

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

**Contribution a la conception et dimensionnement des canaux non revêtus .**

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0009-18

APA Citation ( APA توثيق ):

**Ounzain, Nesrine (2018). Contribution a la conception et dimensionnement des canaux non revêtus[Thèse de master, ENSH].**

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بنمّين الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مبداعات، مقالات، دوريات، كتب....) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE -ARBAOUI Abdellah-

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE URBAINE

## MEMOIRE DE MASTER

*Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique*

**Option: ASSAINISSEMENT**

**THEME :**

**CONTRIBUTION A LA CONCEPTION ET  
DIMENSIONNEMENT DES CANAUX NON REVETUS**

**Présenté Par :  
OUNZAIN NESRINE**

**Devant les membres du jury**

	<b>Nom et Prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
M <sup>r</sup>	B.SALAH	Professeur	Président
M <sup>me</sup>	W.MOKRANE	MAA	Examineur
M <sup>r</sup>	A.HACHEMI	MCB	Examineur
M <sup>me</sup>	L.TAFET	MAA	Examineur
M <sup>r</sup>	A.AMMARI	MCB	Promoteur

Session JUIN- 2018

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissance  
et de gratitude :*

*À mes très chers parents, qui ont cru en moi et pour tous  
les sacrifices et le soutien moral qu'ils m'ont apporté  
durant mon parcours ;*

*À mon très cher frère Kamel à qui je souhaite beaucoup  
de succès et de réussites ;*

*À ma très chère grand-mère pour son soutien ;*

*À tous mes oncles, tantes, cousins et cousines ainsi que  
toute ma famille ;*

*À tous mes amis qui m'ont aidé et soutenu tout au long  
de mon parcours ;*

*À toute ma promotion 2017.*

## *Remerciements*

*Je tiens à remercier et rendre grâce à DIEU le tout-puissant de m'avoir donné le courage et la volonté de terminer ce modeste travail.*

*Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé tout au long de mon travail, particulièrement à :*

*Mon encadreur M<sup>r</sup> A.AMMARI pour son aide et ses orientations judicieuses qui m'ont été infiniment utiles*

*M<sup>r</sup> W.DAMOU pour son aide précieuse et sa patience*

*Mes remerciements vont également :*

*À mes professeurs pour leur enseignement et leurs conseils*

*Aux membres du jury qui me feront l'honneur d'examiner mon travail*

*À tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## ملخص:

يعتبر حساب ابعاد القنوات الترابية مشكلا حقيقيا فيما يخص استقرار حواف وقاع القنوات و ذلك يرجع الى عدم ثبات الارضية و حركة قاع الوديان في الجزائر، و كذلك طبيعة الفيضانات التي تتسبب في تآكل قوي للأرضية.

يهدف العمل الحالي إلى تبسيط حساب أبعاد القنوات غير المصقولة (الترابية) من خلال اعداد برنامج حساب لتصميم القنوات في حالة الوديان الجزائرية و هذا يمثل تحديًا هندسيًا حقيقيًا.

**كلمات مفتاحية:** حساب أبعاد، استقرار، تآكل، الفيضانات

## Résumé :

Le dimensionnement des canaux en terre représente une réelle problématique surtout en ce qui concerne la stabilité des berges et du fond, sachant la forte mobilité des fonds des Oueds Algériens, ainsi que le caractère des crues qui sont des crues intenses provoquant une forte érosion et cela représente un réel défi d'ingénierie.

Le présent travail vise à simplifier le dimensionnement des canaux non revêtus par l'élaboration d'un programme de calcul pour la conception hydraulique des canaux non revêtus dans le cas des oueds algériens.

**Mots clés:** dimensionnement, stabilité, érosion, crue.

## Abstract:

The design of the uncovered canals represents a real problem, especially to the stability of the banks and the bottom. Knowing that the high mobility of the bottoms of the Algerian oueds, as well as intensive floods cause a strong erosion and represents a real engineering challenge. The present work aims to simplify the dimensioning of erodible canals by developing their hydraulic design program in the case of Algerian oueds study.

**Key words:** dimensioning, stability, erosion, flooding



## Table des matières :

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Recherche bibliographique</b>	
I.1. Notions d'Hydraulique fluviale .....	2
I.1.1. Vitesse d'écoulement .....	2
I.1.2. Poussée sur une paroi du canal .....	4
I.1.3. Frottement sur une paroi du canal.....	4
I.2. Erosion superficielle du massif.....	5
I.2.1. Taux d'érosion .....	5
I.2.2. Résistance à l'érosion à la surface du sol.....	6
I.3. Le risque d'érosion hydrique .....	7
I.4. Stabilité des canaux non revetus .....	7
I.4.1. Méthode de la vitesse admissible .....	8
I.4.2. Méthode de la force (ou contrainte) tractrice .....	9
I.5. Erosion et stabilité.....	13
I.6. Avantage des canaux non revetus .....	14
I.7. Mécanisme de l'affouillement.....	14
Conclusion :.....	14

## Chapitre II : Conception et modélisation

II.1. Description de l'application à réaliser .....	15
II.1.1. Caractéristiques du langage Python.....	15
II.1.2. Description schématique du programme de calcul « Calcanal ».....	17
II.2. Algorithme de calcul des dimensions d'un canal non revêtus .....	19
a- Méthode de la force tractrice.....	19
b- Méthode de la vitesse admissible .....	21
Conclusion.....	23

## Chapitre III: Application du cas réel

III.1. Descriptif du projet .....	24
III.1.1. Objectif du projet .....	24
III.1.2. Contexte du projet .....	24
III.1.3. Consistance du projet .....	24
III.1.4. Description du tronçon concerné par l'aménagement (tronçon 2) .....	25
III.1.5. Conception et principes directeurs de l'aménagement du tronçon 2.....	26
III.2. Variante retenue .....	26
III.2.1. Comparaison des méthodes de protection des berges.....	26
III.2.2. Variante retenue pour l'ouvrage de protection des berges .....	26
III.3. Application du cas réel à l'aide du programme « Calcanal» .....	27
III.3.1. Débit de la crue du projet.....	27
III.3.2. Coefficient de rugosité.....	28
III.4. Résultats et discussion.....	35
Conclusion.....	35
Conclusion générale.....	36
Références bibliographiques .....	37
Annexes .....	39



# Liste des Figures :

## Chapitre I : Recherche bibliographique

<b>Figure I.1 :</b> Vitesse de sédimentation et d'érosion, $V_D$ et $V_{cr}$ , pour des grains uniformes, selon Hjulstrom.....	2
<b>Figure I.2 :</b> Vitesse moyenne.....	3
<b>Figure I.3 :</b> Forces appliquées par l'eau sur les parois (l'une perpendiculaire, l'autre tangentielle) .....	4
<b>Figure I.4.</b> Erosion des berges par le cours d'eau d'une rivière (rivière rhône alpes Auvergne).....	7
<b>Figure I.5 :</b> La relation entre l'angle de repos $\psi$ , diamètre et la forme de la particule solide (USBR).....	10
<b>Figure I.6 :</b> Efforts tangentiel critique pour des matériaux non cohésifs (USBR).....	11
<b>Figure I.7:</b> Efforts tangentiel critique pour des matériaux cohésifs (USBR) .....	12
<b>Figure I.8</b> Couplage de l'érosion, de l'écoulement et de la stabilité de la berge.....	13

## Chapitre II : Conception et modélisation

<b>Figure II.1.</b> Fenêtre Sublime-text script python.....	16
<b>Figure II.2.</b> Fenêtre de l'invité de commandes.....	16
<b>Figure II.3.</b> Organigramme de calcul suivant la méthode de la force tractrice.....	17
<b>Figure II.4.</b> Organigramme de calcul suivant la méthode de la vitesse admissible .....	18

## Chapitre III : Application d'un cas réel

<b>Figure III.1</b> Localisation du tronçon du projet .....	25
<b>Figure III.2</b> Détermination de tronçon d'application par type de l'ouvrage de protection de berge.....	27
<b>Figure III.3.</b> Points d'évaluation des crues.....	28
<b>Figure III-4</b> Affichage de Calcanal« méthode de contrainte tractrice ».....	31
<b>Figure III.5.</b> Affichage du résultat final.....	31
<b>Figure III.6.</b> Affichage de Calcanal « méthode vitesse-adm ».....	34
<b>Figure III.7.</b> Affichage du résultat final.....	34



# Liste des Tableaux :

## Chapitre I : Recherche bibliographique

<b>Tableau I.1.</b> Ordre de grandeur des fruits des talus .....	8
<b>Tableau I.2.</b> Vitesse admissible d'écoulement .....	9
<b>Tableau I.3.</b> Revanches utilisées (Freeboard) .....	9

## Chapitre III : Application d'un cas réel

<b>Tableau III.1.</b> Tronçons d'application par type d'ouvrage de protection.....	26
<b>Tableau III.2.</b> Débit de crue du projet.....	27
<b>Tableau III.3.</b> Coefficient de rugosité de cours d'eau et canaux .....	29
<b>Tableau III.4.</b> Valeur appliqué pour le coefficient de rugosité.....	29
<b>Tableau III.5.</b> Valeur de la profondeur et la largeur du canal par la force tractrice...30	
<b>Tableau III.6.</b> Valeur de la profondeur et la largeur du canal par la vitesse admissible.....	32
<b>Tableau III.7.</b> Valeur du niveau de projet et de la largeur de l'oued.....	33



# **Introduction générale**

## Introduction Générale :

Les cours d'eau naturels sont des systèmes environnementaux assez complexes dans leur fonctionnement et leur développement, mais c'est des systèmes qui évoluent, accueillent une faune et une flore qui contribue à l'équilibre de l'écosystème. Ils sont si complexes que n'importe quelle intervention sur leurs caractéristiques peut engendrer des épisodes d'événements extrêmes si ces derniers ne sont pas bien étudiés. L'érosion et le dépôt sont des phénomènes naturels qui font parti de l'évolution fluviale, donc essayer d'éliminer un c'est de porter préjudice à l'équilibre Fluviale et de l'écosystème environnement.

Tout de même , maintenir un équilibre entre l'érosion et le dépôt est essentiel pour le bon fonctionnement de l'aménagement fluviale en terme hydraulique et écologique, de ce fait de nombreux auteurs ont traité de la question afin de trouver des méthodes fiables pour garantir une stabilité dynamique non statique des berges et des fonds des cours d'eau naturels, ces dernières sont utilisées dans la conception des canaux non revêtus qui présentes beaucoup d'avantages techniques, économique et environnementales par rapport aux autres types d'aménagements.

La conception des canaux non revêtus nécessite un calcul précis pour assurer la stabilité des canaux, suivant ce raisonnement nous voulons rapporter de nouvelles solutions par une simplification de calcul sur un programme « Calcanal », Ce dernier facilite le dimensionnement des canaux en terre, il reçoit les données de base caractérisant le canal et renvoie directement les résultats optimaux.

Dans cette optique, notre travail consiste à étudier les méthodes de calcul disponibles pour des canaux stable. Et les concrétiser dans un modèle de calcul simple à adopter afin d'assurer un programme de calcul dans le but d'utilisation pratique en ingénierie.



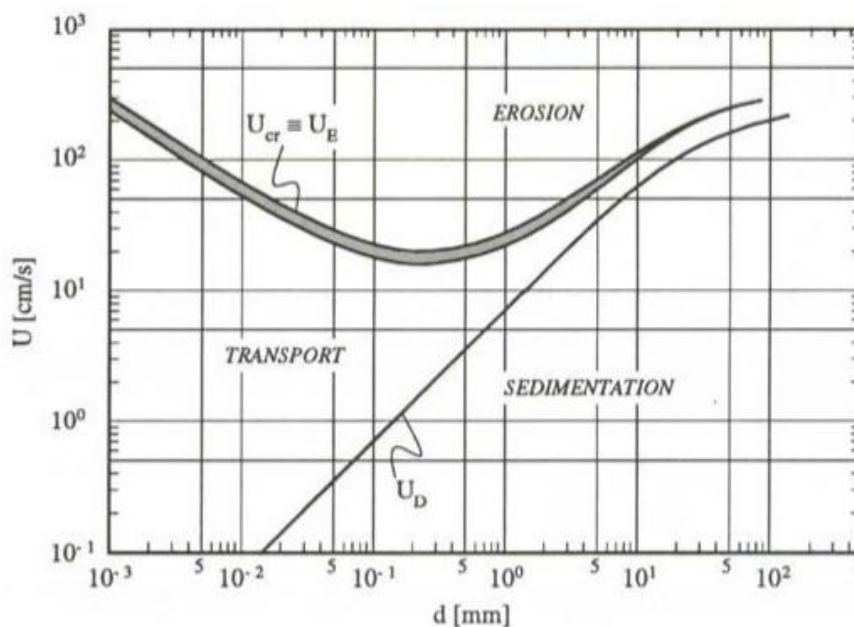
Le comportement de l'écoulement dans un canal érodable est influencé par des facteurs physiques et des conditions complexes alors la conception précise de ces canaux au stade actuel de la connaissance dépasse le domaine de la théorie. La formule de flux uniforme qui convient à la conception de canaux stables dépend principalement des propriétés du matériau formant le corps des canaux.

## I.1. Notions d'Hydraulique fluviale

L'hydraulique fluviale concerne les rivières et cours d'eau naturels, elle considère indépendamment la phase liquide et la phase solide, en tenant compte de l'évolution de la topographie due au transport solide.

### I.1.1. Vitesse d'écoulement

La vitesse moyenne joue évidemment un très grand rôle pour définir la puissance érosive d'un écoulement. L'écoulement de l'eau sur le sol exerce une action cisailante sur les grains de surface d'autant plus vive que la vitesse du courant est importante. Hjulsrom, 1935, a montré que la vitesse à partir de laquelle les grains du fond d'un canal étaient enlevés par l'écoulement dépendait de la dimension de ces grains. La Figure 1.1 représente la vitesse de sédimentation et d'érosion correspondant à des grains de diamètre uniforme selon Hjulsrom. (Graf, 2000).



**Figure I.1.** Vitesse de sédimentation et d'érosion,  $U_D$  et  $U_{cr}$ , pour des grains uniformes, selon Hjulsrom (Graf, 2000)



La vitesse critique est relativement élevée pour les très faibles dimensions de grains (plus de 1m/s pour des grains de 5  $\mu$  m) car la cohésion entre grains est alors très forte (argile). La vitesse minimum s'obtient pour une dimension de grains d'environ 0,2mm (pas de cohésion des sols) (**Pierre, 1986**).

Une fois arraché, le grain peut être transporté même avec des vitesses d'écoulement inférieures, à condition toutefois que ces vitesses ne deviennent pas inférieures à la vitesse limite pour la chute (sédimentation) des grains qui est, elle une fonction croissante de la dimension des grains.

La vitesse d'écoulement donnée par **Areas (2008)** pour le calcul du risque d'érosion linéaire est :

$$U_F < U_{cr} \quad (\text{I.1})$$

où  $U_F$  est la vitesse de l'écoulement près du fond et  $U_{cr}$  la vitesse critique.

Diverses approximations existent pour relier la vitesse du fond à la vitesse moyenne  $U$  :

$$U_F = 0.6U \quad (\text{I.2})$$

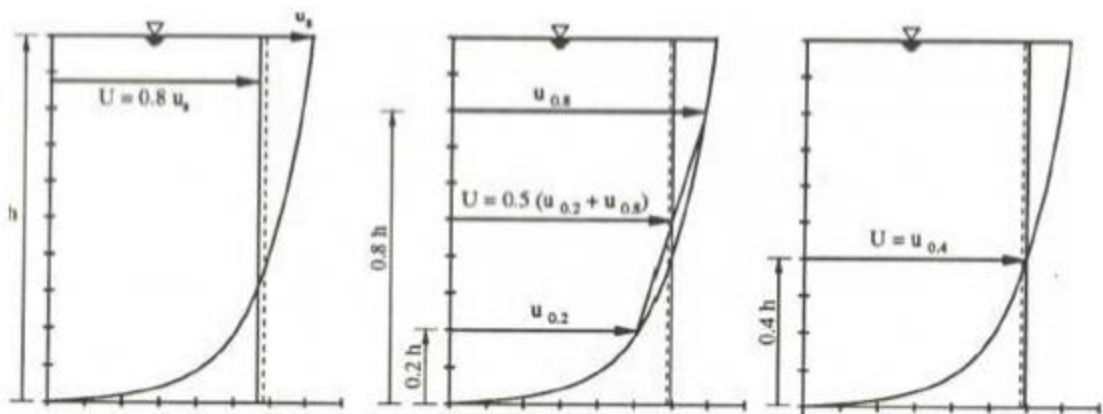
ou bien

$$1.3U_F < U < 1.5U_F \quad (\text{I.3})$$

Pour déterminer la vitesse moyenne ( $U$ ) dans une section, Graf (2000) donne les relations approchées suivantes (Figure I.2) :

- $U \cong 0.8$  à  $0.9 U_s$  (Formule de Prony)
- $U \cong 0.5 (U_{0.2} + U_{0.8})$  (Formule de l'USGS)
- $U \cong U_{0.4}$

où  $U_{0.2}$ ,  $U_{0.4}$ ,  $U_{0.8}$  sont les vitesses ponctuelles à différents niveaux et  $U_s$  la vitesse en surface.



**Figure I.2.** Vitesse moyenne (Graf, 2000)

La vitesse moyenne de l'écoulement par l'équation de Manning Strickler dans la formation technique de l'Areas (2008) est égale à :

$$U = K_{SM} \cdot R_h^{2/3} \cdot J_y^{1/2} \quad (I.4)$$

Où

$K_{SM}$  : est la constante de rugosité de Manning Strickler,

$R_h$  : est le rayon hydraulique (m),

$j_y$  : est la pente locale du fond.

### I.1.2. Poussée sur une paroi du canal

L'eau exerce une poussée égale à celle qui existerait si l'eau était au repos. Sur un élément de section  $ds$ , la poussée est :

$$dP = p \cdot ds \quad (I.5)$$

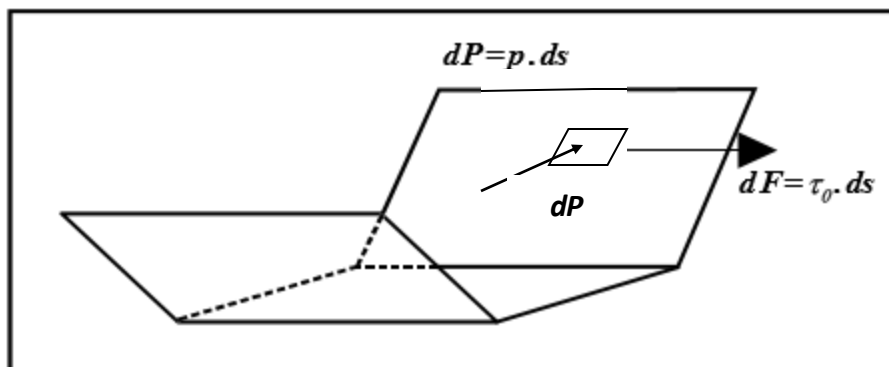
Avec :  $p = \gamma_w \cdot y$

### I.1.3. Frottement sur une paroi du canal

L'eau étant en mouvement, exerce aussi sur les parois du chenal une force de frottement habituellement notée :

$$dF = \tau_0 \cdot ds \quad (I.6)$$

$\tau_0$  : est la force de frottement par unité de surface ou contrainte tangentielle à la paroi. (degoutte, 2006)



**Figure I.3.** Forces appliquées par l'eau sur les parois (l'une **perpendiculaire**, l'autre **tangentielle**) (Degoutte, 2006)

## I.2 Erosion Hydrique

### I.2.1. Taux d'érosion

Trois cas sont distingués dans le phénomène de l'érosion fluviale : érosion sur le lit horizontal, érosion sur les berges inclinées, et érosion interne du sol par infiltration. Sur le lit horizontal, le seuil de mise en mouvement des grains dépend à la fois du nombre de Reynolds, de la vitesse d'écoulement et de la rugosité du lit ; il est renforcé par le poids des grains. Sur les berges du fleuve, les forces principales en jeu sont la force de gravité, la force d'écoulement d'eau le long des berges (**Delphine, 2005**), la force dans le massif, les effets de la marée (**Rezzoug et al. 1994**), et l'action des vagues.

En général, le taux d'érosion volumique  $\dot{E}$  [m/s] est calculé en fonction de la résistance de cisaillement critique de la surface érodée comme suit (**Partheniades 1965; Simon et al., 2006 et 2010 ; Darby et al., 2007 ; Rinaldi et al., 2008 ; Pham, 2008**) :

$$\dot{E} = K_c (\tau_0 - \tau_c) \quad (\text{I.7})$$

où  $K_c$  : est le coefficient d'érodabilité en [ $\text{m}^3\text{N}^{-1}\text{s}^{-1}$ ],

$\tau_0$  : est la contrainte de cisaillement appliquée [ $\text{N m}^{-2}$ ],

$\tau_c$  : est la résistance de cisaillement critique [ $\text{N m}^{-2}$ ].

Différentes hypothèses sur la direction d'érosion de la berge ont été étudiées.

L'érosion est perpendiculaire à la surface érodée selon Simon et al. (2006, 2010) ; alors qu'elle est horizontale selon Rinaldi et al. (2008).

L'expression de la profondeur de l'érosion  $E$  pendant une durée  $\Delta t$  s'écrit :

$$E = \dot{E} \cdot \Delta t \quad (\text{I.8})$$

La valeur de  $K_c$  peut être estimée en fonction de  $\tau_c$  (**Simon et al., 2010**) :

$$K_c = 1.62 \cdot \tau_c^{-0.838} \quad (\text{I.9})$$

Le taux d'érosion dépend de plusieurs paramètres tels que les particules fines du sol, la teneur en argile, la plasticité, la granulométrie, le compactage du sol (densité et degré de saturation) et la minéralogie des argiles. L'indice de taux d'érosion  $I$  indépendant de  $\tau_c$  dont les valeurs mesurées sont comprises entre 0 et 6 d'autant plus faible que le sol est érodable, selon **Wan et Fell (2004)**.

### I.2.2. Résistance à l'érosion à la surface du sol

Nascimento (1981) a exprimé le mécanisme de l'érosion à la surface du sol en termes de mécanique des sols. Il écrit que la résistance au cisaillement moyenne  $\tau$  du sol superficiel est celle qui se développe sur la face inférieure de la couche mono-granulaire de sol qui subit les premières attaques de l'érosion et dont l'épaisseur est égale à :  $d = h \cdot \cos \beta$ , où  $\beta$  est l'angle de la surface du sol avec l'horizontale, et  $h$  est la longueur de segment de verticale traversant la couche mono-granulaire. D'après la relation de Mohr-Coulomb :

$$\bar{\tau} = c + \sigma \tan \phi \quad (\text{I.10})$$

où  $c$  est la cohésion,  $\phi$  est l'angle de frottement interne et  $\sigma$  la contrainte normale donnée par l'expression :

$$\sigma = \gamma' h \cos^2 \beta \quad (\text{I.11})$$

où  $\gamma'$  est le poids volumique déjaugé de la couche superficielle.

D'autre part, **Shields en 1936 (cf. Buffington 1999)** définit la contrainte critique de cisaillement de matériaux non cohésifs en fonction de la rugosité du lit et de la taille des particules :

$$\tau_c = \tau^* (\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot D \quad (\text{I.12})$$

où  $\tau^*$  est un coefficient adimensionnel,

$\rho_s$  : la masse volumique du grain solide,

$\rho_w$  : la masse volumique de l'eau,

$g$  : l'accélération de gravité,

$D$  : le diamètre des particules.

**Simon et Pollen (2006)** ont utilisé une valeur de 0.06 pour  $\tau^*$ , tandis que d'autres valeurs couramment utilisées de  $\tau^*$  sont comprises entre 0.03 et 0.047 (**Vanoni et Brookes, 1957**).

### I.3. Le risque d'érosion hydrique des sols

L'érosion hydrique des sols dépend en fait de nombreux facteurs climatiques, pédologiques et anthropiques de l'érosion. Les risques climatiques sont en relation avec la pluviosité, mais dépendent de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes, la détermination des risques pédologiques de l'érosion est difficile. L'appréciation de l'érodabilité peut se faire à partir de la considération de texture, de plasticité, de la teneur en matières organique, d'agrégation et de structure des sols. Les risques anthropiques de l'érosion sont en relation étroite avec l'évolution démographique et l'état de développement économique des sociétés.

Toute instabilité conduit en fait à des problèmes d'érosion, y compris dans le domaine urbain et celui des infrastructures. Une bonne adaptation et un bon entretien des aménagements fonciers sont indispensables pour leur pérennité. On assiste, enfin à une évolution rapide des techniques agricoles : la mécanisation, la transformation des assolements. Les incendies de forêt, le surpâturage, la baisse des matières organiques ; le lessivage des engrais, aggravent aujourd'hui les risques d'érosion. ( **Henensal. P, 1987**)



**Figure I.4.** Erosion des berges par le cours d'eau d'une rivière (rivière rhône alpes Auvergne)

### I.4. Stabilité des canaux non revêtus

Si le fond du chenal ou les berges sont érodables, le dimensionnement nécessite que la largeur, la profondeur et la pente du fond soient choisies de telle sorte à garantir une stabilité des grains.

Deux méthodes sont généralement utilisées :

La vitesse admissible et la force ou contrainte tractrice.

### I.4.1. Méthode de La vitesse Admissible

Dans cette méthode ; le dimensionnement du canal est fait de telle sorte à ce que la vitesse d'écoulement sous les conditions d'écoulement uniformes soit inférieure à la vitesse admissible. Cette dernière est définie comme étant la vitesse au dessous de laquelle le fond et les berges du chenal sont considérées comme stables. Cette vitesse dépend principalement du type de sol et des dimensions des grains, et aussi de la profondeur de l'écoulement et de la sinuosité du chenal.

En générale des sections trapézoïdales sont utilisées pour les chenaux érodables. Pour le dimensionnement il faut choisir tout d'abord un fruit adéquat.

Le tableau suivant donne un ordre de grandeur des fruits des talus utilisés :

**Tableau I.1.** Ordre de grandeur des fruits des talus

Matériaux	Fruit des talus
Roche	Presque vertical
Roche fissurée, maçonnerie sèche	1/2
Argile	1/2 à 1/1
Sol Ferme, alluvions compactes	1/1
Gros cailloux	3/2
Sol sableux lâche	2/1
Sol Sableux limoneux, terre ramaniée	3/1

(USBR)

La vitesse moyenne admissible pour divers sols sont résumé dans le tableau suivant, ces valeurs sont relatives a un cour d'eau droit sans sinuosité avec une profondeur moyenne de 1m. **Lane [1955]** a suggérer de réduire ces valeurs de 5% pour les cours d'eau faiblement sinueux, 13% pour les chenaux modérément sinueux et de 22% pour ceux très sinueux. Pour les profondeurs différentes de 1m , les vitesses sont multipliées par un coefficient de correction k.

$$K = y^{1/6} \quad (\text{I.13})$$

y : est la profondeur de l'écoulement en mètre.

**Tableau I.2.** Vitesse admissible d'écoulement

Matériaux	V (m/s)
Sable fin	0.6
Sable grossier	1.2
Sol Sablo limoneux	0.6
Sol Sablo argileux	1.1
Argile	1.8
Sablo limoneux végétalisé (pente < 5%)	1.8
Argilo limoneux végétalisé (pente <5%)	2.4
Grés tendre	2.4
Schist douce	1.1
Roche dure	6.1

(US Corps of Engineers, 1970)

On préfère toujours ajouter une revanche aux tirants d'eau. On propose les valeurs suivantes :

**Tableau I.3.** Revanches utilisées (Freeboard)

Débit (m <sup>3</sup> /s)	<0.75	0.75 à 1.5	1.5 à 85	>85
Revanche (m)	0.45	0.60	0.75	0.9

(Chaudry.2008)

En résumé ; les étapes de dimensionnement d'un canal non revêtu par la méthode de la vitesse admissible sont les suivants :

- 1- Pour un matériau donné, choisir une valeur du coefficient de Manning, fruit des talus et vitesses admissible.
- 2- Déterminer les dimensions du canal.
- 3- Ajouter une valeur convenable de la revanche. (Hanif Chaudhry, 2008),

#### I.4.2. Méthode de la force (ou contrainte) tractrice

Comparativement avec la méthode précédente, l'utilisation de la contrainte tractrice semble la plus adaptée, vue que le mouvement des grains est tributaire de la contrainte tractrice et non pas de la vitesse moyenne de l'écoulement, celle si est considérée car il est très difficile de calculer ou de mesurer la vitesse au fond.

la contrainte tractrice peut s'écrire :

$$\tau_0 = \gamma_w R i \quad (\text{I.14})$$

R : est le rayon hydraulique, et i : la pente du fond.

Pour des canaux larges  $R \approx y$ .

Pour la contrainte au niveau des berges, la contrainte peut s'écrire :

$$\tau_{0\text{berge}} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \varphi}} \gamma_w Ri \tag{I.15}$$

Tel que :

$$K = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \varphi}} \tag{I.16}$$

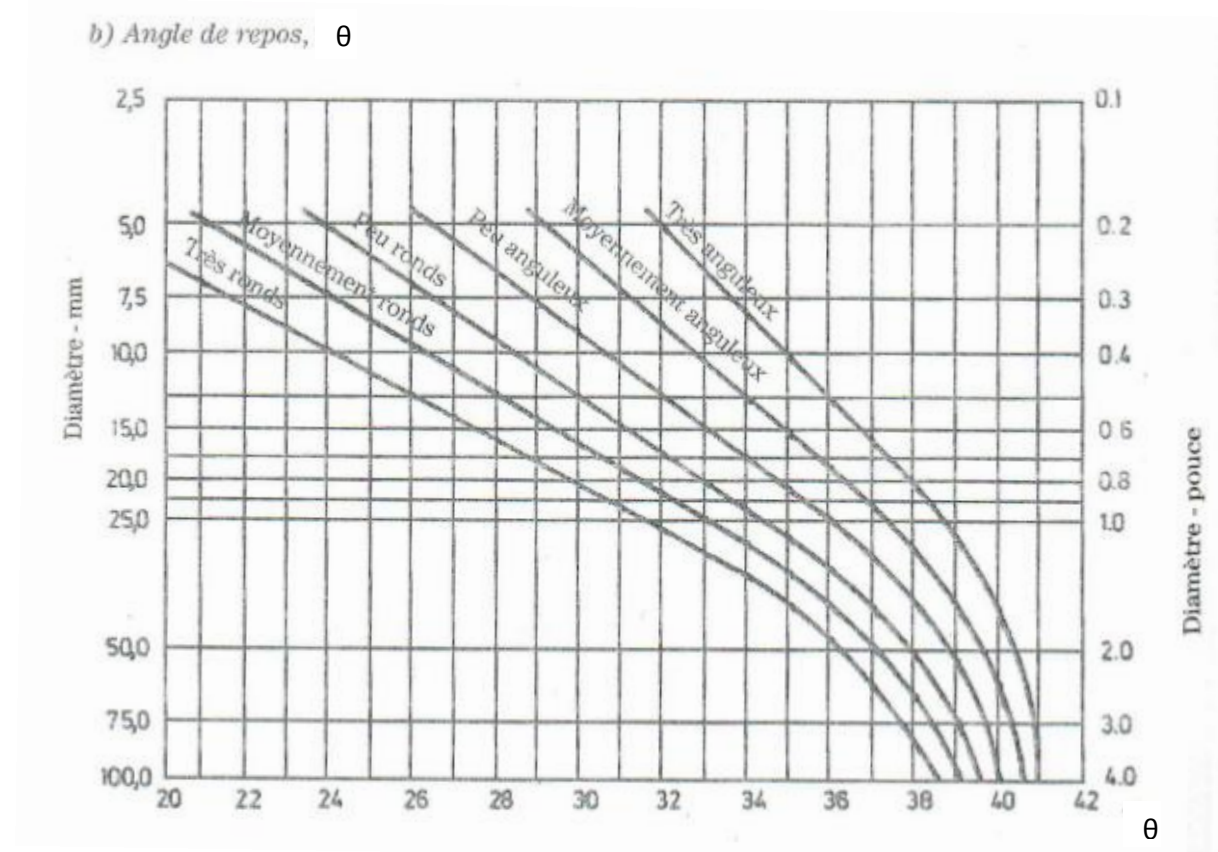
K : le facteur de réduction de la contrainte sur les berges.

$\theta$  : l'angle de repos

$\varphi$  : l'angle de frottement entre la particule et le sol

L'effet de l'angle de repos est considéré seulement pour le cas des particules grossières

La figure I.5 illustre la relation entre l'angle de repos  $\psi$ , diamètre et la forme de la particule solide (USBR)



**Figure I.5.** La relation entre l'angle de repos  $\theta$ , diamètre et la forme de la particule solide (USBR).



La figure I.6 Montre l'effort tangentiel critique pour des matériaux non cohésifs (USBR).

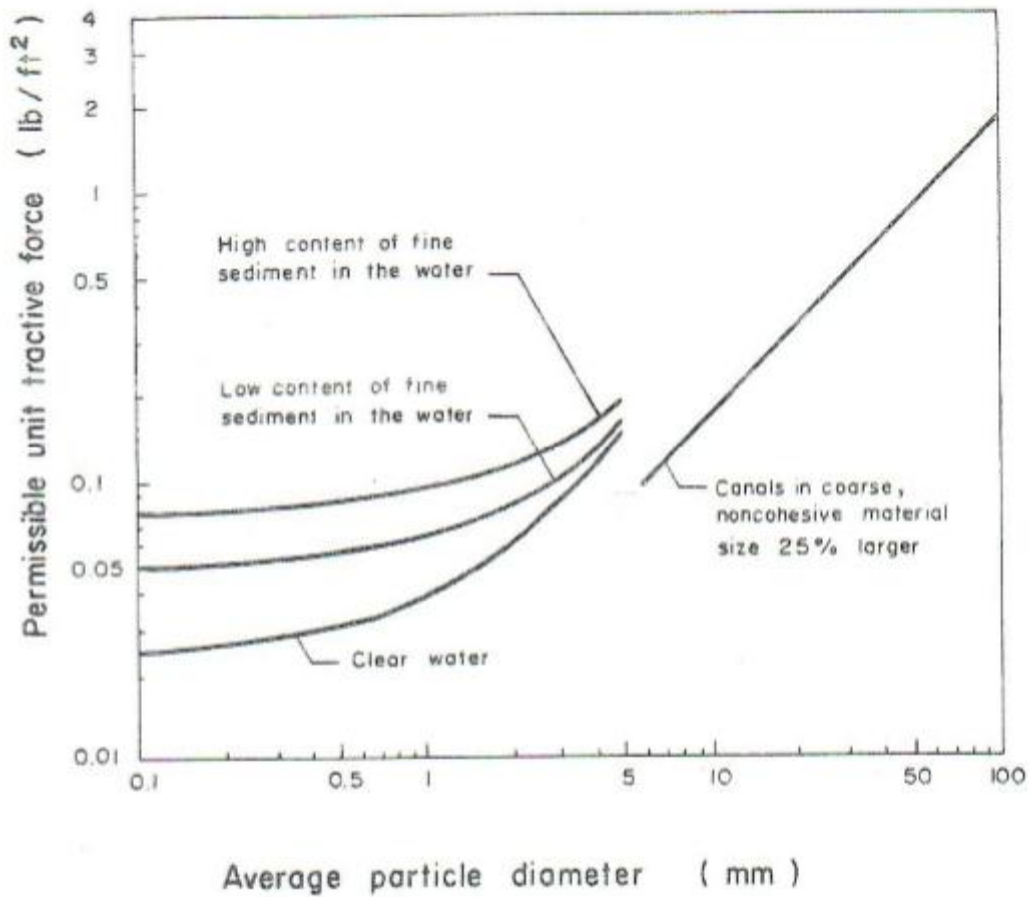
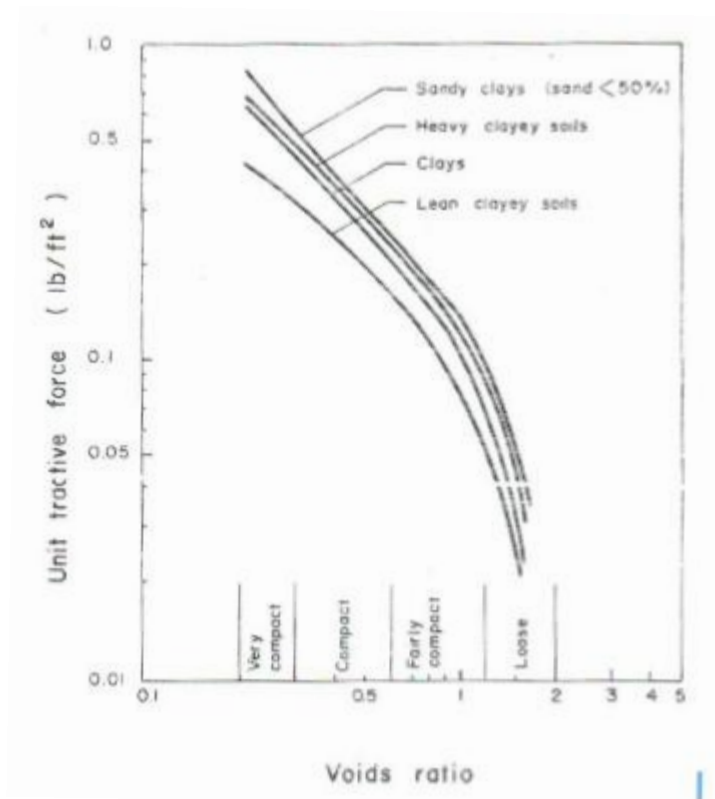


Figure I.6. Efforts tangentiel critique pour des matériaux non cohésifs (USBR).

De même ; la figure I.7 montre l'effort tangentiel admissible pour un matériau cohésif (USBR).



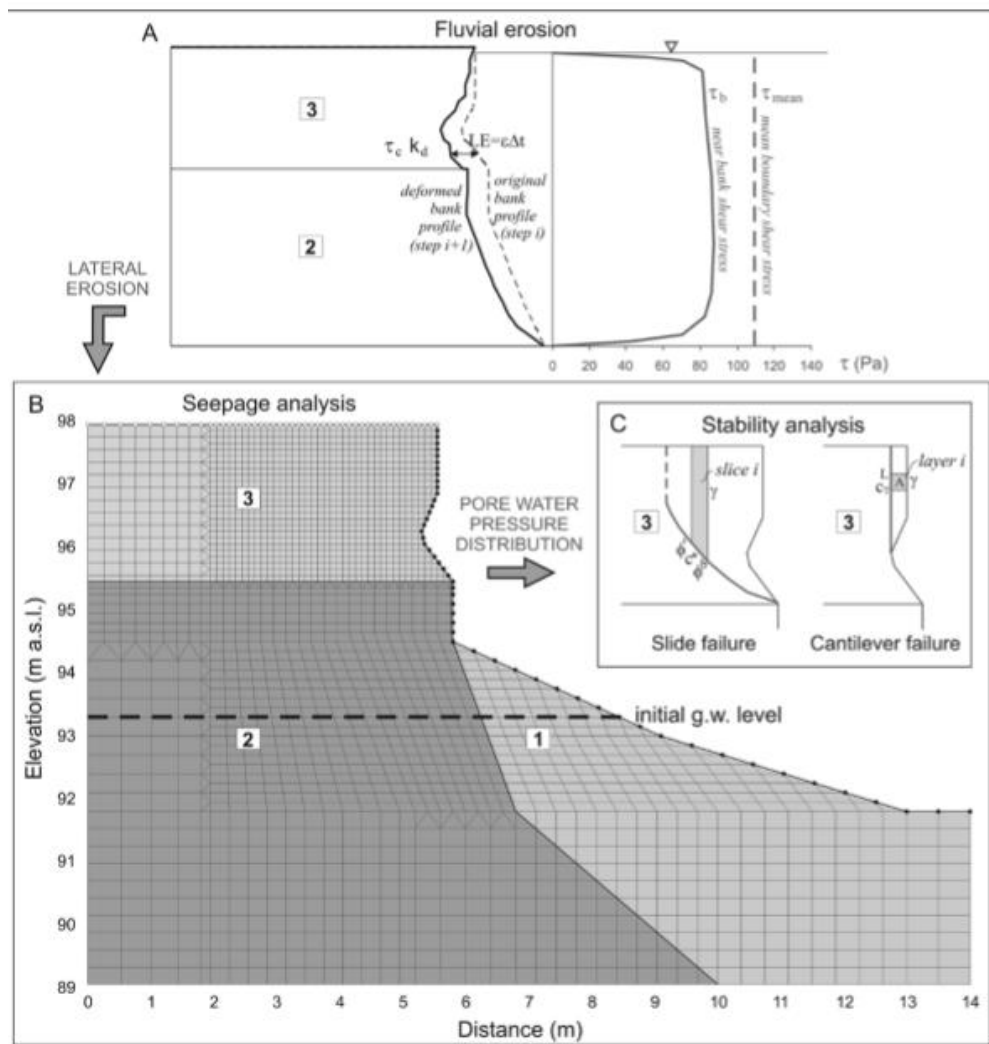
**Figure I.7** Efforts tangentiel critique pour des matériaux cohésifs (USBR).

En résumé les étapes de dimensionnement d'un canal suivant cette méthode sont comme suit :

- 1- Pour un matériau donné, choisir un fruit de talus (Tableau I.1), un angle de repos (Figure I.5) et une contrainte admissible (Figure I.6 pour les non cohésifs et I.7 pour les cohésifs). Déterminer la contrainte tangentielle admissible en tenant en compte si le chenal est droit ou sinueux.
- 2- Pour un matériau non cohésif, il faut calculer le paramètre de réduction  $K$ , et calculer la contrainte tangentielle admissible des talus en multipliant  $K$  par celle calculer en 1.
- 3- Faire l'égalité entre la contrainte admissible des talus (déterminée en 2) est  $0.76 \cdot \gamma_w$  et de déterminer la valeur de  $y$ .
- 4- Pour le  $y$  calculé en 3 et pour des valeurs sélectionnées de Manning des fruits des berges, calculer la largeur au fond  $B_0$  à partir de l'équation de Manning.
- 5- Vérifier que la contrainte tangentielle au fond ( $\gamma_w, \gamma_i$ ) est inférieur à la contrainte admissible calculée en 1. (Hanif Chaudhry, 2008),

### I.5. Erosion et stabilité

L'évolution de la géométrie de la berge implique souvent des combinaisons de l'érosion fluviale et du glissement du massif. **Darby et al. (2007)** ont couplé un modèle d'érosion superficielle avec une étude de l'écoulement par éléments finis et le calcul de la stabilité par la méthode d'équilibre limite (Figure I.6). Ils ont simulé le cas d'une variation du niveau d'eau pendant un pic. Ils ont montré le rôle important de l'érosion fluviale par création de surplombs et son effet sur la stabilité des berges par l'évolution de la pression interstitielle. Une autre étude prenant en compte l'écoulement dans la rivière par un modèle d'érosion couplé avec un calcul de stabilité en rupture plane a été développé par **Simon et al. (2006 et 2010)** dans le programme BSTEM 5.2. Ils montrent que l'érosion d'un sol non cohésif sur le pied de la berge affecte principalement la stabilité globale du massif.



**Figure I.8.** Couplage de l'érosion, de l'écoulement et de la stabilité de la berge (**Darby et al. 2007**)

## I.6. Avantage des canaux non revêtus

La conception des canaux non revêtus présente plusieurs avantages en particulier dans les zones extra urbaines. Ces derniers se concrétisent dans l'économie du coût du projet, la favorisation du comportement naturel du cours d'eau, la contribution dans le développement de la faune et la flore dans le milieu, ce qui donne un bon facteur environnemental ainsi que l'aide à l'interaction entre les nappes phréatiques et le cours d'eau.

## I.7. Mécanismes de l'affouillement

La plus grande profondeur de la fosse se manifeste le long de la génératrice amont de la pile, son évolution dépend des paramètres suivants :

Si il n'ya pas charriage ( $\tau^* < 0,047$  pour une granulométrie uniforme et  $\tau^* < 0,138$  pour une granulométrie étalée), sur le fond de la rivière, sur les piles, l'état d'équilibre est atteint progressivement par l'approfondissement croissant, d'autant plus lentement que la vitesse est plus faible. (Degoutte, 2006)

Si il ya charriage la fosse atteint dès le début de la crue sa profondeur maximale puis cette profondeur subit des fluctuations sous l'influence des matériaux charriées en amont.

La profondeur de l'affouillement au droit d'une pile peut être considérée comme la somme de trois type d'affouillement :

\*Une profondeur appelée (profondeur normale d'affouillement qui se traduit dans un lit mineur, et qui résulte d'une modification du coefficient de SHIELDS  $\tau^*$  et par conséquent rayon hydraulique. (HN)

\*Une profondeur due à la réduction de la section d'écoulement, due au remblai d'accès. (HK)

\*Une profondeur d'affouillement locale due à la présence de la pile.(HL).

## Conclusion

L'étude bibliographique montre les conséquences du comportement des ruissellements sur des canaux non revêtus érodable ainsi que la diversité des méthodes de calcul disponibles pour des canaux stable.

D'après l'analyse des études faites, les méthodes de calcul utilisées actuellement nécessitent une application minutieuse des étapes, afin d'aboutir aux résultats ; Alors notre travail consiste à rapporter un modèle de calcul simple à adopter dans la pratique tout en programmant un algorithme prenant en compte la méthode de la contrainte tractrice ainsi que la vitesse admissible.



Le but de ce projet est de mettre en pied une solution de dimensionnement des canaux non revêtus. Le souhait des utilisateurs est d'avoir un programme de calcul plus facile à utiliser tout en étant plus efficace.

## II.1. Description de l'application à réaliser

Notre travail consiste à concevoir un programme de calcul nommé « Calcanal » qui permettra de faire automatiquement le dimensionnement des canaux non revêtue (en terre) en faisant entrer les données de base et recevoir en contre partie les résultats souhaités.

Pour concrétiser l'application, on a utilisé le langage python car c'est un langage portable, dynamique, extensible, gratuit, qui permet (sans l'imposer) une approche modulaire et orientée objet de la programmation.

### II.1.1. Caractéristique du langage Python

En 1990 apparaît un nouveau langage de script, Python, développé par Guido van Rossum et dont le paradigme de base, parmi d'autres, est l'objet. Le langage Python a été influencé par de nombreux langages de programmation comme le C, C++, Java, Lisp ou même le langage Perl. Inversement, Python a influencé des langages comme Ruby ou JavaScript.

La grande particularité de Python réside dans sa clarté. En effet, un code clair est bien mieux maintenu qu'un code qui ne l'est pas. Ce qui fait de Python un langage privilégié dans le cadre de projets de petite ou de grande envergure est justement sa pauvreté syntaxique très appréciée par certains programmeurs.

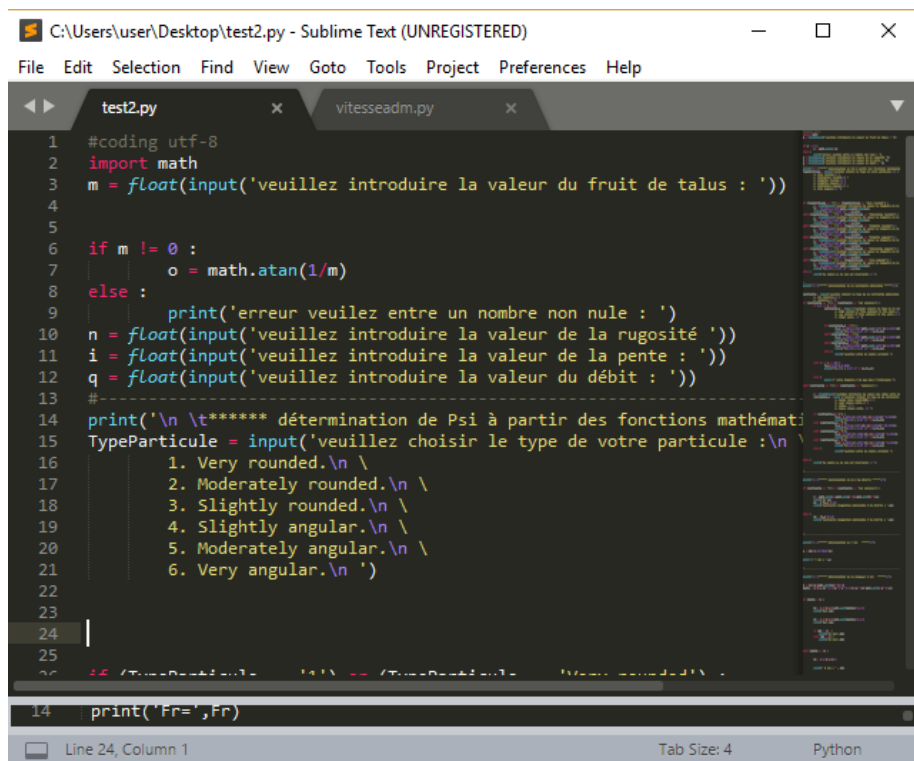
L'objectif ultime de Python est d'afficher un code extrêmement lisible, des structures simples même dans le cas de projets complexes, ainsi qu'une flexibilité redoutable - à l'instar de Perl, c'est un langage extensible et pourvu d'une grande capacité modulaire, offrant toujours plus de créativité aux programmeurs.

Python est utilisé aussi bien dans le monde Windows que dans le monde Unix/Linux. De plus, parmi les nombreux contextes d'utilisation de ce langage, citons :

- le domaine scientifique ;
- l'enseignement;
- l'administration système et réseau ;
- la programmation de logiciel ;
- la programmation web.

L'architecture de Python offre incontestablement aux informaticiens venant d'univers différents une puissance de productivité et d'efficacité que l'on trouve rarement dans les autres langages. (Kais. A, 2015)

La figure ci-après illustre une fenêtre de l'éditeur Sublime-Text sous Windows pour écrire un script en python :

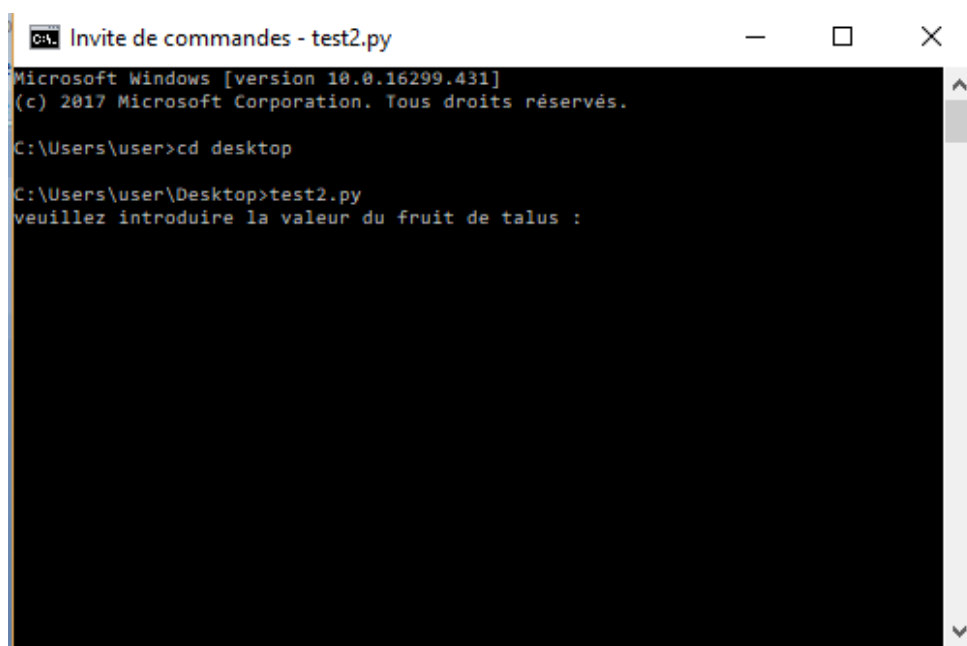


```
C:\Users\user\Desktop\test2.py - Sublime Text (UNREGISTERED)
File Edit Selection Find View Goto Tools Project Preferences Help

test2.py x vitesseadm.py x
1 #coding utf-8
2 import math
3 m = float(input('veuillez introduire la valeur du fruit de talus : '))
4
5
6 if m != 0 :
7     o = math.atan(1/m)
8 else :
9     print('erreur veuillez entre un nombre non nule : ')
10 n = float(input('veuillez introduire la valeur de la rugosité '))
11 i = float(input('veuillez introduire la valeur de la pente : '))
12 q = float(input('veuillez introduire la valeur du débit : '))
13
14 print('\n \t***** détermination de Psi à partir des fonctions mathémat
TypeParticule = input('veuillez choisir le type de votre particule :\n \
15     1. Very rounded.\n \
16     2. Moderately rounded.\n \
17     3. Slightly rounded.\n \
18     4. Slightly angular.\n \
19     5. Moderately angular.\n \
20     6. Very angular.\n ')
21
22
23
24
25
26 # (TypeParticule) = '1' -- (TypeParticule) = 'Very rounded')
14 print('Fr= ',Fr)
```

Figure II.1. Fenêtre Sublime-text script python

L'exécution du programme se fait sur l'invité de commandes qui est représenté sur la figure suivante :



```
C:\Users\user\Desktop\test2.py
Microsoft Windows [version 10.0.16299.431]
(c) 2017 Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

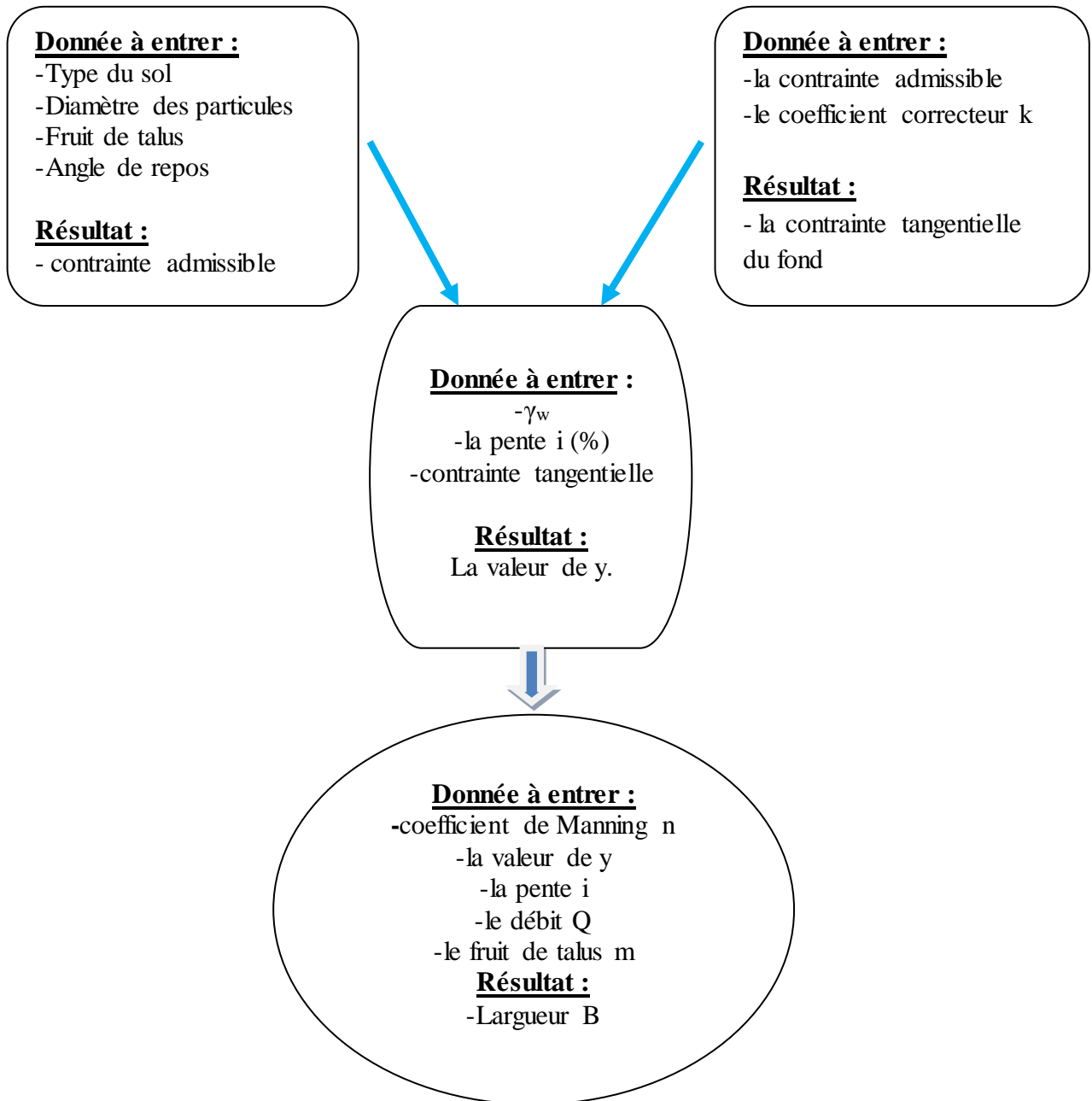
C:\Users\user>cd desktop

C:\Users\user\Desktop>test2.py
veuillez introduire la valeur du fruit de talus :
```

Figure II.2. Fenêtre de l'invité de commandes

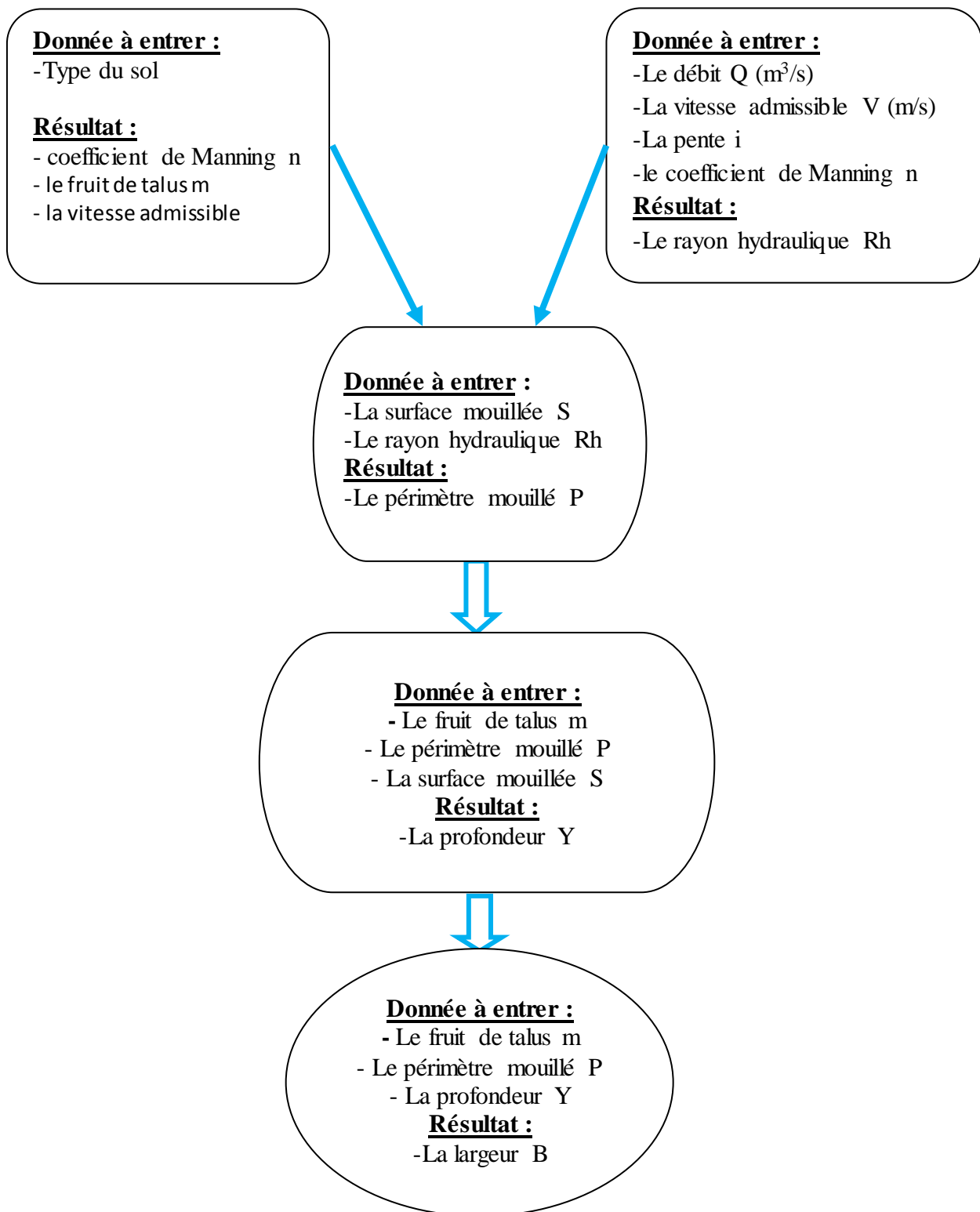
### II.1.2. Description schématique du programme de calcul « Calcanal »

Les différentes classes de calcul interagissent entre elles et une partie de l'information est transmise automatiquement d'une classe à une autre ; les organigrammes suivant détaillent les interactions entre les classes pour chaque méthode de calcul :



**Figure II.3.** Organigramme de calcul suivant la méthode de la force (ou contrainte) tractrice





**Figure II.4.** Organigramme de calcul suivant la méthode de la vitesse admissible

**II.2. Algorithme de calcul des dimensions d'un canal non revêtus**

Il s'agit de l'algorithme de calcul pour les deux méthodes utilisées la force tractrice et la vitesse admissible :

**a- Méthode de la force tractrice :**

Les étapes sont les suivantes :

1. Introduire la valeur du fruit de talus :  $m = \text{valeur}$
2. Introduire la valeur de  $\theta$  :  $\theta = \tan^{-1} \left( \frac{1}{m} \right)$
3. Introduire la valeur de la pente  $i$  :  $i = \text{valeur}$
4. Introduire la valeur du débit :  $Q = \text{valeur}$
5. Détermination de l'angle de repos  $\theta$  à partir des fonctions mathématiques selon le type des particules :  $(\theta = f(x))$

Si c'est **Very rounded** :

On introduit la valeur de  $X$  (diamètre de la particule en mm)

On obtient la valeur de  $f(x)$  :

$$f(x) = \text{valeur } \theta 1$$

Si c'est **Moderately rounded:**

On introduit la valeur de  $X$  (diamètre de la particule en mm)

On obtient la valeur de  $f(x)$  :

$$f(x) = \text{Valeur } \theta 2$$

Si c'est **Slightly rounded** :

On introduit la valeur de  $X$  (diamètre de la particule en mm)

On obtient la valeur de  $f(x)$  :

$$f(x) = \text{Valeur } \theta 3$$

Si c'est **Slightly angular** :

On introduit la valeur de  $X$  (diamètre de la particule en mm)

On obtient la valeur de  $f(x)$  :

$$f(x) = \text{Valeur } \theta 4$$

Si c'est **Moderately angular** :

On introduit la valeur de  $X$  (diamètre de la particule en mm)

On obtient la valeur de  $f(x)$  :

$$f(x) = \text{Valeur } \theta 5$$

Si c'est **Very angular** :

On introduit la valeur de  $X$  (diamètre de la particule en mm)

On obtient la valeur de  $f(x)$  :

$$f(x) = \text{Valeur } \theta 6$$

6. Détermination de la contrainte admissible:

A- Non cohésif :

**Diamètre D (0.5->5mm) : D=X**

**Si High content of fine sediment in the water:**

**F(x) = valeur 1**

**Si Low content of fine sediment in the water:**

**F(x) = valeur 2**

**Si Clear water**

**F(x) = valeur 3**

**Diamètre D (6->100mm): D=X**

**Canals in coarse non cohesive material size 25% larger**

**F(x)= valeur 4**

B- Cohesive:

On introduit la valeur des vides entre les particules (X)

**Si Sandy clays (sand<50%) :**

F(x)= Valeur 1

**Si Lean clayey soils**

F(x)= Valeur 2

**Si clays**

F(x)= Valeur 3

**Si Heavy clayey soils**

F(x) = Valeur 4

7. Détermination de  $\sigma_{tg}$ :

**Si la contrainte admissible est Non cohésive le cas (6-a)**

$$K = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \psi}} \quad (\text{II.1})$$

**Contrainte tangentiel admissible ( $\sigma_{tg}$ ) = k\*contrainte admissible non cohésive (6-a)**

**Si non**

**Contrainte tangentiel admissible ( $\sigma_{tg}$ )=contrainte admissible cohésive(6 b)**

8. Détermination du Y :

$$Y = (6 \text{ tg} / (0.76 * 9810 * i)) \quad (\text{II.2})$$

9. Détermination de la largeur B :

$$F(B) = 0$$

$$B = ???$$

10. Afficher Y=valeur ; B= valeur

#### b- Méthode de la vitesse admissible :

Le protocole à suivre est :

1. Introduire la valeur du débit Q
2. Introduire la valeur de la pente I
3. Choisir la valeur de Manning n :

Si **Metals** : \*Acier =0.012

\*Fonte=0.013

\*Métal ondulé=0.025

Si **Non-Metals** : \*Lucite=0.009

\*Verre=0.01

\*Ciment=0.011

\*Béton=0.013

\*Bois=0.012

\*Argile=0.013

\*Maçonnerie=0.013

\*Gunité=0.019

\*Masonry =0.25

\*Pierre=0.035

Si **Ruisseaux naturel** : \*Droit et propre=0.030

\*Gravier ; pavé ; rocher de fond=0.040

\*Fond de galet avec de gros rochet =0.050

4. Choisir la valeur du fruit de talus m :

Roche=Presque vertical

Argile=1/2 à 1/1

Sol ferme=1/1

Sol sableux lâche=2/1

Sol sableux limoneux, terre remaniée=3/1

5. Choisir la vitesse admissible V :

Sable fin=0.6m/s

Sable grossier=1.2m/s

Sol Sablo- limoneux=0.6m/s

Sol Sablo-argileux=1.1 m/s

Argile=1.8m/s

Sablo- limoneux végétalisé (pente &lt;5%) =1.8m/s

Argilo- limoneux végétalisé (pente &lt;5%)=2.4m/s

Grés tendre=2.4m/s

Schiste douce=1.1m/s

Roche dure=6.1m/s

6. Déterminer le Rayon hydraulique :

a- Calculer la surface mouillée :

$$S=Q/V \quad (\text{II.3})$$

b- Rayon hydraulique :

$$R=(Q.n/S.I^{1/2})^{3/2} \quad (\text{II.4})$$

7. Déterminer le Périmètre mouillé :

$$P=S/R \quad (\text{II.5})$$

8. Déterminer la largeur B et la profondeur y :

$$B=P - 2*(y * \sqrt{m^2 + 1}) \quad (\text{II.6})$$

$$A=y*(B+m*y) \quad (\text{II.7})$$

Alors on remplace l'équation (1) dans (2) on obtient une équation du 2<sup>eme</sup> degré en fonction de y.

On obtient la valeur de y, on la remplace dans (1) on obtient la valeur B.

9. Ajouter une valeur convenable de la revanche sur la profondeur y :

Si le débit :  $Q < 0.75 \text{ m}^3/\text{s} : Y=y+0.45\text{m}$

$0.75 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 1.5 \text{ m}^3/\text{s} : Y=y+0.60 \text{ m}$

$1.5 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 85 \text{ m}^3/\text{s} : Y=y+0.75 \text{ m}$

$Q > 85 \text{ m}^3/\text{s} : Y=y+0.90 \text{ m}$

### **Conclusion :**

L'algorithme construit pour chacune des deux méthodes a permis d'élaborer un programme de calcul sur python qui donne des résultats selon le cas attribué suivant l'enchaînement des étapes du programme, le résultat du dimensionnement obtenu par « Calcanal » permet d'optimiser les conditions de stabilité optimale.

L'objectif de ce chapitre est d'utiliser le programme « Calcanal » sur le cas d'Oued El Harrach, afin d'obtenir le résultat de dimensionnement adéquats aux conditions de stabilité optimales.

### **III.1. Descriptif du projet :**

Dans cette partie d'étude il s'agit de la description et la présentation des généralités sur le projet d'aménagement hydraulique d'Oued El Harrach.

#### **III.1.1. Objectif du projet :**

Le présent projet d'aménagement de l'Oued el Harrach a pour objectif d'assurer le fonctionnement hydraulique de ce dernier.

#### **III.1.2. Contexte du projet :**

Oued El Harrach est l'un des principaux cours d'eau qui traversent la Wilaya d'Alger. Par le passé et jusqu'à nos jours, de nombreux phénomènes hydrologiques extrêmes ont provoqué des crues importantes sur ce dernier, occasionnant des inondations dévastatrices, aussi bien en termes de pertes humaines qu'en termes de dégâts matériels.

Pour faire face à ces inondations de multiples interventions ont eu lieu afin de protéger les zones urbanisées. Cependant l'absence du schéma systématique relatif à l'aménagement des cours d'eau entraîne l'endommagement de la fonction naturelle de l'oued et les habitants riverains restent donc soumis au risque d'inondation.

#### **III.1.3. Consistance du projet :**

Le présent projet concerne la réalisation des études d'Avant Projet Détaillé et d'exécution ainsi que les Travaux d'aménagement de l'Oued El Harrach. L'étendue des travaux couvre à l'embouchure jusqu'à la confluence de l'Oued Djemaa, soit un linéaire de 18,2km. Le délai d'exécution des travaux est de 42 mois.

Le contenu du projet basé sur le Plan directeur est comme suit :

- Aménagement hydraulique : terrassement, protection des berges, recalibrage et reprofilage du lit de l'oued, mur de soutènement, ouvrages de drainage des eaux, etc.
- Ouvrages destinés au soutien du débit d'étiage : Station de pompage, conduite, bâtiment administratif, centre de contrôle commandé, ouvrage assurant le débit pour les jardins filtrants.
- Ponts et passerelles : ponts piétonniers et pont d'accès au terrain autour du cours d'eau.

- Aménagement paysager : Infrastructures (piscines en plein air, terrain de sport, etc), plantation (arbres et arbustes), revêtement de sol, infrastructures sportives (terrain de football, terrain de handball, terrain de basketball et piste de jogging), équipements d'éclairage, etc.

#### III.1.4. Description du tronçon concerné par l'aménagement (tronçon 2) :

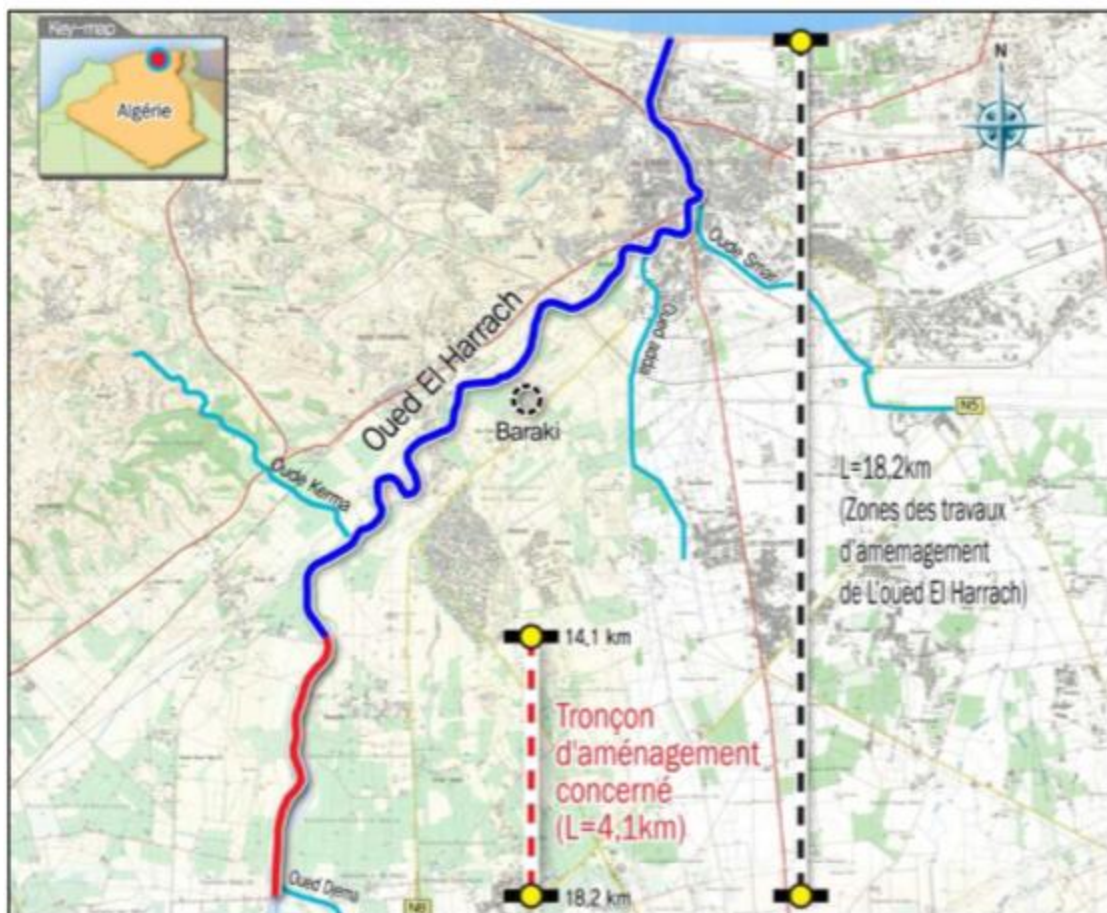
L'amont de l'oued El Harrach rejoint par l'Oued Djema et le tronçon2 gardent le terrain naturel et abritent beaucoup d'espèces d'arbres et d'herbes. Par conséquent ce tronçon sera considéré comme une zone protégée pour la raison qu'il se caractérise par un écosystème sain sans aménagement artificiel.

Le tronçon d'aménagement est localisé par :

Le point de départ : No. 352+20

Et le point de la fin : Confluence de l'Oued Djema, No.455+0.0

Donc il est étendu sur un linéaire de 4.1Km.



**Figure III.1.** Localisation du tronçon du projet

(Projet travaux d'aménagement d'Oued El Harrach)



### III.1.5. Conception et principes directeurs de l'aménagement du tronçon 2 :

L'étude concerne un recalibrage garantissant un bon fonctionnement hydraulique, ainsi que la mise en place de la berge du lit majeur en tenant compte de la stabilité du talus de berge par l'application des méthodes de protection des berges tout au long du tronçon de l'oued.

### III.2. Variante retenue :

Dans cette partie on effectue la comparaison entre les méthodes de protection afin de sélectionner la plus avantageuse.

#### III.2.1. Comparaison des méthodes de protection des berges :

Selon les études de la méthode de protection des berges, le type de protection le plus souvent témoigné est le gabion matelas. On a analysé avec le bloc en béton, ouvrage de protection communément appliqué, favorable à l'installation. Selon la comparaison sur les caractéristiques hydrauliques (stabilité), des avantages et des inconvénients de la construction, le gabion matelas et le bloc végétalisable sont choisis.

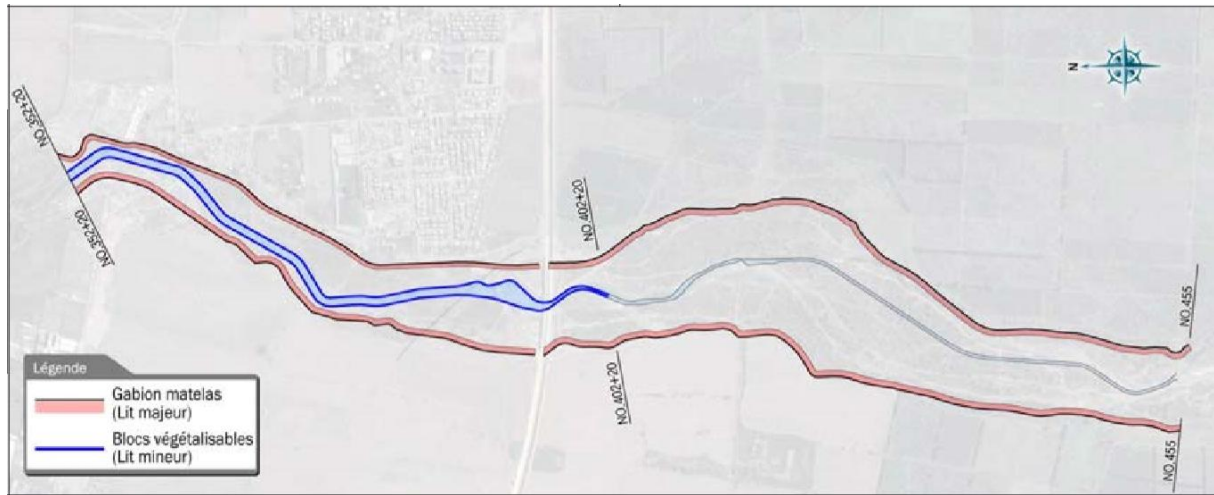
**Tableau.** Comparaison et sélection de la méthode de protection de la berge (**Annexe 1**)

#### III.2.2. Variante retenue pour l'ouvrage de protection des berges :

Les tronçons d'application de gabion matelas et de bloc végétalisable sont déterminés en tenant compte des conditions d'alentour, de présence d'espaces d'activités fluviales et de la partie fortement courbée.

**Tableau III.1.** Tronçons d'application par type d'ouvrage de protection

Catégorie	Gabion matelas (Matelas en pierre)	Blocs végétalisables
Critère de choix	Partie non-urbaine de faibles activités fluviales Partie de l'oued de ligne droite avec l'écoulement douce	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partie urbaine d'activités fluviales (lit mineur)</li> <li>• Rive concave de la partie fortement courbée</li> <li>• Bassin de retenue(Partie de construction des ouvrages de génie civil importants)</li> </ul>
Tronçons choisis (NO)	Vitesse et force tractrice admissibles : Satisfaisant dans tous les tronçons <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rive gauche</li> <li>- Lit majeur : NO.352+20 ~ 455+00</li> <li>• Rive droite</li> <li>- Lit majeur : NO.352+20 ~ 455+00</li> </ul>	Vitesse et force tractrice admissibles : Satisfaisant dans tous les tronçons <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rive gauche</li> <li>- Lit mineur : NO.352+20 ~ 402+20</li> <li>• Rive droite</li> <li>- Lit mineur : NO.352+20 ~ 402+20</li> </ul>



**Figure III.2.** Localisation des variantes retenues sur le profil de l'Oued. (Projet travaux d'aménagement d'Oued El Harrach)

### III.3. Application sur le programme « Calcanal » :

Les données essentielles du cas de notre projet sont illustrées ci-dessous :

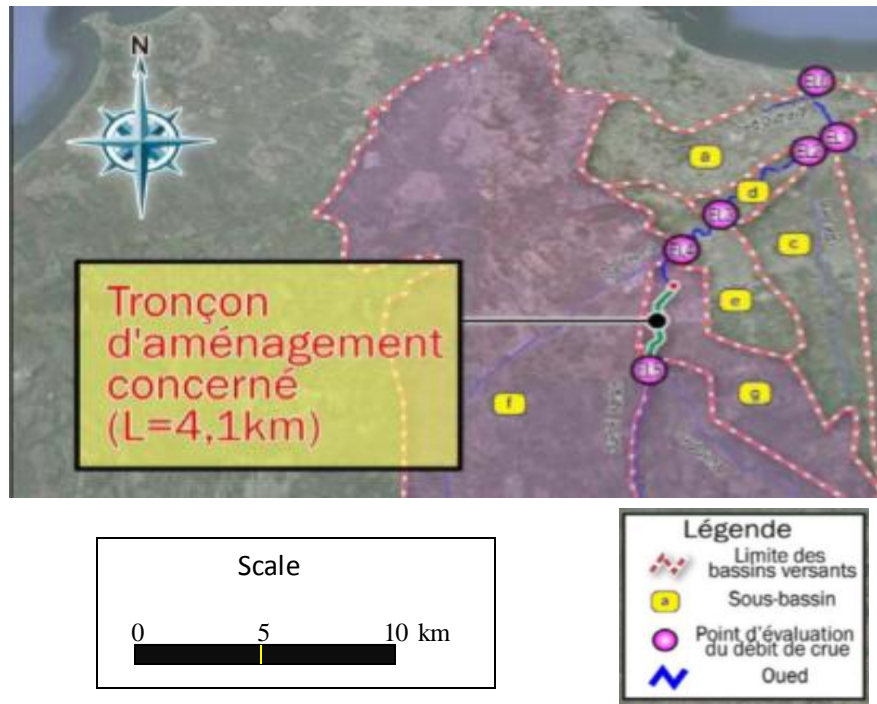
#### III.3.1. Débit de la crue du projet :

Pour réduire le débit de crue dans les profils en aval, le plan de bassins de retenue en amont est adapté à la crue de base. La présente étude du tronçon 2 n'est pas influencée par les bassins de retenue. Donc, le débit de crue au confluent Kerma (EL4) **Figure III.3** est appliqué comme le débit de crue projet.

**Tableau III.2.** Débit de crue du projet

Nom de l'oued	Point d'évaluation	Surface du bassin versant (km <sup>2</sup> )	Débit de crue du projet (crue centennale) (m <sup>3</sup> /s)	Remarque
Oued El Harrach	EL4	935	2 045	Confluent Kerma

La figure ci-dessous représente les points d'évaluation des crues :



**Figure III.3.** Points d'évaluation des crues

### III.3.2. Coefficient de rugosité :

Le coefficient de rugosité est un paramètre hydraulique montrant la résistance de frottement sur l'écoulement de l'eau dans le canal de la rivière. La capacité de débit d'un cours d'eau peut différer largement selon le niveau de ce coefficient de rugosité même si les canaux disposent de la même coupe d'écoulement et de la pente identique. Donc, le fait de mesurer précisément et rationnellement ce coefficient signifie à la fois la garantie de la précision du calcul hydraulique et de l'influence majeure sur la sécurité du projet d'aménagement.

Dans le présent projet, le coefficient de rugosité a été déterminé par l'étude du lit mineur de chaque tronçon en tenant compte des documents tels que "Critères et interprétations de la conception des cours d'eau (2009, publié par l'Académie des ressources en eau de Corée du Sud)".

**Tableau III.3.** Coefficient de rugosité de cours d'eau et canaux

Etat des cours d'eau et canaux		'n'
Cours d'eau naturel	Petit cours d'eau situé dans une plaine (sans végétation mauvaises)	0,025 - 0,033
	Petit cours d'eau situé dans une plaine (mauvaises végétation et arbustes)	0.030-0.040
	Petit cours d'eau situé dans une plaine (mauvaises végétation et arbustes)	0.040-0.055
	Cours d'eau en région montagneuse (galets)	0.030-0.050
	Cours d'eau en région montagneuse (gros galets)	Supérieur à 0.040
	Grand cours d'eau (Lit argileux, sableux, peu de méandres)	0.018-0.035
	Grand cours d'eau (Lit de cailloux)	0.025-0.040

"Critères et interprétations de la conception des cours d'eau (2009, publié par l'Académie des ressources en eau de Corée du sud)".

Dans le cas de notre étude la valeur appliquée est de :

**Tableau III.4.** Valeur appliquée pour le coefficient de rugosité

No. de profil	Etat et dimension des voies des cours d'eau et canaux (visite du site)	n (coefficient de rugosité appliqué)
352+20~455	Grand cours d'eau / Lit mineur de cailloux	0.033

On fait rentrer les données sur le programme « Calcanal » pour chaque méthode de calcul :

**a- Méthode de la force tractrice :**

Pour un fruit de talus de  $m = 3/1$

Et une granulométrie moyenne de  $D = 35\text{mm}$

Les particules sont rondes.

Les résultats obtenus par Calcanal sont résumés sur le tableau III.6.

**Tableau III.5.** Valeur de la profondeur et la largeur du canal par la force tractrice

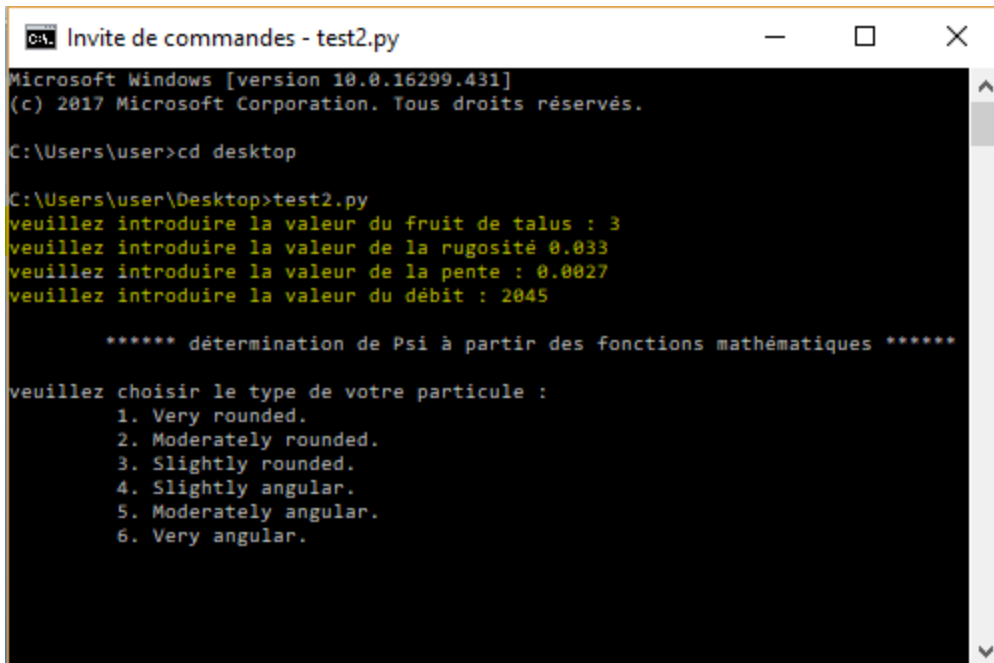
Point de section	Distance (m)		Cote (m)	La pente i	Le débit (m <sup>3</sup> /s)	Résultat	
	tronçon	cumulé				Profondeur Y(m)	Largeur B(m)
352+20	100	14 100	13.75		2 045		
355	100	14 200	14.02	0.0027	2 045	1.02	468.04
357+20	100	14 300	14.29	0.0027	2 045	1.02	468.04
360	100	14 400	14.57	0.0028	2 045	0.99	455.45
362+20	100	14 500	14.84	0.0027	2 045	1.02	468.04
365	100	14 600	14.98	0.0014	2 045	1.98	765.87
367+20	100	14 700	15.11	0.0013	2 045	2.13	809.64
370	100	14 800	15.29	0.0018	2 045	1.54	634.33
372+20	100	14 900	15.47	0.0018	2 045	1.54	634.33
375	100	15 000	15.77	0.003	2 045	0.92	432.49
377+20	100	15 100	15.98	0.0021	2 045	1.32	565.08
380	100	15 200	16.38	0.004	2 045	0.69	348.62
382	80	15 280	16.71	0.004125	2 045	0.67	340.67
382+20	20	15 300	16.79	0.004	2 045	0.69	348.62
385	100	15 400	17.19	0.004	2 045	0.69	348.62
387+20	100	15 500	17.6	0.0041	2 045	0.67	342.23
390	100	15 600	18	0.004	2 045	0.69	348.62
391	40	15 640	18.2	0.005	2 045	0.55	294.96
392+20	60	15 700	18.4	0.0033	2 045	0.84	402.68
393	50	15 750	18.65	0.005	2 045	0.55	294.96
395	50	15 800	18.9	0.005	2 045	0.55	294.96
397	80	15 880	19.33	0.0054	2 045	0.51	278.45
397+20	20	15 900	19.41	0.004	2 045	0.69	348.62
400	100	16 000	19.98	0.0057	2 045	0.48	267.4
402+20	100	16 100	20.39	0.0041	2 045	0.67	342.23
405	100	16 200	20.86	0.0047	2 045	0.58	308.95
407+20	100	16 300	21	0.0014	2 045	1.98	765.87
410	100	16 400	21.4	0.004	2 045	0.69	348.62
412+20	100	16 500	21.5	0.001	2 045	2.77	985.69
415	100	16 600	21.7	0.002	2 045	1.38	586.14
417+20	100	16 700	21.8	0.001	2 045	2.77	985.69
420	100	16 800	21.9	0.001	2 045	2.77	985.69
422+20	100	16 900	22.02	0.0012	2 045	2.31	859.73
425	100	17 000	22.26	0.0024	2 045	1.15	511.25
427+20	100	17 100	22.45	0.0019	2 045	1.45	609.12
430	100	17 200	22.7	0.0025	2 045	1.10	495.84
432+20	100	17 300	22.8	0.001	2 045	2.77	985.69
435	100	17 400	22.9	0.001	2 045	2.77	985.69
437+20	100	17 500	23	0.001	2 045	2.77	985.69
440	100	17 600	23.1	0.001	2 045	2.77	985.69
442+20	100	17 700	23.2	0.001	2 045	2.77	985.69
445	100	17 800	23.4	0.002	2 045	1.38	586.14
447+20	100	17 900	23.77	0.0037	2 045	0.75	369.59
450	100	18 000	24.2	0.0043	2 045	0.64	330.23
452+20	100	18 100	24.7	0.005	2 045	0.55	294.96
455	100	18 200	25.2	0.005	2 045	0.55	294.96

On remarque que les résultats obtenus par la méthode de la contrainte tractrice sont proche aux dimensions du projet.

**Recommandation :**

On propose un déblaiement du canal pour une uniformisation de la pente et dans le but d'avoir des résultats convenable.

Pour la méthode la force tractrice :



```
ca. Invite de commandes - test2.py
Microsoft Windows [version 10.0.16299.431]
(c) 2017 Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

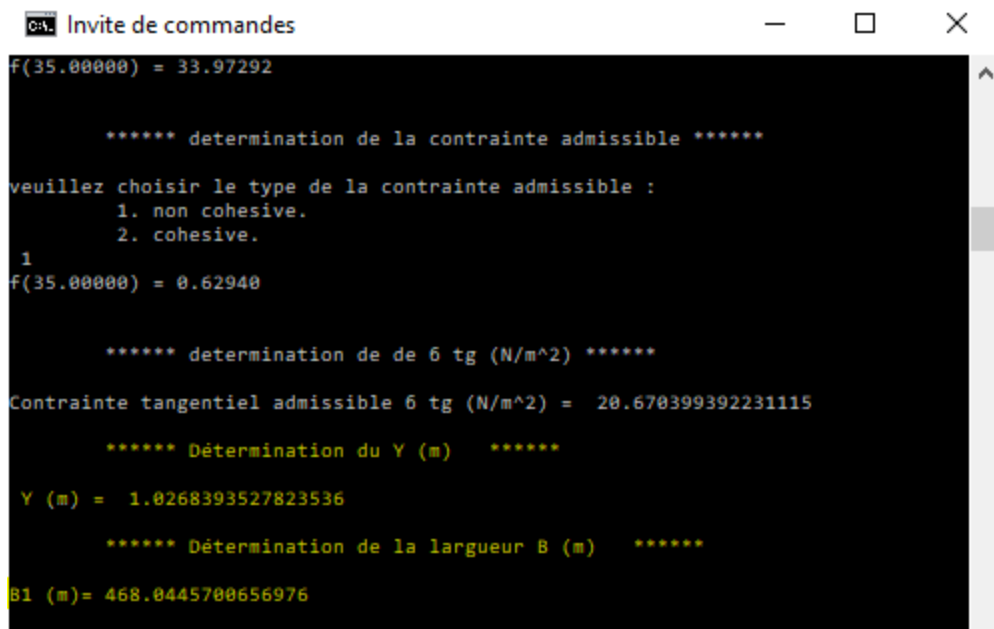
C:\Users\user>cd desktop

C:\Users\user\Desktop>test2.py
veuillez introduire la valeur du fruit de talus : 3
veuillez introduire la valeur de la rugosité 0.033
veuillez introduire la valeur de la pente : 0.0027
veuillez introduire la valeur du débit : 2045

***** détermination de Psi à partir des fonctions mathématiques *****

veuillez choisir le type de votre particule :
1. Very rounded.
2. Moderately rounded.
3. Slightly rounded.
4. Slightly angular.
5. Moderately angular.
6. Very angular.
```

Figure III.4. Affichage de Calcanal « méthode de contrainte tractrice »



```
ca. Invite de commandes
f(35.00000) = 33.97292

***** détermination de la contrainte admissible *****

veuillez choisir le type de la contrainte admissible :
1. non cohesive.
2. cohesive.
1
f(35.00000) = 0.62940

***** détermination de de 6 tg (N/m^2) *****
Contrainte tangentiel admissible 6 tg (N/m^2) = 20.670399392231115

***** Détermination du Y (m) *****
Y (m) = 1.0268393527823536

***** Détermination de la largeur B (m) *****
B1 (m) = 468.0445700656976
```

Figure III.5. Affichage du résultat final

**b- Méthode de la vitesse admissible :**

On a appliqué Calcanal pour la vitesse admissible et on a obtenue :

**Tableau III.6.** Valeur de la profondeur et la largeur du canal par la vitesse admissible

Point de section	Distance (m)		Cote (m)	La pente i	Le débit (m <sup>3</sup> /s)	Résultat	
	tronçon	cumulé				Profondeur Y(m)	Largeur B(m)
352+20	100	14 100	13.75		2 045		
355	100	14 200	14.02	0.0027	2 045	1.64	511.97
357+20	100	14 300	14.29	0.0027	2 045	1.64	511.97
360	100	14 400	14.57	0.0028	2 045	1.60	526.7
362+20	100	14 500	14.84	0.0027	2 045	1.64	511.97
365	100	14 600	14.98	0.0014	2 045	2.74	301.8
367+20	100	14 700	15.11	0.0013	2 045	2.91	283.51
370	100	14 800	15.29	0.0018	2 045	2.25	371.16
372+20	100	14 900	15.47	0.0018	2 045	2.25	371.16
375	100	15 000	15.77	0.003	2 045	1.52	555.74
377+20	100	15 100	15.98	0.0021	2 045	2.00	420.01
380	100	15 200	16.38	0.004	2 045	1.22	693.7
382	80	15 280	16.71	0.004125	2 045	1.19	710.33
382+20	20	15 300	16.79	0.004	2 045	1.22	693.7
385	100	15 400	17.19	0.004	2 045	1.22	693.7
387+20	100	15 500	17.6	0.0041	2 045	1.2	707.02
390	100	15 600	18	0.004	2 045	1.22	693.7
391	40	15 640	18.2	0.005	2 045	1.031	822.77
392+20	60	15 700	18.4	0.0033	2 045	1.41	598.3
393	50	15 750	18.65	0.005	2 045	1.031	822.77
395	50	15 800	18.9	0.005	2 045	1.031	822.77
397	80	15 880	19.33	0.0054	2 045	0.97	872.41
397+20	20	15 900	19.41	0.004	2 045	1.22	693.7
400	100	16 000	19.98	0.0057	2 045	0.93	909.02
402+20	100	16 100	20.39	0.0041	2 045	1.2	707.02
405	100	16 200	20.86	0.0047	2 045	1.08	784.85
407+20	100	16 300	21	0.0014	2 045	2.74	301.83
410	100	16 400	21.4	0.004	2 045	1.22	693.7
412+20	100	16 500	21.5	0.001	2 045	3.61	225.18
415	100	16 600	21.7	0.002	2 045	2.07	403.97
417+20	100	16 700	21.8	0.001	2 045	3.61	225.18
420	100	16 800	21.9	0.001	2 045	3.61	225.18
422+20	100	16 900	22.02	0.0012	2 045	3.10	264.69
425	100	17 000	22.26	0.0024	2 045	1.80	466.82
427+20	100	17 100	22.45	0.0019	2 045	2.16	387.7
430	100	17 200	22.7	0.0025	2 045	1.74	482.04
432+20	100	17 300	22.8	0.001	2 045	3.61	225.18
435	100	17 400	22.9	0.001	2 045	3.61	225.18
437+20	100	17 500	23	0.001	2 045	3.61	225.18
440	100	17 600	23.1	0.001	2 045	3.61	225.18
442+20	100	17 700	23.2	0.001	2 045	3.61	225.18
445	100	17 800	23.4	0.002	2 045	2.07	403.97
447+20	100	17 900	23.77	0.0037	2 045	1.29	653.4
450	100	18 000	24.2	0.0043	2 045	1.15	733.28
452+20	100	18 100	24.7	0.005	2 045	1.031	822.77
455	100	18 200	25.2	0.005	2 045	1.031	822.77

On remarque que les largeurs trouvées sont beaucoup plus importantes que les profondeurs ; cela est dû à la forme de l'oued.

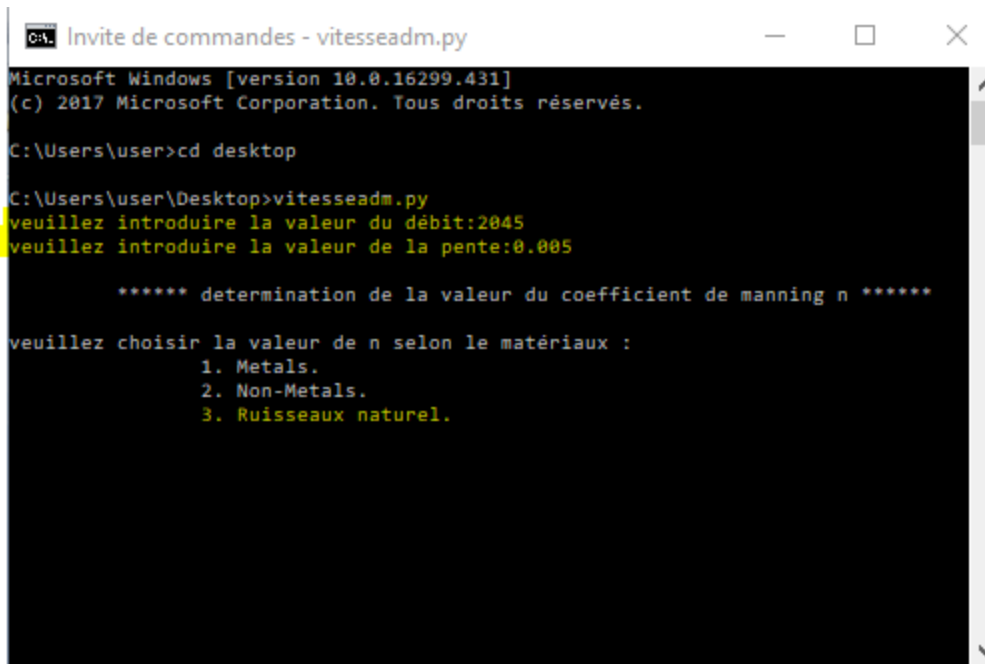
**Tableau III.7.** Valeur du niveau de projet et de la largeur de l'oued

Point de section	Distance (m)		Cote (m)	La pente i	Le débit (m <sup>3</sup> /s)	Niveau crue de projet (m)	Largeur de l'oued (m)
	tronçon	cumulé					
352+20	100	14 100	13.75				
355	100	14 200	14.02	0.0027	2 045	22.93	148
357+20	100	14 300	14.29	0.0027	2 045	22.97	154
360	100	14 400	14.57	0.0028	2 045	23.05	127
362+20	100	14 500	14.84	0.0027	2 045	23.12	136
365	100	14 600	14.98	0.0014	2 045	23.27	145
367+20	100	14 700	15.11	0.0013	2 045	23.34	171
370	100	14 800	15.29	0.0018	2 045	23.57	190
372+20	100	14 900	15.47	0.0018	2 045	23.61	169
375	100	15 000	15.77	0.003	2 045	23.72	184
377+20	100	15 100	15.98	0.0021	2 045	23.79	193
380	100	15 200	16.38	0.004	2 045	23.95	244
382	80	15 280	16.71	0.004125	2 045	23.97	229
382+20	20	15 300	16.79	0.004	2 045	23.97	198
385	100	15 400	17.19	0.004	2 045	24.00	203
387+20	100	15 500	17.6	0.0041	2 045	24.14	230
390	100	15 600	18	0.004	2 045	24.24	250
391	40	15 640	18.2	0.005	2 045	24.32	277
392+20	60	15 700	18.4	0.0033	2 045	24.32	289
393	50	15 750	18.65	0.005	2 045	24.38	299
395	50	15 800	18.9	0.005	2 045	24.49	309
397	80	15 880	19.33	0.0054	2 045	24.59	292
397+20	20	15 900	19.41	0.004	2 045	24.63	290
400	100	16 000	19.98	0.0057	2 045	24.83	295
402+20	100	16 100	20.39	0.0041	2 045	25.02	310
405	100	16 200	20.86	0.0047	2 045	25.15	342
407+20	100	16 300	21	0.0014	2 045	25.39	390
410	100	16 400	21.4	0.004	2 045	25.59	414
412+20	100	16 500	21.5	0.001	2 045	25.83	423
415	100	16 600	21.7	0.002	2 045	26.09	449
417+20	100	16 700	21.8	0.001	2 045	26.25	478
420	100	16 800	21.9	0.001	2 045	26.39	480
422+20	100	16 900	22.02	0.0012	2 045	26.58	454
425	100	17 000	22.26	0.0024	2 045	26.67	472
427+20	100	17 100	22.45	0.0019	2 045	27.13	430
430	100	17 200	22.7	0.0025	2 045	27.59	388
432+20	100	17 300	22.8	0.001	2 045	28.45	334
435	100	17 400	22.9	0.001	2 045	28.76	310
437+20	100	17 500	23	0.001	2 045	29.13	274
440	100	17 600	23.1	0.001	2 045	29.67	277
442+20	100	17 700	23.2	0.001	2 045	30.14	292
445	100	17 800	23.4	0.002	2 045	30.41	276
447+20	100	17 900	23.77	0.0037	2 045	30.67	264
450	100	18 000	24.2	0.0043	2 045	30.87	263
452+20	100	18 100	24.7	0.005	2 045	31	269
455	100	18 200	25.2	0.005	2 045	32.40	296



Afin d'exécuter le script, on fait rentrer les données dans l'invité de commande étape par étape comme l'illustre les figures ci-dessous pour afficher le résultat final.

Pour la méthode de la vitesse admissible :



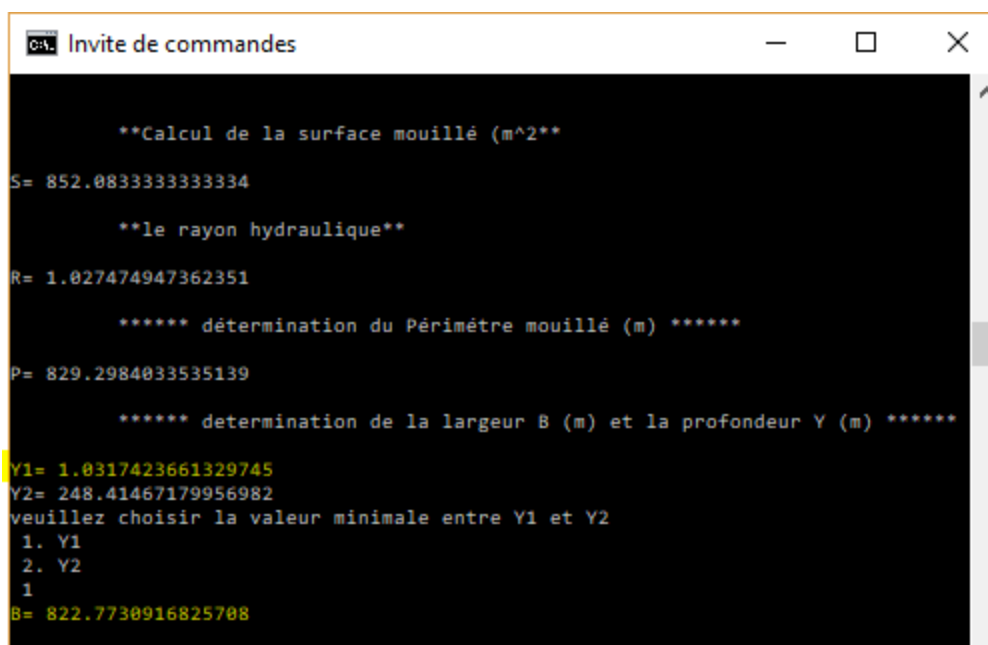
```
Microsoft Windows [version 10.0.16299.431]
(c) 2017 Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

C:\Users\user>cd desktop

C:\Users\user\Desktop>vitesseadm.py
veuillez introduire la valeur du débit:2045
veuillez introduire la valeur de la pente:0.005

***** détermination de la valeur du coefficient de manning n *****
veuillez choisir la valeur de n selon le matériaux :
    1. Metals.
    2. Non-Metals.
    3. Ruisseaux naturel.
```

Figure III.6. Affichage de Calcanal « méthode vitesse-adm »



```
**Calcul de la surface mouillée (m^2**
S= 852.0833333333334

**le rayon hydraulique**
R= 1.027474947362351

***** détermination du Périmètre mouillé (m) *****
P= 829.2984033535139

***** détermination de la largeur B (m) et la profondeur Y (m) *****
Y1= 1.0317423661329745
Y2= 248.41467179956982
veuillez choisir la valeur minimale entre Y1 et Y2
    1. Y1
    2. Y2
    1
B= 822.7730916825708
```

Figure III.7. Affichage du résultat final

**III.4. Résultats et discussion :**

Les résultats présentés sur les tableaux III.6 et III.7 dans le précédent paragraphe sont issues des calculs effectués sur « Calcanal » sous la programmation python suivant les deux méthodes, l'une de la force tractrice et la deuxième de la vitesse admissible.

Comparant les résultats des deux méthodes, le processus d'érosion peut être considéré d'une façon plus rationnelle en tenant compte des forces agissant sur les particules situées sur le fond du canal (méthode force tractrice), par contre dans la méthode de la vitesse admissible, les dimensions du canal sont prises de telle sorte que la vitesse d'écoulement sous les conditions d'écoulement uniformes soit inférieure à la vitesse admissible. On remarque que les valeurs obtenues par la méthode de force tractrice pour des canaux en terre sont plus proches du dimensionnement du projet donné en gabion et blocs végétalisable, mais sans doute beaucoup plus économiques que les variantes retenues.

**Conclusion :**

Dans le cas d'un canal érodable, la conception exige que la dimension du canal et la pente du fond soient sélectionnées de sorte que le canal ne soit pas érodé. Deux méthodes ont été utilisées pour la conception de ces canaux: la méthode de la vitesse admissible et la méthode de la force de traction. Les deux méthodes ont estimées des dimensions et on a opté pour la méthode de la force tractrice. La conception de canaux non revêtus présente plusieurs avantages surtout en milieu extra urbain. :

- 1- Economique
- 2- Favorise le comportement naturel du cours d'eau
- 3- Favorise le développement de la faune et la flore (indicateurs et facteurs environnementales)
- 4- Facilite l'interaction entre le cours d'eau et la nappe souterraine (recharge des nappes...etc)

Tout cela à condition que la conception obéisse aux règles techniques de dimensionnement.

## Conclusion générale :

L'instabilité des fonds et des berges des cours d'eau est un phénomène qui favorise l'érosion et les dépôts et accentue la détérioration des cours d'eau.

La thématique traitée vise à élaborer un protocole de calcul et de dimensionnement des canaux en terre qui pourra être utilisé afin d'éliminer le problème d'instabilité des canaux surtout en milieu urbain et semi urbain où la dégradation des berges et du fonds entraînent des épisodes d'inondation récurrents et dégrade l'espace urbain.

Le travail s'articule sur trois axes essentiels :

Le premier axe a concerné le comportement des canaux non revêtus érodables vis-à-vis des écoulements, ainsi que la diversité des méthodes disponibles dans la bibliographie pour le calcul de stabilité des canaux en terre.

En seconde partie, l'élaboration d'un programme de calcul en langage python, ce programme baptisé « Calcanal » pour les deux méthodes de la contrainte tractrice et de la vitesse admissible. A travers les organigrammes créés, on a construit des algorithmes de calcul sur python qui donnent des résultats très satisfaisants.

Enfin, l'étude d'un cas réel en utilisant Calcanal sur Oued El Harrach, l'application a donné des résultats de dimensionnement très intéressants pour un canal stable suivant les deux méthodes de calcul, ce qui donne une autre variante pour ce projet d'aménagement qui pourra être prise en considération.

Le dimensionnement des canaux non revêtus présente des avantages économiques, écologiques et techniques très intéressants pour l'ingénieur concepteur.

## Références bibliographiques:

- Areas .(30/06/2008).** Calcul du Risque d'Erosion Linéaire - Théorie générale. Formation technique.
- Buffington J.M. (1999).** The Legeng of A.F. Shields. Journal of Hydraulic Engineering. Vol.125, No 4. p376-387.
- Darby S.E., Rinaldi M. and Dapporto S. (2007).** Coupled simulations of fluvial erosion and mass wasting for cohesive river banks, J. Geophys. Res., 112, F03022, doi:10.1029/2006JF000722
- Delphine D. (2005).** Stabilité et Dynamique de Pentés Granulaires Sous-marines, Thèse de doctorat, l'université paris XI
- Graf Walter H. et Altinakar M.S. (2000).** Traité de Génie Civil, Volume 16, Hydraulique Fluviale : Ecoulement et Phénomènes de Transport dans les Canaux à Géométrie Simple, Deuxième édition corrigée, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, CH-1015 Lausanne, imprimé en Suisse.
- Hanif Chaudhry M (2008),** Open Channel flow; University of South Carolina Department of Civil and Environmental Engineering 300 Main Street Columbia, SC 29208
- Jaan Kiusalaas (2005).** Numerical Methods in Engineering with Python, Cambridge University Press The Edinburgh Building, Cambridge, UK
- Kais Ayari (2015).** L'art du Scripting Comprendre les langages de script Kom Shell, Perl, Python, Visual Basic Scripting et Windows PowerShell, Éditions Eyrolles
- Lane, E. W (1955).** Stable Channel Design," Trans. Amer. Soc. of Civil Engrs.
- Nascimento U. (1981).** The mechanism of erosion in noncohesive soils. Laboratory National of Civil Engineering, Lisbonne, Portugal
- Partheniades E. (1965).** Erosion and deposition of cohesive soils. Journal of the Hydraulics Division of the ASCE 91: 105-139.
- Pham T.L. (2008).** Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- Pierre H. (1986).** Rapport de Recherche LPC No138, L'érosion Externe des Sols par l'Eau : Approche Quantitative et Mécanismes, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- Rezzoug A. (1994).** Influence de la marée sur un sol semi-immérgé. Thèse de doctorat, Université de Nantes, France.

**Rinaldi , M., Mengoni B., Luppi L., Darby S. E. and Mosselman E. (2008).** Numerical simulation of hydrodynamics and bank erosion in a river bend, *Water Resour. Res.*, 44, W09428, doi:10.1029/2008WR007008.

**Shields A.F. (1936).** Application of similarity principles and turbulence research to bedload movement. Hydrodynamic Laboratory Publ. No 167, W. P. Ott and J. C. Van Uchelen, trans., U.S. Dept. of Agr., Soil Conservation Service Cooperative Laboratory, California Institute of Technology, California

**Simon, A., Bankhead N. and Thomas R. (2010).** Iterative bank-stability and toe-erosion modeling for predicting stream bank loading rates and potential load reductions. 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, June 27 - July 1, 2010. 11pages

**Simon A. and Pollen N. (2006).** A model of stream bank stability incorporating hydraulic erosion and the effects of riparian vegetation, the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference (8thFISC), April2-6, 2006, Reno, NV, USA, p870-877

**Vanoni V.A. and Brooks N.H. (1957).** Laboratory Studies of the Roughness and Suspended Load of Alluvial Streams, Report No. E-68, Sedimentation Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California.

**Graf Walter H. et Altinakar M.S. (2000).** *Traité de Génie Civil, Volume 16, Hydraulique Fluviale : Ecoulement et Phénomènes de Transport dans les Canaux à Géométrie Simple*, Deuxième édition corrigée, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, CH-1015 Lausanne, imprimé en Suisse.

**Wan C.F. and Fell R. (2004).** Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 4, ©ASCE, ISSN 1090-0241/2004/4-373–380


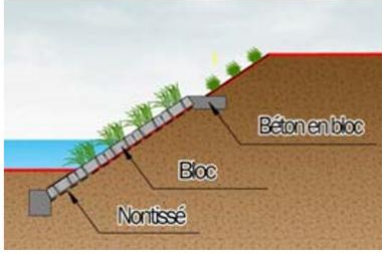
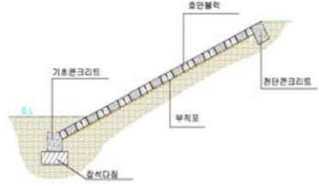


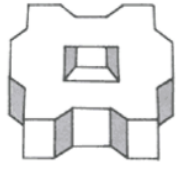



## Sitographie

**Degoutte Gérard 2006** *Traité d'Hydraulique à surface libre*  
<http://www.hydrologie.org/MISC/hydr/degoutte/degoutte1.pdf>

**Henensal. P, 1987** <http://worldcat.org/issn/04585860>

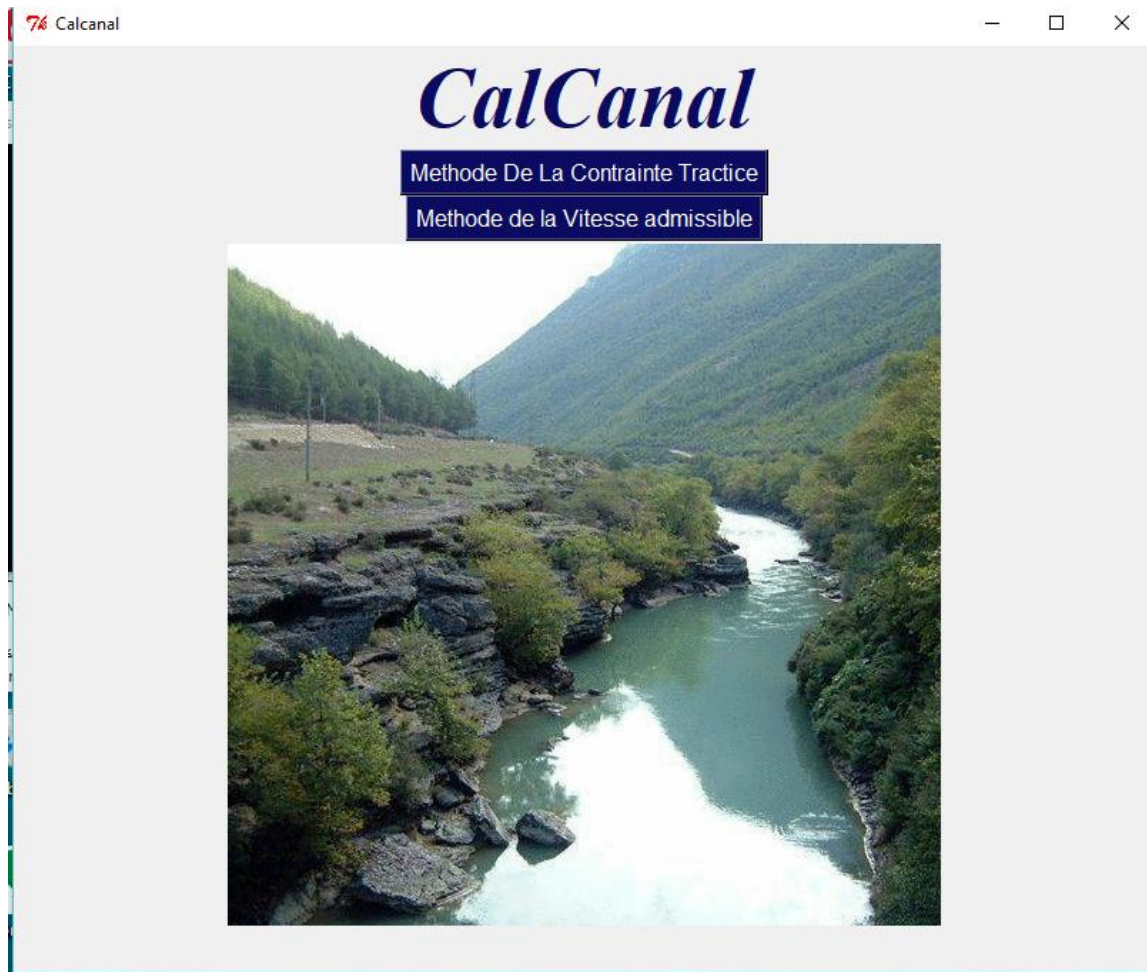
**Kais Ayari, 2015** <http://www.editions-eyrolles.com>

## Annexe 1 :

Type	Gabions Matelas (Matelas Réno)	Bloc végétalisable	Bloc en Béton
Coupe transversale standard			
Image			
Caractéristiques hydrauliques stabilité	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Bonne capacité hydraulique grâce à l'intégration avec la maille en fer</li> <li>*Excellente adaptabilité à la partie où la vitesse d'écoulement est rapide</li> <li>*Forte rugosité de surface et excellente flexibilité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Stabilité structurelle grâce à une simple liaison (E=19cm)</li> <li>*Relativement bonne adaptabilité à la partie de forte vitesse d'écoulement</li> <li>*Bonne adaptabilité à la partie de forte vitesse d'écoulement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Contrainte structurelle à cause d'accrochement de manière simple (E=10cm)</li> <li>*Mauvaise adaptabilité à la partie où la vitesse d'écoulement est rapide</li> <li>*Relativement faible rugosité de surface et faible effet de diminution de vitesse d'écoulement</li> </ul>
Avantages et Inconvénient	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Courte durée d'exécution grâce à la simplicité des travaux et la réalisation indépendante</li> <li>*Facilité de la garde de la forme lors du montage du cage et du remplissage des pierres grâce aux maille en acier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Contrainte importante du climat</li> <li>*Bonne constructibilité grâce à sa taille grande</li> <li>*Nécessité de réaliser la fondation en béton</li> <li>*continuité écologique</li> <li>*Facilité d'entretien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Nécessité de réaliser la fondation en béton,</li> <li>*Mauvaise adaptabilité à la partie où la vitesse d'écoulement et la pente des berges sont rapides</li> <li>*Faible durabilité à l'érosion et à l'effritement</li> </ul>
Exécution			
Zone d'application	Berge du lit mineur et du lit majeur	Berge du lit mineur et du lit majeur	
Raison du choix	Bonne capacité hydraulique et excellente flexibilité grâce à l'intégration avec la maille en fer. Continuité d'un espace écologique	Stabilité structurelle et hydraulique grâce à une simple liaison. Condition pour la végétalisation vue la haute porosité	



## Annexe 2 : Affichage de l'interface Calcanal



## Annexe 3 : Affichage de la méthode de la contrainte tractrice



**Méthode De La Contrainte Tractrice**

*Contrainte Admissible*

Non Cohesive

Cohesive

0

*Vides entre les particules (mm)*

0

Calculer

*Largeur*

0

**INFORMATION**

FRUIT DE TALUS 0

Rugosité 0

LA PENTE 0

LE DEBIT 0

**PARTICULE**

TYPE DE PARTICULE 0

DIAMETRE (mm) 0



## Annexe 4 : Affichage de la méthode de la vitesse admissible

tk

**Methode De la Vitesse Admissible**

**Données**

**Valeur du débit**

**Valeur De La Pente**

**Metals**

**Nom Metals**

**Ruseaux**

**Resultat N**

**TYPE DE SOL M**

**TYPE DE SOL V**

**Resultat M**

**Resultat V**

**Profondeur**

**Largeur**

**FRUIT DE TALUS**

**la Vitesse Admissible**

Calculé