pour charriage
Yang	Sable et graviers	Très sensible à la vitesse du fluide

### 2) La fonction d'évolution du lit sédimentaire

Cette fonction détermine la hauteur du lit sédimentaire grâce à un bilan de masse s'appliquant sur les sédiments. Deux modèles sont proposés par le logiciel HEC-RAS : le modèle d'Exner et le modèle dit "Active Layer" (Figure III.8). Tous les deux reposent sur le principe simple que le niveau du lit augmente proportionnellement à la quantité de particules déposées ou

baisse proportionnellement à la quantité de particules mobilisées. Cependant, les deux modèles diffèrent par le nombre de couches considérées dans le lit sédimentaire. Une description de modèle d'Exner est donnée dans le paragraphe III.4 1.

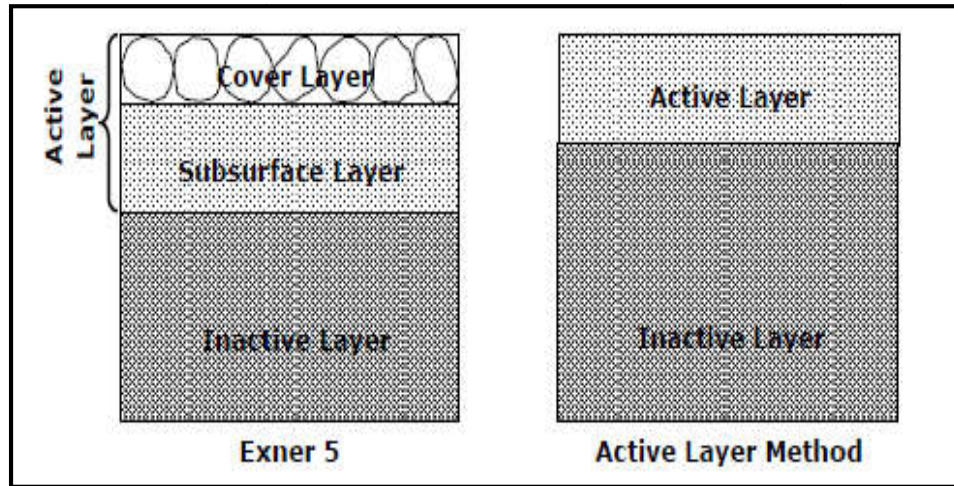


Figure III.8 Modèles d'évolution du lit sédimentaire (HEC-RAS)

### 3) La fonction de vitesse de sédimentation

Cette fonction détermine la vitesse de sédimentation selon la taille des particules ce qui influence donc la quantité de grains qui sédimentent. Le logiciel propose trois équations différentes qui, bien que faisant intervenir la taille des particules, sont restreintes à un ou plusieurs types de sédiments. Nous avons regroupé dans le Tableau III.5 suivant, d'après le manuel utilisateur du logiciel, leur domaine de validité.

Tableau III.5. Domaine de validité des formules de vitesse de sédimentation

Formule	Type de sédiment
Rubey	Argile et sable
Van Rijn	Sable et graviers
Toffalefi	Argile et sable

## III.8 Conclusion

Les modèles de transport fournissent le débit de sédiments transportés en fonction des conditions d'écoulement. Ils sont tous établis pour des conditions hydrauliques bien déterminées. De nombreuses équations ont été développées et testées pour la prédiction du

transport sédimentaire, ce qui pourrait rendre difficile le choix des équations les plus appropriées dans la quantification du transport solide. Les méthodes les plus utilisées dans le calcul du transport sédimentaire étant établies pour des conditions bien particulières, elles n'ont pas forcément les mêmes objectifs ; soit elles cherchent à évaluer le transport sédimentaire dans une section bien déterminée en s'appuyant sur des variables facilement mesurables à grande échelle, comme la pente ou bien la hauteur d'eau moyenne, soit dans toute la section. Le but de ces modèles est de pouvoir réaliser facilement des bilans sédimentaires.

En tenant compte que l'un des objectifs de notre étude est l'estimation de l'effet du transport sédimentaire sur la morphologie géométrique des canaux de drainage en terre nous avons opté pour l'utilisation du logiciel HEC-RAS, car pour la modélisation numérique existant dans le logiciel HEC RAS, il est possible d'utiliser des formules utilisant directement les variables du calcul, à savoir la hauteur d'eau et la vitesse moyennée sur la verticale, ou bien la contrainte et de choisir un modèle adapté au type de sédiments étudiés car cela influence très fortement le résultat fourni par ce logiciel. Enfin HEC-RAS est un logiciel capable de simuler deux phases associés, l'une de transport liquide et l'autre transport solide dans les canaux.

**Chapitre IV :**  
**Modélisation hydro- sédimentaires**  
**dans le canal de drainage**

## **Chapitre IV : Modélisation hydro-sédimentaire dans le canal de drainage**

### **IV.1 Introduction**

Le transport sédimentaire dans les cours d'eau influence souvent le comportement de la ligne d'eau et la morphologie de leur lit. Différents facteurs participent à la morphologie dans les canaux, parmi ces facteurs on rencontre le développement des végétations dans le canal et le transport de sédiments (Hyung Suk Kim et al, 2019). Le transport sédimentaire est influencé par de multiples facteurs tels que la composition des sédiments et les caractéristiques des sédiments du lit (Wang et Lee, 2015 ; Recking, 2010). Le choix d'un modèle spécifique décrivant le processus de transport sédimentaire dépend de la nature du problème rencontré. La mise en œuvre d'un modèle hydro-sédimentaire permet d'analyser non seulement les écoulements, mais aussi le transport des matériaux solides, afin d'identifier les modifications morphologiques des canaux et de vérifier la validité de modèle pour un cas d'étude réel. Dans ce chapitre la modélisation sera appliquée au canal D03 du système de drainage (Figure IV.1). Le canal étudié s'étend sur une longueur de 4350m, discrétisé par 12 profils en travers issus de la campagne topographique réalisée en 2017. La forme de sa section transversale est trapézoïdale. Le modèle du canal a été élaboré sur la base des profils longitudinaux et transversaux des données topographiques à partir de plan de récolement réalisé par le bureau d'étude et à partir des données obtenues lors de la campagne topographique.

Pour la modélisation d'écoulement et du transport sédimentaire dans ce canal, notre choix s'est orienté vers le modèle hydro-sédimentaire du code HEC-RAS. Plusieurs simulations ont été réalisées afin de mettre en place ce modèle capable de calculer la quantité de la charge sédimentaire dans le canal et mettre en évidence l'effet de dépôt de sédiments au fond de canal sur le risque d'inondation des terres agricoles causé par le débordement de ce dernier.

Ce modèle hydro-sédimentaire a été calé et validé sur les hauteurs d'eau mesurées sur site lors de la campagne de mesure pour les différents événements pluvieux en utilisant les résultats de l'étude expérimentale de la granulométrie des sédiments du fond de canal.

Les simulations réalisées ont permis de quantifier le volume de dépôt des sédiments dans le canal pour une certaine période de temps.

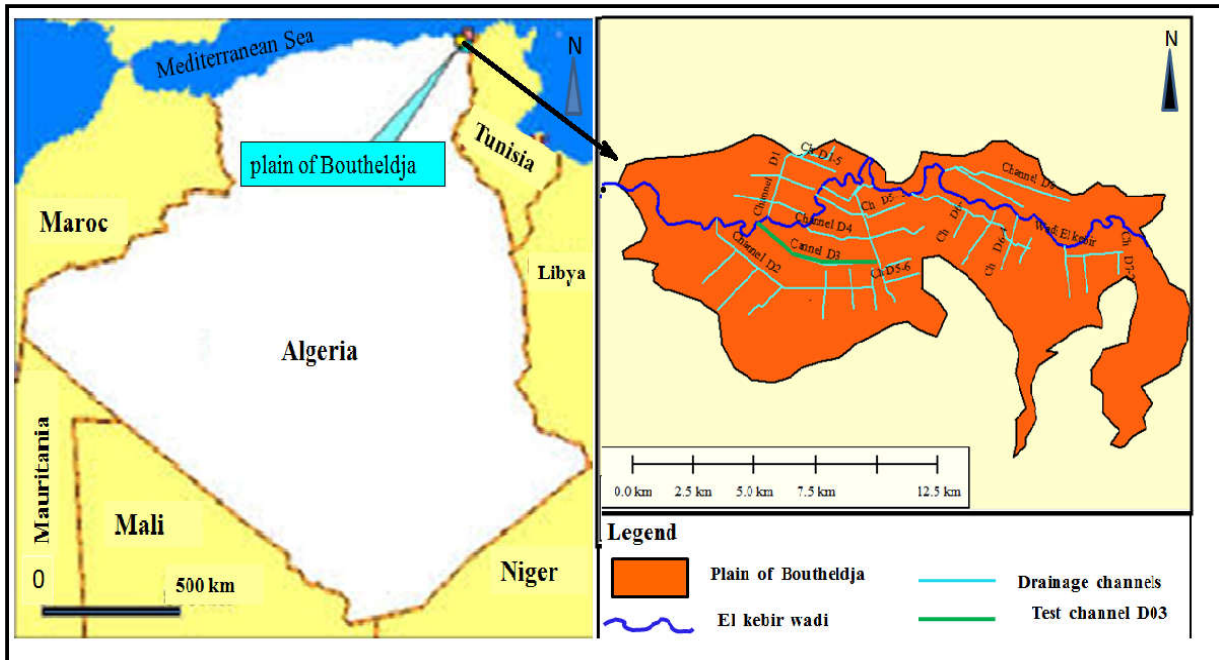


Figure IV.1 Localisation de la zone d'étude à gauche et du réseau de drainage à droite

## IV.2 Préparation des données et méthodes

### IV.2.1 Définition des données de base

Les données disponibles, la méthode d'acquisition de données de terrain et les modèles numériques peuvent et doivent être utilisées pour mieux connaître le transport sédimentaire et l'évolution morphologique dans les canaux.

Les données hydrologiques sont par définition les données de débit liquide, la géométrie du lit des canaux et la nature des sédiments elles peuvent être indispensables dans la mise en œuvre des modèles numériques de transport solide. La plupart des paramètres mentionnés dans les formules de transport solide dans les cours d'eau soit par charriage soit en suspension sont: le débit liquide ( $Q$ ), la pente ( $I$ ), les diamètres des particules du sédiment ( $d_i$ ), la densité des grains ( $\gamma_s/\gamma_w$ ) ou  $s$ , la rugosité du lit ( $K$ ), la porosité ( $p$ ).

### IV.2.2 Étude expérimentale des propriétés de sédiment

La granulométrie du sédiment joue un grand rôle dans le transport sédimentaire surtout si ce dernier contient beaucoup d'eau. Les sols sont très diversifiés et composés de :

- Sable de mer : Il provient de l'ultime érosion des roches cristallines ;
- Gravillons et galets : ils proviennent de l'embouchure des rivières ;

-Limens et vases : les vases sont cohérentes, compressibles, non élastiques, lisses, difficiles à éroder ; les vases se rétractent par dessiccation naturelle mais reprennent ses propriétés une fois humide. Les limons et les vases sont caractérisés par leurs courbes de granulométrie. Dans le tableau IV.6 on présente une classification des sédiments recommandée par l'Union géophysique américaine.

**Tableau IV.6.** Classification des sédiments selon la taille de grain

Classification	mm = 10 <sup>-3</sup> m	µm = 10 <sup>-6</sup> m
Gravier très grossier	64-32	
Gravier grossier	32-16	
Gravier moyen	16-8	
Gravier fin	8-4	
Gravier très fin	4-2	
Sable très grossier	2-1	2000-1000
Sable grossier	1.00-0.50	1000-500
Sable moyen	0.50-0.25	500-250
Sable fin	0.25-0.125	250-125
Sable très fin	0.125-0.062	125-62
Limon grossier	0.062-0.031	62-31
Limon moyen	0.031-0.016	31-16
Limon fin	0.016-0.008	16-8
Limon très fin	0.008-0.004	8-4
Argile grossière	0.004-0.002	4-2
Argile moyenne	0.002-0.001	2-1
Argile fine	0.001-0.0005	1-0.5
Argile très fine	0.0005-0.00024	0.5-0.24

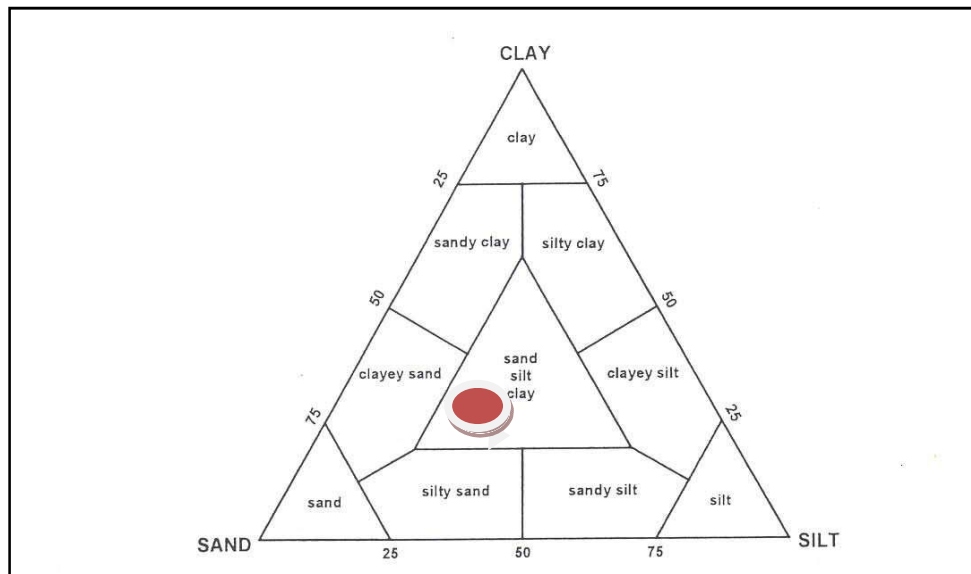
Le mouvement des particules dans le cours d'eau dépend des caractéristiques physiques des grains (forme, taille, densité), ce qui nécessite l'étude des propriétés des sédiments avant d'estimer le débit solide dans tout cours d'eau, et avant le choix de la formule utilisée pour trouver des résultats acceptables. On a effectué une phase expérimentale sur la sédimentation pour classer ce type de matériaux et définir leurs paramètres physico-mécaniques le long du canal D03 dans les laboratoires (LTP Est, Annaba et laboratoire LNHC, Ain Assel, w. El Tarf.

Les résultats d'analyse granulométrique, sédimentométrique et les essais des mesures des propriétés physico-mécaniques des matériaux le long du canal, plus exactement en amont, au milieu et en aval du canal, sont présentés dans le Tableau IV.7, et les courbes granulométriques dans la Figure IV.3.

Les sédiments de lit du canal ont une limite de liquidité de  $WL = 54\%$  et une limite de plasticité  $WP = 27\%$  d'où un indice de plasticité  $IP = 27.23\%$  qui traduit une sensibilité à l'eau. Sur la base du diagramme de plasticité de Casagrande, le sédiment se trouve dans la classe des argiles très plastiques.

$$CU = \frac{D_{60\%}}{D_{10\%}} = \frac{0.042}{0.004} = 10.5 > 3 \quad (\text{granulométrie étalée})$$

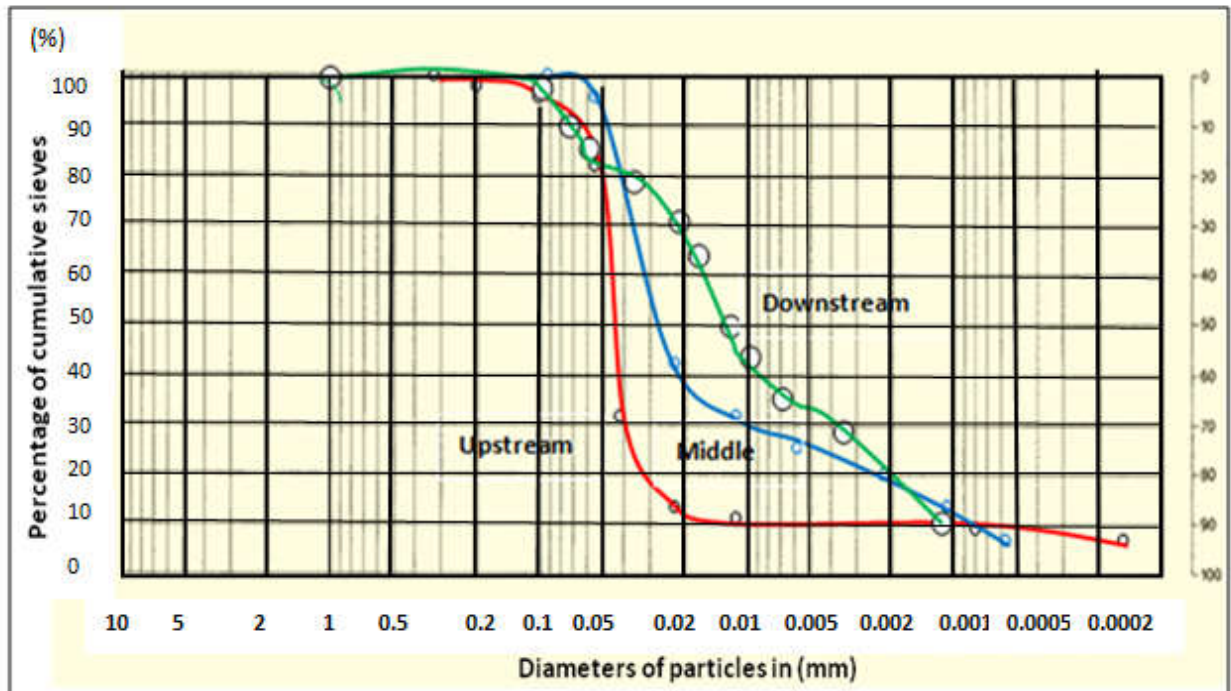
Le sédiment peut être classé en fonction de la classification triangulaire des sols fins (Figure IV.2). Dans cette étude le sédiment est classé entre argile, sable et limon.



**Figure IV.2** Diagramme triangulaire de classification texturale des sédiments, sur la base des proportions de sable, limon et argile. (Source : SHEPARD, 1954).

**Tableau IV.7.** Résultats des essais du sol

Analyses granulométrique et sédimentométrie	Propriétés physico- mécaniques
$dm_{50\%}(\text{amont}) = 0.04\text{mm}$	-Masse volumique humide : $\gamma_h = 1.92 \text{ g cm}^{-3}$
$dm_{50\%}(\text{milieu}) = 0,03 \text{ mm}$	-Masse volumique spécifique : $\gamma_s = 2.653 \text{ g cm}^{-3}$
$dm_{50\%}(\text{aval}) = 0.012\text{mm}$	-Masse volumique sèche : $\gamma_d = 1.56 \text{ g cm}^{-3}$
$dm_{50\%, \dots}$ : diamètre des grains,	- La porosité : $p = 0.28 = 28\%$
	-La perméabilité : $k = 2.77 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$



**Figure IV.3** Variation des courbes granulométriques des sédiments déposés dans le canal

Les résultats des essais d'analyse granulométrique et sedimentometrique montrent que la taille de sédiment à partir le diamètre médian ( $d_{50}$ ) décroisse de l'amont vers l'aval du canal, (amont  $d_{50} = 0.04$  mm, milieu  $d_{50} = 0.03$  mm, aval  $d_{50} = 0.012$  mm), toujours avec une granulométrie étalée à cause de l'existence de la vanne à clapet anti retour dans l'exutoire du canal. Le même processus se produit dans les retenus des barrages où les sédiments grossiers se déposent en amont des retenues et les fins au pied de la digue (Benaicha, 2017).

Enfin le sédiment au fond du canal dans l'ensemble c'est une argile grisâtre sableuse limoneuse.



**Figure IV.4** Essai des propriétés physiques du sol à l'aide de pycnomètre à l'air (EN1097-7)

### IV.2.3 Mesures topographiques et géométriques

En mois de mai 2017 on a effectué des levés topographiques sur le canal D03 ( par un instrument topographique *Leica TS 06* et un nivellement par un niveau *Leica NA2*. Les résultats de mesures topographiques sont présentés dans le tableau IV. 8.

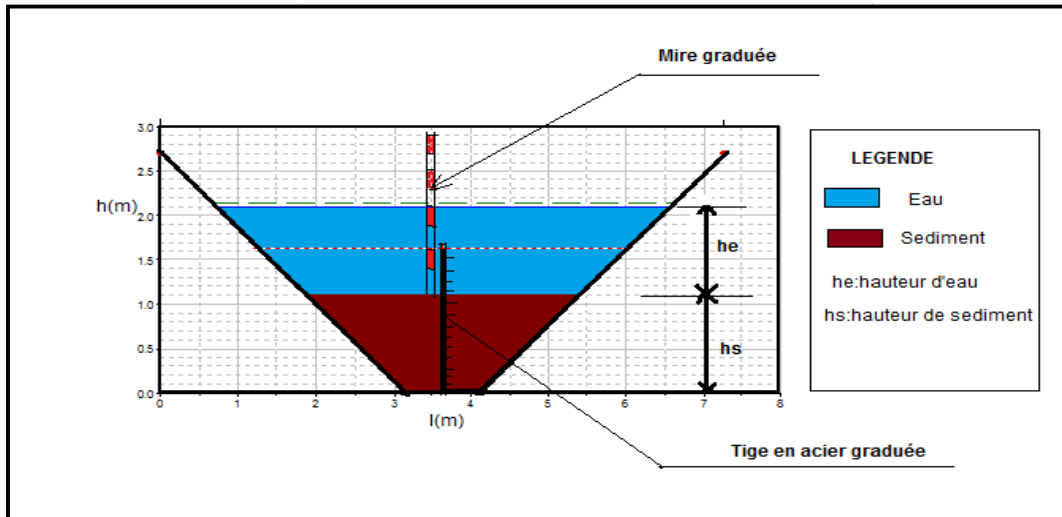
Dans ce tableau sont présentées également les données topographiques des profils longitudinaux et transversaux du canal à partir de plan de récolement qui a été réalisé en 2006 par le bureau d'étude Algérien ENHYD avec ENERGOPROJEKT, bureau d'étude en Yougoslavie (*Source des données* : ONID : Office National d'Irrigation et de Drainage d'El-Tarf, Algérie).

En absence des données hydrométriques du canal depuis sa réalisation en 2006, nous avons placé, en mois de mai 2017 (22/05/2017), au fond du canal D03 des mires en acier graduées (Figure IV.5) dans 12 sections le long du canal (Figure IV.6) pour mener une campagne de mesure dont l'objectif était de mesurer l'épaisseur de la couche sédimentaire (hs), la profondeur d'eau (he) et la largeur du fond (b) à chaque événement pluvial.

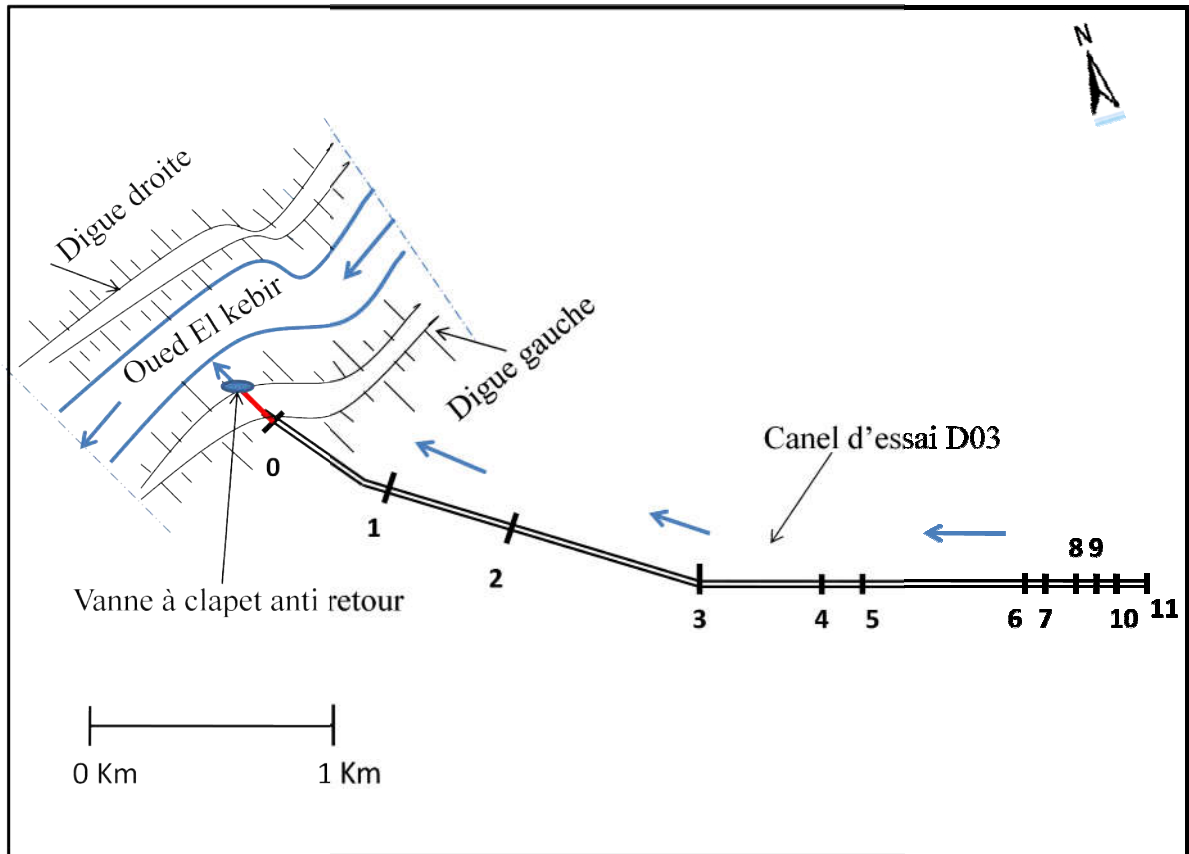
**Tableau IV. 8.** Résultats des mesures topographiques

N° section	L (m)	$\underline{b}_a$ (m)	Ba(m)	li (m/m)	Ir (m/m)	hi (m)	ha (m)	hs(m)
0	0	1.71	7.3	0	0	2.7	1.60	<b>1.10</b>
1	719	1.53	6.1	0.001	0.001	2.34	1.24	<b>1.10</b>
2	581	1.4	5.8	0.001	0.00027	1.93	1.25	<b>0.68</b>
3	910	1.51	5.46	0.001	0.0011	1.91	1.10	<b>0.81</b>
4	634	1.63	5.94	0.001	0.00087	1.85	1.12	<b>0.73</b>
5	117	1.61	5.88	0.001	-0.00094	1.67	1.17	<b>0.50</b>
6	899.95	1.55	4.96	0.001	0.00108	1.46	0.87	<b>0.59</b>
7	96.66	1.47	5.5	0.001	0.00144	1.5	0.86	<b>0.64</b>
8	108.97	1.72	5.15	0.001	0.000091	1.52	0.98	<b>0.54</b>
9	90.59	1.71	5.61	0.001	0.00055	1.43	0.93	<b>0.50</b>
10	91.37	1.86	5.15	0.001	0.0028	1.71	1.04	<b>0.67</b>
11	101.46	1.7	5.04	0.001	0.00068	1.73	1.09	<b>0.64</b>

Où L: distance (m) ; hi : profondeur initial du canal (m) ; ha: profondeur actuel du canal (m) ;  $\underline{b}_a$  : largeur du fond actuel (m) ; Ba : largeur au miroir actuelle (m) ; li : pente initiale (m/m) ; Ir : nouvelle pente (m/m) ; hs : épaisseur de la couche de sédiment (m).



**Figure IV.5** Méthode des mesures sur site de l'évolution du fond et de la profondeur d'eau dans le canal.



**Figure IV.6** Tracé en plan du canal

#### IV.2.4 Mesure expérimentale de la concentration des matières en suspension

En plus des mesures sur terrain, nous avons effectué des prélèvements d'eau à des profondeurs variables du canal lors des événements pluvieux durant la période de 22/05/2017

à 20/02/2018, pour pouvoir mesurer la concentration « C » des matières en suspension de l'échantillon prélevé. L'objectif de ces mesures est de trouver la relation entre le débit liquide et le débit solide et de comparer le volume de la charge sédimentaire expérimentale avec le volume calculé par les formules empiriques.

Le procédé de mesure est le suivant : i) en vue de recueillir les matières en suspension on filtre de l'eau sur du papier-filtre de type Whatman (porosité du filtre égale à 10 µm, temps de filtration  $t = 10,5$  s) ; ii) en suite, les matières en suspension sont séchées à l'étuve pendant une heure à une température de 105 °C ; iii) les matières en suspension sont ramenées à l'unité de volume d'un litre. La charge en suspension se calcule alors par la relation suivante:

$$C = (p_2 - p_1) / V \dots\dots\dots(IV.1)$$

Avec :

C : la concentration exprimée en gramme par litre ;

$p_1$  : le poids du papier-filtre sec et vide exprimé en grammes avant la pesée de l'échantillon ;

$p_2$  : le poids du papier filtre avec les sédiments en suspension exprimé en grammes ;

V : le volume de l'échantillon.

Les valeurs de concentration moyenne trouvées lors des événements pluvieux sont présentées dans le tableau suivant :

**Tableau IV .9.** Les valeurs des concentrations moyennes mesurées

<b>Dates des jours pluvieux observés</b>	<b>Concentration moyenne (C<sub>m</sub>) en (g/L)</b>
Le : 05/06/2017	1.59
Le : 16/11/2017	6.93
Le : 03/12/2017	1.08
Le : 20/12/2017	1.15
Le : 21/12/2017	1.11
Le : 27/12/2017	0.98
Le : 29/12/2017	1.51
Le : 11/01/2018	0
Le : 15/02/2018	1.3
Le : 17/02/2018	1.33
Le : 18/02/2018	1.41
Le : 19/02/2018	2.02
Le : 20/02/2018	1.62

Pour l'événement 11/01/2018 on n'a pas pu mesurer la concentration des matières en suspension.

### **IV.3 Modélisation hydro- sédimentaire des canaux de drainage**

#### **IV.3.1 Méthodologie**

L'objectif principal de l'étude est la modélisation de l'évolution morphologique des canaux de drainage à ciel ouvert en terre sous l'influence des processus de transport sédimentaire. Comme cela a été dit auparavant, le canal D 03 (Figure IV.1), qui fait partie du système de drainage, a été choisi comme objet de cette étude. Le canal a été construit dans le cadre du développement agricole de la plaine depuis 2006 et transporte les eaux de drainage dans l'oued El Kebir. La forme de sa section transversale est trapézoïdale et sa longueur est de 4350 m. Le canal a été divisé en 12 sections (Figure IV.5). Son modèle a été développé et calibré en fonction des conditions opérationnelles actuelles.

La méthodologie de l'étude est présentée sur la figure IV.7 sous la forme d'un organigramme.

Les étapes présentées de cette approche méthodologique sont i) la modélisation d'écoulement dans le canal enfin d'étudier l'influence de l'évolution morphologique de son fond sur sa capacité hydraulique pour la période de 11 ans depuis sa réalisation (2006-2017) et le calage du modèle d'écoulement du code HEC-RAS aux paramètres observés lors de la campagne de mesure menée de 2017 à 2018; ii) la modélisation du transport solide enfin d'estimer l'évolution du fond du canal et le volume de sédiment.

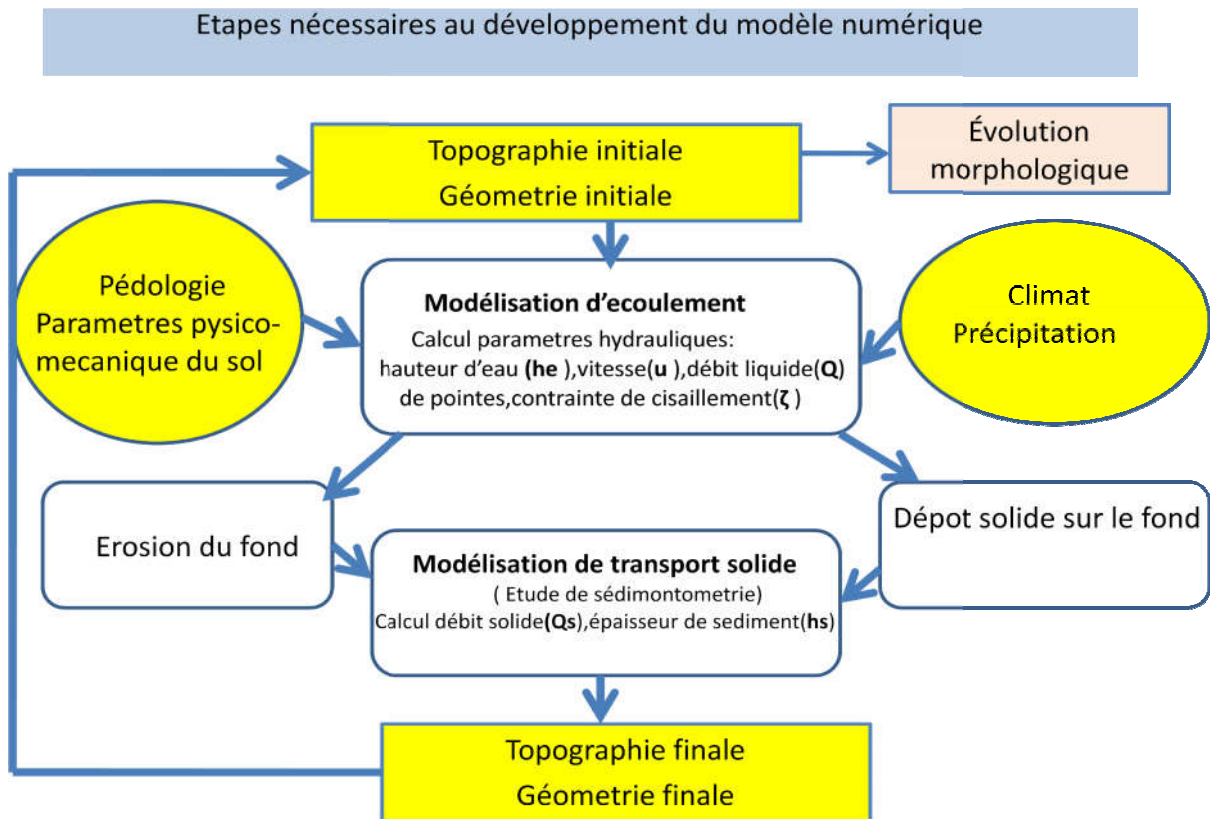


Figure IV.7 Organigramme de la méthodologie

### IV.3.2 Modélisation d'écoulement dans le canal D03

#### IV.3.2.1 Etude de l'influence de l'évolution morphologique pour le fond du canal sur sa capacité d'écoulement

Dans cette étude le modèle hydraulique du code HEC RAS a été appliqué pour modéliser l'écoulement dans le canal. L'étude a été menée sur la base des données topographiques des profils longitudinaux et transversaux du canal à partir de plan de récolement qui a été fait en 2006 par le bureau d'étude algérien ENHYD avec ENERGOPROJEKT bureau d'étude (Yougoslavie) et des mesures topographiques effectuées sur site le 22/05/2017. Ses données sont portées dans le tableau 08 (voir §IV.2.3).

En analysant ses données on voit que le fond du canal a subi, depuis sa réalisation, les fortes modifications causées par le processus du transport sédimentaire. Ces modifications se traduisent par le changement de la pente et des profils transversaux du canal.

Pour illustrer l'influence de l'évolution morphologique du fond sur la capacité hydraulique du canal, les simulations d'écoulement ont été effectuées dans ce canal ayant i) la géométrie

initiale de 2006 et ii) la géométrie nouvelle actualisée en 2017 pour les mêmes débits de pointe.

### 1) Estimation de débit de pointe

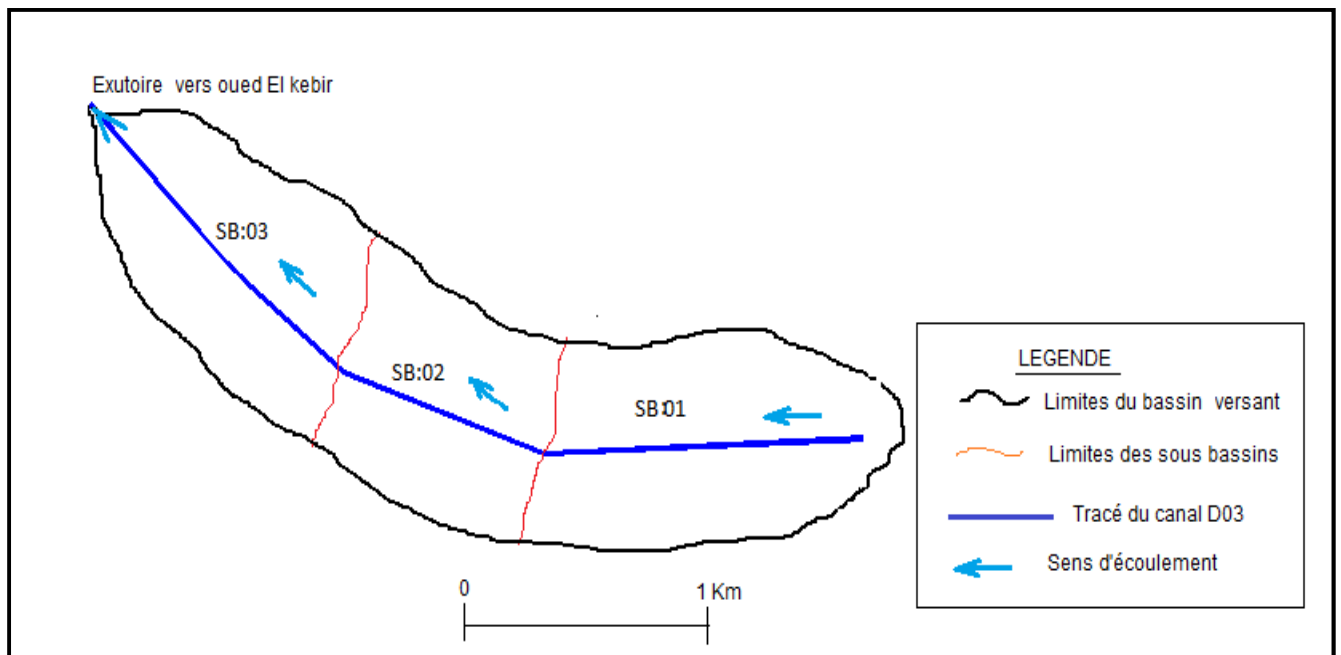
Dans plusieurs études, la modélisation a été utilisée pour estimer le ruissellement de surface (Dieudonné et al, 2019). Ouarda et al. (2001) ont appliqué les méthodes empiriques d'estimation de débit de pointe pour les petits bassins versants. La plupart des formules empiriques d'estimation de débit de pointe tiennent compte généralement de trois facteurs essentiels : l'intensité de pluie, la surface du bassin versant et le temps de concentration.

En absence des données hydrométriques, les débits de pointe ont été estimés par les formules empiriques. Les trois méthodes connues ont été utilisées dans le calcul des débits de pointes destinées au bassin versant du canal D03. Ce bassin versant a été divisé en trois sous bassins (Figure IV.8).

**La méthode rationnelle :**

$$Q = C . i . S \quad (IV.2)$$

Où, C: coefficient de ruissellement, on prend 0,05 en fonction du type d'occupation du sol (Annexe 1); i: intensité de la pluie en mm / h ; S: superficie du bassin versant en ha.



**Figure IV.8** Sous-bassins du bassin versant du canal D 03

**Méthode de Crupedix (1982) :**

La méthode de Crupedix permet d'estimer le débit de pointe décennal ( $Q_{10}$ ) à l'aide de la formule suivante :

$$Q = S^{0.8}(Pj10/80)^2 \cdot R \quad (IV.3)$$

Avec

Q: débit instantané annuel maximum sur dix ans, S: superficie du bassin versant en  $km^2$   
 Pj10: pluie journalière maximale annuelle décennale en mm, R: coefficient régional que nous prendrons égal 1.

**Méthode SCS**

La méthode de SCS estime la hauteur de ruissellement comme suit :

$$Hru = \frac{(P-Ia)^2}{(Pi+Ia)+Rm} \quad (IV.4)$$

$$Ia = 0,2 \cdot Rm \quad (IV.5)$$

Où:

Hru: hauteur ou lame de ruissellement (mm), Pi: hauteur de pluie (mm), Ia: réception initiale (mm) Rm: rétention maximale (mm).

$$Rm = \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \cdot 25,4 \quad (IV.6)$$

CN (Curve Number), ces valeurs varient de 0 à 100 (Annexe 1). La valeur de CN est prise égale à 82 pour tous les sous-bassins selon le tableau du CN de l'annexe 1, pour un sol avec des conditions d'infiltration médiocres.

Le débit de pointe est écrit:

$$Q = \frac{0.75 \cdot Hru \cdot S}{3600 \cdot Tp} \quad (IV.7)$$

Considérant que  $T_p$  et  $T_c$  (temps de concentration) sont égaux, les résultats des calculs de débit de pointe du canal D03 utilisant les trois formules: Méthode Rational, Crupedix, SCS sont présentés dans le Tableau IV.10.

Les débits de pointe ont été calculés pour la hauteur de la pluie journalière maximale annuelle décennale. Cette hauteur a été estimée par l'ajustement à la loi Gumbel d'une série des hauteurs de pluie journalière maximale annuelle pour la période d'observation de 2005 à

2016 de la station météorologique de Lac des Oiseaux, la plus proche de la zone d'étude (Annexe 2).

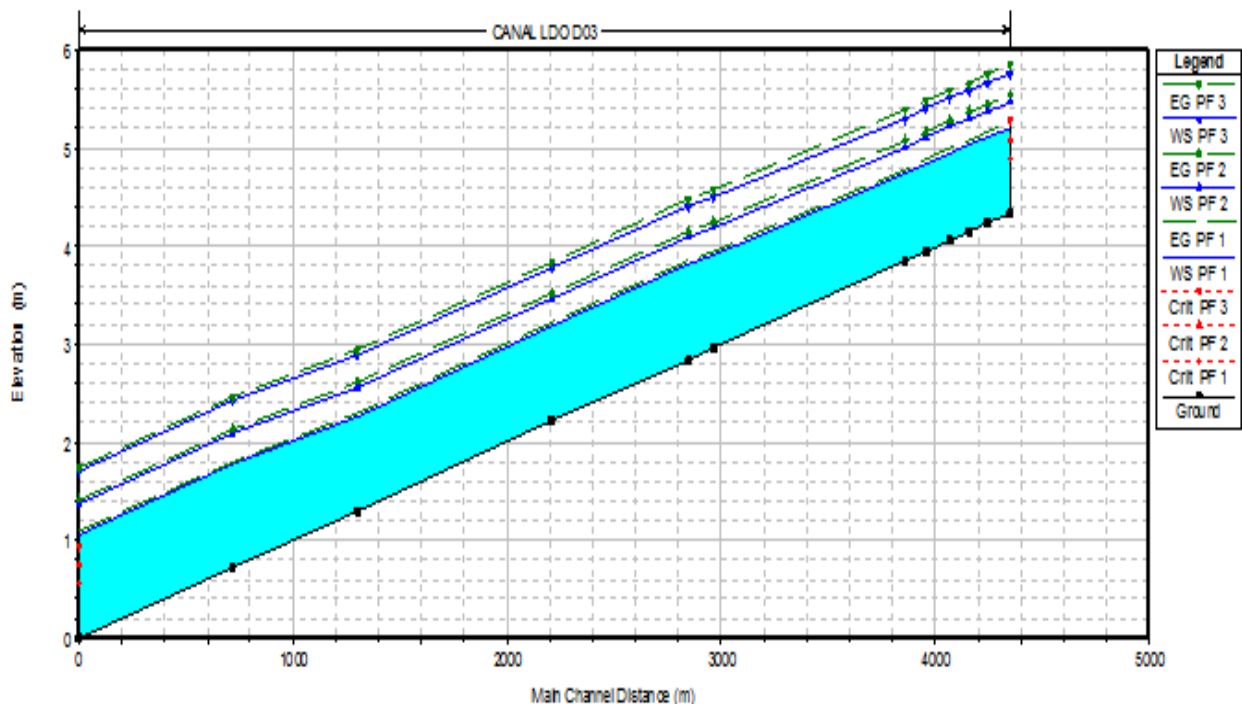
**Tableau IV.10.** Résultats d'estimation de débit de pointe décennal

Sous bassins	S B V (ha)	Pj max10 (mm)	Q max (m <sup>3</sup> /s) Méthode Rationnelle	Q max (m <sup>3</sup> /s) Méthode CRUPEDIX	Q max (m <sup>3</sup> /s) Méthode SCS
SB01	127.70	97.40	1.19	1.79	1.67
SB01+SB02	212.34	97.40	1.98	3.08	3.14
SB01+SB02+S B03	348.00	97.40	3.24	4.97	4.89

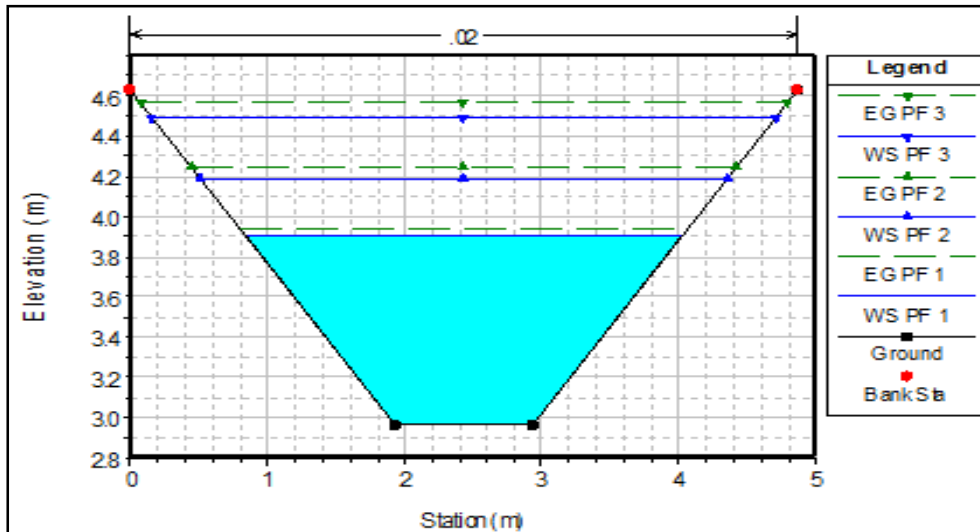
Pour simuler l'écoulement dans le canal via HEC-RAS, les résultats de la méthode Crupedix ont été retenus.

### 2) Simulation d'écoulement dans le canal D03

En premier lieu, l'écoulement a été simulé dans le canal dont la géométrie correspond à la date de la réalisation (05/2006) de ce dernier pour différents débits de pointe (1.79, 3.08 et 4.97 m<sup>3</sup>/s). Après la simulation de l'écoulement à l'aide du modèle hydraulique du code HEC-RAS, on voit qu'aucun débordement n'a été observé le long du canal (Figure IV.9). A titre d'exemple, sur la figure IV.10 sont présentées les lignes d'eau dans la section 05 pour les trois débits simulés.



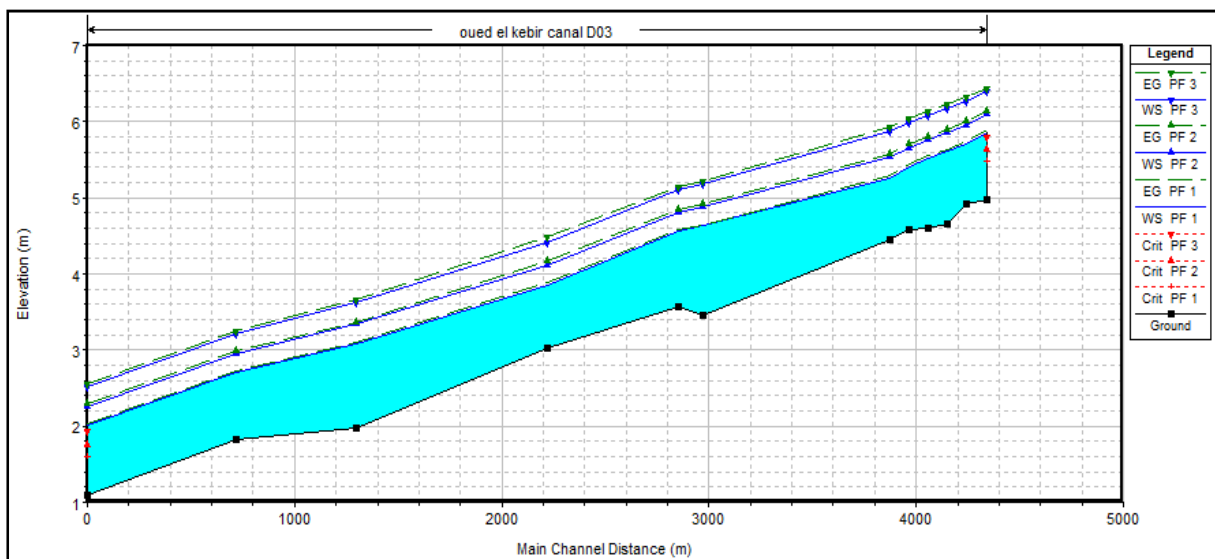
**Figure IV.9** Profil en long et les lignes d'eau dans le canal de géométrie initiale pour les trois débits.



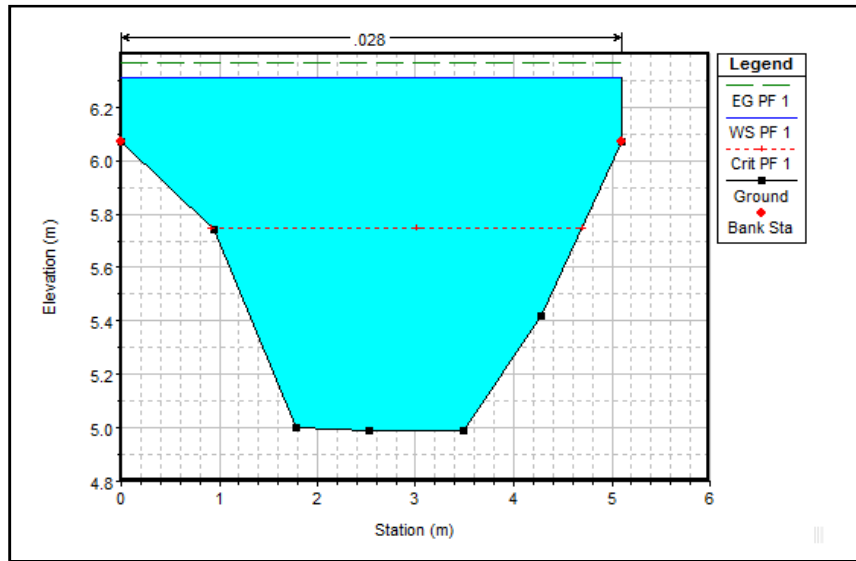
**Figure IV.10** Profil en travers de la section 05 avec les lignes d'eau pour les trois débits (géométrie initiale de la section).

Dans un second temps, l'écoulement a été simulé dans ce canal dont les paramètres géométriques des sections ont été actualisés en 2017.

Sur la figure IV.11 on voit que le canal déborde presque sur toute la longueur pour les débits importants ( $3,08$  et  $4,97\text{m}^3/\text{s}$ ), contrairement au cas précédent. La figure IV.12 mentionne le débordement du canal qui correspond au débit  $4,97\text{ m}^3/\text{s}$  dans la section 11. Il est évident que le débordement était causé par le dépôt de sédiment au fond du canal après 11 ans de son exploitation. Plus de détails sur le comportement hydraulique du canal sont données dans le tableau IV.11.



**Figure IV.11.** Profils en long de la ligne d'eau dans le canal avec les paramètres géométriques des sections actualisés en 2017 pour les trois débits



**Figure IV.12** Débordement du canal pour le débit  $4,97 \text{ m}^3/\text{s}$  (section 11).

**Tableau IV.11.** Test de l'influence d'évolution du fond de canal sur sa capacité hydraulique.

Section	Profil initial (05/2006)			Profil actuel (22/05/2017)		
	$Q=1.79\text{m}^3/\text{s}$	$Q=3.08\text{m}^3/\text{s}$	$Q=4.97\text{m}^3/\text{s}$	$Q=1.79\text{m}^3/\text{s}$	$Q=3.08\text{m}^3/\text{s}$	$Q=4.97\text{m}^3/\text{s}$
0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
1	ND	ND	ND	ND	ND	D(Hr=0.12)
2	ND	ND	ND	ND	D(Hr=0.17)	D(Hr=0.42)
3	ND	ND	ND	ND	PB	D(Hr=0.25)
4	ND	ND	ND	ND	D(Hr=0.10)	D(Hr=0.34)
5	ND	ND	ND	PB	D(Hr=0.23)	D(Hr=0.49)
6	ND	ND	PB	ND	D(Hr=0.17)	D(Hr=0.47)
7	ND	ND	PB	ND	D(Hr=0.13)	D(Hr=0.43)
8	ND	ND	PB	ND	D(Hr=0.09)	D(Hr=0.37)
9	ND	ND	PB	ND	D(Hr=0.18)	D(Hr=0.46)
10	ND	ND	ND	ND	ND	D(Hr=0.18)
11	ND	ND	ND	ND	PB	D(Hr=0.22)

**ND** : pas débordement = le niveau d'eau inférieur à la profondeur du canal.

**PB** : plein bord = le niveau d'eau atteint juste le niveau la plus haut du canal.

**D** : débordement = le niveau d'eau dépasse la profondeur du canal.

**Hr** : hauteur de revanche(m) = la différence entre le niveau supérieur de l'eau et le plein bord.

#### IV.3.2.2 Calage du modèle hydraulique de HEC-RAS

La plupart des modèles hydrauliques nécessitent une phase de calage. La méthode de calage est basée sur la modification des paramètres, fixés initialement de façon arbitraire, afin que les données de sortie soient le plus proche possible des données observées. (Grimaldi, 2016).

Dans un second temps, on est amené à procéder à un examen critique de la performance des simulations. Pour cela il est nécessaire de mettre en place une phase de validation.

Dans notre cas, vu l'absence des données débitmétriques ou bathymétrique au niveau du canal, le modèle HEC-RAS 1D en régime permanent d'écoulement est utilisé pour estimer les débits maximaux dans le canal D03 générés par les différents événements pluvieux pour une période de 22/05/2017 à 20/02/2018 (Tableau 12). Les données observées qu'on dispose sont les hauteurs maximales d'eau mesurées in situ dans 12 sections du canal pour chaque événement pluvial cité dans le Tableau IV.12.

**Tableau IV.12.** Pluies journalières et leurs durées (source : station pluviométrique Lac des Oiseaux)

Dates des jours pluvieux	Hauteur de pluie journalière cumulée (mm)	Durée d'événement pluvial
Le : 05/06/2017	22.1	03 heures
Le : 16/11/2017	92.6	09hrs 30min
Le : 03/12/2017	30.4	06 heures
Le : 20/12/2017	12.4	03 heures
Le : 21/12/2017	17.4	06hrs 15min
Le : 27/12/2017	14.7	05 heures
Le : 29/12/2017	24.7	08 heures
Le : 11/01/2018	13.4	06hrs 30min
Le : 15/02/2018	28.90	11 heures
Le : 17/02/2018	33.6	09 heures
Le : 18/02/2018	34.7	09 heures
Le : 19/02/2018	9.3	04hrs 30min
Le : 20/02/2018	12.30	05 heures

Le calage du modèle a été effectué par l'ajustement du coefficient de rugosité de Manning (n) pour chaque événement pluvial. Avec nombreuses simulations ont été faites avec les différentes valeurs du coefficient de Manning, en commençant par une valeur initiale arbitraire. Finalement, la distance minimale entre les hauteurs d'eau observées et simulées donne un coefficient de Manning (n) pour chaque événement pluvial. Correspondant de l'état réel des talus et du fond du canal qui encombrés par les herbes.

#### *Validation du modèle hydraulique*

Un modèle hydrologique est évalué par les critères d'évaluation de la qualité d'une simulation qui peuvent être parfois utilisés comme fonction objectif lors du calage du modèle, ou comme mesure d'évaluation de ses performances en validation. Il n'existe pas de critère d'évaluation universel. Dans notre étude, nous utilisons les critères numériques qui se basent sur le calcul de l'erreur du modèle, c'est-à-dire la distance évaluée de différentes manières selon le critère utilisé entre les hauteurs observées et simulées. Nous évaluons nos simulations en validation par les critères de Nash (NSE), Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de corrélation (R).

**Le critère de Nash (NSE)**

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (h_{eSimi} - h_{eObsi})^2}{\sum_{i=1}^N (h_{eObsi} - \bar{h}_{eObs})^2} \quad (IV.8)$$

Ce critère permet de juger l'importance de la différence entre les valeurs observées et simulées. Il est compris entre  $-\infty$  et 1, où la valeur 1 correspond à une corrélation parfaite entre les valeurs observées et simulées.

**Le coefficient de corrélation R**

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (h_{eSim} - \bar{h}_{eSim})(h_{eObs} - \bar{h}_{eObs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_{eSim} - \bar{h}_{eSim})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (h_{eObs} - \bar{h}_{eObs})^2}} \quad (IV.9)$$

**Racine carrée d'Erreur Quadratique Moyenne (RMSE)**

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h_{eObsi} - h_{eSimi})^2}{N}} \quad (IV.10)$$

Où  $\bar{h}_{eSim}$ ,  $\bar{h}_{eObs}$  est l'hauteur d'eau moyenne simulée et observée ;  $h_{eSim}$ ,  $h_{eObs}$  est l'hauteur d'eau simulée et observée et  $N$  est le nombre de sections (points de mesure)

Les valeurs de ces critères sont portées dans le Tableau IV.13. Les résultats obtenus sont très satisfaisants que ce soit en termes de critère de Nash, de coefficient de corrélation ou bien pour le RMSE.

Les valeurs de critère Nash sont inférieures à 0,80 seulement pour les plus faibles débits. Kachroo (1986) a donné l'échelle suivante quand aux valeurs prise par le critère de Nash : le modèle est très bon pour les valeurs de 0,8 à 0,9 et bon pour 0,6 – 0,8 ; le modèle est excellent si le critère Nash est supérieur à 0,9 et mauvais s'il est inférieur à 0,6.

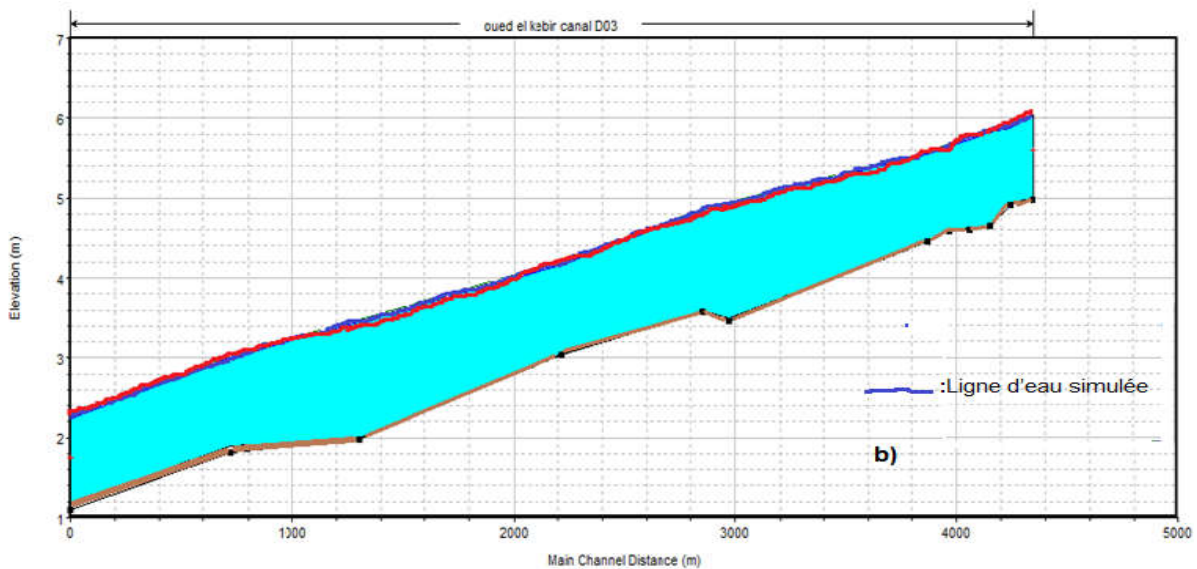
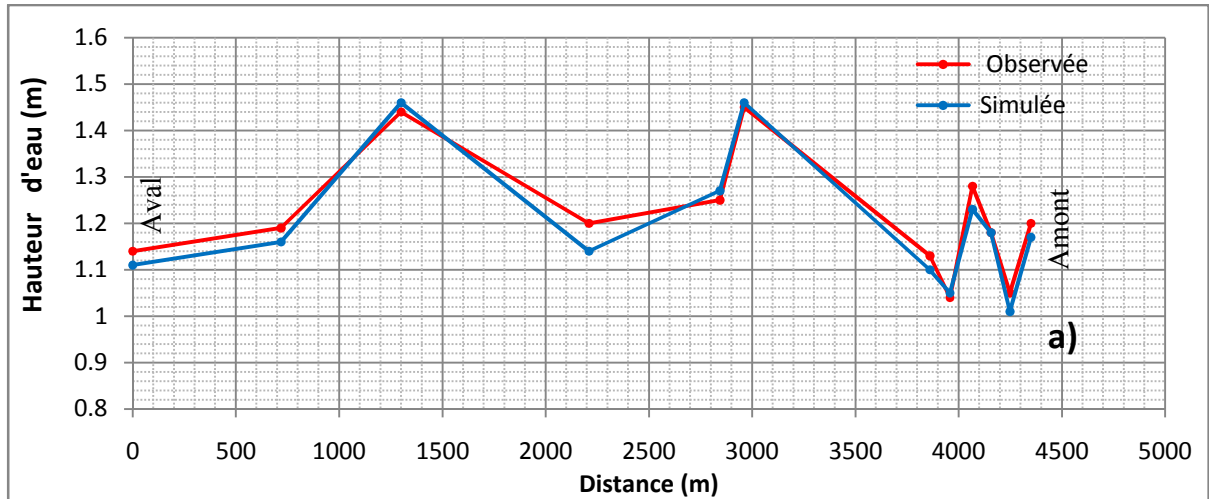
Les valeurs de RMSE sont faibles, ils varient de 0,017 à 0,055 m. Les valeurs relativement élevées de RMSE (0,049 et 0,055 m) correspondent aux plus faibles valeurs de critère de Nash. Ces résultats montrent que les hauteurs d'eau simulées sont très proches de celles observées et que le modèle hydraulique HEC-RAS peut être utilisé pour la simulation de l'écoulement dans le canal D 03 à l'état actuel. Les débits simulés se différencient peu pour la majorité des pluies journalières soit pour deux événements, ceux de 05/06/2017 et 16/11/2017. Pendant ces événements la hauteur de pluie tombée est considérable.

**Tableau IV. 13.** Débits maximaux simulés et les résultats de la validation du modèle HEC-RAS pour les événements pluvieux de 22/05/2017 à 20/02/2018

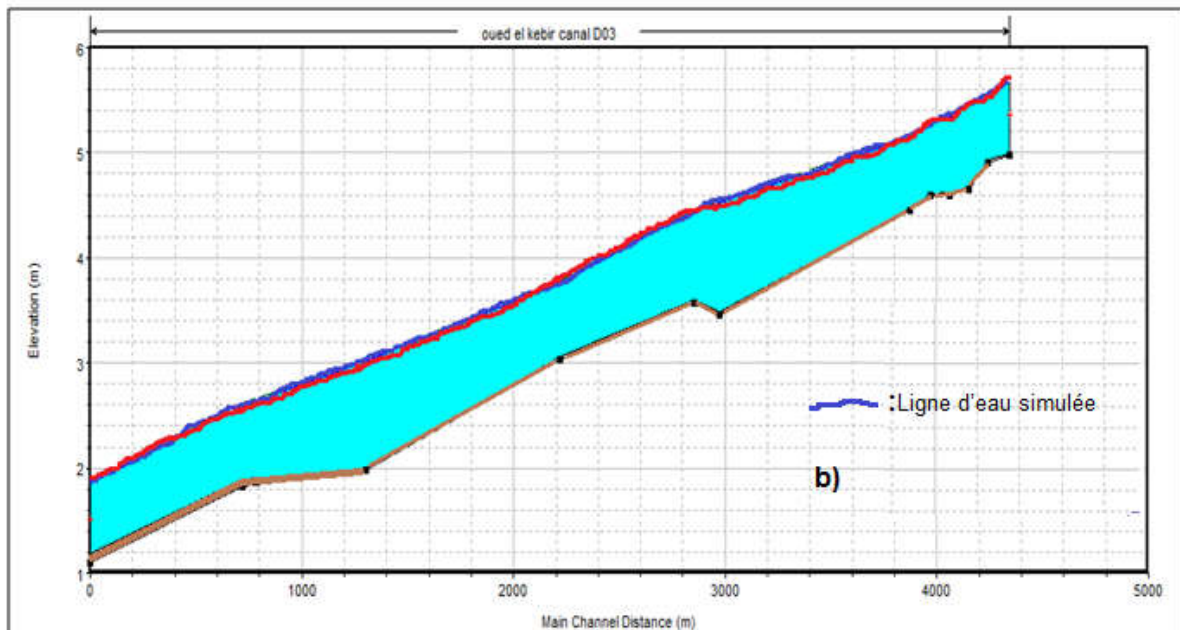
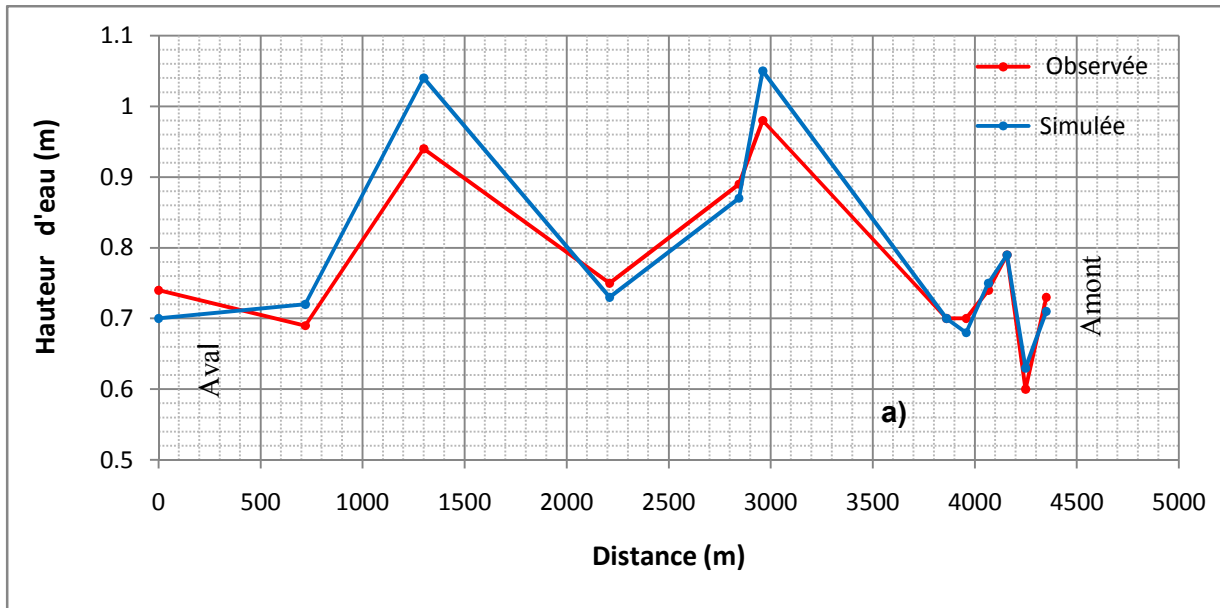
Événement	Débit simulé	Critère Nash	R	RMSE
Le : 05/06/2017	3.21	0.87	0.97	0.018
Le : 16/11/2017	3.45	0.90	0.95	0.030
Le : 03/12/2017	1.81	0.84	0.93	0.017
Le : 20/12/2017	1.40	0.90	0.94	0.015
Le : 21/12/2017	1.52	0.82	0.95	0.015
Le : 27/12/2017	1.45	0.89	0.94	0.030
Le : 29/12/2017	1.60	0.84	0.85	0.020
Le : 11/01/2018	1.38	0.73	0.89	0.049
Le : 15/02/2018	1.68	0.89	0.95	0.017
Le : 17/02/2018	1.63	0.93	0.94	0.023
Le : 18/02/2018	1.70	0.85	0.92	0.030
Le : 19/02/2018	1.68	0.89	0.95	0.017
Le : 20/02/2018	1.55	0.63	0.73	0.055

Pour illustrer les résultats de calage du modèle, on a présenté sur les Figures IV.13, IV.14 et IV.15 les hauteurs d'eau maximales observées et simulées dans 12 sections du canal et les lignes d'eau correspondantes pour trois événements pluvieux le 16/11/2017, 20/12/2017 et le 18/02/2018.

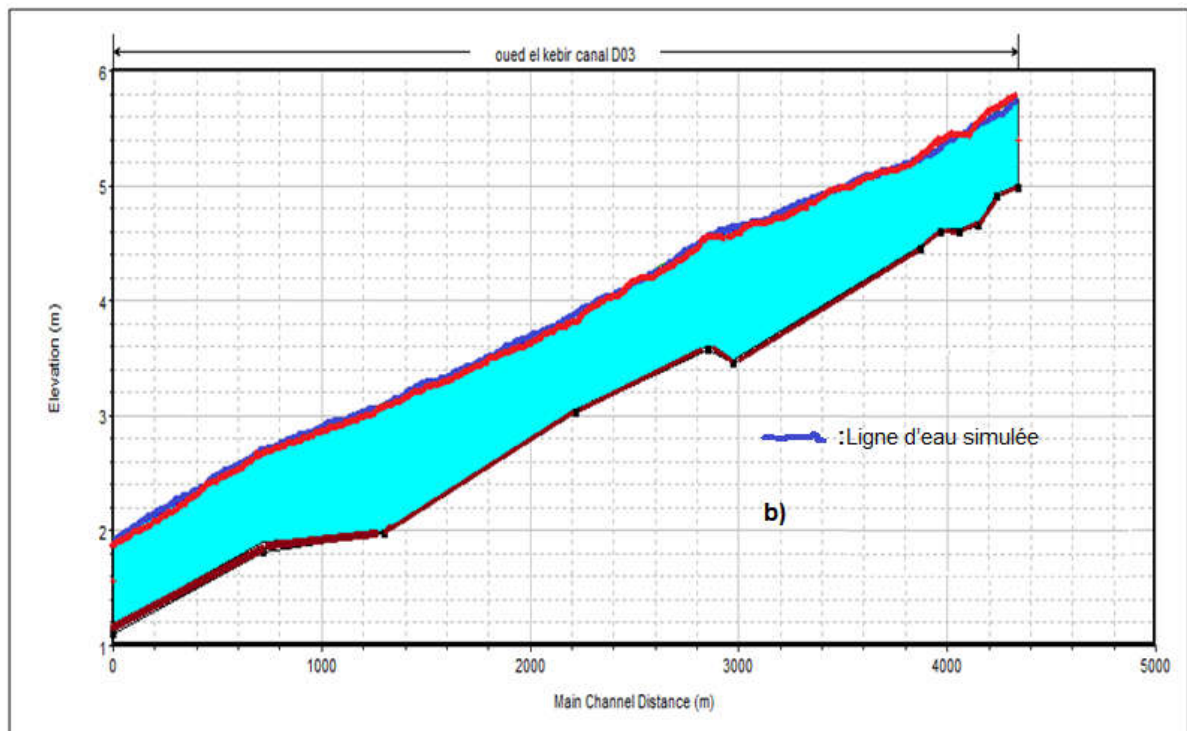
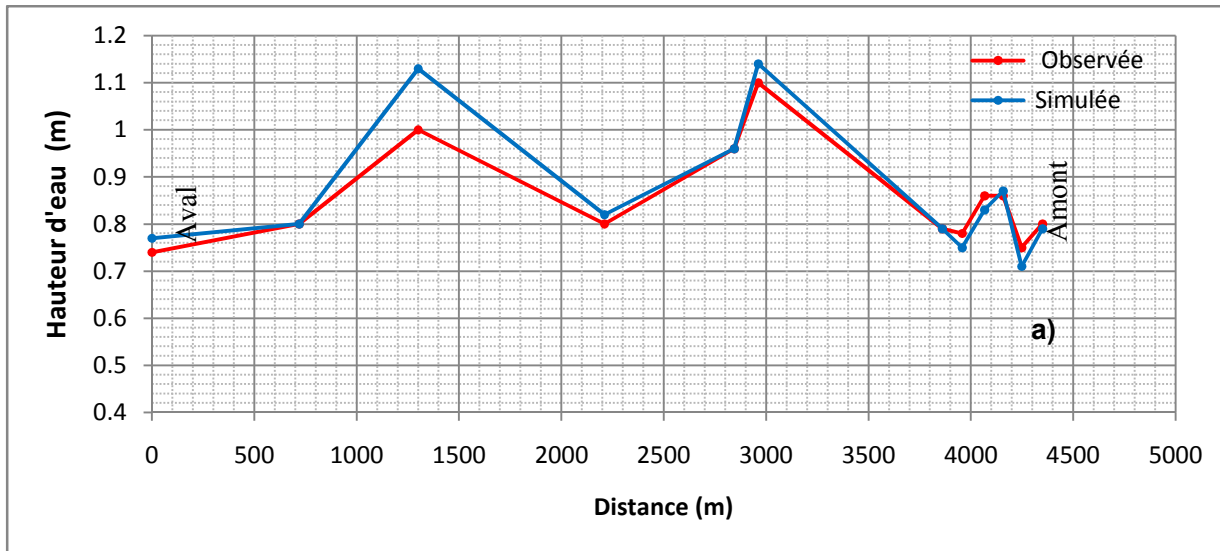
Sur ces figures on voit que les hauteurs simulées sont proche aux hauteurs observées. On voit aussi que dans la section 2 et 5 la hauteur d'eau (observée et simulée) est visiblement supérieure que celles des sections voisines. Ceci peut être expliqué par le fait de forte diminution de la pente du tronçon entre les sections (1 -2) et (4-5) respectivement par rapport au tronçon en aval.



**Figure IV.13** a) Hauteur d'eau observées et simulées dans les 12 sections du canal et b) les lignes d'eau correspondantes pour l'événement de 16/11/2017 ( $Q_{max}=3,45 \text{ m}^3/\text{s}$ )



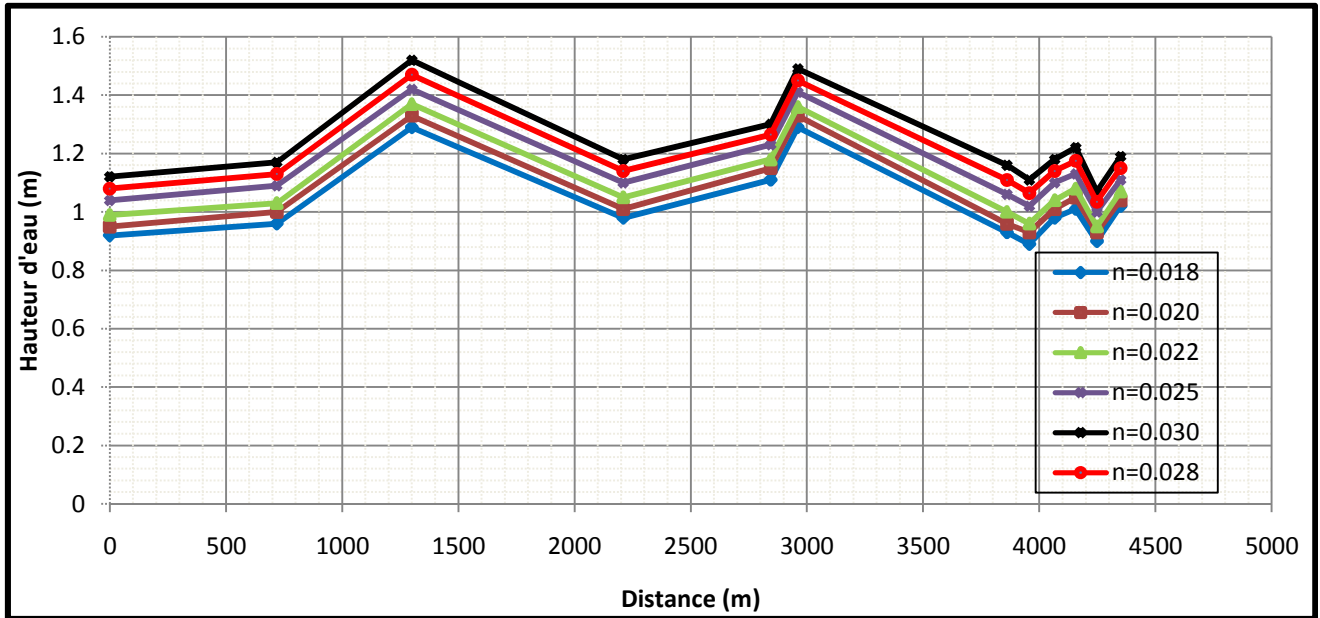
**Figure IV.14** a) Hauteur d'eau observées et simulées dans les 12 sections du canal et b) les lignes d'eau correspondantes pour l'événement le 20/12/2017 ( $Q_{max}=1,40 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Figure IV.15** a)Hauteur d'eau observées et simulées dans les 12 sections du canal et b) les lignes d'eau correspondantes pour l'événement le 18/02/2018 ( $Q_{max}=1,70 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Il été intéressant de tester la sensibilité du modèle hydraulique élaboré via le logiciel HEC-RAS. Pour notre cas d'étude, le test de sensibilité a porté sur la rugosité en vu de son importance pour la phase de calage. Dans ce but, nous avons réalisé plusieurs simulations de l'écoulement dans le canal en changeant à chaque simulation la valeur du coefficient de

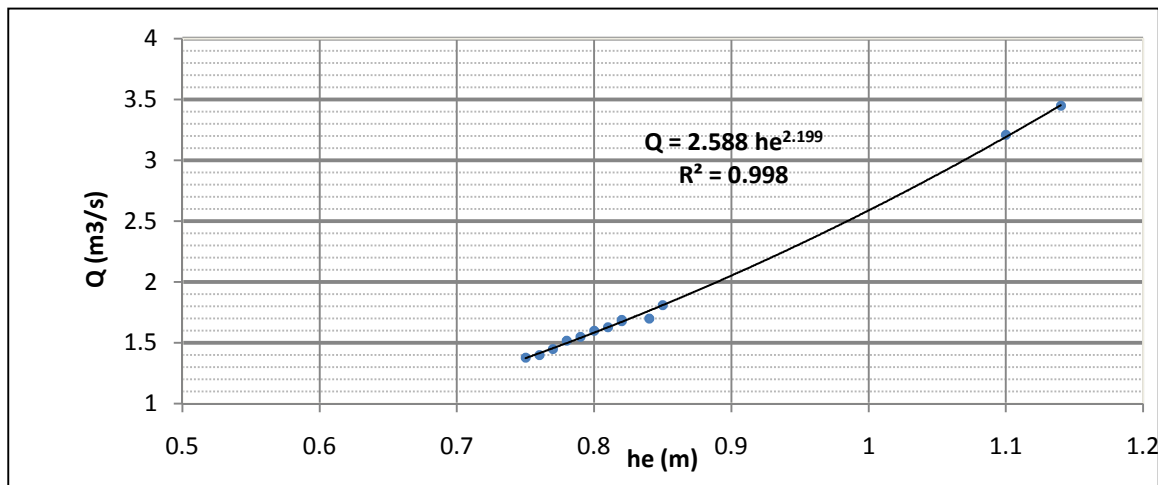
rugosité de Manning ( $n$ ). Ces simulations étaient réalisées pour l'événement pluvial de 16/11/2017 qui a engendré le débit maximal de  $3,45 \text{ m}^3/\text{s}$ . La Figure IV.16 présente l'effet de la variation de la rugosité sur l'évolution de la hauteur d'eau dans le canal. On y voit que la hauteur d'eau varie proportionnellement au coefficient de rugosité.



**Figure IV.16** Effet de la variation de la rugosité sur l'évolution de la hauteur d'eau dans le canal (évènement du : 16/11/2017;  $Q_{\max}=3,45 \text{ m}^3/\text{s}$ ), ( $n$ ) est le coefficient de Manning

Sur la base des hauteurs observées, on a tracé la courbe de tarage en aval du canal pour les conditions de son état actuel (Figure IV.17). L'équation de cette courbe est la suivante :

$$Q = 2.588 \text{ he}^{2.199} \quad (\text{IV.11})$$



**Figure IV.17** Courbe de tarage dans la section aval du canal (section 0)

## Conclusion

L'étude de la modélisation de l'écoulement dans le canal d'essai a montré que le modèle hydraulique du code HEC-Ras peut être utilisé pour décrire l'écoulement dans ce canal avec le coefficient de rugosité de Manning ( $n=0.028$ ) actualisé.

### IV.3.3 Modélisation de transport sédimentaire dans le canal D 03

#### IV.3.3.1 Etude d'évolution de la couche sédimentaire dans le canal

L'absence des travaux d'entretien dans le canal depuis la réalisation en 2006 jusqu'à ce jour selon le service de ONID d'El Tarf, nous laisse à comparer les résultats de simulation avec les mesures sur terrain et caler le modèle. Les objectifs de cette modélisation sont: d'analyser l'évolution morphologique du canal par les sédiments, d'estimer le volume sédimentaire et de chercher un modèle sédimentaire applicable dans la zone d'étude après la validation pour pouvoir planifier la réhabilitation du réseau de drainage.

Les résultats des levés topographiques réalisés sur le terrain en mai 2017 montrent que la forme géométrique du canal, concernant la profondeur, la pente des berges, la largeur du fond, la largeur au miroir et même la pente du fond de quelques tronçons, a changé fortement pendant 11 ans d'exploitation (Figure IV.18). La valeur moyenne de l'épaisseur de sédiment le long du canal pendant 11 ans atteint environ 0,77m ( $hs_{moy} = 0.77m$ ) et correspond à un taux moyen d'environ de 34 % de la section transversale du canal.

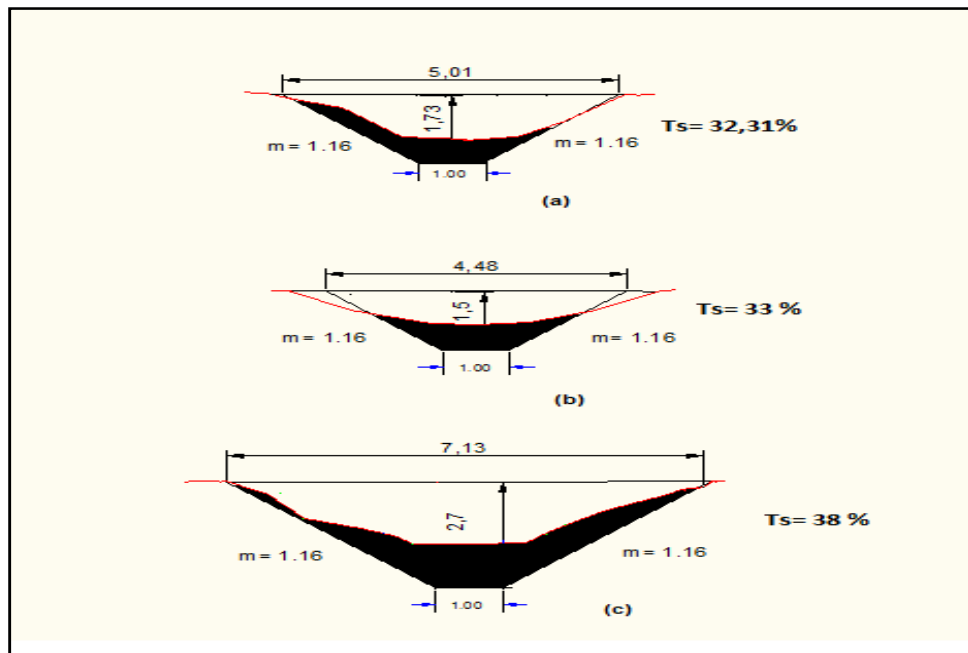
En se basant sur l'interpolation entre les levés topographiques initiaux (récolement du canal en 2006) et les levés topographiques réalisés en mai 2017 des profils transversaux du canal D03, on a constaté que le taux de dépôt sédimentaire ( $T_s$ ) le long de ce dernier augmente progressivement de l'amont vers l'aval (Figure IV.18, Tableau 8). Par contre, selon l'analyse granulométrique du sol de fond du canal, la granulométrie de sédiment décroît de l'amont vers l'aval (Figure IV.3).

Pour voir l'évolution du fond de canal pour la période de 11 ans, les simulations ont été réalisées via les modèles hydro-sédimentaires du logiciel HEC-RAS.

Pour le modèle sédimentaire, plusieurs combinaisons avec sept formules de transport sédimentaire et trois méthodes de calcul de la vitesse de sédiment ont été testées en tenant compte des conditions aux limites. Ces dernières nécessitent d'introduire les charges sédimentaires totales mesurées en aval et de spécifier les débits d'entrée comme un

écoulement quasi instable. Les résultats de chacune de ces combinaisons ont été comparés avec les mesures topographiques relevées sur le terrain (Tableau 8).

Enfin, la combinaison de l'équation d'Engelund et Hansen (1967) et la méthode de calcul de la vitesse de sédimentation de Van Rijn (1984) était plus compatible avec les hauteurs de dépôt sédimentaire interpolées lors de la campagne de relevé topographique, d'autant plus que le domaine de validité de ces équations correspond au type de sédiment du canal qui est classé entre argile sableuse –limoneux.



**Figure IV.18** Taux de dépôt de sédiment (Ts) dans les sections transversales du canal : (a) en amont, (b) au milieu, (c) en aval, pour la période de 2006 à 22/05/2017

Les résultats de modélisation du transport des sédiments montrent qu'il y a un dépôt sédimentaire sur toute la longueur du canal, donc, selon Degoutte (2012) le débit solide est supérieur à la capacité de transport. Les travaux de Méndez (1998) montrent que la quantité de sédiments déposés dans le fond des canaux d'irrigations diminue de l'amont vers l'aval, inversement à nos résultats. Dans les canaux de drainage la couche sédimentaire augmente progressivement de l'amont vers l'aval sur une période de 11 ans (Figures IV.19, IV.20).

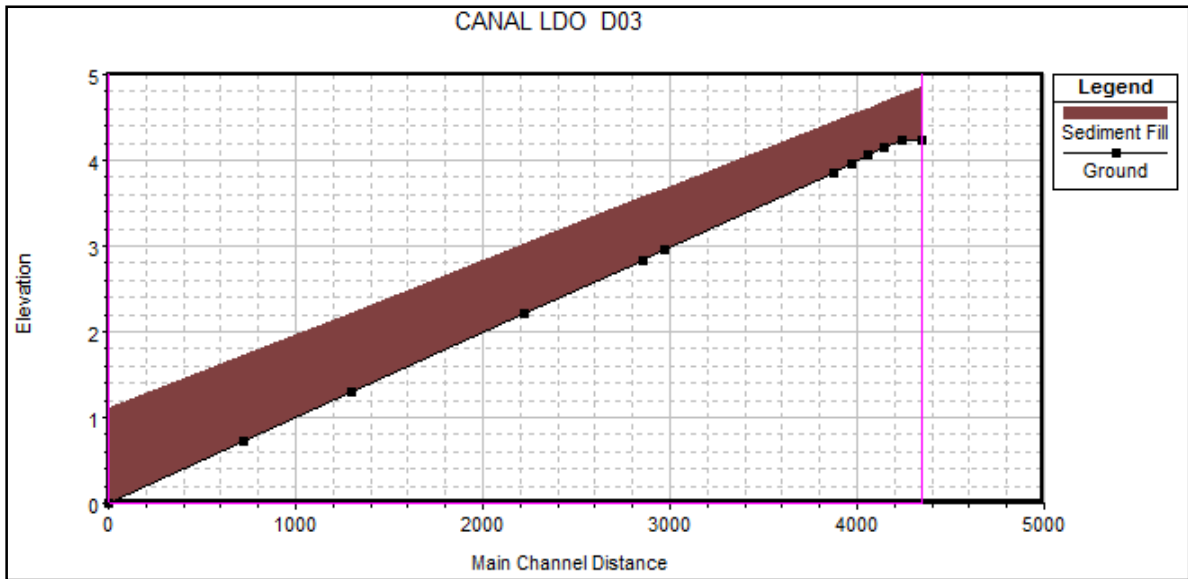


Figure IV.19 Profils en long de sédimentation simulé sur la période de 11 ans (2006 - 2017)

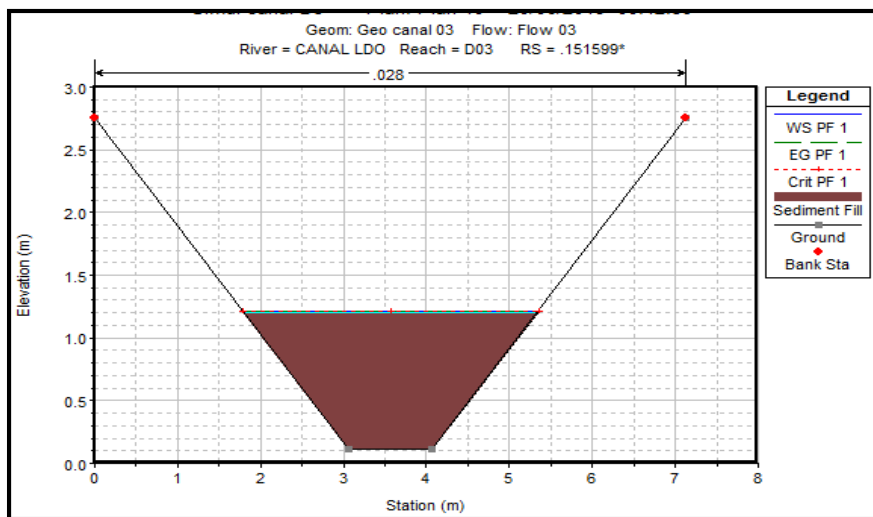
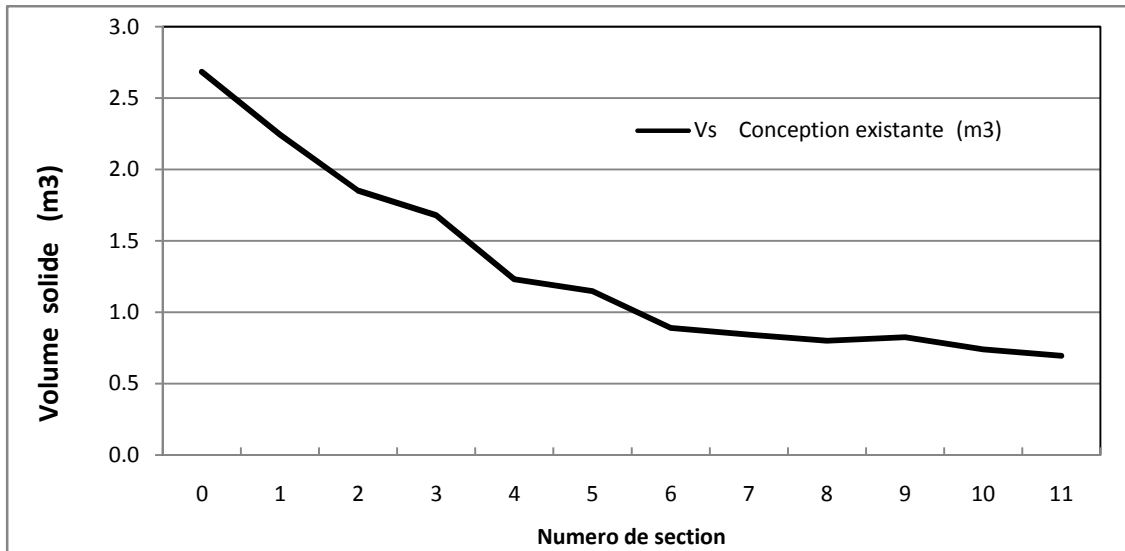


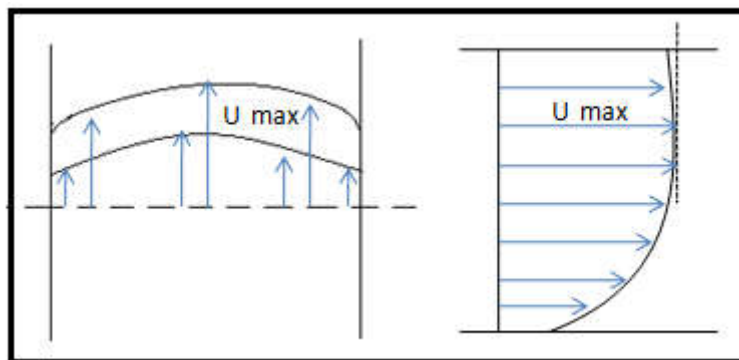
Figure IV.20 Profil en travers de la couche sédimentaire simulé sur la période de 11 ans (section 0)

L'augmentation progressive de la couche sédimentaire dans le canal D03 de l'amont vers l'aval peut être expliquée par l'existence de la vanne à clapet au niveau de rejet du passage busé sous digue (l'exutoire sur Oued El Kebir), qui crée une perte de charge et favorise la sédimentation. Variation du volume sédimentaire déposée le long du canal pour la période de 2006 à 2017 est présenté sur la figure IV.21.



**Figure IV.21** Variation du volume sédimentaire déposé le long du canal pour la période de 2006 à 2017

L'épaisseur de la couche sédimentaire simulée se répartie uniformément au fond du canal (Figure IV.20). En réalité elle n'est pas constante sur le périmètre de la section transversale du canal (Figure IV.18). Cela peut être expliqué par la variation latérale de la vitesse de l'eau qui entraîne une variation latérale du niveau de sédiment le long du canal. La vitesse est très faible au contact de la berge, elle croît pour atteindre une valeur maximale dans l'axe du canal (Figure IV.22), suite de quoi, on remarque que le sédiment se dépose sur berges de ce dernier.

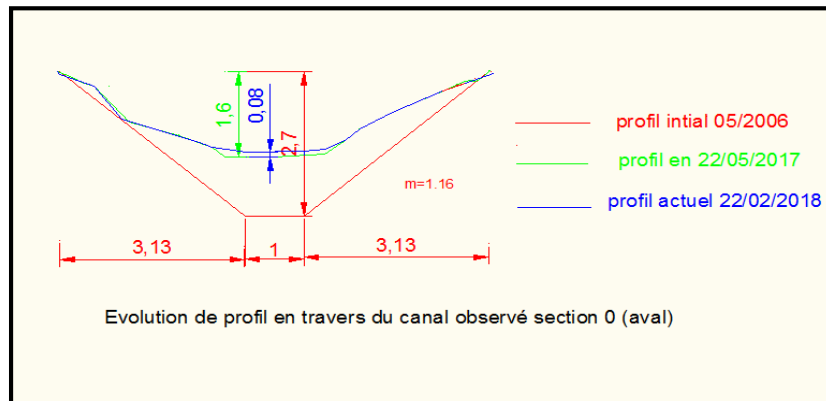


**Figure IV.22** Schéma d'un écoulement laminaire dans un canal (*source* : Beauchamps J., 2006).

#### IV.3.3.2 Calage et validation du modèle sédimentaire

Lors de la campagne de mesures menée de 22/05/2017 à 22/02/2018 on a mesuré les hauteurs d'eau dans les 12 sections transversales de canal correspondantes aux débits maximaux engendrés par les pluies journalières survenus durant cette période. Aussi, les hauteurs des sédiments déposés au fond du canal ont été mesurées après chaque événement

pluvial (Figure IV.23). Ces paramètres observés sont choisis pour le calage de modèle hydro-sédimentaire unidimensionnel élaboré sous le logiciel HEC RAS.



**Figure IV.23** Évolution de profil en travers du canal observé section amont.

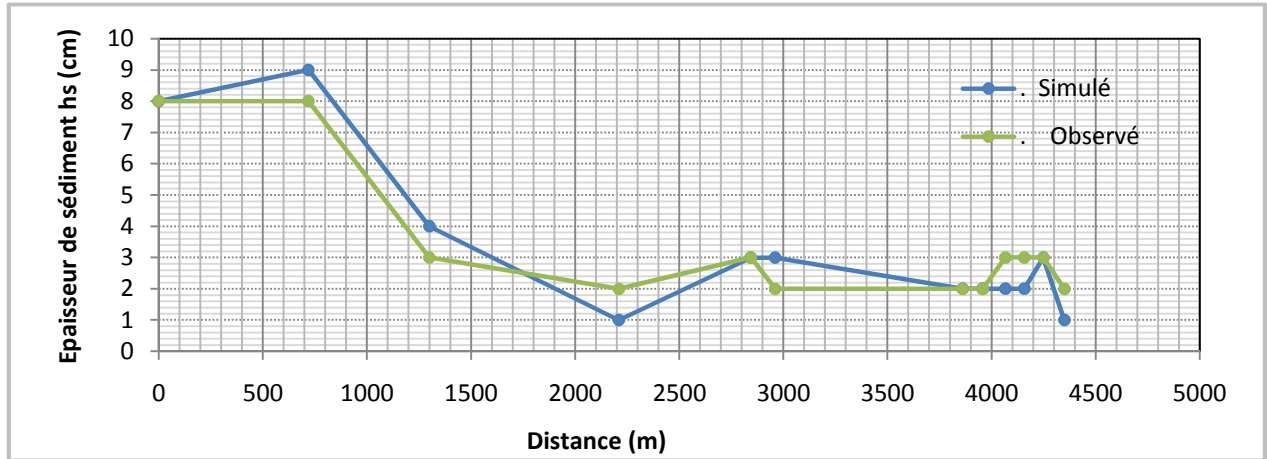
Comme cela a été dit précédemment, le modèle hydraulique élaboré via le logiciel HEC RAS été calé aux hauteurs d'eau observées avec le coefficient de rugosité de Manning égal à 0,028 représentatif pour le canal d'étude.

L'objectif du modèle sédimentaire est de calculer les variations des taux de sédiments transportés, ainsi que de prévoir l'évolution de niveau du fond du canal. L'élaboration du modèle sous HEC-RAS nécessite la définition des paramètres hydrauliques et des propriétés des sédiments, ainsi que le choix de méthodes de calculs.

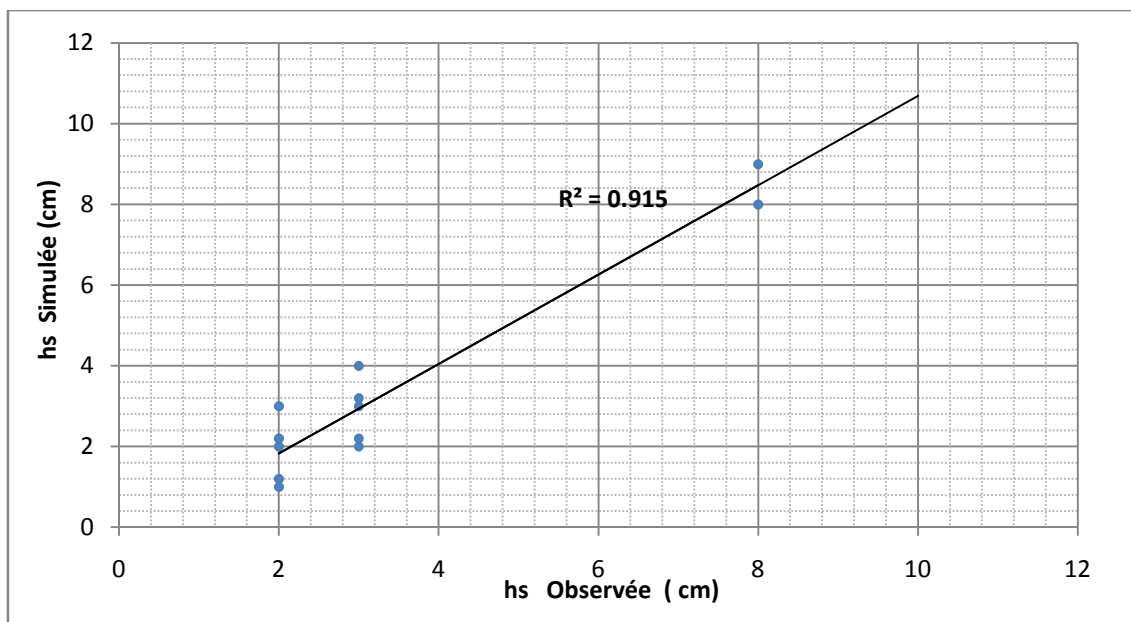
Le modèle a été élaboré sur la base des résultats des essais granulométriques (courbes granulométriques, Figure IV.3) pour le lit du canal, des propriétés de sédiment (densités des sédiments (Tableau 7)) et d'une série des débits qui ont été adaptés dans la simulation hydraulique avec la charge sédimentaire mesurée expérimentalement pendant les événements pluvieux (Tableau 14).

Pour la modélisation du transport solide le logiciel HEC-RAS propose sept formules pour prédire le transport solide par l'épaisseur de sédiment ( $h_s$ ), trois méthodes de calcul de la vitesse de sédimentation et deux méthodes d'évolution de lit sédimentaire celle d'Exner 5 ou Active Layer (Voir §III.5.1). Dans cette modélisation de transport de sédiments total, 20 combinaisons différentes des formules ont été testées et, comme dans le cas précédent, la combinaison de l'équation d'Engelund and Hassan (1967) avec la condition limite de sédimentation aval et la méthode de calcul de vitesse de sédimentation de Van Rijn (1984), était plus compatible avec les épaisseurs observées de sédiments déposés (Figure IV.24). On

remarque qu'en amont du canal les épaisseurs observées sont égales dans plusieurs sections transversales. Le calage de ce modèle sédimentaire a été validé avec les critères suivants :  $R=0.956$  (Figure IV.25),  $RMSE=0.02$  m et du critère de Nash=0.867.

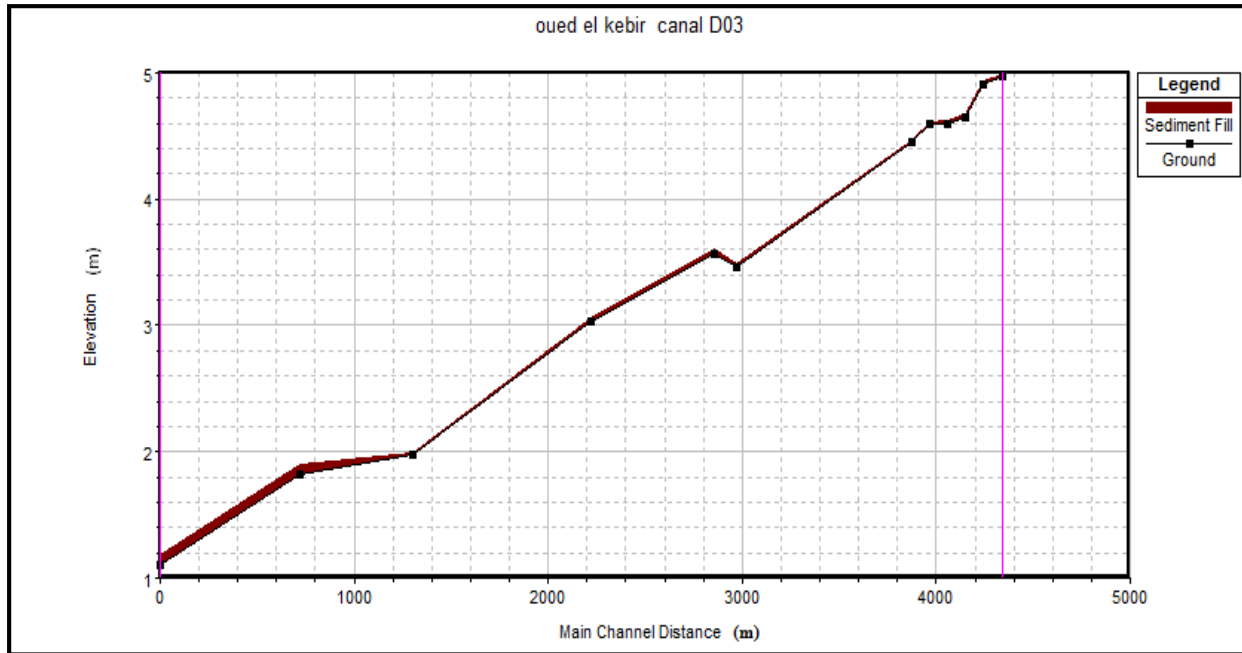


**Figure IV.24** Epaisseurs totales ( $h_s$ ) de la couche sédimentaire simulée et observée dans les 12 sections du canal pour la période de mesure de 22/05/2017 à 20/02/2018



**Figure IV.25** Calage du modèle sédimentaire pour la période de mesure de 22/05/2017 à 20/02/2018

La Figure IV.26 montre que les dépôts des sédiments ne sont pas uniformes le long du canal. Cette figure montre également, que le plus fort changement du fond du canal est enregistré en aval de ce dernier.



**Figure IV.26** Profil en long de sédimentation simulé sur la période de 22/05/2017 à 20/02/2018

### IV.3.3.3 Estimation de l'épaisseur de sédiment empiriquement

De nombreuses équations ont été développées et testées pour la prédiction du transport de sédiments, ce qui rend difficile le choix des équations les plus appropriées dans la quantification du transport solide. Le premier paramètre exploré est celui concernant le domaine d'application des différentes formules de transport selon le mode de transport soit charriage, suspension ou total limité par la contrainte de cisaillement du fond (paramètre de Shields  $\tau^*$ ) et la taille de sédiment (dm). Ainsi, ces équations ont été établies pour des conditions bien particulières. Il n'y a pas de formule universelle de transport solide car elles ont été établies dans des conditions différentes. Les conditions d'établissement des formules ainsi que leur domaine de validité sont souvent peu connus ou mal établis (Degoutte, 2012).

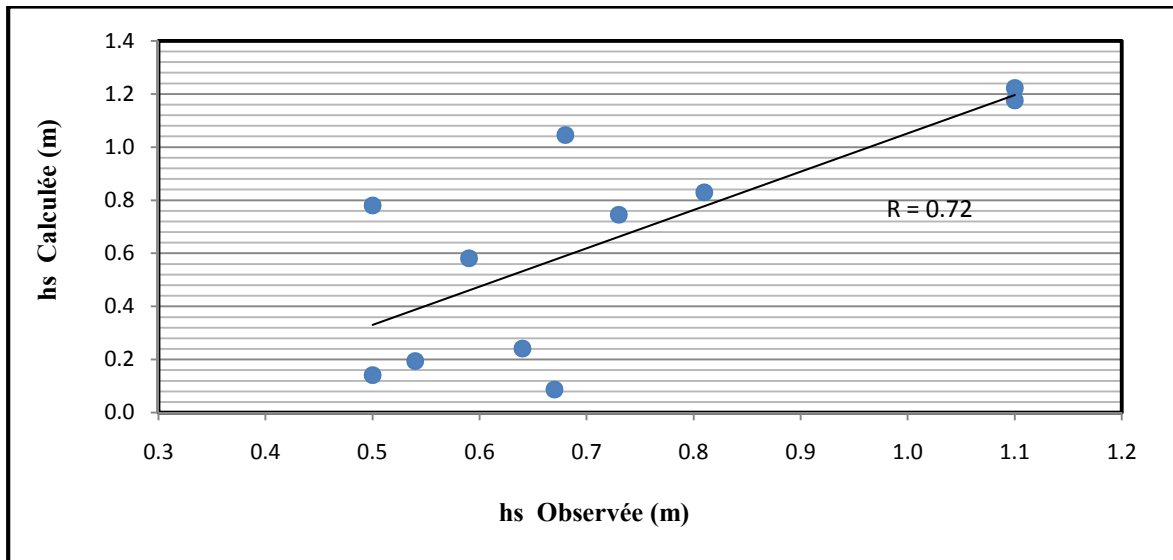
Bien que le manuel du logiciel HEC-RAS et la littérature définissent les domaines de validité pour les différentes formules de transport en fonction du type de sédiments étudié, ces domaines de validité restent assez vagues et sont encore aujourd'hui discutés par les scientifiques. Donc, nous avons décidé de tester d'autres équations hormis les équations du transport solide du code HEC-RAS utilisées précédemment, soit l'équation d'Engelund et Hassan (1967). Ces équations sont suivantes : Smart et Jaeggi (1983), Schoklitsch (1962), Parker (1982), Van Rijn (1984), Engelund et Hansen (1967), Ackers et White (1973) et

Recking (2010). Ces formules donnent le transport solide sous forme d'un débit, pour passer du débit solide  $Q_s$  au volume solide  $V_s$  on utilise la formule Degoutte (2012) suivante:

$$V_s = \sum Q_s \cdot \Delta t \quad (IV.12)$$

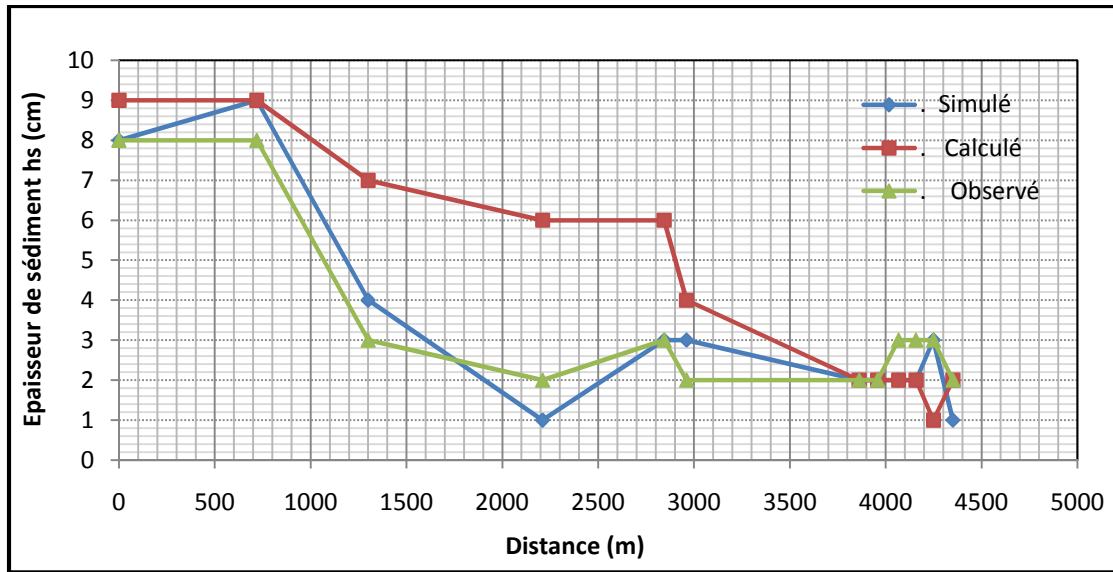
Où  $V_s$  : volume de sédiment ( $m^3$ ),  $\Delta t$  : l'intervalle de temps. Dans notre cas on a proposé de prendre  $\Delta t = 0.25h = 15 \text{ min}$  et on prend  $\Delta t = 90 \text{ s}$  pour la période d'observation: (22/05/2017-20/02/2018).

Les résultats de calcul d'épaisseur de la sédimentation ( $h_s$ ) obtenus par l'application des formules de transport solide de Smart et Jaeggi, Schoklitsch, Parker, Van Rijn et Recking ont présenté des erreurs considérables vue leurs domaines de validité. Par contre, les résultats des deux formules de transport solide total d'Engelund et Hansen et d'Ackers et White, (voir Annexe 3), ont présenté des résultats acceptables (Figure IV.27) avec un coefficient de corrélation  $R=0.72$ .



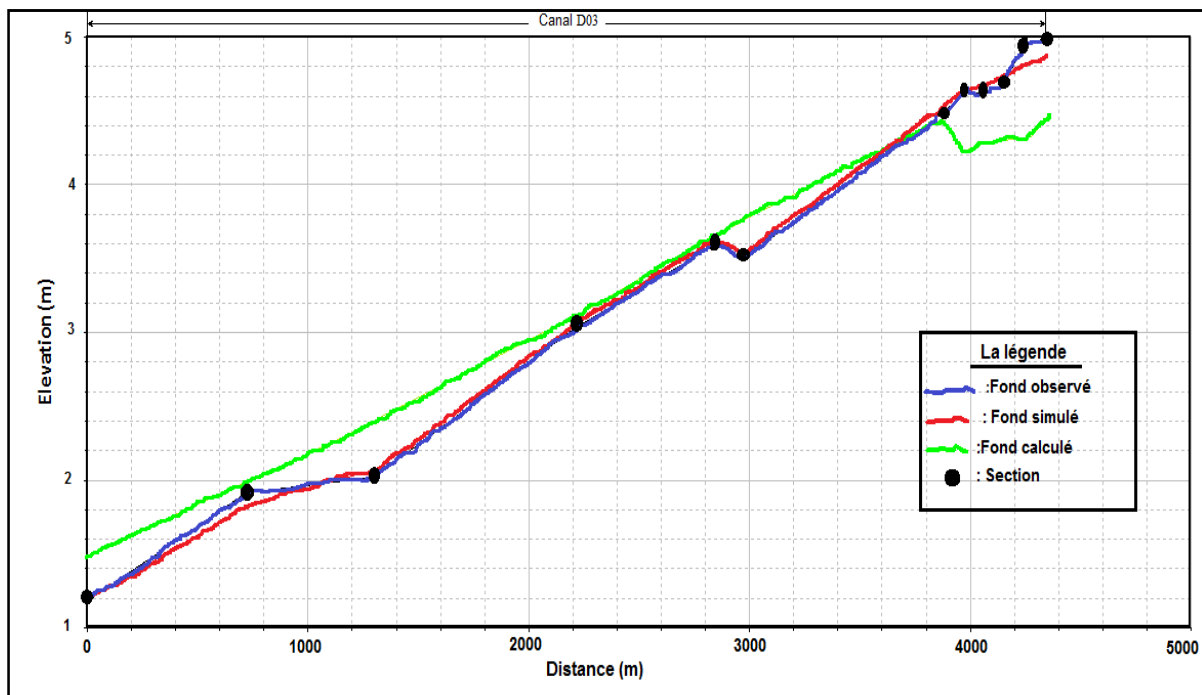
**Figure IV.27** Corrélation de l'épaisseur de la sédimentation ( $h_s$ ) calculée par la formule d'Engelund et Hansen (1967) et mesurée pour la période de 2006 à 2017

Les résultats analogues ont été trouvés lors du calage du modèle sédimentaire empirique d'Engelund et Hansen aux épaisseurs de la sédimentation observées durant la période de 2017 à 2018 (Figure IV.28).



**Figure IV.28** Comparaison des épaisseurs de la sédimentation calculées par la formule d'Engelund et Hansen, simulées et observées pour la période de 2017 à 2018

Sur la figure IV.29 nous avons montré l'évolution du fond du canal pendant les événements pluvieux selon les différentes approches d'estimation de l'épaisseur de la sédimentation et on peut constater que le fond sédimentaire dans le canal n'évalue pas uniquement lors des fortes crues mais aussi lors des événements pluvieux courants.



**Figure IV.29** Evolution du fond du canal pendant les événements pluvieux selon les différentes approches d'estimation de l'épaisseur de la sédimentation

#### IV.3.3.4 Estimation de volume sédimentaire expérimentalement

Les débits solides s'expriment en fonction des débits liquides selon une loi de puissance. Cette dernière a été appliquée et validée sur plusieurs bassins algériens par les nombreux auteurs tels que Dammek (1982), Benkhaled et Remini (2003), Magnounif et al. (2003), Bouanani (2004), Achite et Meddi (2004).

D'après le suivi expérimental des concentrations en matière de suspension et les débits liquides à partir des mesures sur le site du canal (Tableau IV.14) dans la période de 22/05/2017 à 20/02/2018 lors des événements pluvieux, nous avons trouvé la relation entre le débit solide et le débit liquide sous la forme suivante :

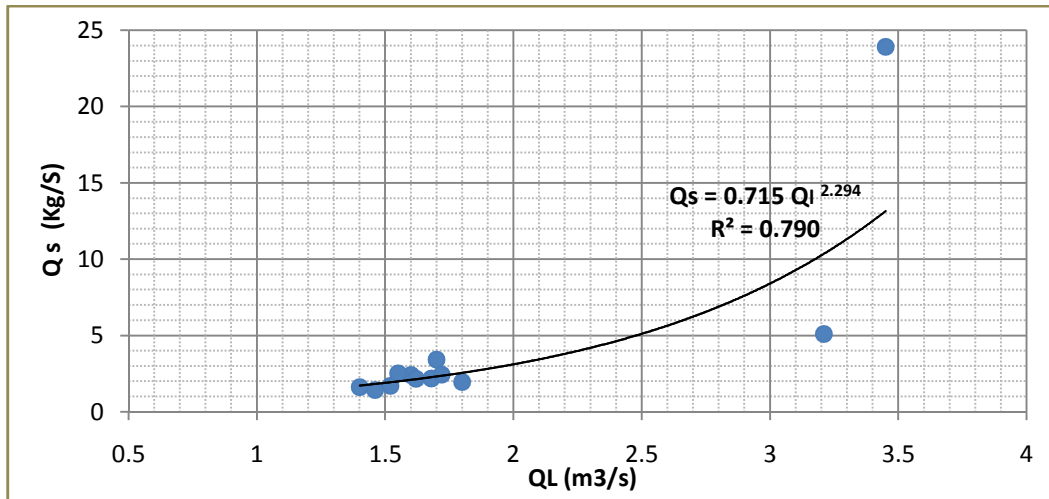
$$Q_S = a Q_L^b \Rightarrow Q_S = 0.715 Q_L^{2.294} \quad (IV.13)$$

Où a et b sont les paramètres d'ajustement,  $Q_S$  est le débit solide exprimé en kg/s et  $Q_L$  est le débit liquide exprimé en m<sup>3</sup>/s.

L'allure de la courbe  $Q_S=f(Q_L)$  est présentée sur la Figure IV.30. La queue supérieure de cette courbe est relativement aléatoire suite au nombre restreint de jours pluvieux observés parmi lesquels durant la journée du 16/11/2017 il est tombé 94 mm de pluie. Cette pluie a engendré un flux fortement chargé en matières en suspension. Pour les pluies courantes, la concentration des matières en suspension est faible.

**Tableau IV.14.** Valeurs des débits liquides et solides lors des événements pluvieux pour la période d'observation de 2017 à 2018.

Dates des jours pluvieux	Débits liquides (QL en m <sup>3</sup> /s)	Concentration (Cm en g/l)	Débits solides (Qs en kg/s)
Le : 05/06/2017	3.21	1.59	5.10
Le : 16/11/2017	3.45	6.93	23.91
Le : 03/12/2017	1.8	1.08	1.94
Le : 20/12/2017	1.4	1.15	1.61
Le : 21/12/2017	1.52	1.11	1.69
Le : 27/12/2017	1.46	0.98	1.43
Le : 29/12/2017	1.6	1.51	2.42
Le : 11/01/2018	1.38	0	0.00
Le : 15/02/2018	1.68	1.3	2.18
Le : 17/02/2018	1.62	1.33	2.15
Le : 18/02/2018	1.72	1.41	2.43
Le : 19/02/2018	1.69	2.02	3.41
Le : 20/02/2018	1.55	1.62	2.51



**Figure IV.30** Variation de débit solide en fonction de débit liquide

Une fois trouvée la relation entre  $Q_s$  et  $Q_L$ , le volume de dépôt de sédiment est calculé par la formule suivante :

$$V_s = \frac{Q_s}{\gamma_s} , \quad (\text{IV.14})$$

où  $Q_s$  : débit solide (kg/s),  $Q_L$  : débit liquide (m<sup>3</sup>/s) et  $\gamma_s$  : masse volumique spécifique du sédiment (kg / m<sup>3</sup>) (Tableau 7).

Donc le volume total de sédiment déposé durant la période de 22/05/2017 à 20/02/2018 est de 189 m<sup>3</sup>. Finalement, on a pu quantifier un cumul de sédiment le long du canal durant 12 ans de 10825.92 tonnes (6939.69 m<sup>3</sup>) environ, avec une moyenne d'épaisseur de 0.77 m et un taux moyen de l'occupation de la section du canal égal à 33.66%.

#### IV.4 Conclusion

L'objectif principal de cette partie d'étude a été de quantifier et estimer l'évolution morphologique des canaux de drainage à ciel ouverte en terre sous l'influence du processus du transport solide pour la période allant de 2006 jusqu'à 2018 et, également, mettre en évidence l'effet de l'évolution morphologique des canaux sur leurs capacité hydraulique. Un canal 03 qui fait partie du système de drainage a été choisi pour une représentation globale de cette étude. Le modèle du canal a été élaboré et calibré sur la base des conditions actuelles. L'étude expérimentale des propriétés physico- mécaniques et de granulométrie des matériaux le long de tracé du canal a montré qu'ils sont classés entre argile, sable et limon, avec une granulométrie variant de  $D_{50} = 0.040$  mm en amont à  $D_{50} = 0.012$  mm en aval du canal.

Pour analyser les quantités de sédiments transportés dans le canal et leurs effets sur les changements morphologiques de ce dernier, nous avons utilisé le modèle hydraulique et sédimentaire de logiciel HEC-RAS.

Le modèle hydraulique a été calé aux hauteurs d'eau observées pendant les événements pluvieux qui se sont produits durant la période d'observation de 22/05/2017 à 20/02/2018. Les résultats plus proches aux données réelles ont été obtenu en ajustant le coefficient de rugosité de Manning  $n=0,028$ . Dans notre cas d'étude l'existence des herbes au niveau du lit du canal correspond parfaitement à cette valeur du coefficient de rugosité. La validation du calage du modèle a montré un bon résultat avec le critère de performance de Nash qui varie de 0,63 à 0,97, le coefficient de corrélation variant de 0,73 à 0,95 et avec le RMSE qui varie de 0,017 à 0,055 m pour les différents événements pluvieux de la période d'observation.

Parmi les différents modèles sédimentaires proposés par le code HEC-RAS, le modèle sédimentaire d'Engelund et Hansen (1967) décrivant le transport solide total dans le canal et le modèle de vitesse de sédimentation de Van Rijn (1984) ont donné les résultats plus proches aux données réelles mesurées lors des événements pluvieux sur la même période d'observation de 22/05/2017 à 20/02/2018 conformément à la granulométrie des sédiments du fond de canal. Le calage de ce modèle sédimentaire a été validé avec les critères suivants :  $R=0.956$ ,  $RMSE=0.02$  m et du critère de Nash=0.867.

Les simulations réalisées ont permis d'estimer le volume moyen de dépôt de sédiments au fond du canal, cumulé depuis sa réalisation en 2006 jusqu'à la campagne de mesure menée en 2018 qui est de 10825.92 tonnes. Ces simulations ont montré, également, que le fond sédimentaire dans le canal de drainage en terre dans la zone d'étude, n'évalue pas uniquement lors des fortes crues mais aussi lors des événements pluvieux courants du période d'observation. Le calage des modèles a permis de découvrir aussi que les changements de la géométrie du canal dépendent fortement de la granulométrie des sédiments, des paramètres hydrauliques ainsi que de paramètre principal qui est la rugosité du fond de canal. Donc pour notre cas d'étude l'existence et l'accroissement des herbes au niveau du fond des canaux augmente le coefficient de rugosité ( $n$ ) et, est l'une des causes de débordement des canaux. A cet effet, on peut conclure que la modélisation du transport solide est un moyen qui peut servir dans la planification de la réhabilitation des canaux de drainage de la plaine.

La plaine de Boutheldja est confronté à un autre problème, que nous allons aborder ci-dessous, c'est le risque de débordement aval de l'oued El Kebir suite de déversement d'un

apport supplémentaire de barrage Mexa pendant les crues et par conséquent, l'inondation de la plaine.

## **IV.5 Étude de l'influence de déversement de barrage Mexa sur le débordement aval de l'oued El Kebir.**

### **IV.5.1 Introduction**

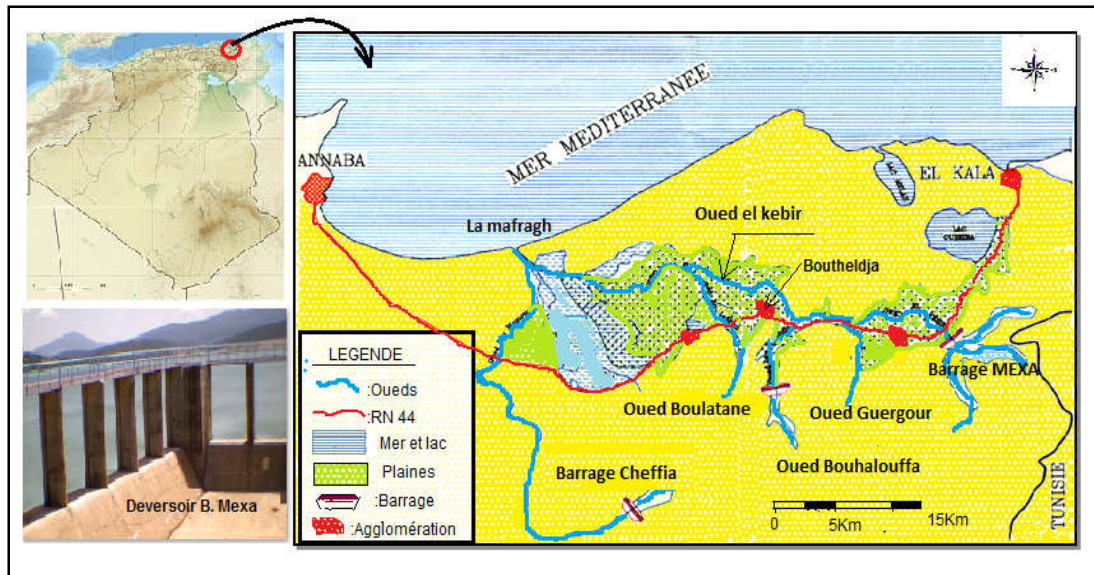
La plaine de Bouteldja a subie des graves inondations notamment celles de 2003, 2009, 2012 et l'avenir reste incertain à causes des déversements du barrage MEXA à l'aval de l'oued El Kebir. La zone de ce dernier a été aménagée en 2006 dans le cadre d'un projet hydro-agricole, par un endiguement de part et d'autre sur 53 Km environ, mais le problème n'a pas été encore résolu. Ce projet incluait aussi la réalisation du système de drainage de la plaine de Bouteldja.

Les causes de ces déversements peuvent être dues à la faible capacité de la retenue du barrage MEXA qui n'arrive pas à retenir les apports prévenants du bassin versant amont pendant les crues, par conséquent l'envasement de ce dernier et des changements dans le lit d'oued à cause de la végétation et, par conséquent, la vitesse d'écoulement d'une part et les dépôts de sédiments pour des quelques kilomètres en aval du barrage réduisent leur capacité d'écoulement d'autre part.

Donc, pour étudier l'effet de déversement du barrage Mexa sur le débordement de l'oued El Kebir en aval du barrage, on a effectué les simulations d'écoulement dans l'oued i) en tenant compte uniquement l'apport du au ruissèlement du bassin versant de son réseau hydrographique aval avec ou sans endiguement des berges et ii) en tenant compte l'apport supplémentaire déversé par le barrage pendant les crues avec l'endiguement des berges.

### **IV.5.2 Présentation de l'oued El Kebir**

La plaine de Bouteldja qui fait partie de la plaine d'El Tarf, est traversée par l'oued El Kebir à l'aval de barrage MEXA et confrontée continuellement aux inondations générées par les crues de cet oued, qui draine une superficie de 17092 ha des terres agricoles (selon DSA, El Tarf) avec une longueur de 62 km. Il débouche dans un seul exutoire au niveau de la mer Méditerrané par oued Mafragh, en plus, des autres oueds et affluents latéraux se déversent dans la rive gauche de l'oued El Kébir. Ce sont : l'oued Guergour, l'oued Bouhalouffa, l'oued Boulathane et l'oued Bounamoussa (Figure IV.31).

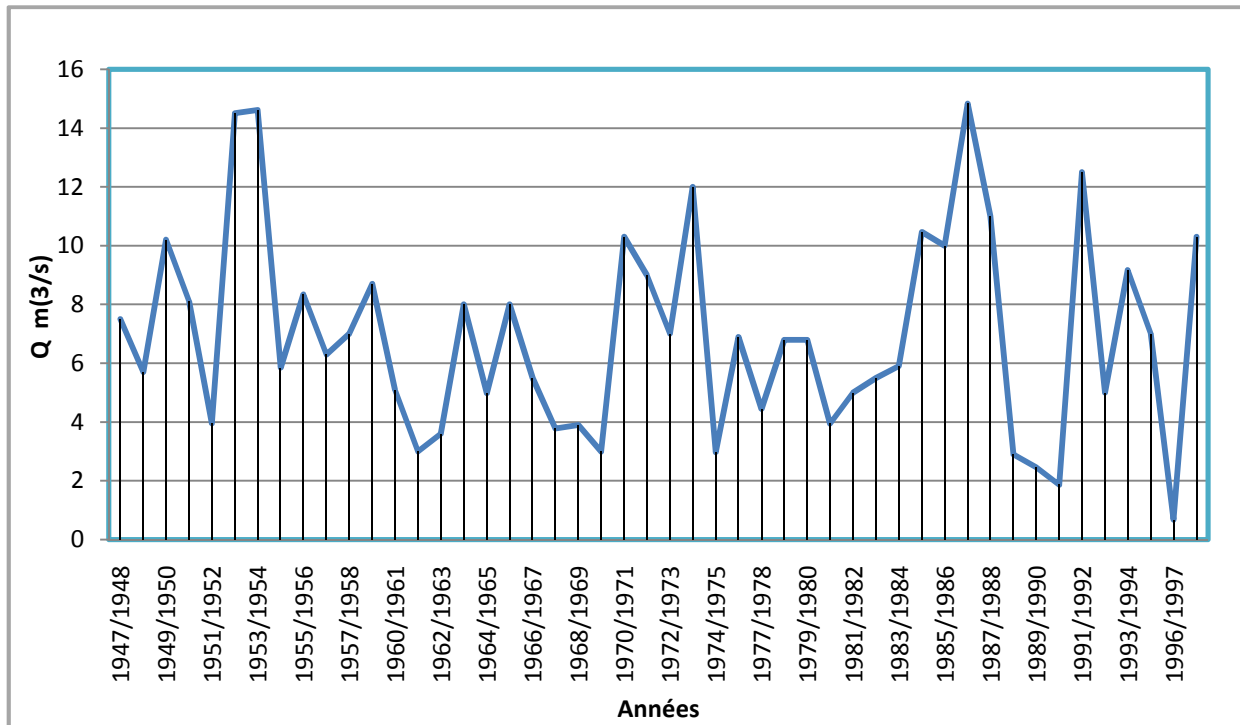


**Figure IV.31** Présentation la zone d'étude

Le barrage de MEXA est construit en 1984. Il est destiné à mobiliser au maximum les ressources hydriques du grand bassin de l'oued El Kebir utilisées pour l'alimentation en eau potable et l'industrie de la wilaya d'El Tarf et d'Annaba. Le barrage est situé à 07 km au Nord-Est de chef lieu de la ville d'El Tarf. Les données caractéristiques correspondant aux études préliminaires du barrage de Mexa qui nous ont été fournies, évaluent l'apport moyen annuel à  $137,1 \text{Hm}^3$  (ENHYD, 1996). La retenue du barrage, s'étendant sur une superficie de 506 ha, retient un volume de  $51.60 \text{Hm}^3$  à sa côte normale, qui est devenue 52 m NGA. Actuellement la capacité utile de retenue est de  $30,27 \text{Hm}^3$ . Le barrage de MEXA est munie d'un évacuateur de crue de surface avec un déversoir forme «L » de longueur 60 m (Figure IV.31).

### 1) Données hydrologiques

La variation des débits moyens annuels de l'oued El Kebir mesurés à la station hydrométéorologique d'Aïn Assel pour une période d'observation de 1946 à 1998 est présentée sur la Figure IV.32. Le graphe montre une importante variation des débits d'une année à l'autre. Le débit le plus élevé a été observé au courant de l'année 1986-1987 ( $Q = 14.83 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et le plus faible a été observé en 1996-1997 ( $Q = 0.68 \text{ m}^3/\text{s}$ ), (ANRH, Constantine).



**Figure IV.32** Variabilité interannuelle des débits moyens de l'oued El Kebir (station Ain Assel (1947-1998)), (source : ANRH, Constantine).

### IV.5.3 Modélisation hydraulique de l'oued El Kebir

On présente sur la Figure IV.34 la géométrie du tronçon étudié de l'oued El Kebir qui s'étend sur une longueur de 53 km allant du barrage MEXA jusqu'à la fin de la plaine proche de marais de Mekrada. Cette géométrie a été élaborée en utilisant logiciel ARC GIS et son extension HEC Géo RAS à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) de la zone. Le tronçon étudié a été divisé en 25 sections transversales.

En utilisant le modèle hydraulique du logiciel HEC-RAS, la première simulation de l'écoulement dans le tronçon aval de l'oued a été effectuée avec le débit maximal annuel de 14,83 m<sup>3</sup>/s pour la période de 1974 à 1998 avant l'endiguement de ce dernier. Le coefficient de Manning (n) était prise égal à 0,04, selon l'étude de Gharbi (2016) sur les crues de l'oued Medjerda en Tunisie.

Les résultats de simulation montrent qu'il n'existe pas de débordement sur toute la longueur du tronçon (Figure IV.34 et IV.35).

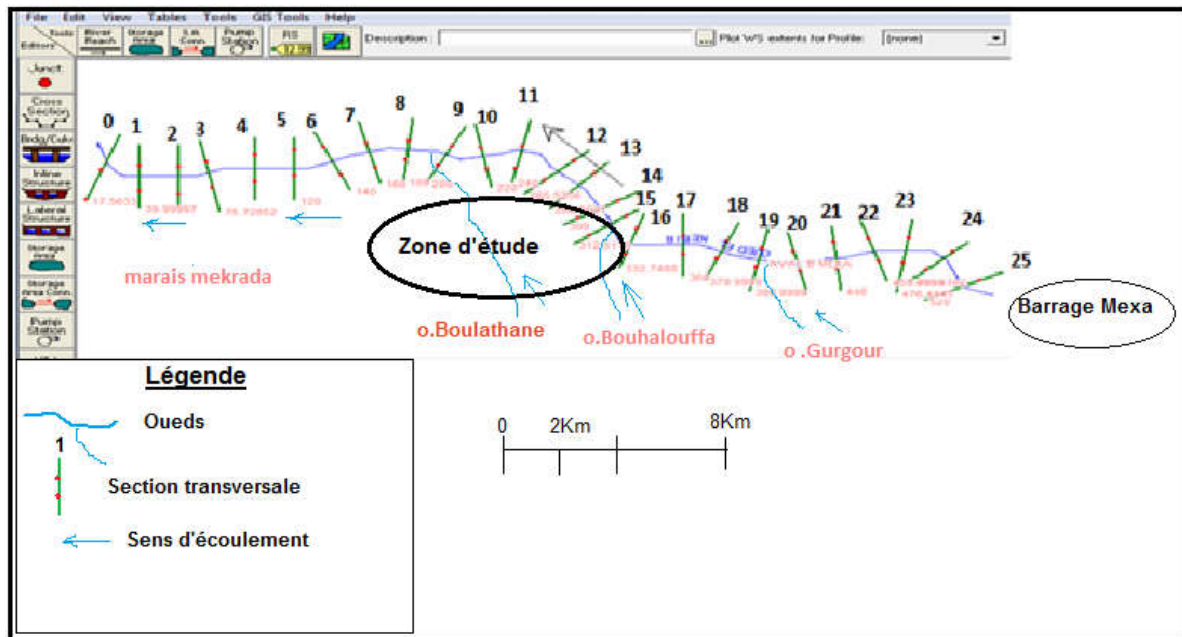


Figure IV.33 Sections transversales de l'oued El Kebir (HEC GéoRAS)

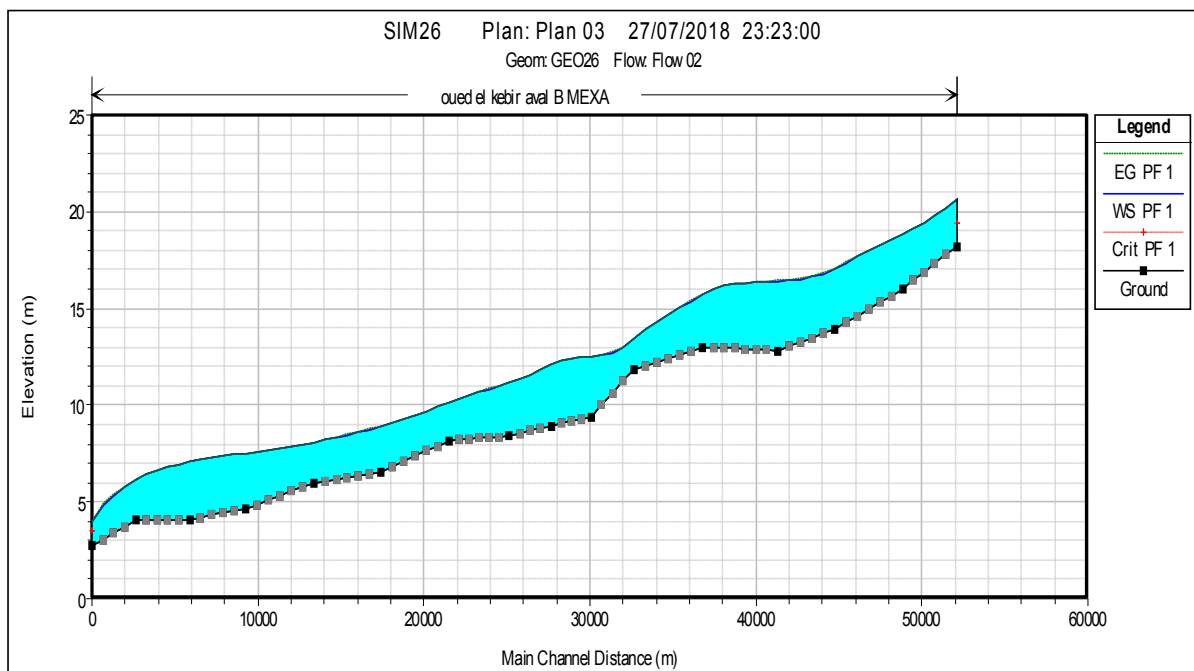
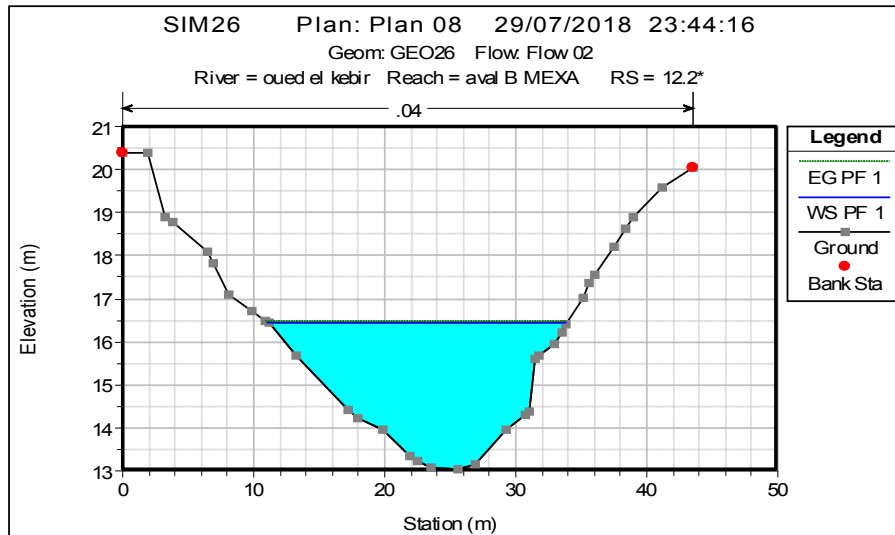


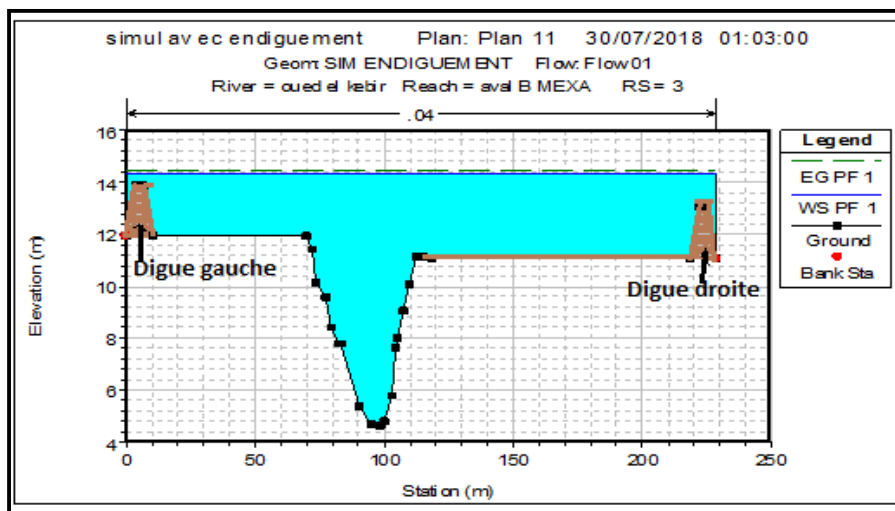
Figure IV.34 Profil en long et la ligne d'eau de oued El Kebir ( $Q= 14.83 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Figure IV.35** Profil en travers de la ligne d'eau de la section 12

Après avoir actualisé les profils en travers de l'oued par l'addition des digues de part et d'autre (Figure IV.36), nous avons simulé l'écoulement dans l'oued avec le débit de crue de 2012 sans tenir compte le débit déversé par le barrage. Pendant ce crue le barrage a déversé le débit maximal de  $802,43 \text{ m}^3/\text{s}$  vers l'aval. La hauteur maximale de pluie journalière tombée le jour de la crue était de 110mm (Station météorologique : Aïn Assel). Les débits des affluents et du bassin versant de l'oued El Kebir générés par cette pluie ont été déterminés à l'aide du logiciel Hec-HMS. Le débit à l'exutoire de l'oued était égal à  $1345,6 \text{ m}^3/\text{s}$ .

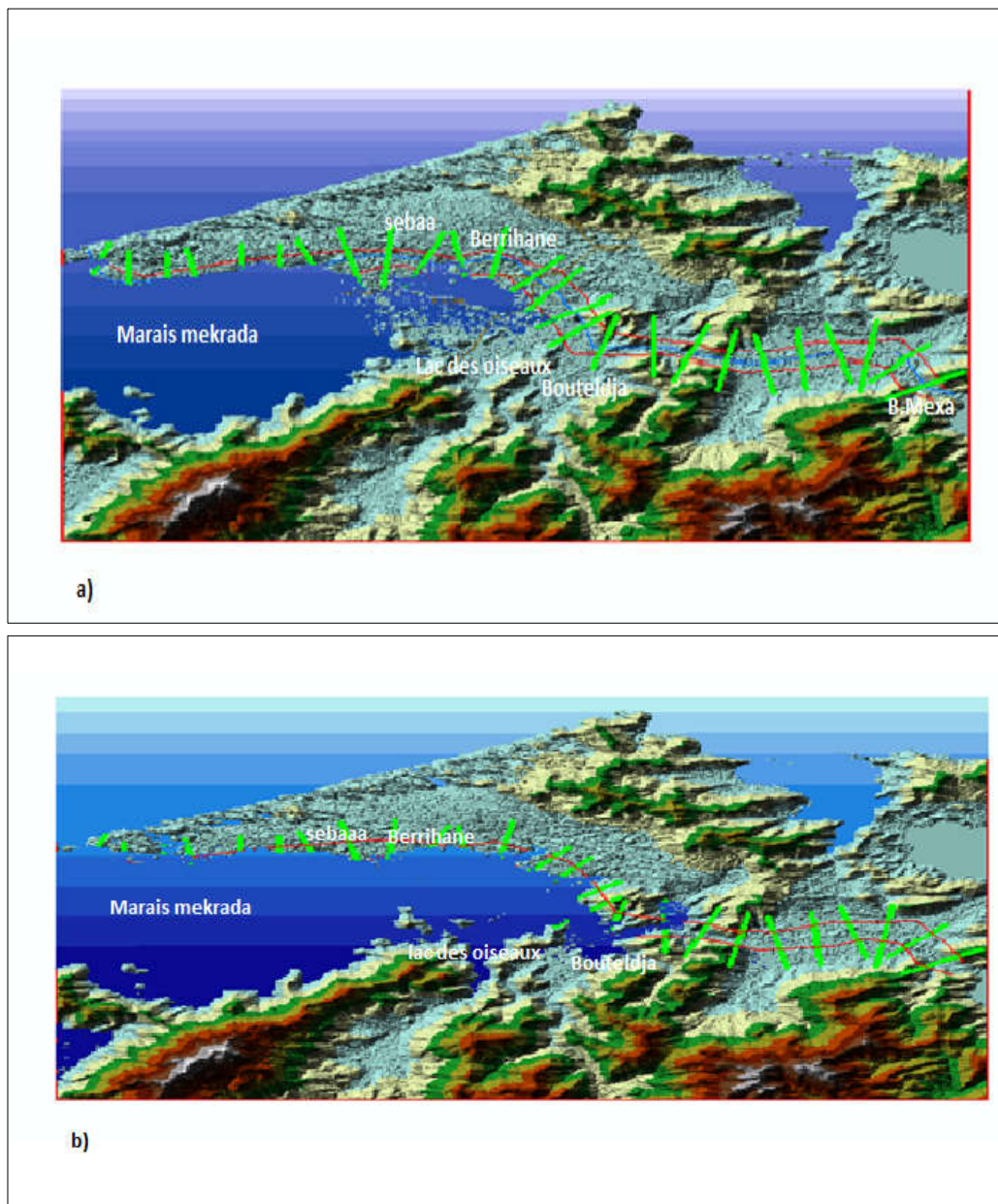
Les résultats de simulation montrent qu'il y a un surplus d'hauteur d'eau  $\text{max} = 1.37 \text{ m}$  dans les sections avals 2, 3, 9 (Figure IV.36), proches de la commune de Berrihane et Lac des Oiseaux. On constate que le débordement commence à partir d'un débit de  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figure IV.37a)).



**Figure IV.36** Profil en travers de la section 3 débordante avec endiguement pour  $Q = 1345.6 \text{ m}^3/\text{s}$

En cas de déversement de barrage et pour un débit global de  $2148.03\text{m}^3/\text{s}$  à l'exutoire, le débordement se propage tout le long d'oued avec un surplus de la hauteur d'eau maximal de 3.69 m dans la section (0) proche de marais de Mekrada et les zones le plus proches à l'oued El Kebir comme Bouteldja, El Tarf, Berrihane, Lac des Oiseaux (Figure IV.37b)).

Effectivement ces zones ont été touchées par les inondations de la crue de 2012 et la submersion de la plaine a duré 10 jours. Donc le débit déversé du barrage il change la situation de la zone d'étude. Les zones à risque se trouvent toujours en aval de barrage, comme la plaine de Bouteldja, Lac des Oiseaux, Sebaa et Berrihane.



**Figure IV.37** La zone inondable a) sans déversement du barrage ; b) avec le déversement du barrage

#### **IV.5.4 Conclusion**

Par cette étude nous avons montré que les sections transversales d'Oued El Kebir ne supportent pas l'addition à son propre débit et le débit déversé par le barrage Mexa en cas de forte crue, malgré l'augmentation de la superficie de ces sections faite par l'endiguement. Donc, la zone d'étude risque d'être inondée par le débordement de l'oued El Kebir en surplus de l'inondation par ruissèlement. D'autres facteurs participent au débordement de l'oued El Kebir sur les terres agricoles de cette plaine, tels que les méandres et la végétation abondante dans l'Oued El Kebir.

## **Chapitre V**

# **Solutions proposées pour améliorer le fonctionnement et le suivi des canaux de drainage**

## Chapitre V. Solutions proposées pour améliorer le fonctionnement et le suivi des canaux de drainage

### V.1 Introduction

Dans cette étude nous proposons quelques solutions afin de diminuer la charge sédimentaire dans les canaux et de chercher aussi des solutions utiles que ce soit pour l'aménagiste durant la conception ou soit pour la réhabilitation et l'entretien adéquat des canaux.

### V.2 Solutions proposées pour diminuer la charge sédimentaire dans les canaux de drainage

Dans l'étude précédente nous n'avons estimé que le volume sédimentaire déposé au fond du canal pour la période de 2006 à 2018, exprimé en tonnes, est égale à 10825.92 tonnes (6939.7 m<sup>3</sup>, et qui correspond à un taux moyen d'occupation de la section transversale du canal égal à 33.66%.

Sur la figure V.1 on voit que ce volume ne se repartit pas uniformément le long du canal et qu'il a une tendance d'accroître de l'amont vers l'aval.

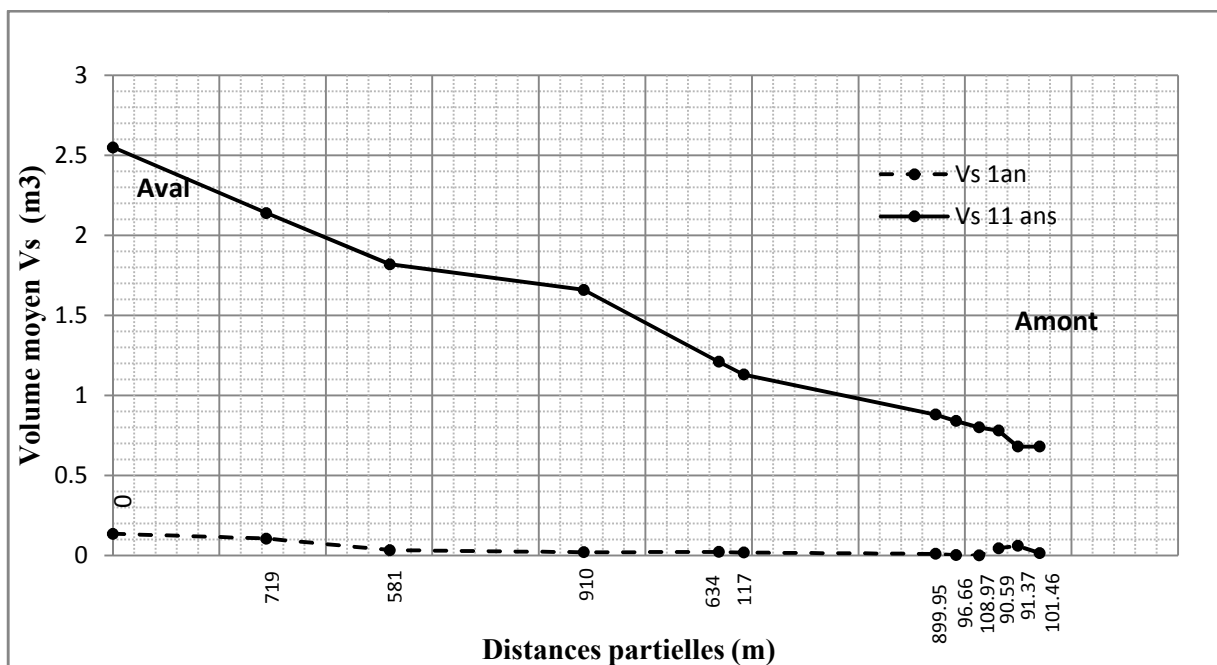


Figure V.1 Variation de volume sédimentaire déposé au fond du canal pour 11 ans et une année

### V.2.1 Etude de l'effet de la granulométrie sur la charge sédimentaire

La granulométrie de sédiment et les conditions hydrauliques jouent un grand rôle dans le processus du transport solide, et par conséquent, influent sur l'évolution morphologique du canal.

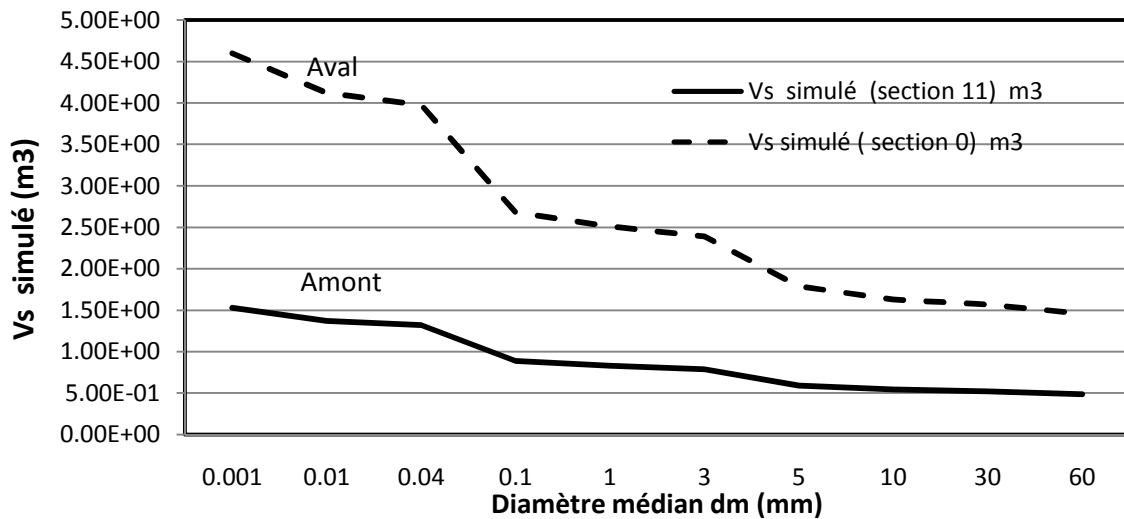
Dans ce contexte, nous proposons de poser une couche de gravier au fond du canal de géométrie initiale afin de diminuer le débit solide. Pour tester l'effet de la granulométrie de sédiment sur le débit solide les simulations ont été réalisées.

A chaque simulation, pour les mêmes conditions hydrauliques (débits de pointe), la granulométrie de sédiment au fond du canal a été changée conformément aux données du tableau V.15. Les modèles sédimentaires de HEC-RAS ont été appliqués selon leur domaine de validité et le classe de sédiment correspondant.

Les résultats de simulations présentés sur la figure V.2 montrent que la pose d'une couche de gravier grossier de 30 à 60 mm sur le fond du canal en terre diminue considérablement le volume des sédiments. Dans notre cas, tous calculs faits, nous avons déterminé que si on posait une couche de gravier grossier au fond du canal, le volume de dépôt sédimentaire diminuerait de 10825.92 à 5044,3 tonnes pour la période de 2006 à 2018.

**Tableau V. 15.** Variation de volume solide simulé en fonction de classe de sédiment

Classification de sédiment dm (mm)	Vs simulé (section 11) m <sup>3</sup>	Vs simulé (section 0) m <sup>3</sup>
Argile fine dm= 0.001	1.53E+00	4.60E+00
Limon fin dm=0.01	1.37E+00	4.12E+00
Limon grossier dm=0.04	1.32E+00	3.98E+00
Sable très fin dm=0.1	8.90E-01	2.68E+00
Sable très grossier dm=1	8.30E-01	2.51E+00
Gravier très fin dm =3	7.90E-01	2.39E+00
Gravier fin dm=5	5.90E-01	1.79E+00
Gravier moyen dm=10	5.43E-01	1.63E+00
Gravier grossier dm=30	5.23E-01	1.57E+00
Gravier très grossier dm=60	4.87E-01	1.46E+00



**Figure V.2.** Variation de volume solide en fonction de diamètre médian (dm) de sédiment en amont et aval du canal

Ainsi, la pose d'une couche de gravier au fond du canal en terre est une solution qui offre, outre la diminution de la charge sédimentaire, plusieurs avantages, notamment:

- la couche de gravier grossier assure le drainage du fond et des berges et dispose l'eau d'une manière régulière.
- la couche de gravier grossier joue le rôle d'alarme pour arriver à l'ancien fond pendant le curage périodique et éviter le nettoyage arbitraire.
- diminuer l'accroissement des herbes au fond et de cette manière diminue la rugosité du canal.

A titre d'exemple, sur la figure V.3 on présente l'aménagement d'un petit cours d'eau.

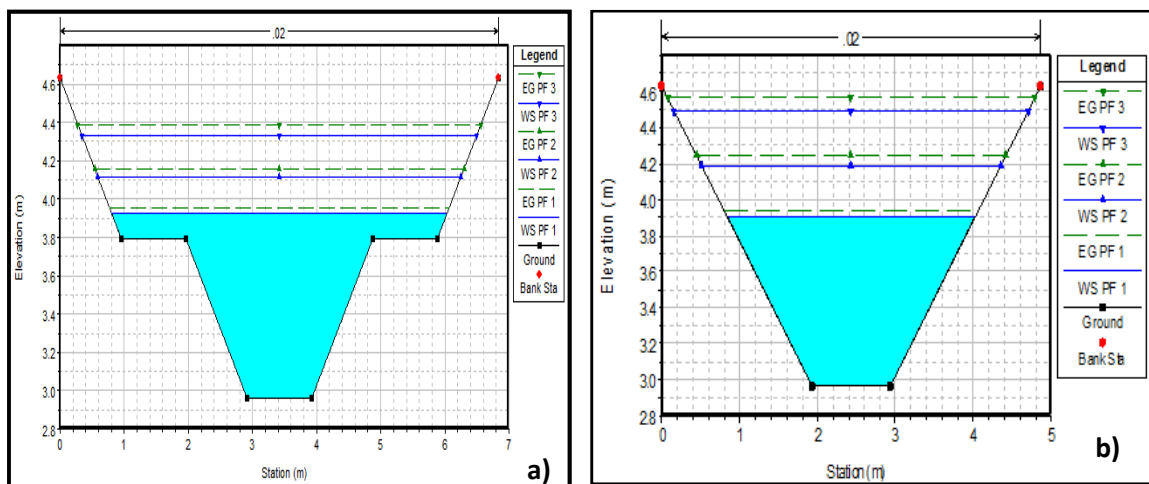


**Figure V.3** Aménagement du lit d'un cours d'eau (source: photo prise par l'entreprise Hydro-Aménagement, Alger)

### V.2.2 Effet de nouvelle conception géométrique du canal étagé sur la sédimentation

Selon Depeweg et Herman (2002), la plupart des théories sur le transport des sédiments négligent l'influence de la géométrie de la section transversale et ces effets sur le développement des formes du lit. En se référant à l'étude de Vastila et Jurvela (2011) où les auteurs démontrent que pour les sédiments cohésifs le profil étagé de la section transversale du canal de drainage en terre est préférable, nous proposons de remplacer la forme trapézoïdale de la section transversale initiale du canal par le profil étagé. Ce nouveau profil aura les mêmes paramètres géométriques (la profondeur, la pente des talus, la largeur du fond) que le profil initial de la section sauf que sa partie supérieure sera élargi. Dans ce qui suit nous allons étudier les avantages que pourrait apporter ce nouveau profil étagé par rapport au profil trapézoïdal initial du canal.

Pour vérifier la capacité hydraulique du canal avec le profil étagé de la section transversale, les simulations via modèle hydraulique du logiciel HEC-RAS été réalisées pour différents débits de pointe testés précédemment. On a constaté qu'aucun débordement du canal ne se produit pour ces débits (Figure V.4), en plus, le profil étagé assure une hauteur de sécurité par rapport aux bords supérieurs plus importante que le profil trapézoïdal.

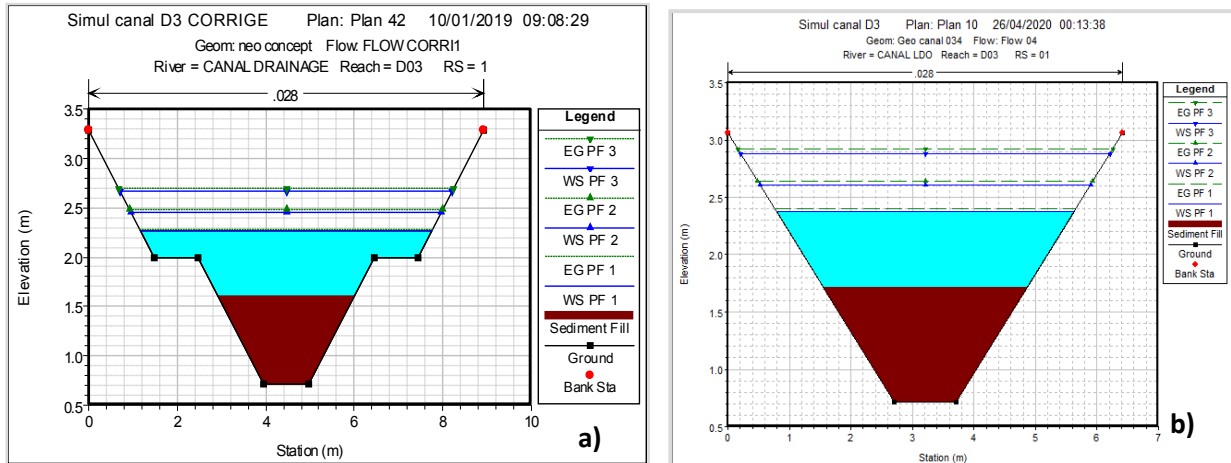


**Figure V.4** Ligne d'eau dans la section 05 du canal de profil transversal: **a)** étagé, **b)** trapézoïdal (géométrie initiale)

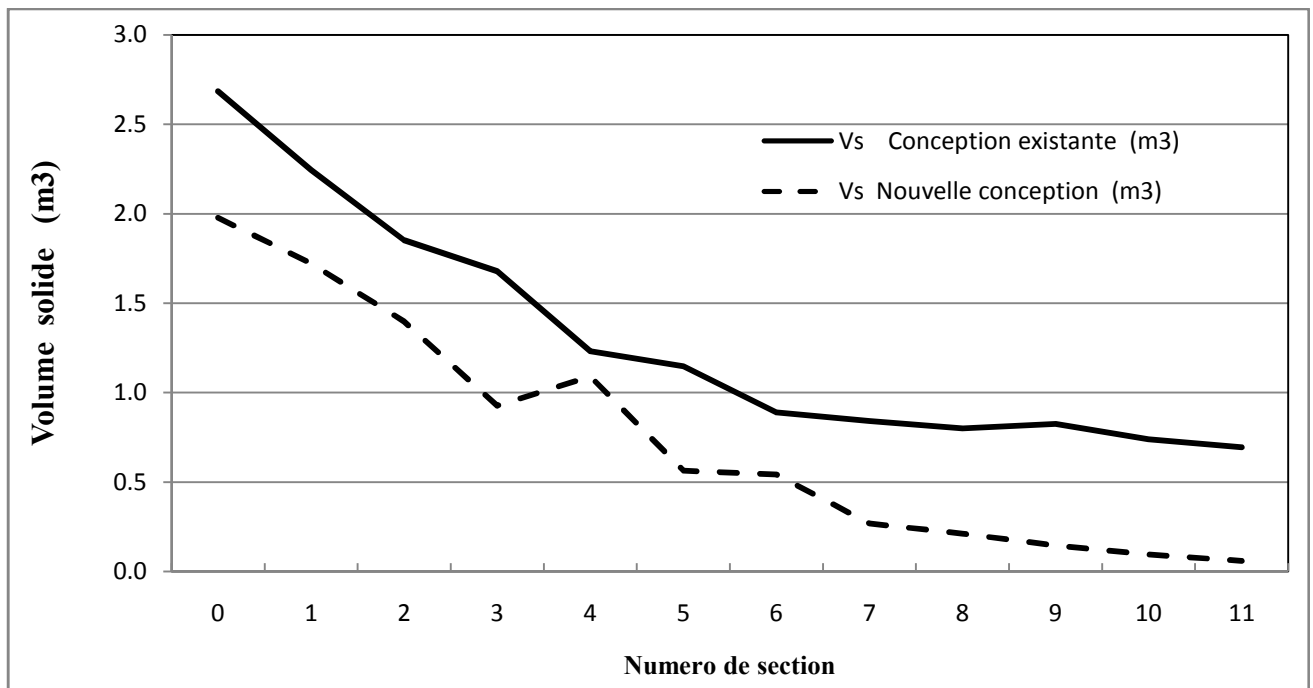
L'analyse des résultats de simulation du processus de transport solide à travers le modèle d'Engelund et Hansen a montré que pour cette conception il y a une diminution du volume sédimentaire déposé au fond du canal durant 11 ans, par rapport à sa géométrie initiale de la section transversale du canal et précisément dans le tronçon aval du canal. Nous avons trouvé

que cette diminution est de 33.33% soit d'un volume de 2311,25 m<sup>3</sup> par rapport au volume initial 6939,70 m<sup>3</sup> (Figure V.5 et Figure V.6).

Évidemment, les simulations ont été réalisées avec les mêmes paramètres hydrauliques (débits de points, coefficient de rugosité, courbe granulométrique des sédiments)



**Figure V.5** Comparaison de la couche sédimentaire au fond du canal de profils en travers : a) étagé (nouvelle conception) et b) trapézoïdal (conception existante)



**Figure V.6** Comparaison de variation de volume sédimentaire (conception existante et nouvelle)

En outre, cette conception offre d'autres avantages, elles visent à assurer la fonctionnalité à long terme du drainage agricole, notamment la stabilisé des berges et augmenter la durée de colmatage des canaux. Selon Vastila K. et Jurvela J. (2011), les canaux de drainage à deux étages devraient fournir des avantages environnementaux tout en étant plus autonome et nécessitant moins de gestion que canaux trapézoïdaux simples.

### **V.2.3 Conclusion et recommandations**

Le but principal de cette partie d'étude, était développer une stratégie pour la conception et la réhabilitation des canaux de drainage, en tenant compte d'important élément qui est la prévention de transport sédimentaire. Ce phénomène compliqué se produit lorsque la section transversale des canaux de drainage change en fonction du transport solide et des précipitations. Pour bien concevoir et entretenir efficacement ces canaux il est nécessaire aux concepteurs examiner et évaluer les performances de leurs conception sur le terrain. Dans cette étude on a mené une recherche analytique de l'évolution morphologique du fond des canaux sous l'effet de transport solide à l'aide d'un modèle hydraulique et sédimentaire HEC-RAS capable de simuler facilement l'écoulement et la sédimentation dans les canaux de drainage. Enfin dans cette étude nous avons découvert que la charge sédimentaire dépend de la taille du sédiment, des paramètres hydrauliques et de la rugosité du fond du canal, qui constituent les principaux paramètres à corriger et à prendre en compte chez le concepteur et l'ingénieur au début de conception du projet de système de drainage agricole. Suite à cette étude, nous avons conclu que :

- pour diminuer la charge sédimentaire dans un canal en terre, en projetant une couche de gravier grossier, surtout dans le tronçon aval de ce dernier.
- la conception des canaux de drainage ayant profil transversal trapézoïdal à deux étages est préférable par rapport aux canaux trapézoïdaux simples, en point de vue de diminution de volume sédimentaire déposé, stabilité des berges et capacité d'écoulement.

## **V.3 Stratégie de la gestion et suivi du système de drainage**

### **V.3.1 Introduction**

La gestion et le suivi des systèmes de drainage agricole sont les plus importantes programmes stratégiques pour améliorer les rendements dans l'agriculture. Le suivi du taux d'envasement rend compte de la vitesse d'envasement et permet de mieux planifier les programmes d'intervention. D'autre part, la gestion appropriée des sédiments dans le réseau des canaux constitue l'un des défis majeurs des travaux d'amélioration, car une grande partie de budget de maintenance et de réalisation disponibles étant dépensés annuellement sur l'enlèvement des sédiments déposés (Depeweg et Mendez, 2002).

Le premier préalable d'une gestion et d'un suivi adéquats des canaux de drainage est l'affinement sans cesse renouvelé de la connaissance de fonctionnement des canaux que se soient par le biais de la modélisation, des techniques de mesure ou d'inventaires.

Dans cette étude nous proposons la méthodologie de suivi d'envasement des canaux de drainage qui permettra d'établir un calendrier pour l'entretien et l'intervention prioritaire.

### **V.3.2 Méthodologie de la gestion et suivi du réseau de drainage**

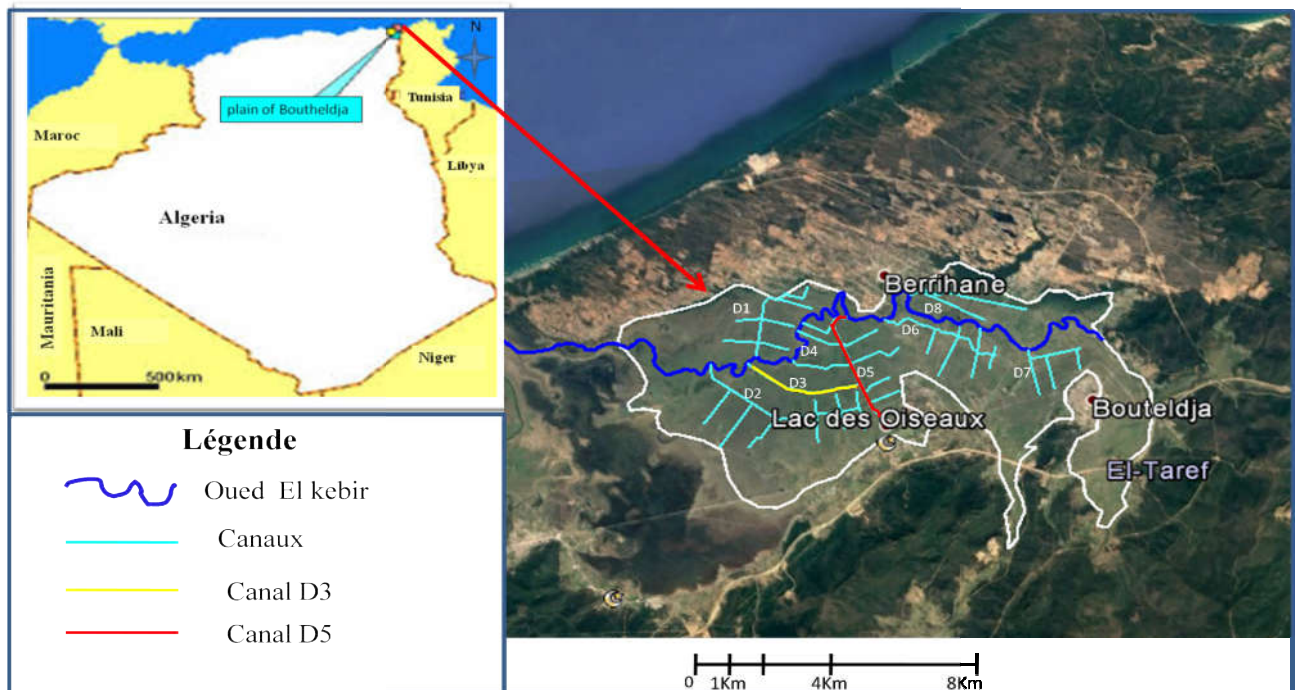
Pour élaborer la méthodologie de la gestion et suivi du réseau de drainage on s'appuyait sur les travaux de Pierluigi D.R. et al. (2019).

L'approche proposée par les auteurs montre comment l'érosion, le transport des solides et les phénomènes de sédimentation sur les tronçons d'un cours d'eau sont liés à des variations brusques (augmentation / diminution) de la «puissance de flux» disponible. Les résultats de cette étude soutiennent l'idée que les moyens de télédétection standardisés des cours d'eau et la variabilité de la puissance le long d'un ruisseau peuvent être utilisés comme élément de diagnostic préliminaire pour identifier les points «sensibles» du courant sur lesquels il faut concentrer les enquêtes ultérieures (contrôles sur le terrain pour vérifier les causes), dans le but d'atténuer les risques dus à la dynamique du lit de la rivière. La capacité de transport d'un flux est une fonction directe du débit et de la pente locale; pour cette raison, la détermination correcte de la pente est cruciale pour obtenir une évaluation correcte du cours d'eau.

Selon cette étude basée sur la télédétection des cours d'eau en utilisant l'ARC-GIS, on propose la méthodologie qui permettra d'effectuer le suivi et le diagnostic préliminaire des canaux de drainage de la zone d'étude sans avoir la nécessité de se déplacer sur le site. Pour y parvenir on utilise les photos satellitaires de Google Earth du système de drainage qu'on

convertie en carte TIN (Triangular Irregular Network) à l'aide du logiciel ARC-GIS et l'extension Hec Geo-Ras (Figure V.7).

A partir de la carte TIN nous avons facilement trouvé les variables physiographiques de réseau de drainage tels que la pente et la longueur du parcours de l'eau, qui est supposé égale à la longueur du canal vue la configuration des bassins versants correspondants à chaque canal, afin d'estimer le temps de concentration.



**Figure V.7** Localisation du réseau de drainage de la plaine de Bouteldja via HEC RAS, basé sur l'image Google Earth

Pour calculer le temps de concentration plusieurs formules empiriques ont été utilisées. Le choix de ces formules a été dicté par l'étude de Mailhot et Bolduc (2016) dans laquelle les auteurs analysent et comparent les données hydrologiques mesurées en champs aux résultats des calculs obtenus à partir des équations empiriques d'estimation des temps de concentration connues pour choisir celles qui soient les mieux adaptées pour les petits bassins versants agricoles. Le processus du choix définitif d'une méthode d'estimation de temps de concentration le plus appropriée à notre cas d'étude sera expliqué ultérieurement.

Dans un canal de drainage, suite au transport solide, il se passe l'évolution de son fond, en particulier, lors de phénomène de sédimentation. Cette évolution dans le temps se traduit par la modification de la pente du canal et par conséquent, par le changement du temps de

concentration. La différence entre le temps de concentration correspondant à l'état initial et à l'état actuel du canal joue le rôle d'indicateur de degré d'encombrement de ce dernier. Donc, selon l'importance de cette différence on peut établir un calendrier pour l'entretien et l'intervention prioritaire sans avoir effectué les sorties sur le terrain. La description détaillée de la méthodologie de gestion et de suivi des canaux de drainage est présentée sous forme d'organigramme sur la figure V.8.

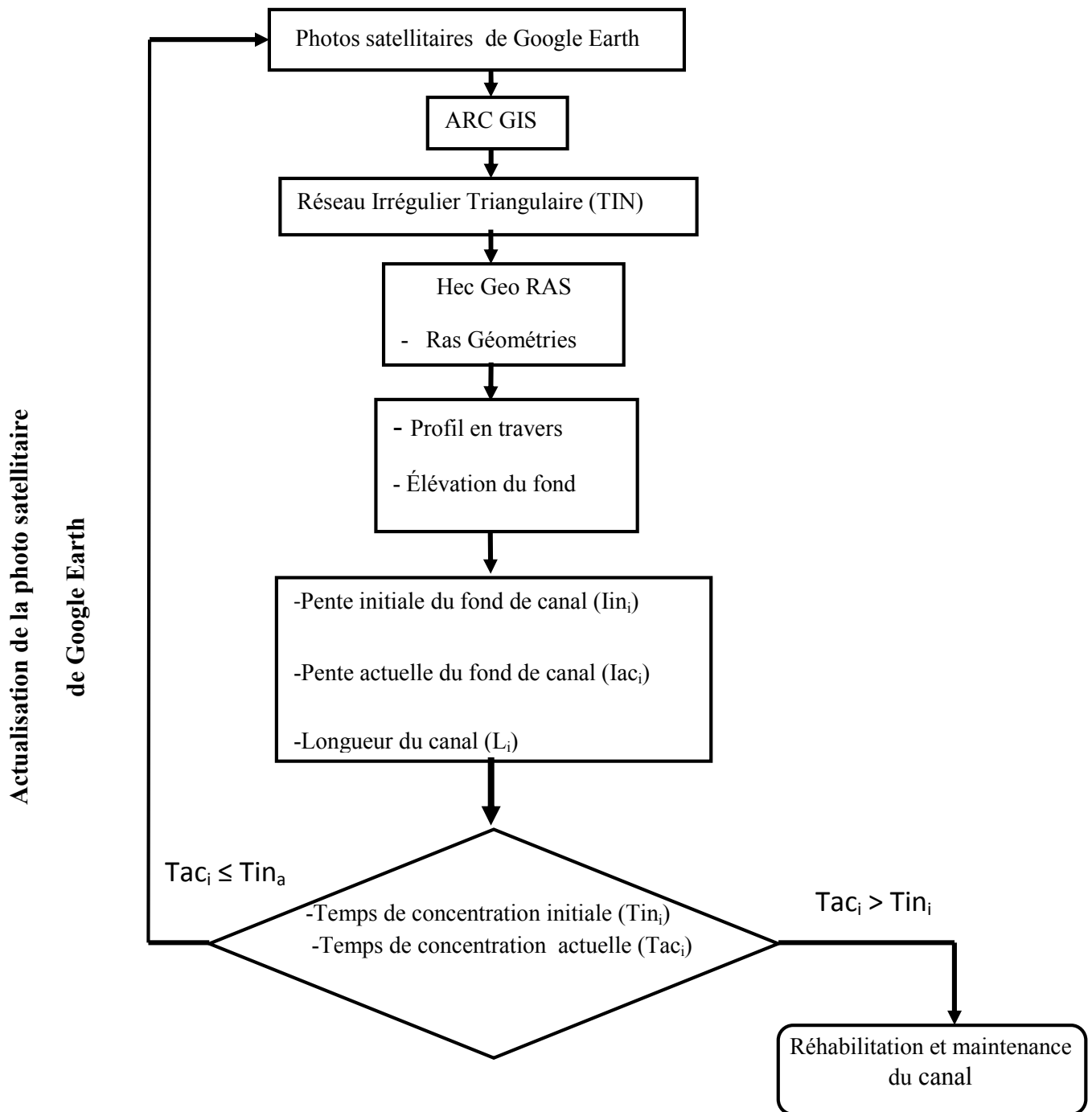


Figure V.8 Organigramme de la méthodologie de la gestion et suivi des canaux de drainage

### V.3.3 Estimation du temps de concentration

Le temps de concentration est le temps écoulé entre le début d'une précipitation et l'atteinte du débit maximal à l'exutoire du bassin versant. Il correspond au temps nécessaire pour permettre à l'eau de ruisseler du point le plus reculé du bassin versant jusqu'à l'exutoire. Plusieurs méthodes d'estimation le temps de concentration repose sur deux variables la longueur maximale de l'écoulement et la pente longitudinale moyenne du bassin versant.

Parmi les méthodes d'estimation de temps de concentration les mieux adaptées pour les bassins versants agricoles proposées par Mailhot et Bolduc (2016) quatre méthodes ont été choisies. Ce sont : la méthode de Kirpich, la méthode de Mockus, la méthode de SCS lag time et la méthode de Ventura dont les équations sont présentées ci-dessous :

#### *Méthode de Kirpich*

Cette méthode est adaptée aux bassins versants dont la superficie varie entre 0,4 ha et 81 ha, dont les sols sont argileux et dont la pente moyenne est comprise entre 3% et 10%. Le temps de concentration est alors calculé à partir de l'équation suivante :

$$Tc = \frac{(0,000325 \cdot L^{0.77})}{(I^{0.385})} \quad (V.1)$$

Où

**Tc** : Temps de concentration en (heures)

**L** : Longueur maximale du parcours de l'eau dans le bassin versant en (m).

**I** : Pente longitudinale moyenne du bassin versant, en suivant l'écoulement de l'eau.

#### *Méthode de Mockus*

Cette méthode est adaptée aux bassins versants de superficie variant entre 3 et 100 ha et qui sont caractérisés par une pente longitudinale moyenne inférieure à 1% et par des sols limoneux ou argileux :

$$Tc = \frac{L^{0.8} \cdot \left[ \frac{1000}{CN} - 9 \right]^{1.67}}{2083 \cdot (100 \cdot I)^{0.5}} \quad (V.2)$$

Où

**Tc** : Temps de concentration (en heures)

**L** : Longueur maximale du parcours de l'eau dans le bassin versant (en m).

**I** : Pente longitudinale moyenne du bassin versant, en suivant l'écoulement de l'eau.

**CN** : Curve Number. Ce facteur représente l'effet des conditions de surface du bassin versant sur le ruissellement.

#### **Méthode de SCS lag time**

$$Tc = L^{0.8} \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0.7} \cdot (4407 \cdot I^{0.5})^{-1} \quad (V.3)$$

Où : la longueur maximale de l'écoulement (L) est en mètre, la pente moyenne du bassin versant (I) est en mètre/mètre et le Tc est exprimé en heures.

#### **Méthode de Ventura**

$$Tc = 76.5 \cdot \sqrt{\frac{S}{I}} \quad (V.4)$$

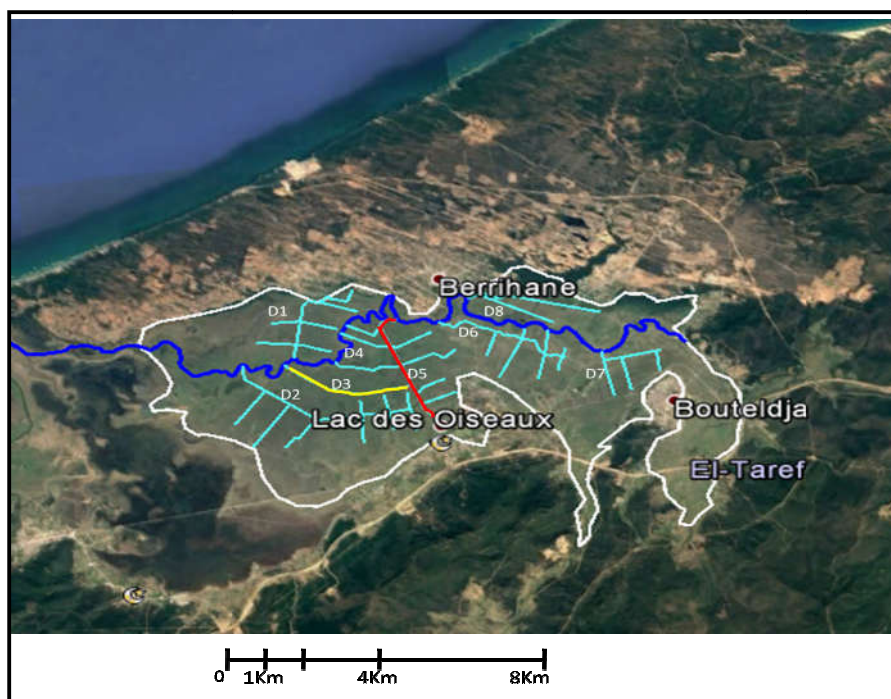
Où :

**Tc** : Temps de concentration en heures

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

**I** : La pente (%)

Pour choisir parmi ces méthodes celle qui est plus appropriée aux caractéristiques des canaux et bassins versants de la zone d'étude nous avons effectué les mesures de temps de concentration lors des événements pluvieux de la période de 22/05 /2017 à 15/12/2018 pour huit principaux canaux du système de drainage (Figure V.9). Les outils de mesure qu'on a utilisée sont rudimentaires : un mètre, chronomètre, des petits morceaux de polystyrène ou jus concentré de betterave de couleur violette (Annexe 4).



**Figure V.9** Canaux du système de drainage de la plaine Bouteldja

La comparaison des valeurs mesurées de temps de concentration pour chaque canal avec les valeurs calculés par quatre équations empiriques a montré que les valeurs calculées par l'équation de Mockus sont plus proche aux résultats observés (Tableau V.16). Donc l'équation de Mockus sera appliquée pour caractériser l'état des canaux selon la méthodologie proposée.

**Tableau V.16.** Résultats de calcul de temps de concentration par quatre méthodes empiriques et les valeurs mesurées de ce dernier pour huit principaux canaux du système de drainage

N°canal	L(max) (m)	Superficie (ha)	I (moy) (m/m)	Tc Kirpich	Tc Mockus	Tc SCS	Tc Ventura	Tc mesuré
D1	4493	8.05	0.001	3.02	8.83	13.52	11.44	8.5
D2	6147	16.62	0.0009	4.00	11.96	18.32	17.33	11.5
D3	4402	3.5	0.00081	3.22	9.65	14.78	8.38	9.3
D4	2587	1.35	0.00074	2.21	6.60	10.11	5.45	6.1
D5	3873	8.1	0.00012	6.08	22.63	34.66	33.13	17.5
D6	4395	6.89	0.00075	3.31	10.01	15.34	12.22	8.95
D7	1911	6.67	0.00025	2.66	8.91	13.65	20.83	8.35
D8	2353	10.71	0.0008	2.00	5.88	9.01	14.75	5.15

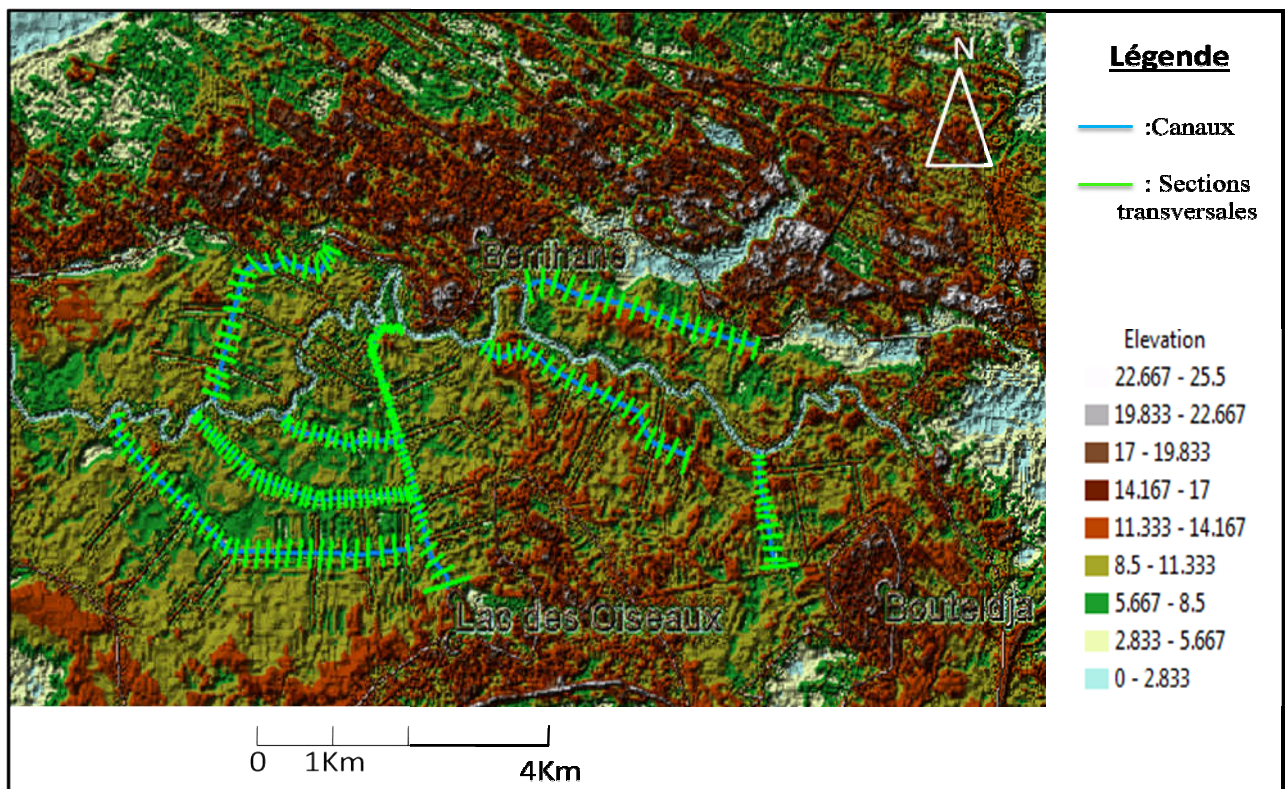
\*L (max) est la longueur maximale de l'écoulement ; Tc est le temps de concentration; Superficie du bassin versant et I(moy) est la pente moyenne du fond du canal au moment de la campagne de mesure.

### V.3.4 Résultats d'application de la méthodologie de la gestion et suivi des canaux de drainage

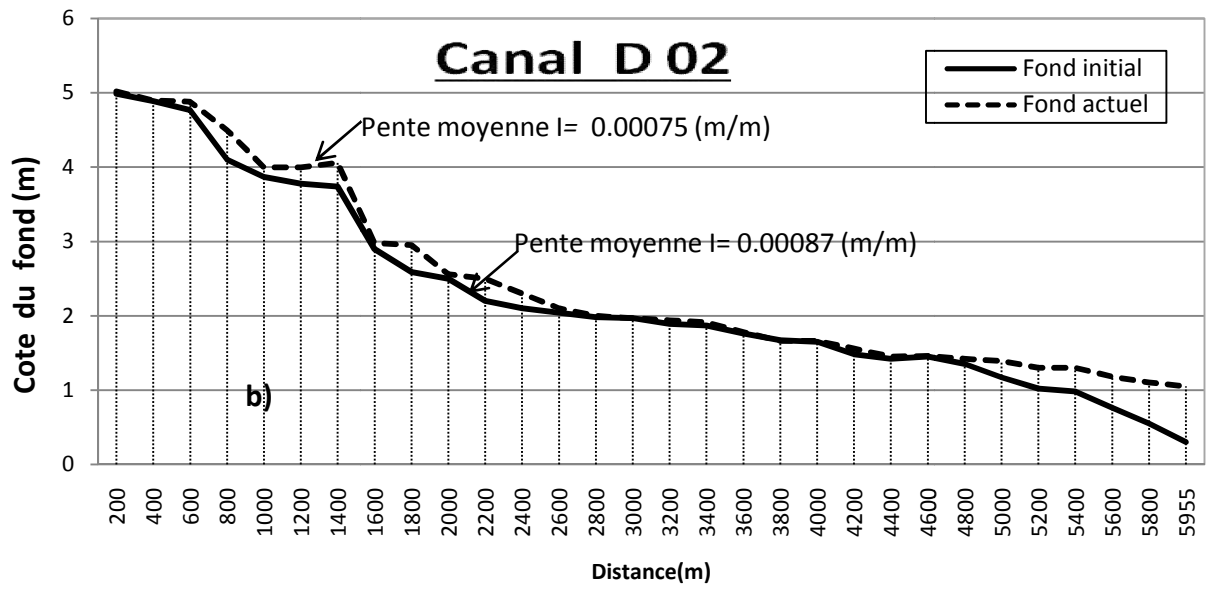
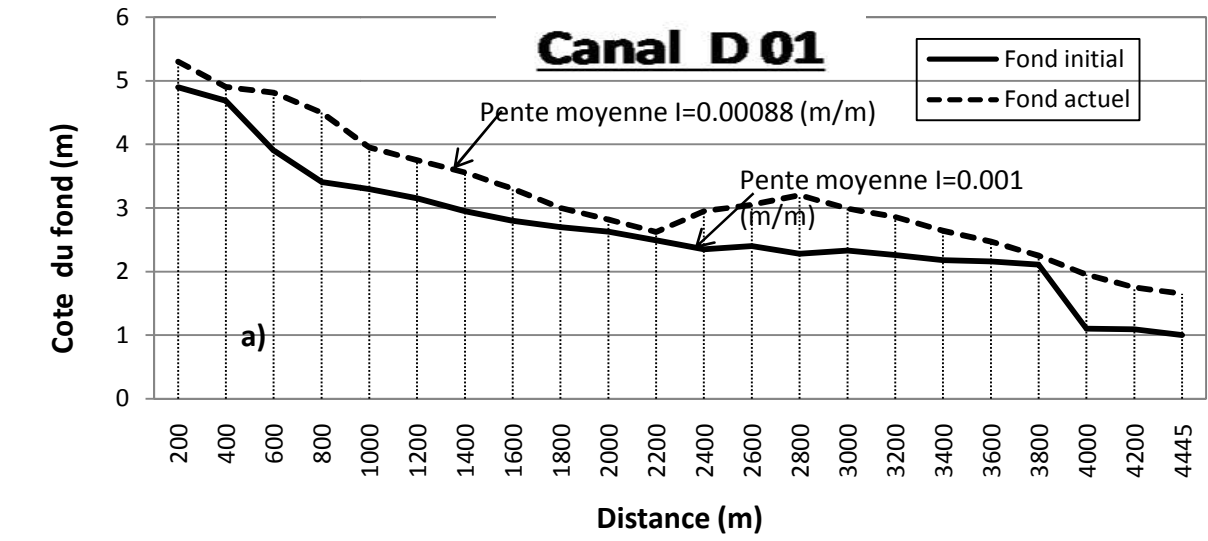
Selon la méthodologie proposée le but de cette partie d'étude est de calculer le temps de concentration pour pouvoir estimer l'évolution du fond des canaux de drainage dans le temps. Dans notre cas d'étude on a pris la période d'observation allant de 2006 à 2017.

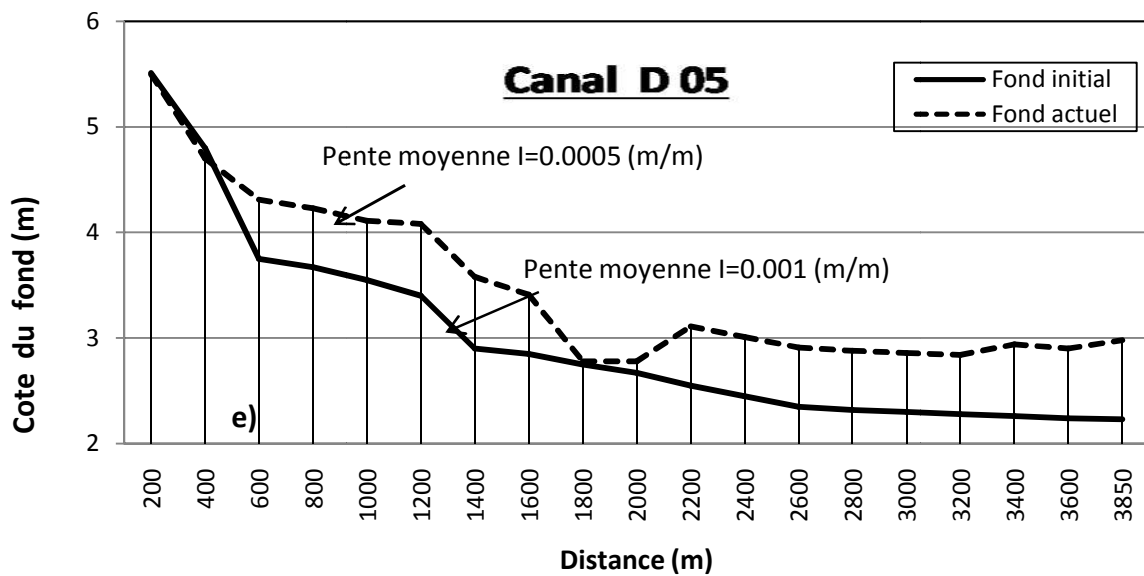
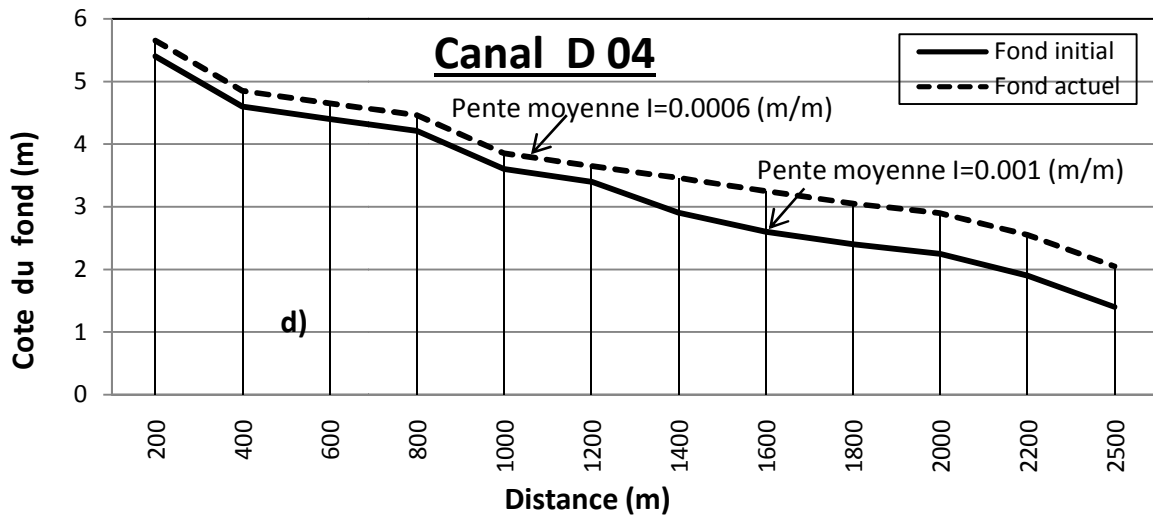
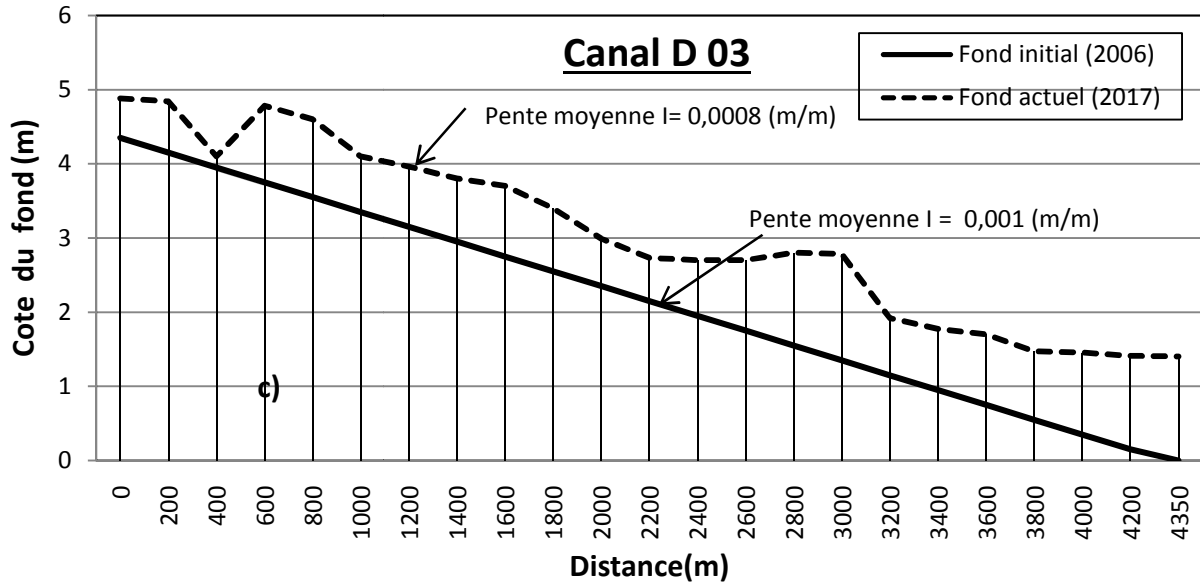
Sur la carte TIN, les huit canaux du système de drainage ont été divisés en sections transversales avec des distantes de 200 m (Figure V.10).

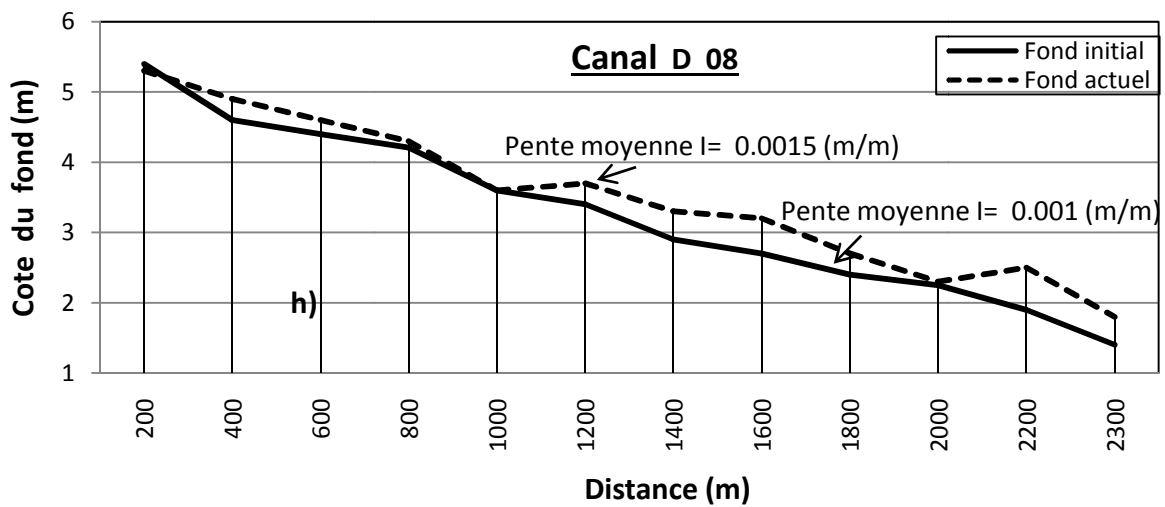
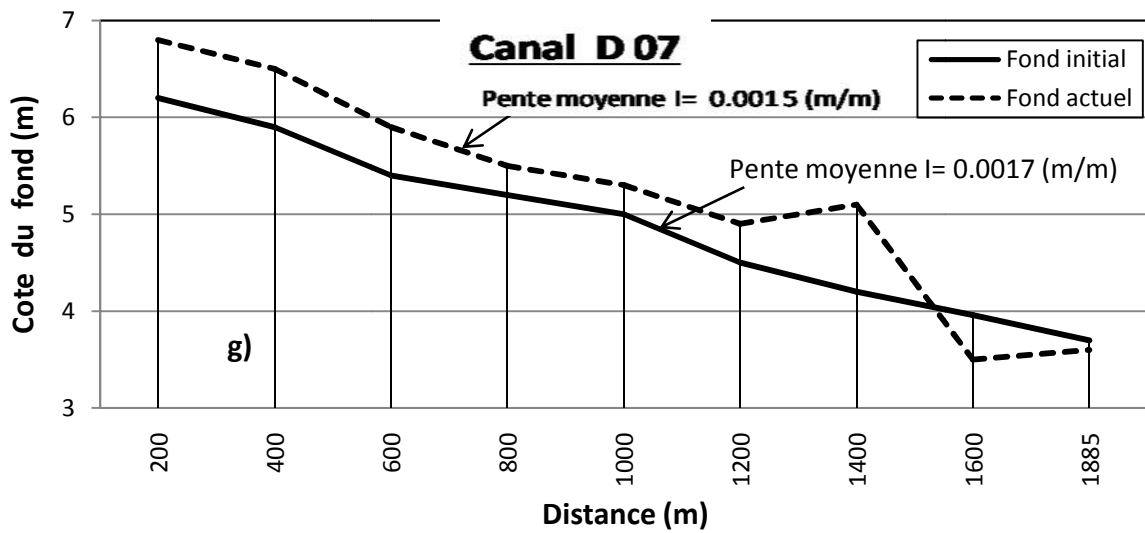
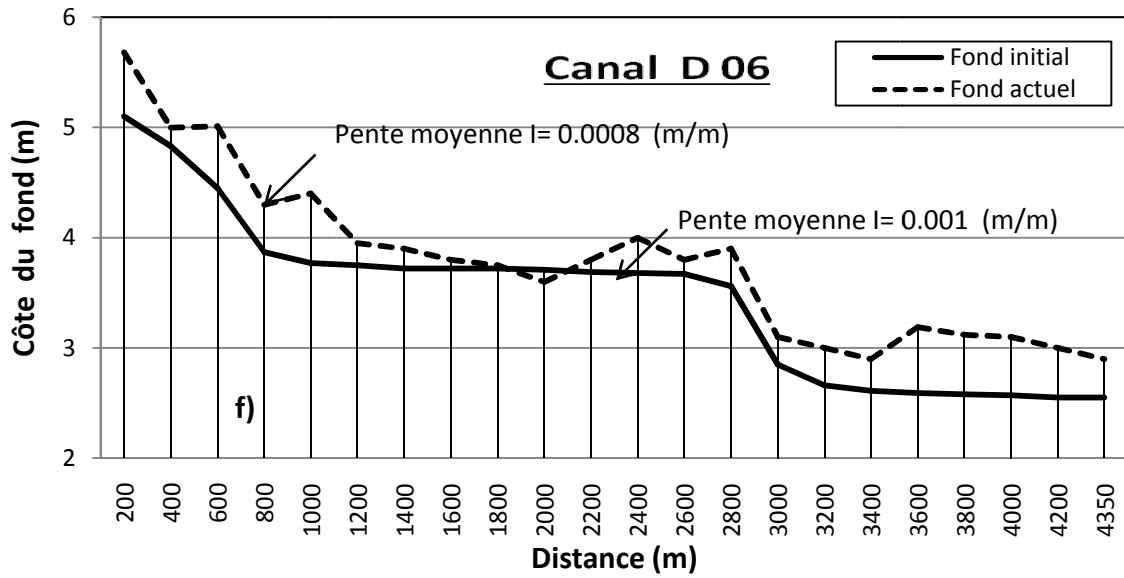
A partir des données relevées on a tracé les profils en long de chaque canal et calculé leur pente moyenne correspondante à l'année 2006 (fond initial) et à l'année 2017 (fond actuel) (Figure V.11).



**Figure V. 10** Carte TIN de la zone d'étude. Présentation de la division des huit canaux principaux en sections transversales (*source* : ARC MAP 10.5)







**Figure V.11** Profils en long des huit canaux principaux du système de drainage : a) canal D01 ; b) canal D02 ; c) canal D03 ; d) canal D04 ; e) canal D05 ; f) canal D06 ; g) canal D07 et h) canal D08

En connaissant les pentes des canaux à l'état initial et actuel, on a calculé les temps de concentration correspondants. En fonction de degré de différence des temps de concentration on a pu établir le classement d'intervention prioritaire pour entretien des canaux (Tableau 17).

Finalement à partir des résultats représentés dans le tableau V.17 on peut analyser l'état de canaux et faire les conclusions suivantes :

- Tous les canaux nécessitent d'entretien et réhabilitation ;
- Le canal le plus prioritaire pour l'entretien c'est le canal D 05.

Pour vérifier l'état de chaque canal et confirmer les résultats de notre étude nous avons effectué les sorties sur le terrain en décembre 2018 et nous avons trouvé effectivement que canal D 05 est fortement colmaté par l'envasement et les herbes par rapport aux autres canaux du système de drainage (Figure V.12).

**Tableau V.17.** Comparaison des temps de concentration (Tc) des canaux à l'état initial et actuel et classement des canaux pour l'entretien prioritaire

N°Canal	L(max) (m)	Surface (ha)	I initiale (m/m)	I actuelle (m/m)	Tc initial (hrs)	Tc actuel (hrs)	Δ Tc (hrs)	Classement
D1	4493	8.05	0.001	0.00088	8.83	9.41	0.58	6
D2	6147	16.62	0.00087	0.00075	12.16	13.10	0.94	5
D3	4402	3.5	0.001	0.00080	8.68	9.71	1.03	4
D4	2587	1.35	0.001	0.00060	5.68	7.33	1.65	2
D5	3873	8.1	0.001	0.00050	7.84	11.09	3.25	1
D6	4395	6.89	0.001	0.00080	8.67	9.70	1.03	3
D7	1911	6.67	0.0017	0.00150	3.42	3.64	0.22	7
D8	2353	10.71	0.001	0.0015	5.26	4.30	-0.96	8



**Figure V.12** Canal D 05 mal entretenu bloquant l'écoulement de l'eau

#### **V.4 Conclusion**

Dans cette étude nous avons constaté et démontré que la charge sédimentaire dépend de la taille de sédiment, des paramètres hydrauliques et de la rugosité du fond du canal, qui constituent les principaux paramètres à corriger et à prendre en compte chez le concepteur et l'ingénieur au début de conception du projet de système de drainage agricole.

Dans ce contexte, pour améliorer le fonctionnement des canaux de drainage quelques solutions suivantes ont été proposées : i) changer la taille des grains des sédiments, notamment, en projetant une couche de gravier grossier au fond du canal en terre pour diminuer la charge sédimentaire ; ii) concevoir les canaux de drainage ayant le profil transversal trapézoïdal à deux étages dont la conception est préférable par rapport aux canaux trapézoïdaux simples, en point de vue de diminution de volume sédimentaire déposé, stabilité des berges et capacité d'écoulement.

Dans cette étude également, on a proposé une approche basée sur la télédétection qui permet d'effectuer le suivi et le diagnostic préliminaire de l'état des canaux de drainage de la zone d'étude sans avoir la nécessité de se déplacer sur le site. Pour y parvenir, les photos satellitaires de Google Earth du système de drainage ont été converties en carte TIN (Triangular Irregular Network) à l'aide du logiciel ARC-GIS et l'extension Hec Geo-Ras. La carte TIN offre la possibilité d'extraire les variables physiographiques des canaux de

drainage tels que la pente et la longueur du parcours de l'eau, qui est supposé égale à la longueur du canal vue la configuration des bassins versants correspondants à chaque canal, afin d'estimer le temps de concentration. La notion du temps de concentration est utilisée pour pouvoir évaluer plus précisément le changement de l'état d'un canal dans le temps, car la pente du canal subie la modification par rapport à son état initial sous l'effet de transport solide et phénomène de sédimentation.

De cette manière nous avons étudié l'état actuel des huit canaux principaux du système de drainage par rapport à leur état initial en utilisant la différence de temps de concentration pour une période allant de 2006 à 2017. Les résultats de cette étude ont montré que tous les canaux nécessitent d'entretien et réhabilitation. Le canal le plus prioritaire pour l'entretien est le canal D 05. Pour vérifier l'état de chaque canal et confirmer les résultats de notre étude les sorties sur le terrain ont été effectués en décembre 2018 et nous avons trouvé effectivement que canal D 05 est fortement colmaté par une couche de sédiment déposé et les herbes par rapport aux autres canaux du système de drainage. Cette approche a permis également établir le classement d'intervention et d'entretien prioritaires des canaux de drainage.

## **V.5 Perspectives**

Dans notre étude nous avons utilisé le modèle unidimensionnel (1D) de transport sédimentaire. Pour améliorer les recherches futures on compte compléter et affiner la modélisation unidimensionnelle par un modèle bidimensionnel (2D) de transport sédimentaire et d'évolution des fonds.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

En Algérie, les problèmes d'inondation et de transport sédimentaire se manifestent de façon critique dont la plaine de Bouteldja n'est pas épargnée. La plaine de Bouteldja à vocation agricole fait partie de la wilaya d'El Tarf, située au Nord Est d'Algérie.

Malgré l'aménagement de cette plaine en 2006 dans le cadre d'un projet hydro-agricole par la création de réseaux de canaux de drainage à ciel ouvert en terre, elle subit jusqu'à présent la submersion des terres agricoles limitrophes.

Donc, l'un des objectifs de notre étude est de quantifier et estimer l'évolution morphologique des canaux de drainage en terre sous l'influence du processus du transport solide pour la période allant de 2006 jusqu'à 2018 et, également, mettre en évidence l'effet de l'évolution morphologique des canaux de drainage sur leur capacité hydraulique. Un canal 03 qui fait partie du système de drainage a été choisi pour une représentation globale de cette étude. Le modèle géométrique du canal a été élaboré et calibré sur la base des conditions actuelles lors de la campagne de mesures topographiques sur le site en 2017.

Pour analyser l'écoulement dans le canal à l'état actuel le modèle hydraulique du logiciel HEC-RAS a été utilisé. Ce modèle hydraulique a été calé aux hauteurs d'eau observées pendant les événements pluvieux qui se sont produits durant la période d'observation de 22/05/2017 à 20/02/2018. La validation du calage du modèle a montré un bon résultat avec le critère de performance de Nash qui varie de 0,63 à 0,97, le coefficient de corrélation variant de 0,73 à 0,95 et avec le RMSE qui varie de 0,017 à 0,055 m pour les différents événements pluvieux de la période d'observation. Les résultats proches aux données réelles ont été obtenus en ajustant le coefficient de rugosité de Manning jusqu'à la valeur de  $n=0,028$ . Dans notre cas d'étude l'existence des herbes au niveau du lit du canal correspond parfaitement à cette valeur de coefficient de rugosité. Les résultats de simulations réalisées ont montré que le canal déborde pour certains débits de pointe. La cause de ce débordement est la diminution de la section de canal par le dépôt des sédiments en absence de l'entretien de ce dernier depuis sa réalisation en 2006. Ceci a été confirmé par la simulation de l'écoulement dans le même canal mais ayant la géométrie initiale de la section (géométrie de projet de réalisation), pour les mêmes débits ce canal n'est pas débordé.

L'objectif de l'étape suivante de l'étude est la modélisation du transport sédimentaire afin de quantifier la charge sédimentaire et le dépôt de sédiments au fond du canal. Parmi les différents modèles sédimentaires proposés par le code HEC-RAS, le modèle sédimentaire

d'Engelund et Hansen (1967) décrivant le transport solide total dans le canal et le modèle de vitesse de sédimentation de Van Rijn (1984) ont donné les résultats les plus proches aux données réelles mesurées lors des événements pluvieux sur la même période d'observation de 22/05/2017 à 20/02/2018 conformément à la granulométrie des sédiments analysée du fond de canal. Le calage de ce modèle sédimentaire a été validé avec les critères suivants :  $R=0.956$ ,  $RMSE=0.02$  m et du critère de Nash= $0.867$ .

Les simulations réalisées ont permis d'estimer le volume moyen de dépôt de sédiments au fond du canal, cumulé depuis sa réalisation en 2006 jusqu'à la campagne de mesure menée en 2018. Ces simulations ont montré, également, que le fond sédimentaire dans le canal de drainage en terre, n'évalue pas uniquement lors des fortes crues mais aussi lors des événements pluvieux courants. Le calage des modèles a permis d'apparaître que le changement de la géométrie du canal lors du processus de transport solide dépend fortement de la granulométrie des sédiments et des paramètres hydrauliques.

Dans ce contexte, pour améliorer le fonctionnement des canaux de drainage quelques solutions suivantes ont été proposées : i) projetant une couche de gravier grossier au fond du canal en terre pour diminuer la charge sédimentaire ; ii) concevoir les canaux de drainage ayant le profil transversal trapézoïdal à deux étages dont la conception est préférable par rapport aux canaux trapézoïdaux simples, en point de vue de diminution de volume sédimentaire déposé, stabilité des berges et capacité d'écoulement.

Dans cette étude également, on a proposé une approche qui permet d'effectuer le suivi et le diagnostic préliminaire de l'état des canaux de drainage de la zone d'étude sans avoir à se déplacer sur le site. Pour y parvenir, les photos satellitaires de Google Earth du système de drainage ont été converties en carte TIN (Triangular Irregular Network) à l'aide du logiciel ARC-GIS et l'extension HecGeo-Ras. La carte TIN offre la possibilité d'extraire les variables physiographiques des canaux de drainage tels que la pente et la longueur du parcours de l'eau, qui est supposée égale à la longueur du canal vue la configuration des bassins versants correspondants à chaque canal, afin d'estimer le temps de concentration. La notion du temps de concentration est utilisée pour pouvoir évaluer plus précisément le changement de l'état d'un canal dans le temps, car la pente du canal subit la modification par rapport à son état initial sous l'effet de transport solide et phénomène de sédimentation.

De cette manière nous avons étudié l'état actuel des huit canaux principaux du système de drainage par rapport à leur état initial en utilisant la différence de temps de concentration pour une période allant de 2006 à 2017. Les résultats de cette étude ont montré que tous les canaux

nécessitent d'entretien et réhabilitation. Le canal le plus prioritaire pour l'entretien est le canal D 05. Pour vérifier l'état de chaque canal et confirmer les résultats de notre étude, les sorties sur le terrain ont été effectués en décembre 2018 et nous avons trouvé effectivement que canal D 05 est fortement encombre par une couche de sédiments déposés et les herbes par rapport aux autres canaux du système de drainage. Cette approche a permis également, établir le classement d'intervention et d'entretien prioritaires des canaux de drainage.

## **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- Ackers P., White, R. (1973). Sediment transport: neo approach and analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 11 (99), 2041-2060.
- Andreotti, B., Fourriere, A., Ould, K. F., Murray, B., Claudin, P. (2009). Size of giant Aeolian dunes limited by the average depth of the atmospheric boundary layer. *Nature*, 45 (7), 1120-1123.
- Achite, M., Meddi, M. (2004). Estimation du transport solide dans le bassin-versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse*, 15 (4) ,367-73.
- Actes de l'Atelier (2012). Agence Spatiale Algérienne et ministère des ressources en eau « Utilisation des technologies spatiales au service du secteur de l'eau Alger, 22 novembre 2012.
- Aslam, H., Andrew, E. L.(2019). Modeling the Natural Drainage Network of the Grand River in Southern Ontario: Agriculture May Increase Total Channel Length of Low-Order Streams. *Geosciences journal*, 9(1), 46. doi:10.3390/geosciences 9010046.
- Bagnold, R. A. (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics geological survey professional paper. 422-1.
- BAK , L, Dabkowski, S.L.(2013). Spatial distribution of Sediments in Suchedniów reservoir. *Journal of Water and Land Development*, 19 (4), 13–22.
- Benaïcha, A.C. (2017). Transports solides et leurs impact sur l'alluvionnement des barrages. *Noor Publishing*. ISBN: 978.3.330.84710.1.
- Brice, M. (1998). The rehabilitation of an old drainage network as a means of controlling the movement of land in Vars (Hautes Alpes- France) European center on geomorphological risks Strasbourg. *Alpine Geography Review*, 86 (1), 59. doi:.org/10.3406/rga.1998.2864.
- Benkhalel, A., Remini, B.( 2003). Analyse de la relation de puissance : débit solide-débitliquide à l'échelle du bassin versant de l'Oued Wahrane (Algérie). *Rev. Sci. Eau*, 16(3), 333-356.
- Bessenasse, M. (2010). Modélisation du cycle d'envasement des retenues de barrages, *Office des Publications universitaires, Université SAAD Dahlab (Blida) – Algérie (OPU2010)*. ISBN :978.9961.0.1326.7.
- Bouzeria H., Ghenim A.N., Khanchoul K. 2017. Using artificial neural network (ANN) for prediction of sediment loads, application to the Mellah catchment, northeast Algeria. *Journal of Water and Land Development*.No. 33 p. 47–55. DOI: 10.1515/jwld-2017-0018.
- Bessaoud, O., Pellissier, J.-P (2019). ENPARD, MEDITERRANEE, Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie, hal-02137632, pp.82.
- Belarbi, F., Bouchelkia, H., Remini B. et Benmansour A. (2018). Quantification and study of monthly variation of suspended sediment loads in Tafna basin – Algeria. *Journal of water and land development*. 2018, No. 37 (IV–VI): 29–38, ISSN 1429–7426, e-ISSN 2083-4535
- Bonometti, T., Balachandar, S. (2010). Slumping of non Boussinesq density currents of various initial fractionel dephs : A comparision between direct numerical simulations and a recent. *Computers and fluids*, 39 (4), 729-734, ISSN 0045-7930.
- Braud, I., Labbas, M., Branger, F. (2014). Développement et évaluation d'un modèle hydrologique

- distribué périurbain prenant en compte différents modes de gestion des eaux pluviales, Application au Bassin de l' Yzeron (150 km<sup>2</sup>), *JDHU Villeurbanne*, France,12-21.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01108366>
- Bouchelkia H., Belarbi F., Remini B. 2014. Quantification of suspended sediment load by double correlation in the watershed of Chellif (Algeria). *Journal of Water and Land Development*. No. 21 p. 39–46.
- Charru, F., Mouilleron, H., Eiff, O. (2004). Erosion and deposition of particles on a bed sheared by a viscous flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 519, 55 – 80.
- Cherif, E. A.(2010).Experimental study of bed deformations in a moving-bottom channel, sedimentation and hydro-complexity erosion phenomenon: *New Tools for Solving Wicked Water Problems Kovacs Colloquium*, July 2010 IAHS Pub, 338.
- Cunge, J.A., Rauhuel, J.L., Belleudy, P. (1986). Mathematical modelling software for river management,Carima and Condor systems. *Adv. Eng Software*, 8, 1-636.
- Daniele, D .W., Reinder, F. (2004). Global Warming and Drainage Development, Perspective and Challenges.” *Irrigation and Drainage*, 53 (3), 215–24.
- Depeweg H., Mendez, N.(2002). Sediment transport applications in irrigation channels. *Inter science irrigation and drainage* , 51(2),167–179.
- Demmak, A. (1982). Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. France, Thèse Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- Degoutte, G., (2012). Diagnostique, aménagement et gestion des rivières, Hydraulique et morphologie, fluviales appliquées. Lavoisier, Paris. ISBN: 978-2-7430-1469-8.
- Dieudonne, U., Stephen, M.M. (2019). Modeling surface runoff using the soil conservation service-curve number method in a drought prone agro –ecological zone in Rwanda. *International soil and water conservation research*,12,.001.doi: org 10-1016.
- Dunne, T. (1978). Field Studies of Hillslope Flow Processes. *Ed.M.J. Kirkby*, 9 (2), 227-293.
- Dreano, J., Valance, A.V., Cassar, C., Lague, D. R. (2008). Parsons et al., Experimental study of deposit morphology and sediment transport in a flume, *Proceedings Marine and River Dune Dynamics*,1-3,April 2008.
- Engelund, F., Hansen, E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streamsrep. Technical university of Denmark, Ostervoldgade p 10, 62.
- Étude de l'aménagement Hydro –Agricole de la plaine d'el Tarf. (2004). Association des bureaux d'étude ENHYD Algérien et ENERGOPROJEKT, Yougoslavie.
- Elahcene O., Terfous A., Remini B., Ghenaïm A., Poulet J.P. (2013). Etude de la dynamique sédimentaire dans le bassin versant de l'Oued Bellah (Algérie). *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 58 (1) p. 224–236. DOI 10.1080/02626667.2012.742530.
- Gharbi, M. (2016) .Floods effects on rivers morphological changes application to the Medjerda River in Tunisia. *J.Hydrol.Hydromech* , 64(1), 56 – 66. doi: 10- 1515.
- Graf, W.H., Suska, L. (1987).Sediment transport in steep channels, *Journal of hydroscience and*

*hydraulic Engineering*, 5(1), 11-26.

Gary, W. Brunner (2010). HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.

Hartani, T. (2001). Drainage status and capacity building needs in Algeria. IPTRID, capacity building report N°2, marsh 2002. *Proceeding of workshop, Cairo-Egypt*, P 79-91.

Hasbaia, M. (2014). Effet des lois de transport solide et du frottement dans la modélisation hydraulique 1D. *Research gate*, (2014), p 313 791703.

Hasbaia, M. (2011). Etude critique de transport solide et ces conséquences sur les cours d'eau naturels, Thèse doctorat, université Mohamed Boudiaf-Oran, CEMOA: archive ouverte d'Irstea / Cemagref, 147 p.

Heede, B., Rinne, J. (1990). Hydrodynamic and Fluvial Morphologic Processes: Implications for Fisheries Management and Research. *North American Journal of Fisheries Management*, 10(3), 249-363. doi :org/10.1577/1548-8675.

Hergault, V. (2011). Étude micro-structurale du transport par charriage de mélanges bidispersés à forte pente. Thèse. Université de Grenoble, HAL Id: tel-00684258.

Hjulstrom, F. (1935). Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. *Bulletin of the Geological Institute University of Uppsala*, 25, 221- 527.

Huppert, Walter., Mark, S., Douglas, L V. (2003). Maintenance in Irrigation: Multiple Actors, Multiple Contexts, Multiple Strategies, *Irrigation and Drainage Systems*, 17 (1-2), 5-22.

Husheng, L. (1993). Solid transport in collector unit and its modeling, The School National Ponts et Chaussées Français, HAL Id.

Hyung, S. K., Ichiro, K., Yasuyuki, S. (2019). Experiment and Computation of Morphological Response to a Vegetation Patch in Open-Channel Flows with Erodible Bank. *Water journal*, 11, 2255 .doi:10.3390/w11112255.

Inguer, M., Bourouay, O. (2016). Etude de l'envasement du canal du rocade (plaine du Haouz-Marrakech). Thèse ORMVAH- Marrakech.

Jia, Y., Wang S.S.Y. (1999). Numerical model for channel flow and morphological change studies, *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 125(9), 924-933.

Kakinoki, K., Takikawa, K., Yamada, F. (2006). Seasonal Changes of the Profile of Intertidal Flats, *Journal of Coastal Research* 39(2), 806-809.

Karim, M.F., Kennedy, J. F. (1982). Alluvial: A Computer Based Flow and Sediment Routing Model for Alluvial Streams and its Application to the Missouri River, Iowa Institute of hydraulic Research, Report No.250, The University Iowa City, Iowa.

Kevin, M. (2012). Utilisation de la méthode du SCS pour calculer le débit de pointe des micro-bassin hydrographiques, conférence technique sur l'hydrologie des petits bassins versants, Québec.

Kirpich, Z.P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Journal civil*

*Engineering*, 0(6),362.

- Klemes, V. (1977). Physically based stochastic hydrologic analysis. *Advances in hydrosciences*. Academic press, New York, 11, 285-355.
- Khanchoul K., boukhrissa Z.E., Majour h. 2012. Statistical modeling of suspended sediment transport in the Cherf drainage basin, Algeria. *Comunicações Geológicas*. Vol. 99. No.1p. 27–32.
- Labar, S. (2003). Contribution à l'identification des aires inondables et qualité physico-chimiques des eaux stagnantes temporaires dans la vallée de la Mafragh « Extrême Nord Est Algérien », Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba.
- Lajeunesse, E., Malverti, L., Charru, F. (2010). Bed load transport in turbulent flow at the grain scale: Experiments and modeling. *Journal of Geophysical Research*, 115. F04001. doi:10.1029/2009JF001628.
- Ledoux, B. (2006). La gestion du risque inondation, Edition TEC et DOC, 11 rue Lavoisier-Paris.
- Lukasz, B., Szczepan L. (2013). Spatial distribution of Sediments in Suchedniów reservoir. *Journal of Water and Land Development*, 19 (4): 13–22 PL ISSN 1429–7426.
- Mailhot, A., Bolduc, S. (2016). Hydrology on the scale of small agricultural catchments, Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement, Ministère de l'Agriculture, des Pêches et de l'Alimentation (MAPAQ).
- Malavoi, J.R., Recking, A. (2011). *Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière*. ONEMA, France. ISBN : 295163935X.
- Meddi, M., Khaldi, Ab., Meddi, H. (1998). Contribution à l'étude du transport solide en Algérie du nord, Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes (*Proceedings of a symposium held at Vienna, July 1998*), IAHS Publ.249, 199.
- Merabet, A. (2006). Étude de la protection de la ville de Sidi Bel Abbés contre les inondations, Mémoire de Magister, Université de Djilali Liabes-Sidi Bel Abbés.
- Mendez, N. (1998). Sediment transport in irrigation canals, A.A. Balkema Publishers Old Post Road, Brookfield, VT 05036-9704, USA, ISBN: 9054104139.
- Ministère de l'agriculture. (1980a). La méthode CRUPEDIX. Méthode d'estimation du débit de crue de fréquence décennale sur un bassin versant non jaugé à partir des précipitations et d'un paramètre régional, CTGREF, p. 21.
- Mockus, V. (1961). Watershed lag, U.S. Dept. of Agriculture. *Soil Conservation Service*, ES-1015, Washington, DC.
- Nicolas, Stämpfl. (2007). Fact sheet Peak Flow Assessment for Small Agricultural Watersheds in Quebec, Brace Centre for Water Resources Management (McGill University).
- Ochiere, H.O., Onyando, J.O. (2015). Simulation de transport de sédiment dans les canaux souterrains par HEC RAS, canal Sud Ouest Kano, plan d'irrigation, Kenya. *International journal of Engineering Science Invention*, Issue 2319-6734 (4), p. 15-31.
- Omari, C., Moiserons, J.Y., Alpha, A. (2012). L'agriculture algérienne face aux défis alimentaires. *Revue tiers monde*, 210 (2), p 123 – 141.

- Ouarda, T. B. M.,Gingras, H., Bobée, B.(2001). Synthèse des méthodes simples de régionalisation. Rapport de recherche No R-600, ISBN : 2-89146-471-0.
- Parker, G., Klingeman, C. (1982). On why gravel bed streams are paved. *Water resources research*, 18(5), p. 1409-1423.
- Pierluigi, D. R.,Andrea, F.(2019). Stream Power Determination in GIS: An Index to Evaluate the Most 'Sensitive' Points of a River, *Water Journal*, 11, 1145 doi: 10.3390/w11061145.
- Plecha, S., Silva, P. A., Oliveira, A., Dias, J. M. (2011). Sediment transport modeling and morphological trends at a tidal inlet, sediment transport in aquatic environments. *Journal of coastal research*, 64, 1155-1159.
- Rampon, J.M.(1990).Erosion hydrique et sédimentation dans les barrages, informations techniques, CEMAGREF, 78.6 pp.1-7.
- Remini, B.(2015). Impact of sediment transport of the Chelif River on silting of the Boughezoul Reservoir (Algeria), *Journal of Water and Land Development*, 24( 1),35-40, PL . ISSN 1429– 7426.
- Recking, A. (2006). Étude expérimentale de l'influence du tri granulométrique sur le transport solide par charriage. Thèse Institut National Des Sciences Appliquées de Lyon École Doctorale M.E.G.A Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique, 2006-ISAL-00113.
- Recking, A., Frey, P., Paquier, A., Belleudy, P. (2008). Bedload transport flume experiments on steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 13(4), 1302-1310.
- Recking, A.(2010). Évaluation des formules de transport solide en rivière avec prise en compte de l'échelle temporelle, Rapport Final, Cemagref, UR ETNA, Conseil général de l'Isère.
- Rodi, W. (1993). Turbulence models and their applications in hydraulics. 3rd Ed., IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Roche, P.A; Miquel, J; Gaume, E. (2012). Hydrologie quantitative, Processus, modèles et aide à la décision. Préface de G. de Marsily, membre de l'Académie des Sciences.Ingénierie et développement durable, Springer.
- Ronald, V., Aljosja, H., Dedi, M., Iwan S., Maarten, P.(2020). A New Method for Rapid Measurement of Canal Water Table Depth Using Airborne LiDAR,with Application to Drained Peatlands in Indonesia. *Water journal*, 12, 1486; doi:10.3390/w12051486.
- Rickenmann, D; Recking, A. (2011). Evaluation of flow resistance in gravel-bed Rivers through a large field dataset. *Water Resources Research*. Vol 47, pp. 1-23.
- Salomon, J.N.(1997). L'homme face aux crues et aux inondations, Presses Universitaire de Bordeaux, Université Michel de Montaigne, Bordeaux. doi: 10.4000/books.pub.1466 -140 p.
- Savoie, V.(2009), Le drainage de surface, MAPAQ ,centre du Québec- Agroenvironnement, documents, drainage formation 2009- 2010.pdf <https://www.agrireseau.net>.
- Schultz, B., and Daniele, D .W. (2002). Irrigation and Drainage Systems Research and Development in the 21st Century. *Irrigation and Drainage*, 51 (4), 311–27. doi:org/10.1002/ird.67.
- Schoklitsch, A. (1962). Handbuch des wasserbaus (in german). *Springer verlag* (3rd edition), Wien

- Austria, ISBN: 978-3-7091-.8088-4.
- Shepard F.P.(1954). Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of Sedimentary Research*, 24 (3): 151–158
- Shields, A. (1936). Application of similarity principles and turbulence research to bed load movement, *Mitteilungen der preussischen versuchsanstalt fur wasserbau und schiffbau, Berlin*, 26, 5-24.
- Shepard, F.P.(1954). Nomenclature based on sand- silt-clay ratios, *Journal of sedimentary research*, 24(3), 151-158.
- Smart, G.M., Jaeggi, M.N.R.(1983). Sediment transport on steep slopes, mitteilungen, der versuchsanstalt fuer wasserbau, hydrologie und glaziologie, eidg. *Techn. Hochschule zuerich, zurich. Strickler*, (64), p 89-191.
- Smedema, L. K., and Walter, J .O.(1998).Needs and Prospects for Improved Drainage in Developing Countries, *Irrigation and Drainage Systems*, 12 (4), 359–69.
- Smedema, L. K., Safwat, A.D.,Walter, J .O. (2000). Drainage and Agricultural Development. *Irrigation and Drainage Systems*, 14 (3), 223–35.
- Smith, K. V. H. (1986) Regime Approach to the Design of Drainage Channels. Hydraulic Design in Water Resources Engineering: Land Drainage © *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp. 305-314.
- Sonal, B .D., Mrs.D.R .(2015).Vaidya Simulation de l'écoulement dans un canal. *International multidisciplinary journal*, 4, ISSN:2277-4262.
- Struiksmā, N., Crosato, A. (1989). Analysis of a 2 D bed topography model for Rivers. In S. Ikeda and G. Parker eds., River Meandering. *Water Resour. Monograph*, 12, 153- 180.
- Touaibia, B., Gomer, D., Aïdaoui , A. & Achite, M. (2001). Quantification et variabilité temporelles de l'écoulement solide en zone semi-aride, de l'Algérie du Nord. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 46(1), 41–53.
- Terfous A., Megnounif A., Bouanani A. 2001. Etude du transport solide en suspension dans l'oued Mouilah (Nord ouest Algérien) [Study of the suspended load at the river Mouilah (North West.Algeria)]. *Revue des Sciences de l'Eau*. Vol. 14(2) p. 173–185
- Tuijnder, A. P. (2010). Sand in short supply: modeling of bed forms, roughness and sediment transport in rivers under supply-limited conditions. Thesis. Engineering Technology (CTW).ISBN:978-90-9025123-3.
- U.S. Army Corps of Engineers. (2008). HEC-RAS (Version 4.0) [Hydraulic Reference Manuel]. Davis, CA: Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers.
- Vandersypen, K., Keita, A., Coulibaly, B., Dirk, R., and Jamin, J.Y. (2007). Drainage Problems in the Rice Schemes of the Office Du Niger (Mali) in Relation to Water Management. *Agricultural*, 89 (1), 153–60.
- Van Rijn, L. C. (1993). Principles of Sediment Transport in rivers, Estuaries and Coastal Seas Aqua Publications in Netherlands,1-612. ISBN:90-800356-2-9.

- Van Rijn, L. C. (1986). Mathematical modeling of suspended sediment in non-uniform flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1126, 433 – 455.
- Van Rijn, L. C. (1984). Sediment transport, part: bed load transport. *Journal of hydraulic engineering*, 110(10), 1431-1457.
- Vastila, K. , Jurvela, J. (2011). Environmentally preferable two-stage drainage channels: considerations for cohesive sediments and conveyance. *International Journal of River Basin Management* 9, (4), 171-180. doi: 10.1080/15715124.
- Walinford, HR. (1993). Canal sediment - software for improved management. ODU Bulletin, n°28.
- Wang, S. S. S., Wu, W. (2004). River sedimentation and morphology modeling – The state of the art and future development, Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation, Yichang, China. October 18 – 21, 2004,71-94.
- Wang, Z.Y. Lee, J. H.W., Melching, C. S.(2015). River dynamics and integrated river management. Environmental sciences. *Tsinghua University Press, Beijing*.ISBN: 978-7-302-27257.
- Williamson, T.N. ( 2019). Delineation of tile- drain networks using thermal and multispectral Imagery. Implications for water quantity and quality differences from paired edge-of-field sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, doi:10.2489/jswc.74.1.1.
- Savoie V., (2009). Le drainage de surface, MAPAQ – centre du Québec.[www.agrireseau.net](http://www.agrireseau.net) > documents > drainageformation2009-2010.
- Wu, W. (2002). Computational River Dynamics, Sediment laden drainage, Betsiboka River, Madagascar. Courtesy of NASA, National Aeronautics and Space Administration. Houston. USA. *Taylor & Francis Group, London, UK*. ISBN: 0-203-93848-8.
- Wu, W., Wang, S.S.Y., Jia, Y.( 2000). Non uniform Sediment Transport in Alluvial Rivers. *J Hydr. Res., IAHR*, 38(6), 427-434.
- Xi, Wei., Sabine, Sauvage et al. (2019). A Modeling Approach to Diagnose the Impacts of Global Changes on Discharge and Suspended Sediment Concentration within the Red River Basin. *Water journal*, 11, 958.doi: 10.3390/w11050958.
- Yang, C. T.(1984). Unit stream power equation for gravel. *Journal of hydraulic engineering*, 110 (12).1783-1797.
- Yang, H. S.(2018). Predicting Sedimentation in Urban Sewer Conduits. *Water journal*, 10, 462. doi:10.3390/w10040462.
- Yaohui, C., Xiao, Z. Pute, W. (2019). Effect of Soil Texture on Water Movement of Porous Ceramic Emitters: A Simulation Study. *Water journal*, 2019, 11, 22; doi:10.3390/w1101002.
- Zettam A., Taleb A., Sauvage S., Boithias L., Belaidi N., Miguel Ánchez-Pérez J. 2017. Modelling hydrology and sediment transport in a semi-arid and anthropized catchment using the SWAT model:The case of the Tafna River (Northwest Algeria). *Water*. Vol. 9.Iss. 3 (216). DOI 10.3390/w9030216.

# **Annexes**

**Annexe.1** Tableaux des valeurs du numéro courbe (CN) et coefficient de ruissellement (c)

Tableau 1 : Valeurs du numéro de courbe (NC)

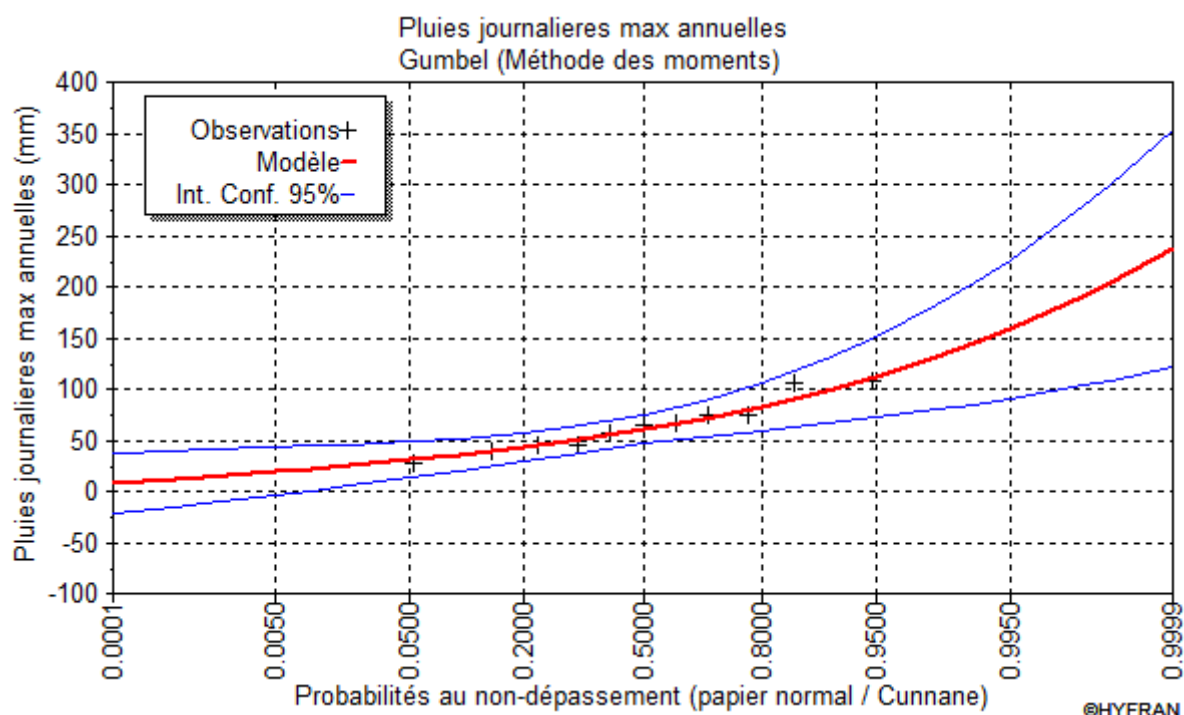
Utilisation du sol	Pente transversale du bassin versant (perpendiculaire au cours d'eau)	Condition hydrologique	Classe de sol			
			A	B	C	D
Culture intensive	<3%	Pauvre	63	74	80	82
		Bonne	60	70	78	81
	3-8%	Pauvre	65	76	84	88
		Bonne	63	75	83	87
	>8%	Pauvre	72	81	88	91
		Bonne	67	78	85	89
Culture extensive	<3%	Pauvre	39	61	74	80
		Bonne	25	40	70	78
	3-8%	Pauvre	49	69	79	84
		Bonne	39	61	74	80
	>8%	Pauvre	68	79	86	89
		Bonne	49	69	79	84
Boisé	<3%	Pauvre	25	55	70	77
		Bonne	22	53	65	74
	3-8%	Pauvre	41	63	75	81
		Bonne	25	55	70	77
	>8%	Pauvre	47	68	80	84
		Bonne	41	63	75	81
Résidentielle		Dense	73	83	88	90
		Peu dense	59	74	82	86
Conditions hydrologiques Pauvre : Faible couvert végétal et conditions limitant l'infiltration Bonne : Bon couvert végétal et conditions favorisant l'infiltration		Classes de sol A : Graviers et sables grossiers (infiltration élevée); B: Sables moyens et fins (infiltration moyenne); C : Sables fins mal drainés, sols limoneux et argiles perméables (infiltration passable); D : Argiles lourdes et sols minces (infiltration faible)				

Source : Laroche et Champagne (1989)

Type d'occupation du sol	Coefficient de ruissellement
Commercial	$0,70 \leq C \leq 0,95$
Résidentiel	
lotissements	$0,30 \leq C \leq 0,50$
collectifs	$0,50 \leq C \leq 0,75$
habitat dispersé	$0,25 \leq C \leq 0,40$
Industriel	$0,50 \leq C \leq 0,80$
Parcs et jardins publics	$0,05 \leq C \leq 0,25$
Terrains de sport	$0,10 \leq C \leq 0,30$
Terrains vagues	$0,05 \leq C \leq 0,15$
Terres agricoles drainées	$0,05 \leq C \leq 0,13$
non drainées	$0,03 \leq C \leq 0,07$

Tableau – Valeur du coefficient de ruissellement suivant le type d'occupation du sol.

**Annexe.2** Ajustement des pluies journalières maximales à la loi Gumbel de la station météorologique « Lac des Oiseaux » pour la période d'observation de 2006 à 2017



Station Lac des Oiseaux  
Résultats de l'ajustement  
Gumbel (Méthode des moments)  
Nombre d'observations: 11

Paramètres

u 52.710867

alpha 19.872904

Quantiles

q = F(X) (probabilité au non-dépassement)

T = 1/(1-q)

T	q	XT	Ecart-type	Intervalle de confiance (95%)	
100.0	0.9900	144	30.2	85.0	203
50.0	0.9800	130	25.9	79.5	181
20.0	0.9500	112	20.3	72.0	151
10.0	0.9000	97.4	16.0	66.0	129
5.0	0.8000	82.5	11.9	59.2	106
3.0	0.6667	70.7	8.96	53.1	88.2
2.0	0.5000	60.0	7.05	46.2	73.8

**Annexe.3** Résultats de calculs de la couche sédimentaire dans le canal par la formules de :  
*Engelund et Hansen* et *Ackers et White*

N°profil	L (m)	Formule de Engelund et Hansen				Formule de Ackers et White				hs Mesuré(m)
		Qs(m3/s)	Vs(m3)	Ss(m2)	hs(m)	Qs(m3/s)	Vs(m3)	Ss(m2)	hs(m)	
0	0	<b>3.29E-03</b>	2.960	2.420	<b>1.223</b>	<b>1.73E-03</b>	1.550	1.925	<b>0.805</b>	1.100
1	719	<b>3.08E-03</b>	2.780	2.364	<b>1.176</b>	<b>1.63E-03</b>	1.470	1.897	<b>0.775</b>	1.100
2	581	<b>2.52E-03</b>	2.270	2.172	<b>1.045</b>	<b>1.37E-03</b>	1.230	1.841	<b>0.668</b>	0.680
3	910	<b>1.80E-03</b>	1.620	1.952	<b>0.830</b>	<b>1.02E-03</b>	0.920	1.643	<b>0.56</b>	0.810
4	634	<b>1.55E-03</b>	1.390	1.866	<b>0.745</b>	<b>8.98E-04</b>	0.810	1.588	<b>0.51</b>	0.730
5	117	<b>1.65E-03</b>	1.480	1.897	<b>0.780</b>	<b>8.12E-04</b>	0.570	1.200	<b>0.475</b>	0.500
6	899.95	<b>1.08E-03</b>	0.970	1.670	<b>0.581</b>	<b>7.55E-04</b>	0.530	1.178	<b>0.45</b>	0.590
7	96.66	<b>3.37E-04</b>	0.300	1.245	<b>0.241</b>	<b>2.93E-04</b>	0.200	0.930	<b>0.215</b>	0.640
8	108.97	<b>2.62E-04</b>	0.240	1.231	<b>0.195</b>	<b>2.42E-04</b>	0.160	0.865	<b>0.185</b>	0.540
9	90.59	<b>1.80E-04</b>	0.160	1.135	<b>0.141</b>	<b>1.80E-04</b>	0.160	1.143	<b>0.14</b>	0.500
10	91.37	<b>1.15E-04</b>	0.100	1.149	<b>0.087</b>	<b>1.22E-04</b>	0.130	1.238	<b>0.105</b>	0.670
11	101.46	<b>5.57E-05</b>	0.050	1.000	<b>0.05</b>	<b>7.09E-05</b>	0.060	1.000	<b>0.06</b>	0.640

**Annexe.4** Photos prises par l'auteur pendant les essais de mesure le temps de concentration à droite utilise jus de betterave et à gauche petit morceaux de polystyrène



## Annexes publications de la thèse

## Annexe.5

Iraqi Journal of Agricultural Sciences –2019:50(2):662-674

Foued &amp; et al.

**MODELING OF SEDIMENT TRANSPORT IN THE DRAINAGE CHANNELS  
WAY OF REHABILITATION- CASE OF BOUTHEA -NORTH EST PLAIN OF ALGERIA**

S. Foued<sup>1\*</sup>      B. Tamara<sup>2</sup>      S. Abdallah<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Hydraulic Department University: BADJI MOKHTAR ANNABA –ALGERIA

<sup>2</sup>Hydraulic Department University: BADJI MOKHTAR ANNABA –ALGERIA

<sup>3</sup> Amenagement Department University : BADJI MOKHTAR ANNABA- ALGERIA

<sup>1,2,3</sup> Hydraulic and soil laboratory, Faculty of Engineering Sciences ANNABA, Algeria

<sup>1\*</sup> Email : [sennaoui-foued@hotmail.com](mailto:sennaoui-foued@hotmail.com) , <sup>2</sup>Email : [kondratievat@yahoo.fr](mailto:kondratievat@yahoo.fr) , <sup>3</sup>Email : [saihia\\_a@yahoo.fr](mailto:saihia_a@yahoo.fr)

**ABSTRACT**

The Drainage of agricultural land has become a top priority in agriculture, at the level of developing countries it is directly related to human life and economic development of the state. The objective of this article is to quantify and estimate morphological evolution in the medium term. the morphological evolution of the canals under the influence of sedimentary transport processes. The study area consists of agricultural land located in the plain of Bouteldja, in the north-east of Algeria. This zone was developed in 2006 as part of a hydro-agricultural project through the creation of networks of open-air drainage channels, but until now submerged with adjacent farmland. The causes may be: i) the lack of cleaning maintenance since completion, ii) the existence of drained males. To model the sediment transport process in the drainage canals, we used the empirical formulas and models of the HEC-RAS software. These models were calibrated to actual data obtained during the observation period from 2017 to 2018 for the various rain events, the model results give good criteria.

**Keywords:** modelization, drainage, channels, solid transport, HEC RAS

مجلة العلوم الزراعية العراقية - 2019: 50(2): 662-674 فؤاد وآخرون

نمذجة نقل الرواسب في قنوات الصرف وطريقة اعادة التأهيل حالة بوئلدة شمال الشرقي من الجزائر

عبد الله

تمارا

فؤاد

المستخلص

اصبح تصريف الاراضي الزراعية اولوية قصوى في الزراعة على المستوى البلدان النامية مايرتبط ارتباطاً مباشراً بالحياة البشرية والتنمية الاقتصادية للدولة والهدف من هذه الدراسة هو تقدير التطور المورفولوجي على المستوى المتوسط للقنوات تحت تأثير عمليات النقل الرسوبية تتكون منطقة الدراسة من اراضي زراعية تقع في سهل بوئلدة وفي شمال الشرقي من الجزائر. تم تطوير هذه المنطقة عام 2006 كجزء من مشروع المزارعة المروية من خلال انشاء قنوات الصرف المكشوفة ولكن لحد الان مغمورة مع الاراضي الزراعية المجاورة قد تكون الاسباب في عدم وجود صيانة منذ الانتهاء في وجود استنزاف في نمذجة عملية نقل الرواسب من القنوات ثم استعمال الصبغ والنماذج التجريبية لبرنامج HEC- RAS تحت معايرة هذه النماذج وفقاً للبيانات الفعلية التي تم الحصول عليها خلال فترة المراقبة من 2017 الى 2018 كمختلف الاتجاهات وكانت النماذج المستعملة جيدة ودقيقة

كلمات مفتاحية: تنمية الاقتصادية، قنوات الصرف، القنوات المكشوفة

\*Received:11/5/2018, Accepted:17/10/2018

## INTRODUCTION

The proper management of sediments in canal beds is one of the major challenges of the improvement work, as a large part of the annual maintenance and implementation budget is spent annually on the removal of deposited sediments (9). Before undertaking the rehabilitation of the drainage network, it was important to determine the effectiveness of the old system, control of surface flows, and more precisely the morphological evolution of the bottom of the channels by sedimentation and their influence on flow. during the floods consequently flooding agricultural land (4). It was therefore necessary to research plans and old photographs, profiles along and through the canals in archive is very useful is interested in the evolutionary trend of the rivers (11). in order to know, on the one hand the effect of the change of the profiles of the channels in the time and the space and the influence on the submersion of the lands Bordering on everything in a plain as our case "plain of Bouteldja" wilaya of El Tarf North East of Algeria, Therefore Sediment transport processes in watercourses depend both on hydraulic parameters, physical characteristics of catchments and sediment properties (7). The knowledge of these parameters is therefore essential in fluvial hydraulics and hydraulic modeling, in particular to the different models of fluid mechanics (Navier Stokes models, Saint Venant 2D and 1D models, etc ...) also describing the propagation of flows in streams. Several models have been developed in the literature, such as empirical, conceptual and numerical models for the quantification of solid transport in rivers and channels (6 ,11). They are useful for the modeling of Sediment transport and its effects on morphological changes in drainage canals in particular. The D 03 channel (Figure 1b) which is part of the drainage system was chosen as the object of this study. The canal was built as part of the

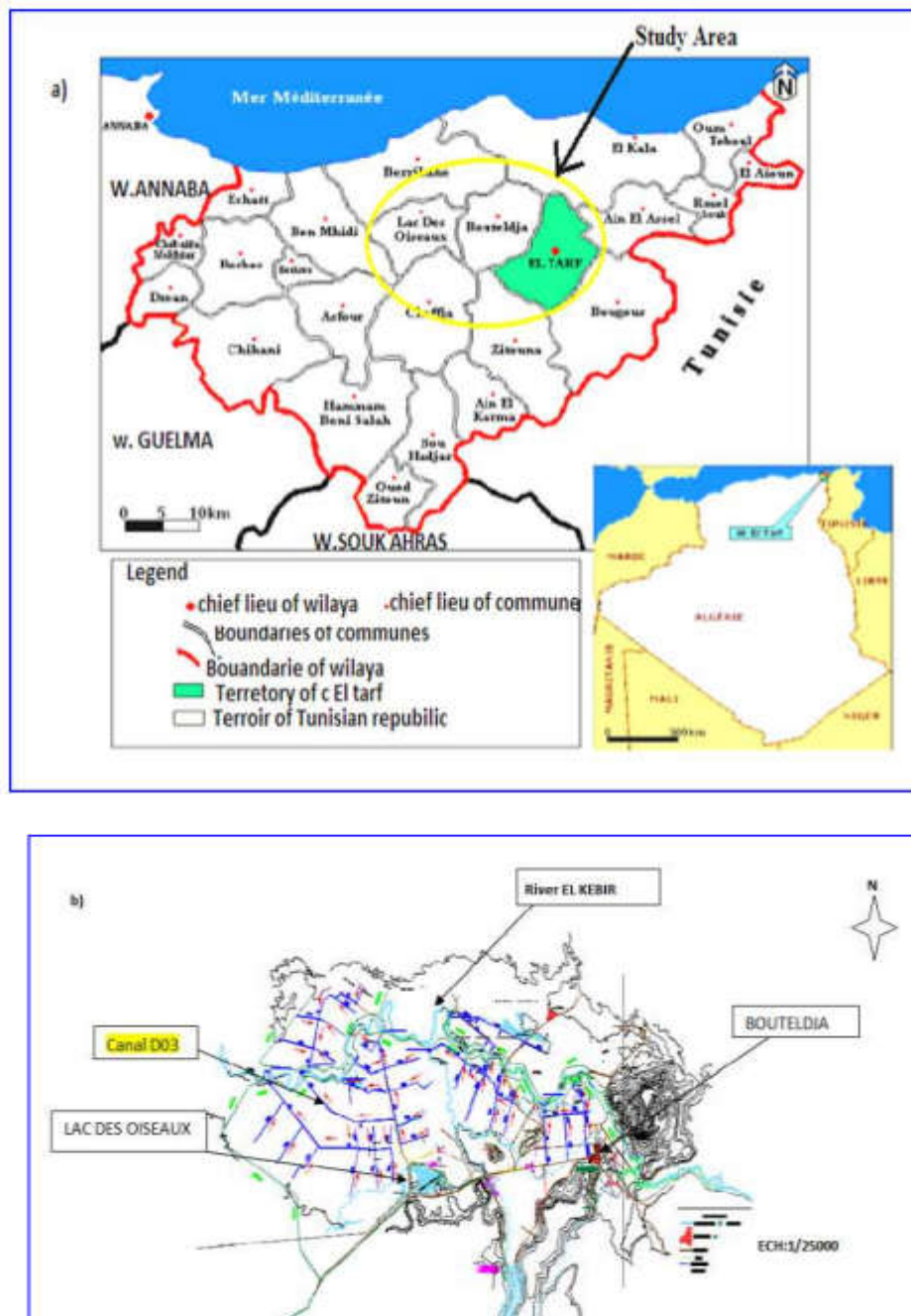
agricultural development of the plain since 2006 and carries drainage water to river El Kebir. The shape of its cross section is trapezoidal and its length is 4350 m. The channel model was developed and calibrated based on current operational conditions. Canal bottom deformation is then simpler to determine since the eroded or deposited volume is directly related to the change in the bottom elevation .

## MATERIALS AND METHODS

### Study Area:

the study area is an agricultural plain is located in the municipality of Bouteldja located 12km from the capital of the Wilaya EL TARF, included in the hydro system of the watershed El Kebir extends over a longitude of 7 ° 45 'to 8 ° 58' and a latitude of 36 °20 'to 36 ° 45', is part of the MAFRAGH catchment area and is bounded by: to the north by the dune side and Mediterranean sea, to the east by the Mexa dam and the Tunisian borders, to the west by Annaba wilaya to the south by Bounamoussa dam (Cheffia) and wilaya of Souk Ahras (figure01) .the plain covers an area of 10572ha and about 6425 ha are agricultural land.

- Rainfall is characterized by heavy rains, often showers in winter, which decrease almost regularly in the spring and eventually reach a total of a few millimeters per month in summer The eastern part of the perimeter is a little wetter. (Ain El Assel 916.38mm / yr, Cheffia 803.63mm / yr) relative to the western part (lac des oiseaux 674.82 mm / yr)., And the average annual water slide elapsed is: 182.04 mm. The temperature over a period of 11 years (2005-2016) show that the average annual temperature for the three stations reached 19.24 ° C., the month of February is the coldest with a low temperature reached at 12.80 ° C, over the months from July and August temperatures exceed 25C.



**Figure 1. Location of study area a) and drainage network b)**

Our case study is based on the topographic and geometric network data of the drainage channels (Figure 1, b) and the results of the channel ground tests, with measurements and field diagnosis. The soil texture study was done in the LNHC laboratory of Ain Assel, ENTENE El Tary and Water and Soil Laboratory (Faculty of Engineering Sciences Annaba University). The results of particle size and sedimentometric analysis and the

measurement of the mechanical physics properties of the materials along the channel lines are presented in Table 1 and in the curve of Figure 2. Finally, the bed sediments of the channels have a limit of liquidity of  $w_l = 54\%$  and a plasticity limit  $w_p = 27\%$  where a plasticity index  $IP = 27.23\%$  reflects a sensitivity to water, based on the Casagrande plasticity diagram the sediment is in the class very plastic clays.

Table 1. Soil test results

Particle size analysis And sedimentometric	Physico-mechanical propriétés
- d90% = 0.06mm - d65% = 0.045mm - d60% = 0.042mm - dm 50% = 0.04mm - d10% = 0.004mm dm,90 ,65... :particle diametr	-Moist density: $\gamma_h = 1.92 \text{ g/cm}^3$ -Specific mass density: $\gamma_s = 2.653 \text{ g / cm}^3$ -Dry density: $\gamma_d = 1.56 \text{ g / cm}^3$ -the porosity: $(p) = 0.28 = 28\%$ -permeability: $(k) = 2.77 * 10^{-6} \text{ m / s}$

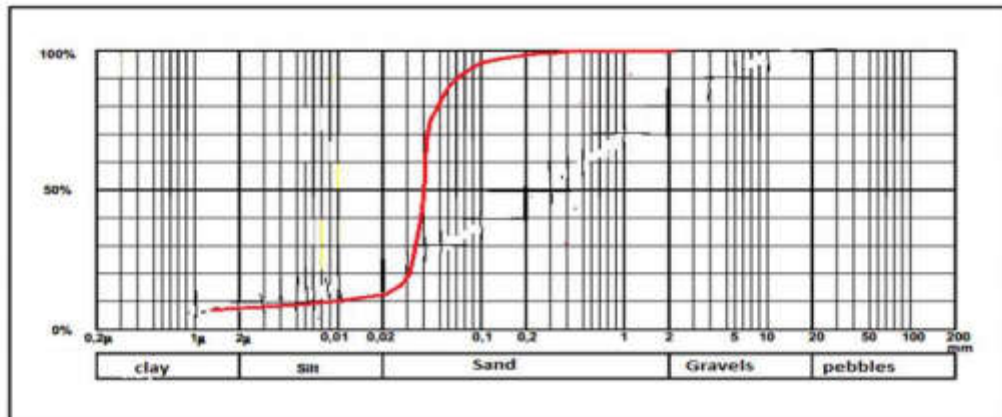


Figure 2. Size curve of bed soil of canals

**Methodology**

The methodology of the study is presented in Figure 3 in the form of the flowchart. According to the stages presented, this study aims at estimating the evolution of the bottom of the D03 channel during the period of 11 years after its realization between (2006-2017). The study was conducted on the basis of the topographic data of the longitudinal and transverse canal profiles from the proofing plan that was made by the Algerian ENHYD design office with ENERGOPROJEKT BET YUGOSLAVIE (2004) (data source: ONID

National Irrigation Office and El Tarf drainage) in the framework of hydro-agricultural development in the area. with the interpolation of the two initial and current topographic surveys in the field, we compared the results obtained by the empirical computation and the simulation according to the HEC RAS model and calibrated its models to the measured data for the observation period from 2017 to 2018 years. on 12 sections at the D03 channel to choose the most appropriate model.

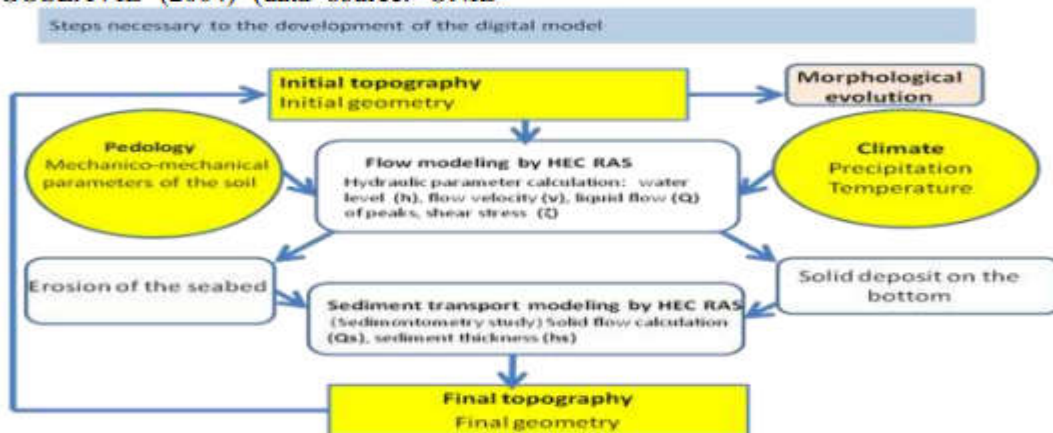


Figure 3 . Organization chart of the methodology

**Peak flow estimation:**

The first stage of flow modeling is the peak flow estimation, Two methods were used:

**Empirical methods:**

The calculation methods identified using different empirical formulas take into account three essential factors: the intensity of rain, the surface of the watershed, the time of concentration. The empirical methods tested in our case are the rational method and the method of CRUPUDIX,

**Soil Conservation Service (SCS) method:**

In this method runoff is modeled using the Hydrological Modeling System (HEC-HMS), it is designed to simulate the precipitation-discharge process of watersheds.

**Modeling of the flow and sedimentary transport:****Development of the mathematical model:**

Many models have been developed to address the various problems encountered in nature, including the simulation of non-cohesive and cohesive sediment transport, channel widening and meandering, roughness, turbulence, vegetation presence, etc. (10).

The sedimentary transport models are very diverse and always start with the resolution of the Saint-Venant basic one-dimensional equations (1D) (equation (1) for the liquid phase and the sediment mass conservation law and deformation of the bed by two-dimensional equation (2D) of Exner (equation (4) for the solid phase.

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = ql \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = ql \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{S} \right) + gs \frac{\partial h_e}{\partial x} - gs \frac{\partial h_f}{\partial x} + g s J = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial x} + g \frac{\partial h_e}{\partial x} = g(l - J) \quad (3)$$

with I the slope of the bottom and J: the loss of energy given by the formula:  $J = \frac{Q^2}{k^2 S^2 R^{4/3}}$

$$(1 - p) \frac{\partial h_f}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

To compare the results of the liquid phase concerning the water depth in the channel during the max daily rain event found by the HEC RAS 4.0 simulation model, we have used the Manning-Strickler formula (5) for the calculation the Auto Cad was used to graphically extract the wet surface and perimeter wet with iteration of water depth.

Manning-Strickler Formula:

$$V = \frac{1}{n} * R^{2/3} * I^{1/2} \quad (5)$$

with V: the flow rate, n :Manning roughness coefficient depends on the nature of the walls of the channels ( $\frac{1}{n} = K$  coefficient de strickler), R: Hydraulic radius, I : the slope of the bottom On the other hand, to calculate the solid transport, there are several empirical formulas, but the difficulty lies first in the choice of an appropriate formula among the tens of formulas available, each being constrained to conditions of use a

priori strictly limited to those which prevailed during their validation. "The first parameter explored is thus that concerning the field of application of the different transport formulas according to the mode of transport either thrusting, suspension or total limited by the shear stress of the bottom. (parameter de shields  $\zeta^*$ ) and sediment size (dm), among the formulas Smart and Jaeggi (1983) , Schoklitsch(1962) , Parker(1982), Vin Rijn(1984) , Yong, Engluand et Hansen(1967) , Ackers et White (1973). (Recking, Al. 2010) give solid transport QS, in the form of a flow, to the solid volume VS we use the following formula (Gérard Degoutte 2012).

$$VS = qs * \Delta t \quad (6)$$

where  $\Delta t$  : the time interval.

we take  $\Delta t = 0.25h = 15 \text{ min}$ , usually taken for a return period of 10 years (Montana), and

we take  $\Delta t = 90$  s for the observation period: (22/05/2017- 20/02/2018).

#### Presentation of the models:

HEC RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System)

it is a software used to model flows and sediment transport in streams or channels. Concerning solid transport, the HEC-RAS software makes it possible to model both the thrust and the suspension. For this, proposes to define three functions: a transport function, the software proposes seven formulas and a function of evolution of the sedimentary bed, this function determines the height of the sedimentary bed thanks to a mass balance applying on the sediments. Two models are offered by the software: the Exner model and the so-called "Active Layer" model, as well as a sedimentation rate function. The software proposes three formulas, otherwise it sets the boundary conditions. The formulas that we

used in our model (Exner) the formula *Englund* and *Hansen* and the formula of *Ackers* and *White*, for the solid transport but for the sedimentation rate the Van Rijn formula.

#### RESULTS AND DISCUSSION

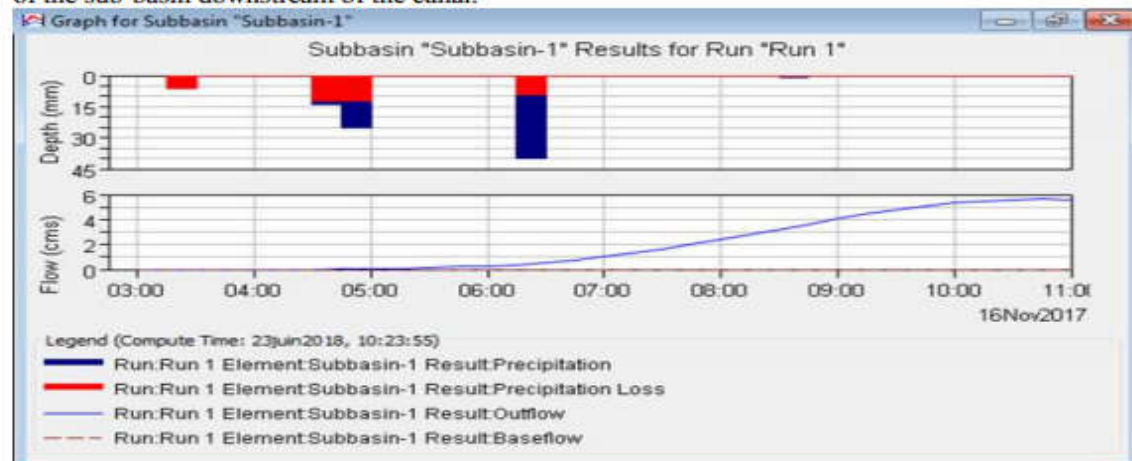
The first step of the study is the estimation of the peak flow. To achieve this, the D03 channel was divided into three sections according to the route (Figure 5.). The watersheds corresponding to each section have been designated SB01, SB02 and SB03 respectively and this from upstream to downstream of the channel. The flow values calculated by the empirical method and the SCS model simulated by HEC HMS and those of the measured flow are given in Table 2.

With TC: concentration time, CN: curve number, Q MAX: max flow.

**Table 2. Peak flow estimation results**

Under basins	BV area (ha)	Length (L) (m)	TC(min)	CN	Q MAX Calculated (m <sup>3</sup> / s)	Q MAX Measured (m <sup>3</sup> / s)	Q MAX Simulated (m <sup>3</sup> / s) HEC RAS
SB01	127.70	1598	485.39	88	1.67	3.45	3.30
SB02+ SB01	86.64	1127.5	367.22	88	3.14	4.18	4.1
SB03+	135.66	1624.5	491.82	88	4.89	5.06	5.50
SB02+SB01							

For example, Figure 4 shows the hydrograph of the sub-basin downstream of the canal.



**Figure 4 .Hydrograph sub basin in downstream channel using HEC HMS**

In the first phase according to the flow simulation by the HEC RAS 4.0 software with measured flow rates (3.45, 4.18, 5.06) m<sup>3</sup> / s, for the initial geometry of the channel (May 2006), and current in (22/05/2017) figure (06a,

b) and (07 a, b) it is an enhancement of the water line because of deposit sediment along the channel which causes the overflow of the channel in all the sections .the comparison of the longitudinal profile results for 12 simulated

and measured calculated sections (Figure 8,9) led to the calibration of our one-dimensional model (1D) to a Manning coefficient for the bottom and the banks,  $n = 0.028$ , representative of the roughness for the study area after tested initial value of  $n = 0.02$ , to better visualize the correlation between the observed values and the simulated values, and in order to know the effectiveness of the proposed model it is necessary to calculate

certain criteria called "performance criteria", a Good performance of a hydrological model should include at least two performance criteria. In our case study, two types of criteria were used: the correlation coefficient  $R^2 = 0.58$ , The Nash criterion = 0.67, and therefore the acceptable model results that are close to those observed with respect to the empirically calculated results.

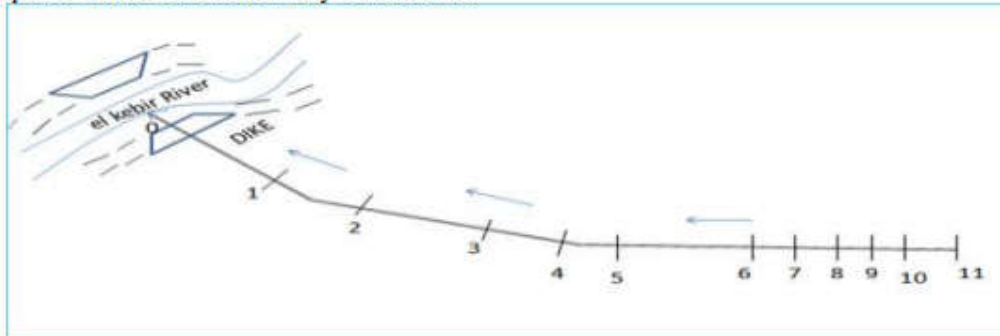


Figure 5. Plot of the profile of the channel through

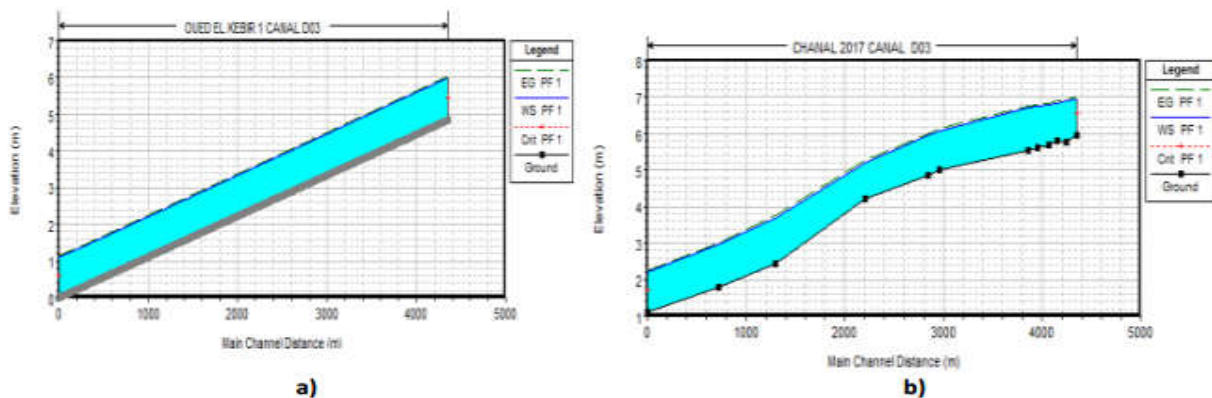


Figure 6. Profile along of the simulated water line initial geometry (05/2006) a) and after 11 years (22/05/2017) b)

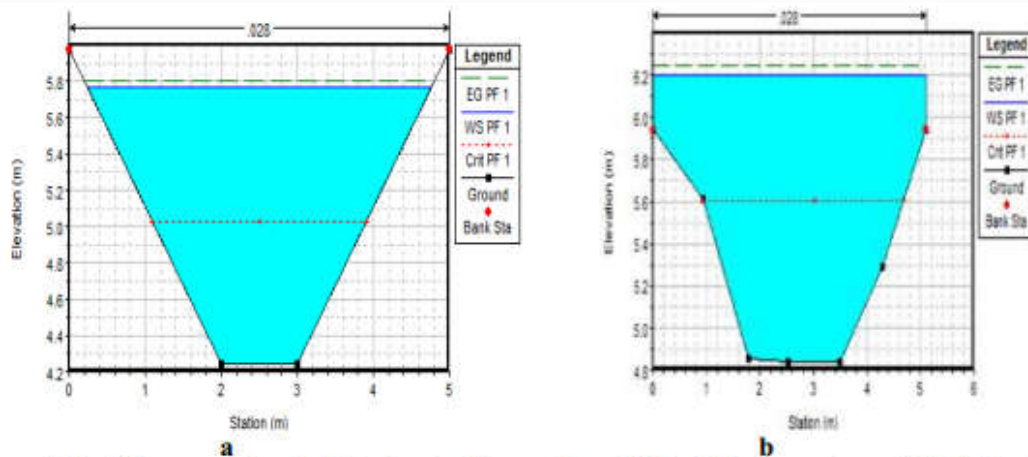


Figure 7. Profile across the simulated water line section 11 the initial geometry (05/2006) a) and after 11 years (22/05/2017) b).

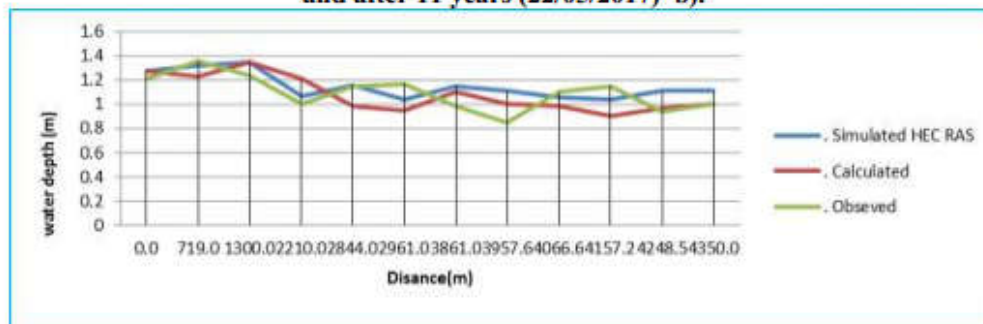


Figure 8. Comparison of the water level in the channel during the event of (22/05/2017) .

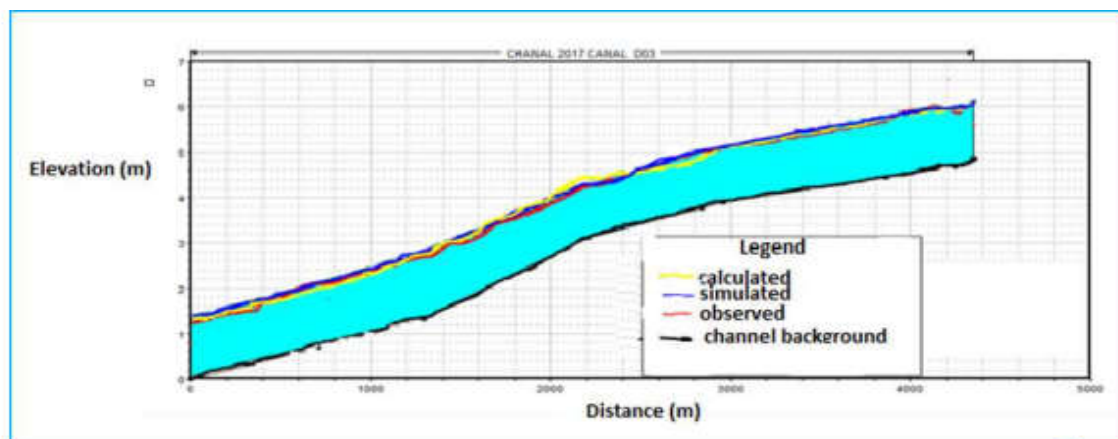


Figure 9. Longitudinal profile of comparison with the channel water line for  $Q=5.06\text{m}^3/\text{S}$ . In the second phase of sediment transport modeling, the results show the thickness of the deposit (hs), so solid flow greater than the capacity of transport(11). increasing progressively from upstream to downstream because of the existence of the flap valve figure10, at the level of rejection of the underpass (the outlet on El Kebir river), which favors the sedimentation braking and creates a loss on the one hand and the sediment size from the median diameter ( $d_{50}$ ) decreasing from upstream to downstream of the canal, a comparison of the results of morphological evolution at the bottom give acceptable results against the simulation results by HEC RAS software after 20 different combinations, with

sedimentation boundary conditions downstream are closer to the field real which allowed the model wedging with the combination of the *Engelund and Hansen* solid transport equation and the *Van Rijn* sedimentation velocity equation (1984) etched into the model after fitted the Manning roughness coefficient ( $n = 0.028$ ), the model was validated on the field control level calculated by the application of solid transport formulas and simulated by the HEC RAS version 4.0 (figure10,11 a, b) compared to the field real after the interpolation topographic surveys and control series on the seabed

(Figure 15). The sedimentation thickness calculation results ( $h_s$ ) obtained by the application of the solid transport formulas according to the range of validity, they present considerable errors. . Except that the results of the two total solid transport formulas), event which gives correlation performance criteria ( $R^2 = 0.91$ ) Nash = 0.95 for an error of 5cm in the sediment thickness ( $h_s$ ), finally one can quantify a cumulative sediment for 12 years of 16775.63 tons for a thickness average of 0.74 m occupies average rate of 33.66% of the section of the channel.



Figure 10. Discharge work under dike leads into El Kebir river canal D03 (photo Sennaoui . F 2016

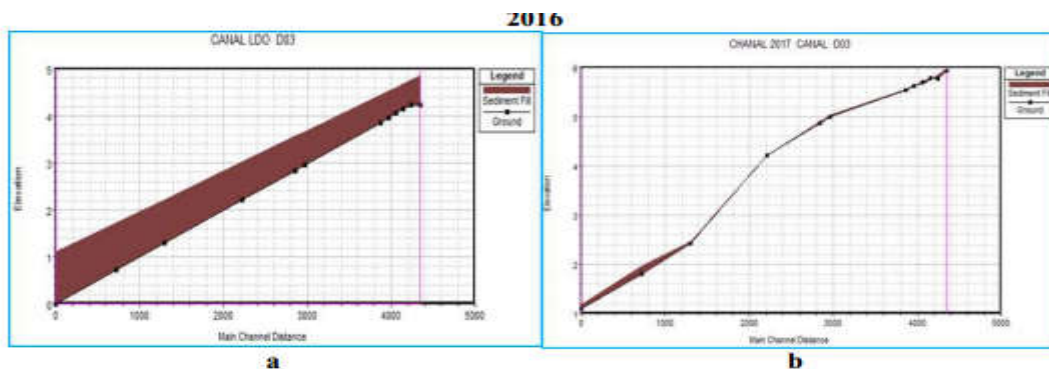


Figure 11. Simulated long sedimentation profile over 11years (05/2006) a) and period ( 22 /05/2017-20 /02/2018) b)

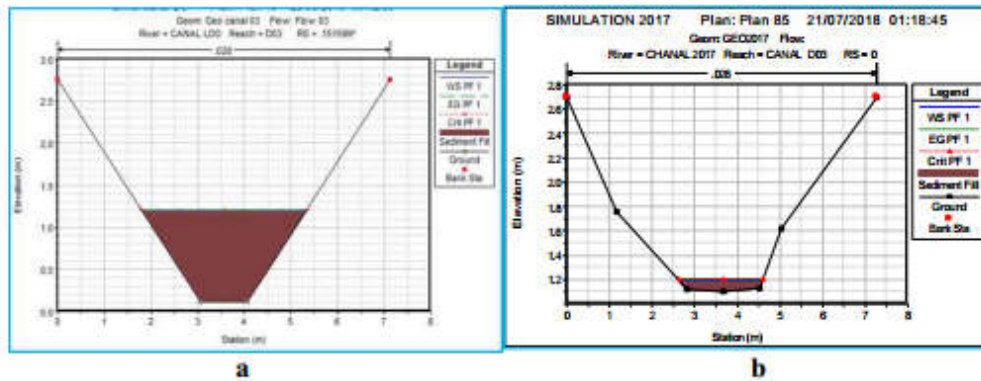


Figure 12. Simulated sedimentation cross section over 11 years (05/2006) a) and period ( 22 /05/2017-20 /02/2018) b)

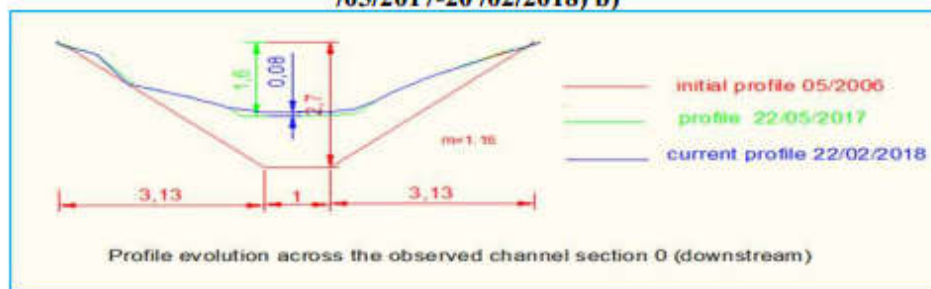


Figure 13. Evolution the profile across section the observed channel upstream section on control events

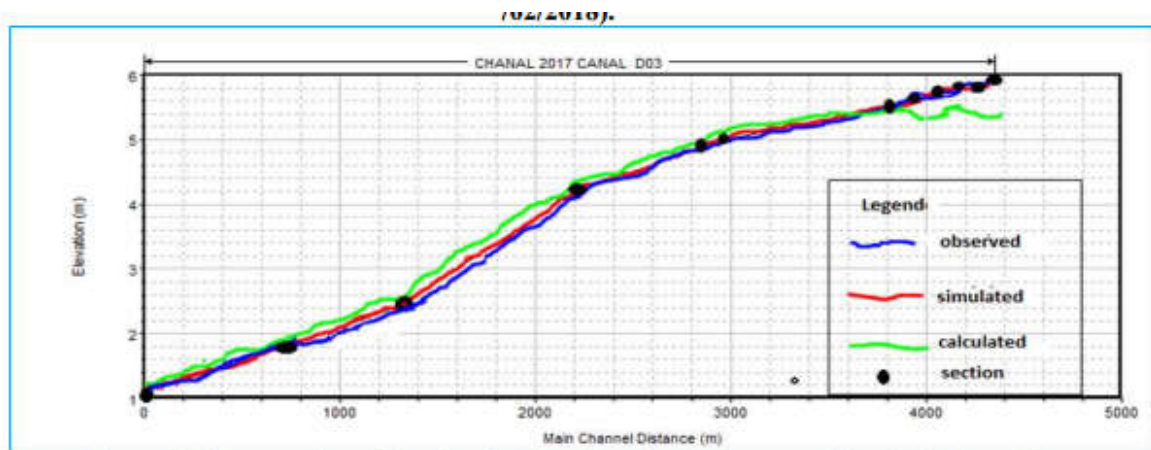


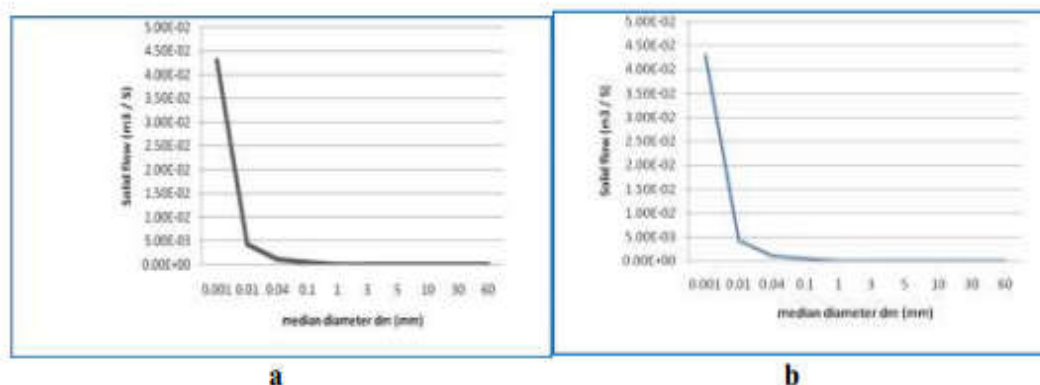
Figure 15. Comparison of longitudinal profile for the bottom of the final channel After adjusting the size of the grains in the bottom of the channel by noble materials (sand, gravel, to test the diminution of the sedimentary load, the results presented in Table 3 and the graph figure16 shows when we change the grains of the bottom by the

laying of coarse grains so the projected a layer of coarse gravel (30-60 mm) on the bottom of the channel allowed to avoid the sedimentary deposit on the downstream trench of the canal, it is the most important is to decrease the total sediment load along the canal from 1677.63

tons to 8.44 tons and offers several advantages such as: economic compared to the concreting of the channel, drained the soil of the bottom and bank in a regular way, the layer of coarse gravel plays role of alarm for arrived at the old bottom pendant the periodic cleaning.

**Table 3. results of solid flow tests according to sediment class**

Classification of sediments dm(mm)	QS (upstream) m3/s	QS (downstream ) m3/s
Fine Clay dm= 0.001	4.30E-02	1.29E-01
Fine silt dm=0.01	4.30E-03	1.29E-02
'Coarse silt dm=0.04	1.08E-03	3.20E-03
'Very fine sand dm=0.1	4.34E-04	1.28E-03
Very coarse sand dm=1	4.35E-05	1.29E-04
Very fine gravel dm =3	1.45E-05	4.30E-05
Fine gravel dm=5	8.70E-06	2.60E-05
Medium gravel dm=10	4.30E-06	1.30E-06
Coarse gravel dm=30	0.00E+00	4.00E-06
Very coarse gravel dm=60	0.00E+00	2.00E-06



**Figure 16. Graph variation of ( Qs) as function of (dm) upstream channel a) Downstream b) the observation period. Calibration of the models has also revealed that the changes in the geometry of the channel depend greatly on the size of the sediment, the hydraulic parameters, the roughness of the channel bottom, so the main key parameter that must be corrected and taken into account. the designer and the engineer at the beginning is the grain size at the bottom of the channel, so it must be projected a layer of coarse gravel especially in the downstream edge to avoid the sedimentary load and plays the role of an alarm for to reach the deep end and avoid arbitrary cleansing, and consequently the flooding of adjacent agricultural lands. For this purpose, it can be concluded that the modeling of solid transport is a means that can be used in the planning of the rehabilitation of the drainage channels of the plain. Surface drainage designs taking into account the economic side.**

## REFERENCES

1. A. Blanco-Vogt1 ,2015 . Assessment of the physico flood susceptibility of buildings on a large scale conceptuel and méthodologique Framework., Nat. Hazards Earth Syst ,Sci ,doi. : 10.5194/nhess-14.
- 2 . Achite Mohamed, 2004. estimate of solid transport in the watershed of River Haddad (North-West Algeria), Sécheresse , 15 (4) : 367-73.
- 3 . Alain Recking, 2006. Experimental study of the influence of trigranulometry on solid transport by channeling these ISAL 00113 PhD .
4. Brice Martin ,1998. Rehabilitation of an old drainage network as a means of fighting against the movement of land in Vars (Hautes Alpes-France) Alpine Geometry Review (86-1) pp59-65.
5. Boualem Remini,2015. Impact of sediment transport of the Chellif River on silting of the Bougezoul reservoir (Algeria) Journal of Water and Land Development PL .ISSN 1429–7426 Volume 24: Issue 1 .
6. Bergaoui Mohamed and Alberge IJean, 2000 . Anti-erosion effects in dry stones on the violence and the shape of the floods: the watershed of Wadi ZIOUD, TUNISIA. IRD scientists publications, 20, p. 23-38.
7. Bessenasse Mohamed, 2012. A contribution to the numerical modeling of dam reservoir siltation cycles, International Water Technology Journal, Vol. 2 – No. 3, p5 September.
8. Cherif El amine,2010. Experimental study of the deformations of the bed of a channel with a moving bottom: phenomenon of sedimentation and erosion Hydro complexity: New Tools for Solving Wicked Water Problems Kovacs Colloquium IAHS Publ 338.
9. Depeweg. Méndez .2006. Sediment transport applications in canal irrigation, Wiley online library Vol 51 Issue,2.
10. Gharbi Mohamed, 2016. National Polytechnic of Toulouse (INP Toulouse): Study of floods and associated sediment transport-application to the watershed of MEDJERDA-TUNIS. J Hydrol. Hydromech Doi10-1515, PP56-66.
11. Gérard Degoutte. 2012. Diagnostic, development of rivers 2nd edition, Lavoisier, Paris ISBN: 978-2-7430-1469-8.
12. HASBAIA Mahmoud. 2014. Effect of Solid Transport Laws and Friction in Hydraulic Modeling 1D Research gate, p 313 791703.
13. Husheng Lin ,.1993. Solid transport as a unitary sewerage collector and its modeling. The French National School of Roads and Bridges (1993)HAL Id tel 00520688 .
14. Laidia Zerkaoui . 2017. Adaptation of the irrigation system in the agricultural perimeters by modeling of the water tower, case of Habra (north-west Algeria) 2017. Agriculture and Forestry Journal Vol. 1, Issue 1, pp. 1-9, June, 15.
15. Ochiere H.o et Onyando J .O, 2015. simulation of sediment transport in underground canals by HEC RAS, South West Canal Kano, Irrigation Plan Kenya. International Journal of Engineering Science Invention Issue, 2319-6734 Vol4, pp. 15-31.
- 16 . Pierre-Olivier Malaterre et al, 2013. "The modernization of irrigation canals: contributions of Automation for Operational Management ", Science Water & Land ,2013/2 (Number 11), p. 44-47.
17. Pauline Leduc, 2013. Experimental study of the sedimentary dynamics of rivers in braids ,HAL Id: tel-01167872 .
18. Raphaël CERTAIN, 2008. Feasibility study by numerical modeling and sediment channel of relapse in MICROTIPAL medium a new method of fight against coastal erosion 021C DOL10.5150 Research gate p 237313131.
19. Sonal B.,Deshmukh ,2015. Simulation of canal flow, international multidisciplinary journal Issn 2277- 4262 VOL IV.
20. Study of the Hydro-Agricultural development of the plain of el Tarf. (. Association of Algerian ENYD and ENERGOPROJEKT Yugoslavia. Study Office).( 2004).
21. Stephanie Defosseze., 2009. Evaluation of flood risk management measures application to the case of the low plains of AUDE. Geography. Paul Valery University-Montpellier III, 2009. French. ,NNT: .MON30073.
22. Terafous Abdelali , hydrology of the Mediterranean and semlaried regions

## Annexe.6

DOI: 10.2478/jwld-2019-0001

© Polish Academy of Sciences (PAN), Committee on Agronomic Sciences  
 Section of Land Reclamation and Environmental Engineering in Agriculture, 2019  
 © Institute of Technology and Life Sciences (ITP), 2019

JOURNAL OF WATER AND LAND DEVELOPMENT  
 2019, No. 43 (X–XII): ??–??  
 PL ISSN 1429–7426, e-ISSN 2083–4535

Available (PDF): <http://www.itp.edu.pl/wydawnictwo/journal>; <http://www.degruyter.com/view/jjwld>; <http://journals.pan.pl/jwld>

Received 10.01.2019  
 Reviewed ??-??-2019  
 Accepted ??-??-2019

A – study design  
 B – data collection  
 C – statistical analysis  
 D – data interpretation  
 E – manuscript preparation  
 F – literature search

## Use of modelling for the renovation of drainage channels – The case of the Bouteldja plain in northeastern Algeria

Foued SENNAOUI<sup>1)A</sup>✉, Tamara BENABDESSELAM<sup>2)B</sup>, Abdallah SAIHIA<sup>3)C</sup>

<sup>1), 2)</sup>Badji Mokhtar University, Department of Hydraulics, BP 12, 23000 Annaba, Algeria; e-mail: sennaoui-foued@hotmail.com; [kondratievat@yahoo.fr](mailto:kondratievat@yahoo.fr)

<sup>1), 2), 3)</sup>Badji Mokhtar University, Faculty of Engineering Sciences, Soil and Hydraulic Laboratory, Annaba, Algeria

**For citation:** Sennaoui F., Benabdesselam T., Saihia A. 2019. Use of modelling for the renovation of drainage channels – The case of the Bouteldja plain in northeastern Algeria. Journal of Water and Land Development. No. 43(X–XII) p. ??–??. DOI: 10.2478/jwld-2019-0001.

### Abstract

Agricultural drainage has become a priority in agriculture and the economic development of the state. Algeria has been launched several agro-economic projects from natural resources and human potential for development in agricultural areas. Our aim is to model the morphological evolution of open drainage channels, under the influence of sedimentary transport processes. The application of the Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC RAS) software is to examine two-phase mathematical models. In our case it is the flow and the sedimentary charge along a trapezoidal earth channel of a wetland north east of Algeria. The results of these models were validated by actual data obtained during the observation period from 2017 to 2018, for various rainy events. The solid transport and sedimentation velocity equations of Engelund & Hansen and Van Rijn respectively used by this model, give Nash performance criteria equal to 0.95 and a correlation coefficient  $R^2$  equal to 0.91. On the other hand, the laying of a coarse gravel layer of median diameter of the grains  $d_{50\%} = 60$  mm on the bottom of the channels reduces the rate of sedimentation by about 32% over an 11-year period. This satisfying objective study of the modeling allows to obtain an approach to the renovation and a plan for new design of drainage systems, that participates to the sustainable development in the agricultural field.

**Key words:** channels, drainage, HEC RAS, modelling, sediment transport



Received 16.01.2019  
 Reviewed 03.04.2019  
 Accepted 08.05.2019

A – study design  
 B – data collection  
 C – statistical analysis  
 D – data interpretation  
 E – manuscript preparation  
 F – literature search

## Use of modelling for the renovation of drainage channels – The case of the Bouteldja plain in northeastern Algeria

Foued SENNAOUI<sup>1)A</sup><sup>✉</sup>, Tamara BENABDESSELAM<sup>2)B</sup>, Abdallah SAIHIA<sup>3)C</sup>

<sup>1),2)</sup> Badji Mokhtar University, Department of Hydraulics, BP 12, 23000 Annaba, Algeria; e-mail: [sennaoui-foued@hotmail.com](mailto:sennaoui-foued@hotmail.com); [kondratievat@yahoo.fr](mailto:kondratievat@yahoo.fr)

<sup>3)</sup> Badji Mokhtar University, Department of Planning, Annaba, Algeria; e-mail: [saihia\\_a@yahoo.fr](mailto:saihia_a@yahoo.fr)

<sup>1),2),3)</sup> Badji Mokhtar University, Faculty of Engineering Sciences, Soil and Hydraulic Laboratory, Annaba, Algeria

For citation: Sennaoui F., Benabdesselam T., Saihia A. 2019. Use of modelling for the renovation of drainage channels – The case of the Bouteldja plain in northeastern Algeria. *Journal of Water and Land Development*. No. 43 (X-XII) p. 1-8. DOI: 10.2478/jwld-2019-0057.

### Abstract

Agricultural drainage has become a priority in agriculture and the economic development of the state. Algeria has launched several agro-economic projects pertaining to natural resources and human potential for development in agricultural areas. Our aim is to model the morphological evolution of open drainage channels, under the influence of sedimentary transport processes. The application of the Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) software is to examine two-phase mathematical models. In our case it is the flow and the sedimentary charge along a trapezoidal earth channel of a wetland north east of Algeria. The results of these models were validated by actual data obtained during the observation period from 2017 to 2018, for various rainy events. The solid transport and sedimentation velocity equations of Englund and Hansen and Van Rijn respectively used by this model, give Nash performance criteria equal to 0.95 and determination coefficient  $R^2$  equal to 0.91. On the other hand, the laying of a coarse gravel layer of median diameter of the grains  $d_{50\%} = 60$  mm on the bottom of the channels reduces the rate of sedimentation by about 32% over an 11-year period. This satisfying objective study of the modelling allows to obtain an approach to the renovation and a plan for new design of drainage systems, that participates to the sustainable development in the agricultural field.

**Key words:** *channels, drainage, HEC-RAS, modelling, sediment transport*

sediment transport in rivers depend both on hydraulic parameters, the physical characteristics of watersheds and the properties of sediments [BRAUD *et al.* 2014]. Knowledge of these parameters is therefore essential in river hydraulics and hydraulic modelling, in particular for the various fluid mechanics models (Navier Stokes models, Saint Venant 2D and 1D models) which also describe the propagation of flows in rivers. Several models have been developed in the literature, such as empirical, conceptual and numerical models for the quantification of solid transport in rivers and channels [BAGNOLD 1966; GRAF, SUSZKA 1973; RENAAT *et al.* 2001; RODI 1984]. They are useful for modelling sediment transport and its effects on morphological changes in drainage channels in particular. The D 03 channel presented in (Fig. 1), which is part of the drainage system, was chosen as the subject of this study. The channel was built as part of the agricultural development of the plain in 2006 and transports drainage water into the Wadi El Kebir. The shape of its cross-section is trapezoidal and its length is 4350 m. The channel model has been developed and calibrated according to current operational conditions. The deformation of the bottom is then easier to determine because the eroded or deposited volume is directly related to the change in the elevation of the bottom [BESSENASSE 2010]. The work of DEPEWEG *et al.* [2014] shows that the amount of sediment deposited at the bottom of the irrigation channels decreases from upstream to downstream.

## MATERIALS AND METHODS

### STUDY AREA

The study area is an agricultural plain is located in the municipality of Bouteldja, located 12 km from the capital of the EL Tarfwilaya, which is part of the hydraulic system

of the El Kebir watershed CHAIB *et al.* [2011], extends over a longitude of 7°45' to 8°58' and a latitude of 36°20' to 36°45', this watershed is bounded by: to the North by the dune and the Mediterranean Sea, to the East by the Mexa dam and the Tunisian border, to the West by Annaba wilaya to the South by the Bounamoussa dam (Cheffia) and by the wilaya of Souk Ahras (Fig. 1). The plain covers an area of 10 572 ha and about 6 425 ha are agricultural land [FADEL *et al.* 2007].

Precipitation is characterized by heavy rains often showers in winter, which decrease almost regularly in the spring and reach a few millimetres a month in summer. The eastern part of the perimeter is a bit wetter (Ain El Assel 916.38 mm·y<sup>-1</sup>, Cheffia 803.63 mm·y<sup>-1</sup>) compared to the western part (Bird Lake 674.82 mm·y<sup>-1</sup>). And the average annual water flow elapsed is 182.04 mm.

The temperature over a period of 11 years (2005–2006) shows that the average annual temperature for the three stations reached 19.24°C, the month of February being the coldest, with a minimum temperature reached at 12.80°C, July and August temperatures exceed 25°C (data source ANRH: National Agency of Hydraulic Resources Constantine-Algeria. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques Constantine-Algeria).

### METHODS OF ESTIMATION PEAK FLOW

The first step in the flow modelling is the estimation of the peak flow ( $Q$ ). Two methods were used in our case. The rational method (1977) and the Crupedix method (1982), these empirical formulas (1) and (2).

Take into account three essential factors: the rainfall intensity or the maximum annual daily rainfall ( $P/10$ ), the catchment area ( $S$ ), the concentration time ( $t_c$ ). The results are presented in Table 1.

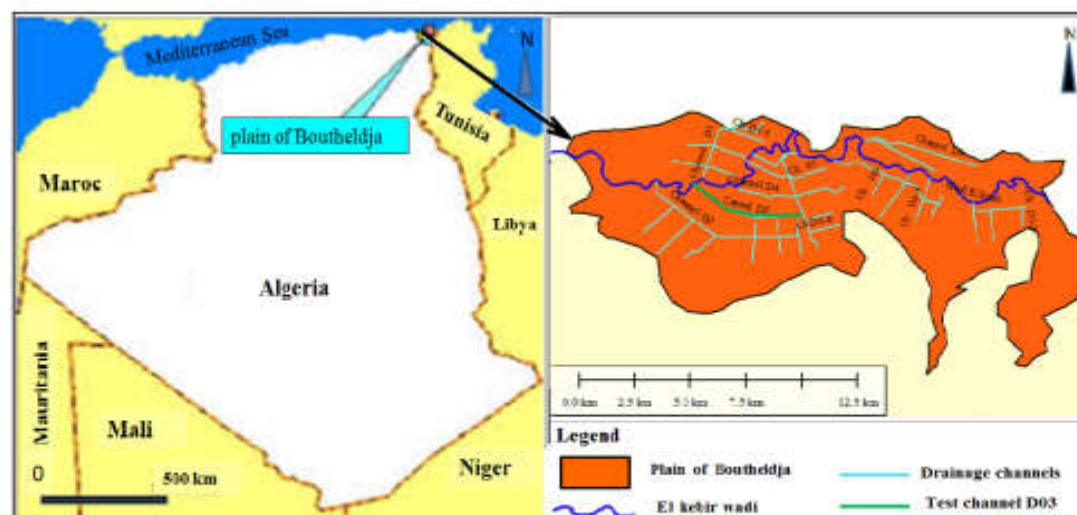


Fig. 1. Location of the study area on the left and drainage network on the right; source: own elaboration based on Global map & Google Earth

Table I. Calculation results peak flows

Sub-basins	S (ha)	Pj max 10 (mm)	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
			rational method	Crupedix method
SB01	127.70	97.40	1.19	1.79
SB01+SB02	212.34	97.40	1.98	3.08
SB01+SB02+SB03	348.00	97.40	3.24	4.97

Source: own study.

- The rational method

$$Q = CIS \quad (1)$$

Where:  $C$  = runoff coefficient we take 0.05 depending on the type of soil (plant);  $I$  = intensity of rain (mm·h<sup>-1</sup>), in our case  $I = 67.22$  mm·h<sup>-1</sup>.

- Crupedix method

$$Q = S^{0.8}(Pj10/80)^2R \quad (2)$$

Where:  $Q$  = maximum annual flow rate;  $S$  = catchment area in (km<sup>2</sup>);  $Pj10$  = maximum annual rainfall in decennial (mm);  $R$  = regional coefficient that we will take equal 1.

#### PROPRIETES PHYSICO MECHANICS OF SEDIMENT

The experimental phase carried out on sedimentation to classify the type of sedimentation of the bed, and the physical-mechanical parameters of the sediment along the canal in the the LTP Est laboratory (Eastern Public Works Laboratory Annaba-Algeria) and the Soil and Hydraulics Laboratory, Faculty of Engineering Sciences, University Annaba-Algeria). LTP Est (Laboratoire des Travaux Publics Est- Annaba- Algérie) et le Laboratoire Sol et Hydraulique (Faculté des Sciences Techniques Université Annaba – Algérie).

The results of the sedimentometric particle size analysis are presented in Figure 2 and tests of measurements of

the physico-mechanical properties of the materials along the channel lines such as the following: moist density:  $h = 1.92$  g·cm<sup>-3</sup>; specific mass:  $s = 2.653$  g·cm<sup>-3</sup>; dry density:  $d = 1.56$  g·cm<sup>-3</sup>; porosity:  $p = 0.28 = 28\%$ , the permeability:  $k = 2.77 \cdot 10^{-6}$  m·s<sup>-1</sup>. Canal bed sediments have a liquidity limit of  $WL = 54\%$  and a plasticity limit of  $WP = 27\%$ , hence an  $IP$  plasticity index of 27.23% indicates water sensitivity, according to the Casagrande plasticity diagram, the sediment belongs to the class of very plastic clays.

#### METHODS

The methodology of the study is presented in the (Fig. 3), in the form of an organization chart. According to the steps presented, the purpose of this study is to estimate the evolution of the bottom of the D03 canal during the 11-year period after construction between (2006–2017). The study was carried out on the basis of topographical data of the longitudinal and cross section profiles of the canal based on a survey plan prepared by the Algerian design office: ENHYD with Energoprojekt BET YUGOSLAVIE [Association... 2004] (data source ONID: Office National d'Irrigation et de Drainage El Tarf – Algeria).

#### MODELING FLOW AND SEDIMENT TRANSPORT

Many models have been developed to address the various problems encountered in nature, including simulation flow as TRAORE *et al.* [2015] and the transport of non-cohesive and cohesive sediments, influence of the laws of friction [HASBAIA 2014], channel widening and meandering, roughness, turbulence, presence of vegetation, etc. [GHARBI2016]. Sediment transport models are very diverse and always start with the resolution of the basic one-dimensional equations (1D) Saint-Venant (Eq. 3) for the liquid phase and the law of conservation of sediment mass and bed deformation by two-dimensional (2D) Exner equation (Eq. 6) for the solid phase:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = ql \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t} \left( \frac{Q^2}{S} \right) + gs \frac{\partial ne}{\partial x} - gs \frac{\partial hf}{\partial x} + gs J = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial x} + g \frac{\partial ne}{\partial x} - gs \frac{\partial hf}{\partial x} = g(I - J) \quad (5)$$

Where:  $I$  = the slope of the bottom and,  $J$  = the head loss given by the formula:  $J = \frac{Q^2}{K^2 S^2 R^4}$

$$(1 - p) \frac{\partial hf}{\partial t} + \frac{\partial Q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{sy}}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

Where:  $Q$  = the liquid flow,  $S$  = the cross section of the watercourse;  $ql$  = lateral flow,  $x$  = the abscissa, and  $t$  = the time;  $p$  = the porosity of sediment in the bed;  $hf$  = bottom side;  $\partial Q_{sx}, \partial Q_{sy}$  = variation of the solid flows in the  $x$  direction and in the  $y$  direction. To analyse the liquid flow with the solid flow, it is necessary to establish the calibration curves, using the Auto-Cad to graphically extract the wetted surface and wetted perimeter with iteration of water depth, we have retained the Manning–Strickler formula (Eq. 7).

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (7)$$

Where:  $U$  = the flow velocity,  $n$  = Manning roughness coefficient depends on the nature of the channel walls;  $1/n = k$  (Strickler coefficient),  $R$  = hydraulic radius,  $I$  = bottom slope.

On the other hand, to calculate solid transport there are several empirical formulas, but the difficulty lies first in choosing an appropriate formula from among the dozens of available formulas, each being constrained to conditions of use a priori strictly limited to those that prevailed during their validation.

The first parameter explored is thus the one concerning the field of application of the different transport formulas according to the mode of transport, bed load, suspension or total limited by the shear stress of the bottom (Shields parameter  $\star$ ) and sediment size ( $d_{50\phi}$ ), among the formulas: Smart and Jaeggi (1983), Schoklitsch (1962), Parker (1982), van Rijn (1984), Yong, Englund and Hansen (1967), Ackers and White (1973). RECKING [2010] give the solid transport in the form of a flow, to pass from the solid flow  $Q_s$  to the solid volume  $V_s$  the Equation (8) is used by DEGOUTTE [2012].

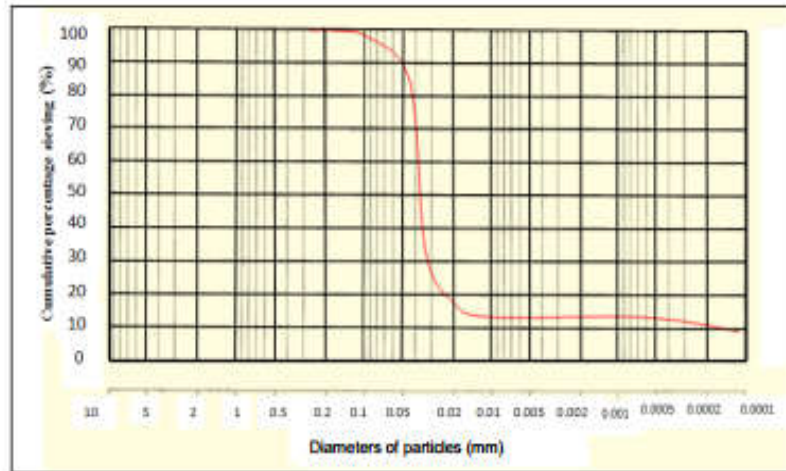


Fig. 2. Granulometric curve of bed soil of canals; source: own study

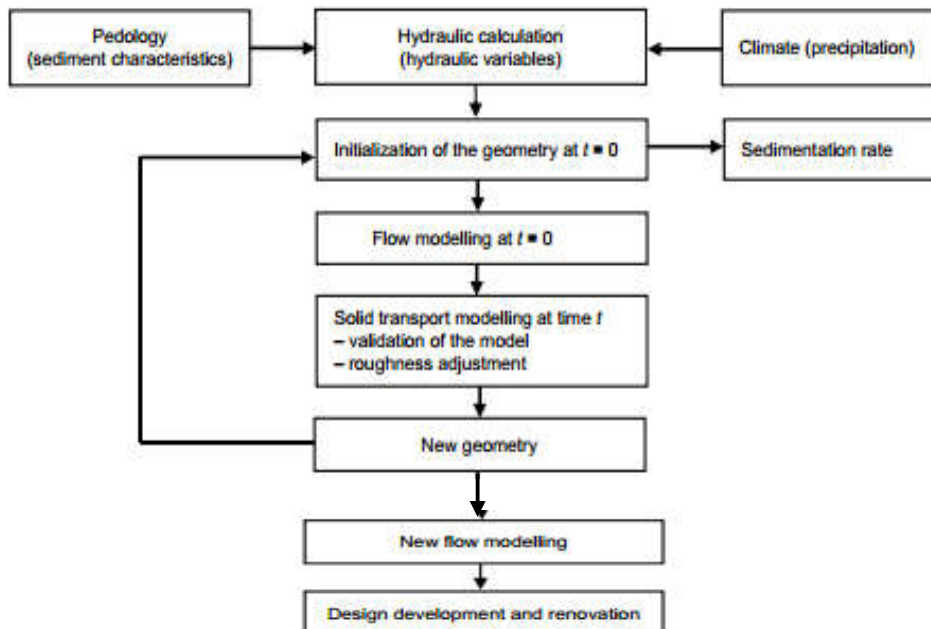


Fig. 3. Organization chart of the methodology; source: own elaboration

$$Vs = \sum Qs \Delta t \quad (8)$$

Where:  $\Delta t$  = the time interval.

We take  $\Delta t = 0.25h = 15$  min (generally taken for a 10-year return period in the Montana short duration rain calculation), and we take  $\Delta t = 90$  s for the observation period: from 22.05.2017 to 20.02.2018.

DEPEWEG and MENDEZ [2002] in a discreet way, he finds the change of the bottom during a time step  $\Delta t$  using the continuity equation for sediment transport:

$$hs = \frac{(Qs_{i+1} - Qs_i)}{(1-p)B\Delta x} \Delta t \quad (9)$$

Where:  $hs$  = sedimentation thickness (m);  $B$  = width bottom.

Interpolation of the two initial and current field topographic surveys, we compared the results obtained by empirical computation and simulation using the HEC-RAS model and calibrated its models to the data measured for the 2017 to 2018 year observation period on 12 sections at channel D03 (Fig. 4).

#### PRESENTATION OF MODELS

Presentation of the models HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centre – River Analysis System) it is software to model flows and sediment transport in rivers or canals. For solid transport, the HEC-RAS software allows to model both the load and the suspension. To do this, it proposes to define three functions: a transport function, the software proposes seven equations and a sediment bed evolution

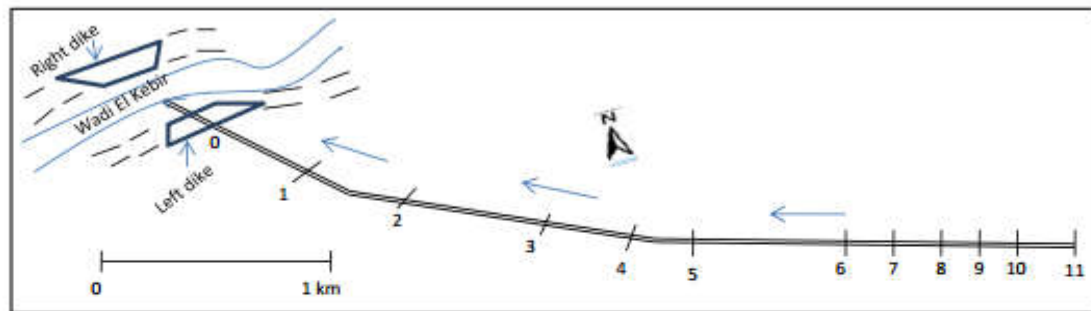


Fig. 4. Plan of the channel; source: own elaboration

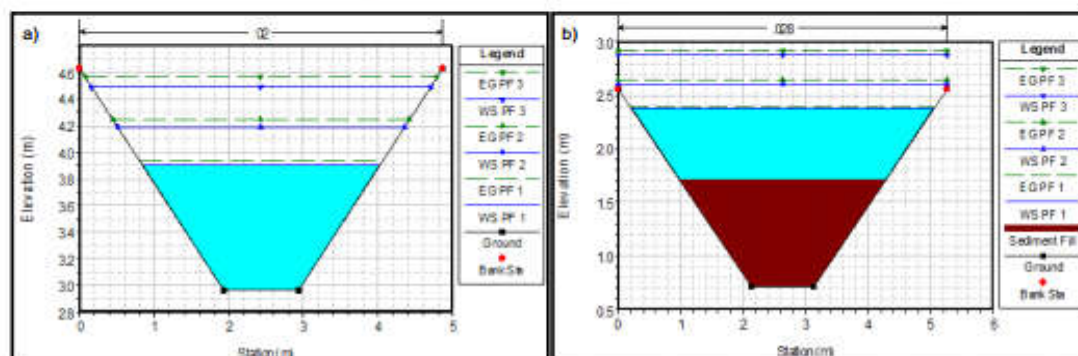


Fig. 5. Profiles cross section of channel after water line simulation: a) section 11 for initial geometry in 2006, b) section 1 for new geometry in 2017 (simulation by HEC-RAS 4.0)

function, this function determines the height of the sediment bed thanks to a mass balance applied to the sediments. Two models are proposed by the software: the Exner model and the so-called "Active Layer" model, so a sedimentation elaboration velocity function, the software proposes three equations, otherwise it sets the conditions at the limits. The equations that we used in our model (Exner), equation of Engelund and Hansen and the equation of Ackers and White for solid transport but for the sedimentation velocity the Van Rijn equation.

The absence of maintenance works in the canal since the realization in 2006 until today according to the services of (ONID El Tarf – Algeria), we leave to compare the results of simulation with the measurements on ground and stalled the model.

In the first phase, the flow simulation results from the HEC-RAS 4.0 software with three scenarios of the calculated flows ( $1.79, 3.08, 4.97$ )  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , for the initial channel geometry in: May 2006 and current in: 22.05.2017. Figure 5a, b shows an elevation of the water line due to sediment deposition along the channel that causes the canal to overflow in all sections. The comparison of the length profile results for 12 simulated and observed sections, calculated, leads us to calibrate our one-dimensional (1D) model to a Manning coefficient for bottom and banks,  $n = 0.028$ , representative of the roughness of the study area after initial value tested  $n = 0.02$ , in order to better the correlation

between the values measured on site and the simulated values, and to know the efficiency of the proposed model it is necessary to calculate certain criteria called "performance criteria", a good performance of a hydrological model should compare at least two performance criteria [GHARBI 2016].

In our case study, we used two types of criteria: the correlation coefficient  $R^2 = 0.58$ , the Nash criterion = 0.67, so that the acceptable results of the model can be close to those observed in relation to the empirically calculated results (Fig. 6).

In the second phase, the results of the sediment transport modelling show there is a sedimentary deposit along the canal, so the solid flow is greater than the transport capacity [DEGOUTTE 2012]. The sedimentary thickness ( $h_s$ ) gradually increasing by upstream to downstream due to the existence of the flap valve non-return (Photo 1) at the discharge level of the bused passage under the dike (outlet at Wadi El Kebir level) which promotes sedimentation braking and creates a head loss.

The work of DEPEWEG and MENDEZ [2002] shows that the amount of sediment deposited at the bottom of the irrigation channel decreases from upstream to downstream, inversely to our results in the drainage channel the sediment load gradually increases from upstream to downstream Figures 7 and 8. A comparison of the results of morphological evolution at the bottom gives acceptable

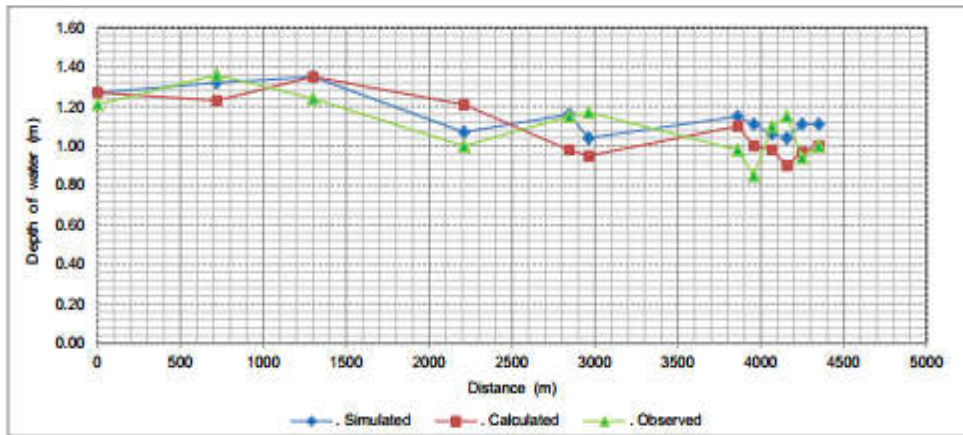


Fig. 6. Comparison of the water level in the D3 channel during the event of 22.05.2017; source: own study



Photo 1. Downstream rejection structure of the canal towards wadi El Kebir (phot. F. Sennaoui)

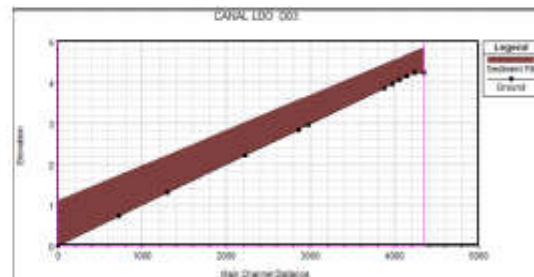


Fig. 7. Longitudinal sedimentation profiles simulated over the 11-year period (2006–2017); source: own study (simulation by HEC-RAS 4.0)

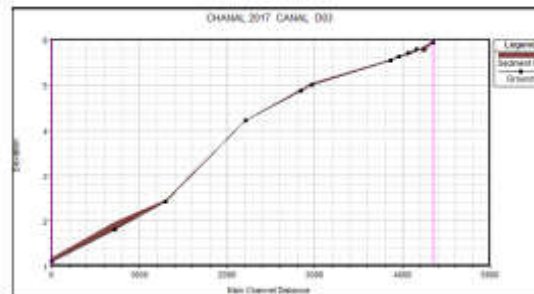


Fig. 8. Longitudinal sedimentation profiles simulated over the period (22.05.2017–20.02.2018); source: own study (simulation by HEC-RAS 4.0)

results compared to the simulation results of the HEC-RAS software, after 20 different combinations with downstream sedimentation boundary conditions are closer in the field, which allowed the model to be calibrated by combining the equation of Engelund and Hansen solid transport and the Van Rijn sedimentation velocity equation engraved in the model, after adjusting the Manning roughness coefficient ( $n = 0.028$ ). The model was validated on the field control event that gives performance criteria: correlation coefficient  $R^2 = 0.91$ ; Nash = 0.95 for an error of 5 cm of sediment thickness ( $hs$ ), finally we can quantify a cumulative sediment for 12 years of 16 775.63 Mg, for an average

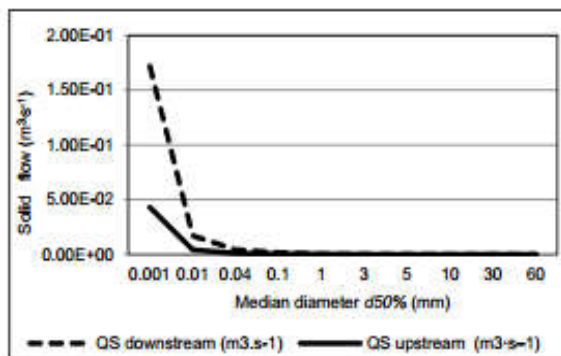
thickness of 0.74 m, that occupies an average rate of 33.66% of the channel section.

After adjusting the grain size in the channel bottom with noble materials (sand, gravel) to test the variation of the sediment load, the results presented in Table 2 and the graph of the (Fig. 9) grain size has a significant effect on sediment variation at the bottom of canals. So the projection of a layer of coarse gravel (30–60 mm) on the bottom of the canal avoids the sedimentary deposit on everything in the downstream section of the canal, and the most important is to decrease the total sediment load along the ca-

**Table 2.** Solid flow ( $Q_s$ ) results by sediment class

Classification of sediments	$d_{50\%}$ mm	$Q_s$ upstream	$Q_s$ downstream
		$m^3 \cdot s^{-1}$	
Fine clay	0.001	4.30E-02	1.29E-01
Fine silt	0.01	4.30E-03	1.29E-02
Coarse silt	0.04	1.08E-03	3.20E-03
Very fine sand	0.1	4.34E-04	1.28E-03
Very coarse sand	1	4.35E-05	1.29E-04
Very fine gravel	3	1.45E-05	4.30E-05
Fine gravel	5	8.70E-06	2.60E-05
Medium gravel	10	4.30E-06	1.30E-06
Coarse gravel	30	0.00E+00	4.00E-06
Very coarse gravel	60	0.00E+00	2.00E-06

Source: own study.

Fig. 9. Graph of variation of solid flows ( $Q_s$ ) as a function of upstream and downstream ( $d_{50\%}$  = median diameter of the grains); source: own study

nal from 16 775.63 Mg to 8.44 Mg and offers several advantages, including: economical compared to canal concreting, soil drainage from the bottom and the bank in a regular way, the layer of coarse gravel plays the role of alarm to reach the old bottom during the periodic cleaning.

## CONCLUSION AND RECOMMENDATION

In this modelling, the quantities of sediment transported in the drainage channel (D03) during rainfall events and their effects on bottom morphological changes were analysed, using the hydraulic and sediment software model HEC-RAS 4.0, the Engelund and Hansen solid transport equation and the Van Rijn sedimentation velocity equation engraved in the model, they give results that are closer to reality in the field than those of applying empirical formulas after calibration and validation of models with adjustment of the Manning roughness coefficient ( $n = 0.028$ ) over an observation period from 22.05.2017 to 20.02.2018, according to Nash performance criteria equal to 0.95 and  $R^2$  correlation equal to 0.91. The analysis showed that the sediment bottom in the soil drainage channels in our study area is assessed not only during major floods, but also during the current precipitation recorded during the observation period. The calibration of the models also revealed that changes in the geometry of the channel are highly dependent on sediment size, hydraulic parameters, channel bottom roughness, thus constituting the main key parameter to be corrected and taken into account by the designer

and engineer at the beginning is the grain size at the channel bottom, so we must provide a coarse gravel layer especially in the downstream section to avoid sediment loading and act as a warning to reach the initial bottom when cleaning and avoid arbitrary cleaning, which promotes flooding of adjacent agricultural lands. Finally, we can conclude that modelling the transport of solids after flow is a useful tool in planning the renovation of the drainage channels of the plain, taking into account the economic side.

## REFERENCES

- ACHITE M., MEDDI M. 2004. Assessment of sediment transport in the wadi Haddad watershed (North West Algeria). *Science et changements planétaires: Sécheresse*. Vol. 15 (4) p. 367–373.
- Association of ENYD Design Offices Algerian and ENER-GOPROJEKT Yugoslavia 2004. Study of Hydro Development – Agriculture of El Tarf Plain.
- BAGNOLD R.A. 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. Geological Survey Professional Paper. 422-I. Washington. United States Government Printing Office, pp. 37.
- BAK L., DĄBKOWSKI S.L. 2013. Spatial distribution of sediments in Suchedniów reservoir. *Journal of Water and Land Development*. No. 19 (VII–XII) p. 13–22.
- BESSENASSE M. 2010. Cycle modeling siltation of dam reservoirs. SAAD DAHLAB University Blida. Algeria (OPU2010). ISBN 978-9961-0-1326-7 pp. 273.
- BRAUD I., LABBAS M., BRANGER F. 2014. Développement et évaluation d'un modèle hydrologique distribué périurbain prenant en compte différents modes de gestion des eaux pluviales. Application au Bassin de l'Yzeron (150 km<sup>2</sup>) [Development and evaluation of distributed peri-urban hydrological model taking account different modes of rain water management, Application to the Yzeron basin (150 km<sup>2</sup>)]. Villeurbanne, France. JDHU p. 12–21.
- BRICE M. 1998. La réhabilitation d'un ancien réseau de drainage comme moyen de lutte contre les mouvements de terrain à Vars (Hautes-Alpes, France) [The rehabilitation of an old drainage network as a means of controlling the movement of land in Vars (Hautes-Alpes, France)]. *Alpine Geography Review*. Vol. 86, Iss. 1 p. 59–65.
- CERTAIN R., GRASSO F., SPIELMAN K., ASTRUC D., LARROUDE P., MICHALLET H., BARTHELEMY E., SABATIER F., BARUSSEAU J.-P. 2008. Etude de faisabilité par modélisation numérique et canal à sédiment de rechargements sédimentaires sableux d'avant-cote en milieu microtidal, une nouvelle méthode de lutte contre l'érosion côtière. En : Xèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil [Feasibility study by numerical modeling and sediment channel of recharging in microtidal environment, a new coastal erosion control method. In: X<sup>th</sup> National Days Coastal Engineering – Civil Engineering]. Eds D. Levacher, P. Gaufres. 14–16 octobre 2008 Sophia Antipolis p. 221–232. DOI 10.5150/fjngc.2008.021-C.
- CHAIB N., SAMRAOUI B. 2011. Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux de l'oued Kebir-Est et de ses principaux affluents (Nord-Est algérien) [Evaluation of the physico-chemical quality of the waters of the Kebir-East Wadi and its main tributaries (North-East Algeria)]. *Sécheresse*. Vol. 22 p. 171–177. DOI 10.1684/sec.2011.0309.
- DEGOUTTE G. 2012. Diagnostic, aménagement et gestion des rivières : Hydraulique et morphologie fluviales appliquées [Diagnostic, development and management of rivers: Hydraulics and river morphology applied]. 2<sup>nd</sup> ed. Paris. La-voisier. ISBN 978-2-7430-1469-8 pp. 542.

- DEPEWEG H., MÉNDEZ N. 2002. Sediment transport applications in irrigation canals. *Irrigation and Drainage*. Vol. 51 p. 167–179.
- DEPEWEG H., PAUDEL K.P., MÉNDEZ V.N. 2014. Sediment transport in irrigation canals a new approach. UNESCO-IHE, Lecture Note Series. CRC Press. ISBN 9781138026957 pp. 296.
- FADEL D., HOURIA B. 2007. Impact de la pollution organique sur la qualité des eaux superficielles dans le Nord-Est algérien [Impact of organic pollution on the quality of surface waters in northeastern Algeria]. *Secheresse*. Vol. 18. No. 1 p. 23–27. DOI 10.1684/sec.2007.0065.
- GHARBI M. 2016. Floods effects on rivers morphological changes application to the Medjerda River in Tunisia. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. Vol. 64. Iss. 1 p. 56–66. DOI 10.1515/johh-2016-0004.
- GRAF W., SUSZKA L. 1973. Sediment in steep channels. *Journal of Hydrosciences and Hydraulic Engineering*. Vol. 5. No. 1 p. 11–26.
- HASBAIA M. 2014. Effet des lois de transport solide et du frottement dans la modélisation hydraulique 1D [Effect of transport laws solid and friction in modeling hydraulic 1D] [online]. [Access 10.12.2018]. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/313791703\\_Effet\\_des\\_lois\\_de\\_transport\\_solide\\_et\\_du\\_frottement\\_dans\\_la\\_modelisation\\_hydraulique\\_1D](https://www.researchgate.net/publication/313791703_Effet_des_lois_de_transport_solide_et_du_frottement_dans_la_modelisation_hydraulique_1D)
- LIN H.S. 1993. Le transport solide en collecteur unitaire d'assainissement et sa modélisation [Solid transport in collector unit and its modeling]. PhD Thesis. Paris, France. École nationale des ponts et chaussées pp. 225.
- MALATERRE P.-O., DORCHIES D., BAUME J.-P. 2013. La modernisation des canaux d'irrigation : apports de l'automatisation pour la gestion opérationnelle [The modernization of irrigation canals: contributions of Automation for Operational Management]. *Sciences Eaux & Territoires*. No. 11 p. 44–47.
- MALAVOI J.R., GARNIER C.C., LONDON N., RECKING A., BARAN PH. 2011. Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière [Elements of knowledge for the management of the solid transport in rivers]. Vincennes, France. Onema. ISBN 295163935X pp. 216.
- OCHIERE H.O., ONYANDO J.O., KAMAU D.N. 2015. Simulation of sediment transport in the canal using the Hec-Ras (Hydrologic Engineering Centre – River Analysis System) in an underground canal in Southwest Kano Irrigation Scheme – Kenya. *International Journal of Engineering Science Invention*. Vol. 4. Iss. 9 p. 15–31.
- REMINE B., BENSAFIA D. 2015. Impact of sediment transport of the Chellif River on silting of the Bougezoul reservoir (Algeria). *Journal of Water and Land Development*. No. 24 (I–III) p. 35–40. DOI 10.1515/jwld-2015-0005.
- RENAAT R., VERHOEVEN R., KREIN A. 2001. Simulation of sediment transport during flood events: Laboratory work and field experiments. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 46. Iss. 4 p. 599–610.
- ROOT W. 1984. Turbulence models and their application in hydraulics: A state-of-the-art review. Balkema, Leiden. ISBN 9021270021 pp. 104.
- SMITH K.V.H. 1986. Regime approach to the design of drainage channels, hydraulic. In: *Design in water resources engineering: Land drainage*. Eds. K.V.H. Smith, D.W. Rycroft. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference, Southampton University, U.K. April 1986. Berlin Heidelberg. Springer-Verl. p. 305–314.
- SONG Y.H., YUN R., LEE E.H., LEE J.H. 2018. Predicting sedimentation in urban sewer conduits. *Water*. Vol. 10 (4), 462 p. 1–16. DOI 10.3390/w10040462.
- TERFOUS A., MEGNOUNIF A., BOUANANI A. 2001. Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord Ouest Algérien) [Study of the suspended load at the river Mouilah (North West Algeria)]. *Revue des Sciences de l'Eau*. No. 14 (2) p. 173–185.
- TRAORE V.B., SAMBOU S., SAMBOU H., DIAW A.T. 2015. Steady flow simulation in Anambe River basin using HEC-RAS. *International Journal of Development Research*. Vol. 5. Iss. 7 p. 4968–4979.
- US ACE 2008. HEC-RAS Version 4.1 [Hydraulic reference manual]. Davis, CA. Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers.
- WILLIAMSON T.N., DOBROWOLSKI E.G., MEYER S.M., FREY J.W., ALLRED B.J. 2019. Delineation of tile-drain networks using thermal and multispectral imagery – Implications for water quantity and quality differences from paired edge-of-field sites. *Journal of Soil and Water Conservation* pp. 11. DOI 10.2489/jswc.74.1.1.

Foued SENNAOUI, Tamara BENABDESSELAM, Abdallah SAIHIA

Wykorzystanie modelowania do renowacji kanałów odwadniających – przykład z równiny Bouteldja w północno-wschodniej Algierii

#### STRESZCZENIE

Drenowanie stało się priorytetem w rolnictwie i gospodarczym rozwoju kraju. W Algierii uruchomiono kilka programów rolniczych odnoszących się do zasobów naturalnych i potencjału rozwojowego obszarów wiejskich. Naszym celem było modelowanie zmian morfologicznych w otwartych kanałach drenażowych pod wpływem procesów transportu zawiesziny. W dwufazowym modelu matematycznym wykorzystano program HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System). Zmiennymi w modelu były przepływ i ładunek zawiesziny wzdłuż ziemnego kanału o trapezoidalnym przekroju w środowisku podmokłym północno-wschodniej Algierii. Wyniki modelu porównano z rzeczywistymi danymi opadowymi pozyskanymi w różnych okresach w latach 2017 i 2018. Równania Engelunda i Hansena (transport zawiesziny) i Van Rijna (tempo sedymentacji) użyte w modelu dały w wyniku kryterium Nasha równe 0,95 i współczynnik determinacji  $R^2$  równy 0,91. Warstwa grubego żwiru o medianie średnic ziaren  $d_{50\%} = 60$  mm na dnie kanału spowalniała tempo sedymentacji o ok. 32% w ciągu 11 lat. Przedstawione badania umożliwiają nowe podejście do renowacji istniejących i projektowania nowych systemów drenażowych, które przyczyniają się do zrównoważonego rozwoju rolnictwa.

**Słowa kluczowe:** drenowanie, kanały, modelowanie, program HEC-RAS, transport osadu

## Annexe.7

**LABORATOIRE : ENVIRONNEMENT SEDIMENTAIRE, RESSOURCES  
MINERALES ET HYDRIQUES DE L'ALGERIE ORIENTALE  
ET**

**LE DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS,  
UNIVERSITE DE LARBI TBESSA DE TEBESSA (ALGERIE)**



**Organisent**

**LE 4<sup>EME</sup> COLLOQUE INTERNATIONAL  
SUR**

**LES GEOSCIENCES AU SERVICE DU DEVELOPPEMENT DURABLE**

**21-22 novembre 2018 /TEBESSA**

**MODELISATION DU TRANSPORT SOLIDE DANS LES CANAUX DE DRAINAGE**

**CAS DE LA PLAINE BOUTELDJA SITUEE AU NORD-EST ALGERIEN.**

<sup>1</sup>Sennaoui Foued, <sup>2</sup>Benabdesslam Tamara, <sup>3</sup>Saihaia Abdallah

*Université : BADJI MOKHTAR ANNABA Laboratoire Hydraulique et sol,  
Faculté des sciences de l'ingénierat ANNABA , Email : sennaoui-foued@hotmail.com*

**Résumé :**

L'objectif de cette étude est de quantifier et d'estimer à moyen terme l'évolution morphologique des canaux de drainage à ciel ouvert en terre sous influence des processus de transport sédimentaire. La zone d'étude est constituée par des terres agricoles dans la plaine de Bouteldja de wilaya d'El Tarf au nord est d'Algérie. Cette zone a été aménagée en 2006 dans le cadre d'un projet hydro-agricole par la création de réseaux des canaux de drainage à ciel ouvert en terre mais jusqu'à présent subie la submersion des terres agricoles limitrophes. Les causes peuvent être i) l'absence d'entretien par le curage depuis la réalisation, ii) l'existence des zones males drainées. Pour modéliser le processus de transport sédimentaire dans les canaux de drainage les formules empiriques et modèles du logiciel HEC-RAS ont été utilisés. Ces modèles ont été calés sur les données réelles obtenues pendant la période d'observation de 2017 à 2018 pour les différents événements pluvieux. Les résultats de calage ont montrés que les modèles du logiciel HEC-RAS sont plus appropriés pour décrire le processus de transport sédimentaire dans les canaux de drainage avec le critère de Nash égal à 0.95 et le coefficient de corrélation  $R^2$  égal à 0.91 .

**Mots clés :** Modélisation, drainage, canaux, transport solide, HEC RAS .

**Keywords:** Modelization, drainage, canals, solid transport, HEC RAS.

## Annexe.8

---

 First International Conference on Dams. ICDBiskra-2018
 

---

## **Influence du déversement des barrages sur les inondations à l'aval : Cas du barrage Mexa (El Tarf, Nord Est algérien)**

F. Sennaoui, T. Benabdesselam, A. Saihia

*Laboratoire hydraulique et sol, Faculté des sciences de l'ingénierat, Université Badji Mokhtar, Annaba*

*sennaoui-foued@hotmail.com,*

**RESUME :** Les inondations sont devenues un véritable fléau ces dernières années. L'Algérie n'échappe pas à ces problèmes. Elles peuvent menacer nos vies et nos terres agricoles. D'un autre sens, la plaine d'El Tarf souffre de graves inondations notamment celles de 2003, 2009, 2012 et l'avenir reste incertain par les causes des déversements du barrage à l'aval du bassin versant de l'oued El Kébir. La zone de ce dernier a été aménagée en 2006 dans le cadre d'un projet hydro-agricole par un endiguement de part et d'autre sur 53 km environ, mais le problème n'a pas été encore résolu.

Les causes peuvent être dû à l'influence de la capacité du barrage MEXA pendant les crues, par conséquent l'envasement de ce dernier et des changements dans le lit d'oued à cause de la végétation par conséquent la vitesse d'écoulement d'une part et les dépôts de sédiments pour des quelques kilomètres en aval du barrage réduisent leur capacité d'écoulement d'autre part.

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence l'effet de ce genre de problème sur la base des données d'un apport moyen annuel de 316,57Hm<sup>3</sup> déversé, selon l'ANBT (période 2008-2013). Lors d'une simulation d'écoulement à partir d'un modèle numérique de terrain de la zone d'étude dans le cas du seul ruissèlement du réseau hydrographique du bassin versant, avec le logiciel HEC RAS, combiné au logiciel ARC GIS par extension HEC-GEO RAS, aucun signe d'inondation n'a été constaté. Par contre, la simulation d'écoulement avec un apport supplémentaire déversé par le barrage pendant les crues a montré un débordement conséquent au-delà des limites.

**Mots clés :** Barrage MEXA ; Oued El Kébir ; Inondation ; HEC RAS ; Déversement

### **1 INTRODUCTION**

L'eau peut être une aubaine comme elle peut être une source de problèmes, elle engendre des situations contradictoires, une fois des pénuries et une autre fois des inondations. Ainsi les zones inondables sont soumises à différents types d'inondation, dont les caractéristiques influencent le déroulement des crises et l'ampleur des impacts

## Annexe.9



SNE6-2019-UMMTO "6ème SEMINAIRE SUR L'EAU"



## Modélisation des canaux de drainage basée sur le temps de concentration d'écoulement: cas de la plaine Bouteldja (w.El Tarf, Algérie)

Sennaoui Foued<sup>(1)</sup>, Benabdesselam Tamara<sup>(2)</sup>, Saihia Abdallah<sup>(3)</sup>

<sup>1,2</sup> Département d'Hydraulique, Université Badji Mokhtar ANNABA- ALGERIA

<sup>3</sup> Département de l'Aménagement, Université Badji Mokhtar ANNABA- ALGERIA

<sup>1,2,3</sup> Laboratoire Sols et hydraulique, Faculté des sciences de l'ingénierie, Université Badji Mokhtar ANNABA- ALGERIA

<sup>1</sup>Email : sennaoui-foued@hotmail.com, <sup>2</sup>Email : kondratievat@yahoo.fr, <sup>3</sup>Email : saihia\_a@yahoo.fr

### Résumé :

La mise en valeur des terres agricoles par drainage, est l'un des plus importants plans dans l'agriculture. Pour cela elle est devenue une priorité absolue dans ce domaine, elle est liée directement au développement économique de l'état. Le drainage par canaux à ciel ouvert est un aménagement indispensable en pluviométrie importante, à terrain plat avec une faible perméabilité des sols. Cette recherche présente une analyse sur l'écoulement en relation avec l'adéquation des canaux de drainage. Une fois validée l'équation de temps de concentration de Mockus parmi d'autres à partir des données topographiques actuelles obtenues sur champs en 2018. Cela donne des critères de performance de Nash égal à 0.86 et le coefficient de corrélation  $R^2$  égale à 0.92. Nous comparons le temps de concentration observé pour tous les canaux de la zone d'étude avec une longueur totale de 29635m par rapport aux temps de concentration adéquats calculés en fonction des pentes critiques, utilisant les équations de Mockus. Les paramètres topographiques ont été déterminés aussi sur la base des photos satellitaires. À l'aide d'ARC GIS avec l'extension HEC Géo Ras, les résultats de cette modélisation montrent que le temps de concentration a un effet significatif sur l'écoulement et l'efficacité de drainage. Il permet de déterminer un calendrier de réhabilitation et un plan d'entretien des systèmes de drainage sans déplacement sur site. Ce la rentre dans le développement durable dans le domaine agricole.

**Mots clés:** Canaux de drainage, Temps de concentration d'écoulement, Équation Mockus, ARC GIS