



## Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>  
Eprints ID : 10423

### To link to this article :

URL : [http://www.pcnjournal.com/volume\\_68\\_april\\_2013\\_1758.htm](http://www.pcnjournal.com/volume_68_april_2013_1758.htm)

### To cite this version :

Soualmia, Amel and Jouini, Manel and Dartus, Denis *Study of flow through rockfill in channel = Etude des écoulements dans une mèche en canal*. (2013) Physical and Chemical News, vol. 68 . ISSN 1114-3800

Any correspondance concerning this service should be sent to the repository

administrator: [staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

# Study of flow through rockfill in channel

## Etude des écoulements dans une mèche en canal

A. Soualmia<sup>1\*</sup>, M. Jouini<sup>2</sup>, D. Dartus<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Sciences et Techniques de l'eau (LSTE), de Institut National Agronomique de Tunisie (INAT),  
Université de Carthage, 43 Avenue Charles Nicolle, 1082 Tunis, Tunisie

<sup>2</sup>Laboratoire Sciences et Techniques de l'eau (LSTE), de Institut National Agronomique de Tunisie (INAT),  
Université de Carthage, 43 Avenue Charles Nicolle, 1082 Tunis, Tunisie

<sup>3</sup>Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (Institut National Polytechnique de Toulouse),  
Allée du professeur Camille Soula 31400 Toulouse, France

### Abstract

We present the results of an experimental, theoretical, and also numerical study of free surface buried flows that we have undertaken in the laboratory LSTE of INAT. This work was conducted as part of collaboration with the engineering international office MECATER which included the construction of a new channel with large section in INAT, this channel was designed to study the losses in porous media with high porosity for which Darcy's law is no longer applicable.

The experiments consisted in determining the evolution of the free surface for different geometrical characteristics of riprap and different flow rates. These tests were used to verify different laws of head loss proposed in the literature, by performing numerical simulations of the evolution of the water surface for each experiment.

The analysis of our results shows that the Stephenson's formula is relevant to calculate the non-linear head loss for flows with high Reynolds number of pore. Furthermore, the simulations have highlighted the important role of porosity.

These results should be confirmed by further tests to assess in particular the influence of the slope and to analyze the behavior of the flow at the inlet and outlet of the riprap.

**Keywords:** Non Darcian flow; Experiments; Simulations; Flow through riprap; Stephenson's formula.

### Résumé

Nous présentons les résultats d'une étude expérimentale et théorique ainsi que des simulations numériques des écoulements enterrés à surface libre que nous avons entreprise au laboratoire LSTE de l'INAT. Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration avec le bureau d'études international MECATER qui a notamment construit un nouveau canal de grande section à l'INAT. Ce canal est destiné à l'étude des pertes de charge dans des milieux poreux de grande porosité pour les quels la loi de Darcy n'est plus applicable.

Les expériences ont consisté à déterminer l'évolution de la surface libre pour différentes caractéristiques géométriques des enrochements et pour différents débits. Ces essais ont permis de tester les lois de perte de charge proposées dans la littérature en réalisant des simulations numériques de l'évolution de la ligne d'eau pour chaque expérience.

L'analyse de l'ensemble de nos résultats montre, que la formule de Stephenson s'avère pertinente pour calculer la perte de charge non linéaire dans des écoulements à grand nombre de Reynolds de pore. Par ailleurs les simulations ont permis de souligner le rôle important de la porosité.

Ces résultats devront être confirmés par de nouveaux essais pour évaluer notamment l'influence de la pente et pour analyser le comportement des écoulements à l'entrée et à la sortie des enrochements.

**Mots clés :** Ecoulements non Darcien ; Expériences ; Simulations ; Ecoulements dans une mèche ; Equation de Stephenson.

### 1. Introduction

Dans les hautes montagnes le stockage des stériles miniers se fait au niveau des versants des talwegs. Pour la protection de ces stériles contre les écoulements d'eau, la mise en place d'un ouvrage en enrochement appelé mèche au fond du

talweg est nécessaire. Le stockage est assuré en préservant l'écoulement de l'eau à travers les enrochements de la mèche. C'est dans ce contexte qu'on s'intéresse aux écoulements dans les enrochements.

Ce travail permet d'apporter quelques

interprétations sur les calculs des profils d'eau dans un écoulement non Darcien. Ce type d'écoulement se produit dans différents domaines de l'hydraulique, comme les ruisseaux enterrés, les roches des drains, des filtres de protection composés de matériaux grossiers [16], barrages en enrochement, et piscines [5]. Les écoulements à travers les milieux rocheux, comme la plupart des écoulements, peuvent aller du laminaire au turbulent [10] bien que la transition entre ces régimes est graduelle plutôt que soudaine [2].

Cette étude se base sur des essais expérimentaux réalisés dans un canal qui a été conçu et construit à l'INAT dans le cadre d'une collaboration avec le bureau d'études international MECATER. Dans un second temps des simulations numériques sont développées pour tester des lois de perte de charge comme la relation de Stephenson [3] [11].

## 2. Dispositif expérimental et essais réalisés

Il s'agit d'un canal, large de 0.8m, long de 10m et de hauteur 0.6m. Les parois latérales sont en verre pour permettre l'observation de

l'écoulement. Le haut du canal est construit en tôle avec quelques fenêtres en verre, à travers lesquelles se font le remplissage et la vidange des enrochements. Le tout est en équilibre sur des supports en tôle. La pente du canal varie entre 0 et 15%, et le réglage de cette dernière se fait en variant la hauteur des supports. L'amont du canal est relié à un réservoir de capacité  $3.6\text{m}^3$ , par l'intermédiaire de caoutchouc flexible, ce qui permet d'atteindre de fortes pentes. À l'intérieur de ce réservoir une grille à nid d'abeille, assure la tranquillisation de l'écoulement. L'écoulement se déverse à l'aval du canal dans un bac d'une capacité de  $9\text{m}^3$ . Le niveau d'eau au droit du déversement est contrôlé par une vanne glissière. Trois pompes centrifuges, de 10l/s chacune, assurent la circulation de l'eau du réservoir aval vers le réservoir amont par une conduite unique. La conduite d'amenée est équipée d'un débitmètre électromagnétique permettant la mesure du débit. La mèche est réalisée par l'empilement, sur une longueur  $L_m$ , d'enrochements maintenus par deux grilles, à l'amont et à l'aval de la mèche.



Figure1: Vue du canal construit au laboratoire de l'INAT [7]

Dans cette étude, quatre types de mèches, numérotées, de I à IV, ont été expérimentées, avec quatre différentes tailles d'enrochements (fig.2). Les paramètres caractéristiques de chaque mèche, taille  $d$  des enrochements, porosité  $n$  et longueur  $L_m$  de la mèche sont indiquées dans le tableau 1. Pour chaque type de mèche, trois essais correspondant à trois débits différents, voir tableau1, ont été mis en œuvre. Chaque essai a donné lieu à un relevé de la ligne d'eau le long de

la mèche par mesure directe du tirant d'eau  $h$  sur une des parois latérales du canal. L'ensemble de ces essais a été réalisé avec la même pente du canal  $I=0.05$ . Les points mesurés, représentatifs de l'évolution  $h(x)$  de la surface libre, sont regroupés sur les figures 3. Ces résultats expérimentaux ont été utilisés pour tester des modèles de perte de charge dans la mèche à partir de simulations numériques de la ligne d'eau [7].

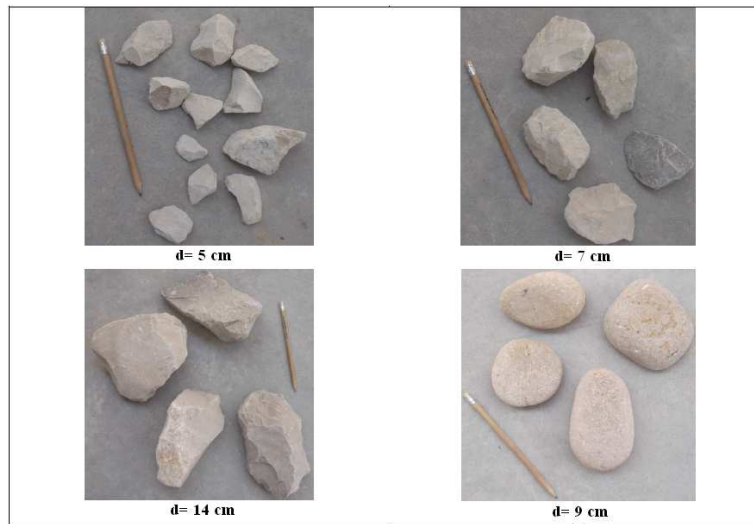


Figure 2: différentes tailles d'enrochements utilisés

N° mèche	d (m)	n	L <sub>m</sub> (m)	N° essai	Q l/s	hc (m)	h <sub>0</sub>	K <sub>t</sub>
I	0.07	0.496	5	I-1	8.27	0.03538	0.222	4.000
				I-2	18.04	0.05951	0.44	4.000
				I-3	22.6	0.06915	0.483	4.000
II	0.09	0.426	2	II-1	8.151	0.03878	0.175	2.800
				II-2	17.8	0.06527	0.323	2.800
				II-3	24.58	0.08094	0.411	2.800
III	0.14	0.528	3	III-1	8.7	0.0351	0.14655	3.715
				III-2	16.9	0.05465	0.263	3.715
				III-3	24.7	0.07038	0.3585	3.715
IV	0.05	0.485	3	IV-1	8.2	0.03571	0.276	5.300
				IV-2	17.4	0.05896	0.492	5.300
				IV-3	25.6	0.07628	0.63	4.900

Tableau 1: Valeurs des paramètres relatifs aux expériences réalisées à l'INAT.

### 3. Equation de la ligne d'eau

Les écoulements dans les cours d'eau enterrés sont modélisés dans le cadre de l'approche intégrale de Saint Venant comme pour les écoulements à surface libre en régime graduellement varié [11]. L'équation de la ligne d'eau  $h(x)$  en écoulement permanent, graduellement varié dans un canal de pente  $I$ , de section constante  $S$  s'écrit [3] :

$$\frac{dh}{dx} = \frac{I - j}{1 - F_r^2} \quad (1)$$

où le nombre de Froude est défini par :

$$F_r = \frac{Q}{S} \sqrt{\frac{B}{gS}}$$

$j$  est le gradient hydraulique, pente de la ligne d'énergie,

$h$  est le tirant d'eau, hauteur de la surface libre par rapport au fond du canal,  $x$  est l'abscisse le long du fond du canal, avec son origine à l'entrée de la mèche,  $B$  est la largeur au miroir. Pour un canal de section rectangulaire considéré par la suite,  $B$  est la largeur du canal et  $S=B h$ . Le nombre de

Froude s'exprime alors par : 
$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$

Dans le cas des écoulements graduellement variés dans les enrochements, l'expression (1) de la ligne d'eau reste valable. La vitesse caractérisant l'énergie cinétique, dans ce cas, étant la vitesse

interstitielle  $V_p = \frac{V}{n}$  dans les pores, et le nombre de Froude correspondant devient :

$$Fr_p = \frac{V_p}{\sqrt{gh}} = \frac{V}{n\sqrt{gh}} \quad (2)$$

Les équations (1) et (2) doivent être complétées par un modèle de perte de charge, forcément non linéaire compte tenu des valeurs du nombre de

$$Reynolds R_{cp} = \frac{V_p d}{\nu} = \frac{V d}{n \nu} > 1000$$

Différentes relations ont été proposées par plusieurs auteurs dans la littérature, pour décrire la circulation du fluide à travers les enrochements. L'équation de Stephenson est parmi les plus utilisées [4].

#### 4. Perte de charge non linéaire

Sous l'effet de la grande tortuosité des chemins d'écoulements à travers les pierres, et l'existence d'importantes résistances locales, il y a apparition d'une inertie engendrant un écoulement rotationnel multidirectionnel à travers le milieu [14]. Ceci conduit à exprimer une relation non-linéaire entre le gradient hydraulique  $j$  et la vitesse d'écoulement [8] [11].

Pour décrire les écoulements en milieu poreux n'obéissant pas à la loi de Darcy, deux types de lois de perte de charge ont été proposées. L'une est de type quadratique et l'autre de type loi de puissance [5] :

$$j = A_1 V + A_2 V^2 \quad (3)$$

$$j = A_3 V^w \quad (4)$$

où  $w$   $A_1$   $A_2$   $A_3$  sont des constantes dépendant des propriétés du milieu rocheux, et de l'écoulement.

L'équation (3) est dite de Forchheimer (1901), et l'équation (4) est connue sous le nom de l'équation d'Izbash (1931).

Sur la base de l'équation de Forchheimer, Venkataraman et Rama Mohan Rao (1998) [10] ont cherché les limites entre l'écoulement laminaire et écoulement turbulent.

Les écoulements turbulents sont les plus rencontrés. Dans ces conditions d'écoulement, les valeurs de  $A_1$  et  $A_2$  (paramètres de Forchheimer) ne sont pas nulles. Lorsque  $A_1=0$  et  $w=2$ , les deux formulations sont équivalentes [5] [6].

La formulation de la loi quadratique de Forchheimer est la suivante :

$$j = \underbrace{\frac{v}{gk}}_{D_L} V + \underbrace{\frac{c}{g\sqrt{k}}}_{D_T} V^2 \quad (5)$$

$c$  est un coefficient de frottement sur les grains,  $D_L$  et  $D_T$  représentent les contributions laminaire et turbulente de la résistance à l'écoulement.

Quand  $D_T=0$ , l'équation (5) devient équivalente à l'équation de Darcy.

L'équation de Stephenson appartient à la deuxième catégorie. Par analogie avec les écoulements dans les conduites, Stephenson (1979) a proposé la relation suivante reliant la vitesse au gradient hydraulique [3]:

$$j = \frac{k_{st}}{gd} \left( \frac{V}{n} \right)^2 \quad (6)$$

où

$K_{st}$  : coefficient empirique de Stephenson

$K_{st} = (800/Re) + K_t$ , avec  $K_t$  un coefficient qui tient compte de l'angularité des particules, et variant de 1 à 4 pour des pierres concassées sphériques à des pierres angulaires.

#### 5. Modélisation et simulations

La méthode numérique utilisée consiste à intégrer l'équation de l'écoulement à surface libre au niveau des sections successives, en commençant par le niveau d'eau connu. Les conditions aux limites sont imposées soit à l'entrée de la mèche :

$$x = 0, \quad h = h_0 \quad (7-a)$$

Soit à l'extrémité aval :

$$x = L_m, \quad h = h_1 \quad (7-b)$$

Notons que les écoulements étudiés dans nos expériences sont toujours en régime fluvial :

$$h > h_c \quad \text{pour } 0 \leq x \leq L_m \quad (8)$$

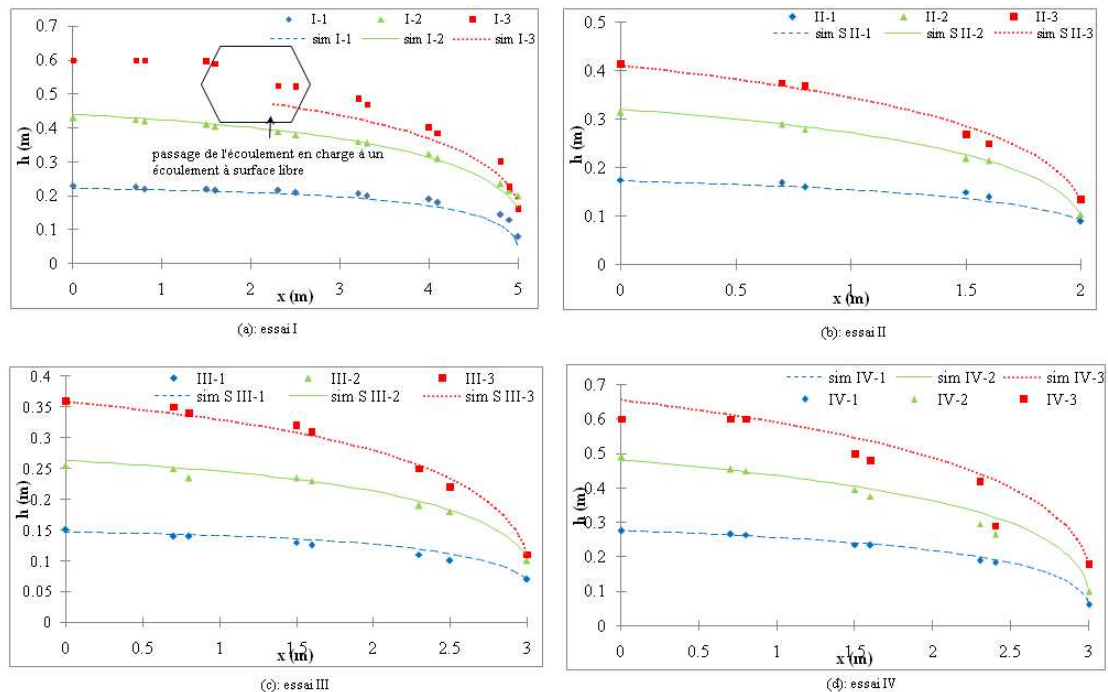
où  $h_c = \left( \frac{q^2}{gn} \right)^{1/3}$  est la hauteur critique

Le but des simulations des expériences est d'évaluer la validité de la loi de Stephenson, en déterminant la constante d'angularité  $K_t$ . Nous avons adopté, comme condition aux limites, soit la valeur expérimentale du tirant d'eau à la sortie de la mèche, soit sa valeur à l'entrée. Notons cependant que les deux démarches ne sont pas forcément équivalentes. En effet à l'aval, la pente de la surface libre augmente sensiblement ; ceci limite la validité de l'équation (1) fondée sur l'hypothèse d'écoulement graduellement varié. Par contre, cette hypothèse est mieux vérifiée dans la zone d'entrée de la mèche. Mais dans cette zone,

l'écoulement est très sensible aux petites variations de  $h_0$ . Après plusieurs essais, nous avons estimé que les simulations à partir de l'entrée de la mèche, en ajustant éventuellement la valeur de  $h_0$ , étaient les plus appropriées pour

tester la loi de perte de charge [7].

La résolution est réalisée à l'aide d'outils spécifiques par matlab, telle que la fonction ODE45. Les résultats des simulations des quatre essais sont présentés sur la figure suivante :



**Figure 3 :** Profils des hauteurs d'eau observés et simulés pour les essais réalisés.

Les résultats, obtenus avec la même valeur de la constante d'angularité  $K_t=4$  pour le premier essai appellent trois remarques :

- La simulation des essais I-1 et I-2 est tout à fait satisfaisante sur la majeure partie de la mèche.
- La simulation de l'essai I-3 ne peut rendre compte de l'évolution de la ligne d'eau suivant son premier tiers car l'écoulement est en charge et le modèle ne s'applique pas dans ces conditions à l'exception de la partie aval de la mèche.
- Notons enfin que pour les trois expériences, on ne rend pas compte des brusques décroissances de la ligne d'eau à l'extrémité de la mèche.

La figure 3-b regroupe les résultats expérimentaux et numériques de l'essai II.

Pour les trois expériences correspondant aux débits 8.151 l/s, 17.80 l/s, 24.58 l/s, l'on obtient un lissage satisfaisant des résultats expérimentaux avec la même valeur de la constante d'angularité  $K_t=2.8$ . Ce résultat est conforme aux indications de la littérature lorsque les enrochements sont beaucoup plus lisses ce qui est le cas de l'essai II. Pour les trois courbes correspondant aux trois débits, 8.7 l/s, 16.9 l/s, 24.7 l/s, dans le cas du troisième essai (fig 3-c) l'évolution des lignes d'eau est bien reproduite avec la valeur  $K_t=3.715$ ,

proche de la valeur  $K_t=4$  de l'essai I, la mèche étant plus courte dans l'essai III.

Dans le cas du quatrième essai (fig 3-d) on a obtenu de bons résultats pour le débit  $Q_1$  de 8.2 l/s, et pour le deuxième débit  $Q_2$  de 17.4 l/s, on remarque un faible décalage de 0.05 m vers la sortie de l'enrochement. D'autre part pour le débit  $Q_3$  (25.4 l/s), on obtient un écoulement en charge juste à l'entrée de la mèche, et les courbes représentatives des résultats expérimentaux et numériques, montrent un décalage de 0.05m au début de la mèche. Le coefficient d'angularité pour ces enrochements varie d'un essai à l'autre, en effet pour chaque débit ce coefficient est  $kt_{4-1}=5.3$ ,  $kt_{4-2}=5.3$ ,  $kt_{4-3}=4.9$ .

## 6. Conclusion

L'examen des résultats expérimentaux et numériques que nous venons de présenter montre que la loi de Stephenson permet de reproduire l'évolution de la surface libre sur toute la longueur de la mèche à l'exception du voisinage immédiat de la section de sortie, à condition d'ajuster les valeurs de la constante d'angularité. Nous constatons également, que les valeurs de la constante  $K_t$  sont invariantes pour chaque série

d'essais, à trois débits différents, mais pour une même longueur de mèche, et même arrangement des enrochements (même porosité  $n$  et même longueur caractéristique  $d$ , et en principe même angularité). Pour chacune de ces séries on a trouvé les valeurs de  $K_t$  suivantes :

Essai I :  $K_t=4$ , Essai III :  $K_t=3.715$ , Essai IV :  $K_t=4.9$  à  $5.3$

Ces valeurs sont très proches de la valeur standard  $K_t=4$  proposée dans la littérature pour des enrochements présentant de fortes irrégularités angulaires. Cette constante  $K_t$  n'apparaît pas cependant comme une constante universelle et des prolongements de cette étude devront s'attacher à mieux modéliser les effets de la forme des enrochements sur la perte de charge. Notons enfin que l'essai II conduit à une valeur de  $K_t=2.8$ , ce qui correspond à une forme beaucoup plus lisse des enrochements. Notons bien cependant qu'il s'agit de conclusions tirées d'expériences à pente du canal fixée à 5%, et les essais à venir permettront d'élargir le champ de ces conclusions.

### Remerciements

Nous tenons à remercier les responsables de Mecater, en particulier Messieurs Samir Ennour, et Okba Boughanmi. Nous remercions aussi, Mr Elies Hamza (professeur et directeur de l'INAT) pour le soutien qu'il a apporté à la réalisation du canal expérimental, et Mr Lucien Masbernat (professeur à l'INP Toulouse) pour ses critiques constructives et ses riches idées, ainsi que notre collègue Karem Saad pour son aide précieuse concernant le déroulement des expériences.

### Nomenclature

$Q$  : débit d'écoulement ( $m^3/s$ )

$A$  : section d'écoulement  $m^2$

$j$  : gradient hydraulique

$V$  : vitesse moyenne de l'écoulement ( $m/s$ )

$L$  : longueur caractéristique ( $m$ )

$\nu$  : viscosité cinématique ( $m^2/s$ )

$Re$  : nombre de Reynolds

$d$  : diamètre moyen des particules ( $m$ )

$n$  : la porosité

$K_t$  : coefficient d'angularité de Stephenson

$K_{st}$  : coefficient empirique de Stephenson

$g$  : accélération de la pesanteur ( $m/s^2$ )

$x$  : distance le long de canal ( $m$ )

$h$  : hauteur de l'eau ( $m$ )

$h_c$  : hauteur critique ( $m$ )

$h_0$  : la hauteur initiale à l'entrée de la mèche ( $m$ )

$I$  : pente du canal

$B$  : largeur du canal ( $m$ )

$Fr_p$  : nombre de Froude dans les pores.

$W, A_1, A_2, A_3$  : des constantes dépendantes des propriétés du milieu rocheux et de l'écoulement.

### Références

[1] A. Sobieski, "Darcy and Forchheimer laws in experimental and simulation studies of flow through porous media", Polycopié de cours, pp. 1-21

[2] C. Bordier, D. Zimmer, "drainage equations and non-darcian modeling in coarse porous media or geosynthetic materials", Journal of Hydrology., 228 (2000) 174-187.

[3] D. Stephenson, "Rockfill in hydraulic engineering", Amsterdam (1979).

[4] J. R. Dubin, "On gradually varied flow profiles in rectangular open channels", Journal of Hydraulic Research, 37 (1999) 99 – 106.

[5] K. Michioku, S. Maeno, T. Furusawa, M. Haneda, "Discharge through a permeable rubble mound weir", Journal of Hydraulic Engineering, 131 (2005) 1-10.

[6] M. Corquodale, J.A. Hannom, and M. S. Nasser, "hydraulic conductivity of rockfill", Journal of Hydraulic Research., 16 (1978) 123-137.

[7] M. Jouini, "Etude des écoulements dans une mèche en pierres en canal", Mastère de l'Institut National Agronomique de Tunis, (2012).

[8] M. Morris, "the flow of fluids through porous media", Journal of Apply Physics, 8 (1973) 274-282.

[9] P. Basak, "Steady non-Darcian Seepage through embankments", Journal of Irrigation and Drainage., 102 (1976) 435-443.

[10] P. Venkataman, P. R. M. Rao, darcian, "transitional and turbulent flow through porous media", Journal of Hydraulic Engineering., 124 (1998) 840-846.

[11] Bari, D. Hansen, "Application of gradually-varied flow algorithms to simulate buried streams", Journal of Hydraulic Research., 40 (2002) 673-683.

[12] Bari, D. Hansen, "Uncertainty in water surface profile of buried stream flowing under coarse material", Journal of Hydraulic Engineering., 128 (2002) 761-772.

[13] R. Nazemi, S. M. Hosseini, M. R. Akbarzadeh, "Soft computing-based nonlinear fusion algorithms for describing non-Darcy flow in porous media", Journal of Hydraulic Research., 44 (2006) 269 – 282.

[14] Pagliara, I. Lotti, "Surface and subsurface flow through block ramps", Journal of Irrigation and Drainage Engineering., 135 (2009) 366-374.

[15] R. Abt, J. F. Ruff, R. J. Wittier, "Estimating flow through riprap", Journal of Hydraulic Research, 117 (1991) 670-675.

[16] V. T. Chow, "Open Channel Hydraulics", New York (195).