



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE HADJ LAKHDAR –BATNA

Institut de Génie Civil, d'Hydraulique et d'Architecture

Département d'hydraulique

Mémoire de Magister en Hydraulique

Option : Hydraulique Numérique et Environnement

Présenté par :

Mr. YOUB Saïd

Pour obtenir le diplôme de Magister en Hydraulique

Thème

CARACTERISTIQUES STATISTIQUES DE LA RUGOSITE DU FOND ET RESISTANCES HYDRAULIQUES DES CANAUX OUVERTS

Sous la direction de : D^r FOURAR Ali

Mémoire soutenu le : 19/04/2012

Devant le jury composé de :

Jury	Grade	Affiliation	Qualité
Dr. BOUDOUKHA Abderrahmane	Prof	Univ.Batna	Président
Dr. FOURAR Ali	MC	Univ.Batna	Rapporteur
Dr. KADID Abdelkrim	MC.	Univ.Batna	Examineur
Dr. BENKHALED Abdelkader	MC	Univ.Biskra	Examineur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

إهداء

إلى أمي نبع الرحمة والحنان

إلى والدي رمز الكفاح والعطاء

إلى إخوتي وأخواتي الأعمام

إلى زوجتي وأبنائي الأحياء

إلى كل أستاذ علمني ولو حرفاً

إلى كل من ساندني ولو بكلمة طيبة

إلى كل هؤلاء أهدي ثمرة جهدي واجتهادي ، من خلال عملي المتواصل
والدؤوب لإنجاز هذا البحث الذي أسأل الله تعالى أن يتقبله مني ، وأن يجعله
ذخراً لي في دنياي وأخرتي .

وأخيراً أقول للجميع ، من قريب أو من بعيد : جزاكم الله خيراً الجزاء .

Remerciements

Tout d'abord Je remercie Dieu tout puissant qui m'a donné la volonté, la patience, le courage pour achever ce travail.

Je remercie en second mes parents, qui ont sacrifiés leur vie pour notre bien.

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude à **Dr.Fourar Ali** qui a assuré la direction de ce mémoire. Je le remercie pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de la durée de ce travail, pour ses précieux conseils, et sa disponibilité.*

En fin, j'adresse mes sincères remerciements, reconnaissances et gratitudes à tous mes enseignants.

Je tiens aussi à remercier également le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Sommaire

Introduction générale	01
-----------------------------	----

CHAPITRE I: CARACTERISTIQUES STATISTIQUES DE LA RUGOSITE DU FOND

1) - Définitions Et Quantification De La Rugosité -Aspect Bibliographique

1-1 Introduction et problématique	03
1-2 Définitions et caractéristiques de la rugosité	03
1-3 Les techniques de mesures de la rugosité	04
1-4 Paramètres de la Rugosité.....	05
1.5. Approches Statistiques Pour La Détermination De La Rugosité	07
1-6 Paramètres de la Rugosités dans les canaux à ciel ouvert.....	11
1.6.1. Rugosités dans les canaux artificiels	13
1.6.2. Rugosités dans les cours d'eau naturels	14

CHAPITRE II : ETUDE DE LA RESISTANCE HYDRAULIQUE DES CANAUX A CIEL OUVERTS

2.1. Introduction –contexte générale	16
2.2. Historique de l'étude de la résistance hydraulique	17
2.3. Programme de calcul de coefficient de la résistance Hydraulique	22

CHAPITRE III : REVUE SUR LES ECOULEMENTS A CIEL OUVERT

3.1. Introduction.....	28
3.2. Revue Sur Les Ecoulements A Ciel Ouvert	29
3.2.1. Ecoulement d'eau Sur Fond lisse	29
3.2.8 Ecoulements sur Fond Rugueux	34
3-2-11 Spécificités des écoulements à forte pente.....	40

CHAPITRE 4: APPLICATION AUX PROBLEMES DE L'ÉCOULEMENT A SURFACE LIBRE PAR MODELISATION NUMERIQUE. FLUENT

4.1. Introduction.....	42
4.2. Présentation du code de calcul.....	43
4-3. Application expérimentale.....	44
4- 4. Caractéristiques hydrodynamiques de l'écoulement étudié.....	44
4- 5. Modélisation mathématique.....	45
4- 6. Modélisation Numérique.....	47
Chapitre V : Résultats et interprétations.....	56
1 ^{er} cas Ecoulement rugueux.....	56
2 ^{er} cas Ecoulement transitoire.....	61
3 ^{er} cas Ecoulement lisse.....	66
4 ^{er} cas Ecoulement avec rapport du creux $K_s/L_{\text{creux}}=0.83$	70
Conclusion générale.....	76
Références Bibliographiques	77

Introduction générale :

La rugosité d'une surface est un paramètre déterminant dans les équations de mouvement ; particulièrement dans le cas de l'existence des forces de frottement, et son caractère statistique représente une grande difficulté pour sa quantification.

Ceci est à cause de l'aspect insolite des statistiques qui représente, à ce jour, un écueil pour le praticien.

Dans le domaine des écoulements à surface libre, les équations du mouvement imposent la connaissance d'un coefficient de perte de charge pour leur résolution, ce coefficient est le seul paramètre inconnu du modèle et la qualité de son estimation influence directement la qualité finale des résultats. La formulation de ce coefficient fait très souvent recours aux expressions de CHEZY, de MANNING-STRICKLER, couramment utilisées dans le domaine de constructions hydrauliques.

Pour permettre une description plus réaliste des écoulements à surface libre et ainsi améliorer la qualité des modèles numériques, des recherches fondamentales ont été entreprises par différents chercheurs afin de déterminer l'influence des différents paramètres intervenants dans ce processus ; parmi les quelles on cite les travaux expérimentaux et de modélisation qui ont été consacrés à l'étude des écoulements en présence de variations de la rugosité, ces travaux montrent bien le rôle que jouent les interactions de la paroi et de la surface libre sur la génération des écoulements secondaires. Ces travaux soulignent également les difficultés qui existent encore au niveau de la modélisation qui ne peut progresser qu'en s'appuyant sur de nouvelles expériences. [1]

Ce travail présente une contribution à l'étude des écoulements à surface libre en présence de variations de la rugosité et a pour objectifs :

- ✚ Etudier les différentes méthodes pour quantifier la rugosité en particulier les méthodes statistiques.
- ✚ Etudier l'influence de la rugosité du fond sur l'écoulement à ciel ouvert en utilisant le code Fluent dans la simulation numérique.
- ✚ Quantifier l'impact de la rugosité d'un canal sur les conditions d'écoulement.

ORGANISATION DU TRAVAIL

L'approche suivie pour atteindre ces objectifs est présentée comme suite :

La première partie de ce document est consacrée à l'étude théorique de la rugosité du fond, en commençant par un chapitre (le chapitre (1) ayant trait aux définitions des concepts de base, à la présentation des techniques permettant de mettre en évidence cette rugosité et à l'étude bibliographique des différentes approches existantes pour quantifier la rugosité, en particulier l'approche statistique.

La deuxième partie (chapitre 2) sera consacrée quant à elle, à l'étude théorique de La résistance hydraulique dans les conduites et canaux à ciel ouvert. A la fin de ce chapitre, nous présentons un programme informatique élaboré pour calculer le coefficient de résistance hydraulique dans les canaux ouvert, en utilisant la méthode des approximations successives.

Finalement pour quantifier l'impact de la rugosité d'un canal sur les conditions d'écoulement, nous avons utilisé une application en précédant ceci par un chapitre (le chapitre 3) qui est consacré donc aux généralités liées à l'écoulement dans les canaux ouverts, en insistant sur le cas d'un fond rugueux. Dans le chapitre 4, nous présentons cette Application et sa modélisation mathématique et numérique en utilisant le code Fluent. Dans le chapitre 5, nous présentons les résultats obtenues de cette application et leurs interprétations en le comparant à un travail expérimental utilisé pour la réalisation de tests d'écoulement dans un fond rugueux. Enfin une synthèse des principales conclusions qui peuvent être tirée de ce travail.

CHAPITRE I: CARACTERISTIQUES STATISTIQUES DE LA RUGOSITE DU FOND

1) - Définitions et quantification de la rugosité - Aspect bibliographique -

1-1 Introduction et problématique:

Les pertes de charges (ou pertes d'énergie) est due aux frottements des molécules entre elles d'une part, et entre la surface du dispositif qui guide le courant liquide d'autre part. Dans notre travail on va s'intéresser au deuxième point qui cause les pertes de charge qui est la rugosité.

La quantification de la rugosité n'est pas facile, parce qu'elle est déterminée en fonction de plusieurs paramètres de caractère statistique. En générale sont des grandeurs aléatoires qui varient dans l'espace (Tridimensionnelle) et dans le temps (âge).

Ainsi, nous notons que la rugosité du fond et la rugosité des parois ne sont généralement pas identiques.

Dans une première partie de ce chapitre on va présenter la notion de la rugosité ainsi qu'une étude bibliographique des principales méthodes existantes pour la caractériser dans un but de cerner le problème dans tous ses cotés, nous présentons ensuite l'approche statistique de mesure pour la détermination du coefficient de la rugosité.

1-2 Définitions et caractéristiques de la rugosité:

D'une manière générale, on définit la rugosité comme l'état d'une surface présentant des aspérités (Dictionnaire Larousse, 2006).

Dans la littérature ; « Une surface rugueuse implique un état de surface tel que ces irrégularités ont une action directe sur les forces de frottement. ». « une surface rugueuse peut être considérée comme étant constituée par une série de protubérances élémentaires ». [2]

Cette définition montre qu'on ne peut prendre en considération la rugosité qu'au-delà d'un certain degré de grandeur (hauteur k) ou la configuration de la surface peut influencer sur la résistance à l'écoulement, cette grandeur représente le premier paramètre caractéristique de la rugosité. Ce paramètre a un caractère statistique, vu sa variation dans l'espace (Tridimensionnelle) et dans le temps (âge de la surface rugueuse).

Le deuxième paramètre c'est la relativité de cette grandeur par rapport aux dimensions géométriques de la surface, appelé rugosité relative.

Le troisième paramètre c'est la forme des protubérances; chaque forme géométrique de ces protubérances influe sur l'écoulement d'une façon différente.

Le quatrième paramètre c'est la répartition des protubérances sur la surface cela peut se présenter sous deux cas :

- Une répartition homogène (artificielle).
- Une répartition hétérogène ou inhomogène (dans la nature) ; c-a-dire des protubérances irrégulièrement distribuées.

En pratique la rugosité homogène n'existe pas, mais on fait souvent recours à cette dernière en introduisant la notion de la rugosité équivalente au diamètre de grains utilisés dans l'expérience de NUKARADSE. « En pratique, pour les conduites industrielles, le paramètre Ra est obtenu par équivalence en comparant les pertes de charges mesurées sur une conduite à celles obtenues dans le cas d'essai de Nikuradse (rugosité calibrée). » [3]

La mesure de la rugosité est très délicate. En effet, dans la littérature, le terme « rugosité » est également utilisé pour représenter les paramètres qui décrivent qualitativement ou quantitativement le caractère irrégulier d'une surface ; qui est majoritairement un caractère statistique.

A cet effet, Le facteur essentiel de la rugosité dépend :

- de la hauteur moyenne des aspérités,
- des variations de hauteurs par rapport à la hauteur moyenne,
- de la forme et de la répartition des aspérités
- l'écart-type σ sur les hauteurs d'aspérité.

1-3 Les techniques de mesures de la rugosité :

Il existe plusieurs techniques pour mesurer la rugosité des surfaces. Dans le domaine de la métallurgie et de la mécanique pour la caractérisation de surfaces d'éléments mécaniques, on utilise les profilomètres à un système de palpeur, ou à un système optique permettant une mesure des hauteurs d'aspérités sans contact. Il existe aussi des techniques de mesure en utilisant la technologie de LASER qui ont une très grande précision (de l'ordre du μm). D'autres techniques optiques utilisant l'interférométrie permettent une précision meilleure encore. On trouve également des techniques de microtopographie optique (où le profil est obtenu grâce à la combinaison d'observations à profondeur de champs variable et à l'application des techniques de traitement d'image ou des profilomètres utilisant les rayons X. Tous ces méthodes sont à présent harmonisés grâce à des normes internationales (ISO 4287, 1302 et 12085 ou DIN 4761, 4762 et 4768 par exemple).

1-4 Paramètres de la Rugosité

Dans le domaine d'hydraulique d'autres paramètres qui sortent du cadre des normes citées ci-dessus continuent à être étudiés ; on peut les classer dans deux types :

1. Paramètres de la rugosité dans les conduites en charges.
2. Paramètres de la rugosité dans les canaux à ciel ouverts.

La rugosité des conduites est un facteur déterminant dans le choix des matières de tuyaux lors de l'étude d'un réseau hydraulique ou aéraulique.

Pour des raisons pratiques de calcul son unité varie suivant les applications :

- Pour l'étude des pertes de charges dans les conduites et des plaques planes nous utiliserons la profondeur moyenne de rugosité en millimètres (k). C'est la moyenne des distances saillies-creux des défauts de surfaces constitués par des stries, sillons, arrachement ou fentes.
- Les formules d'évaluation du régime d'écoulement (voir COLEBROOK) utilisent un rapport de la rugosité moyenne(k) sur le diamètre(D) des conduits appelé rugosité relative (D et R dans la même unité): k/D
- On utilise parfois un rapport de rugosité constitué de grains de sables dont le diamètre est comparé à l'épaisseur de la couche laminaire d'écoulement sur une plaque plane. Il est constaté que lorsque ce rapport dépasse 0.5 la rugosité commence à jouer un rôle déterminant dans la résistance de frottement sur plaque plane.

Exemples de rugosités de conduites de réseaux hydrauliques:

Table 1-1: Table de rugosités de quelques conduites en fonction de leur état ou nombres d'années de service

Nature du matériau	K (mm)	Etat
Acier soudé	0,04	Neufs
Tuyaux en acier soudé	0,05	Neufs, revêtus de bitume
Tuyaux en acier soudé	0,1	Depuis longtemps en service, le bitume partiellement disparue.
Tuyaux en acier soudé	0,15	Depuis longtemps en service, corrosion uniforme
Tuyaux en acier soudé	0,3 à 0,4	Sans inégalités notables aux joints ; intérieurement enduits (épaisseur de la couche: 10 mm) ; mauvais état
Tuyaux en acier soudé	0,5	Conduites principales de gaz, après de nombreuses années d'exploitation
Tuyaux en acier soudé	0,6 à 0,7	Avec rivure transversale simple ou double ; enduits intérieurement, ou sans revêtement, mais non corrodés
Tuyaux en acier soudé	0,95 à 1	Enduits intérieurement, mais non exempts d'oxydation ; encrassés au cours du service avec de l'eau, mais non corrodés
Tuyaux en acier soudé	1,1	Conduites principales de gaz, après 20 ans de service, dépôts stratifiés.
Tuyaux en acier soudé	1,2 à 1,5	Avec double rivure transversale, non corrodés; encrassés en cours de service avec de l'eau
Tuyaux en acier soudé	1,5	Dépôts faibles

Table 1-2:Table de rugosités de quelques conduites en fonction de la nature du matériau des canalisations corrodables et/ou dépôts possibles

Nature du matériau	k (mm)	Nature	k (mm)
Acier neuf	0,05	Béton neuf centrifugé)	0,04
revêtement plastique et lisse non poreux	0,03	moules lisses	0,4
	0,03	moules grossiers	2,0
Fonte neuve	0,5	Fibrociment neuf	0,06
revêtement bitume	0,12		
revêtement ciment	0,07		
Aluminium neuf	0,02	Grès vernissé	0,08
Cuivre et Plomb neuf	0,01	Plastique	0,002
Laiton	0,003	Bois	0,3

Table 1-3:Table de rugosités de quelques conduites en fonction de la nature d'eaux [21]

Contenant	k (mm)
Eaux filtrées, pratiquement à l'équilibre	0,50
Eaux brutes peu chargées, non chlorées	1,00
Eaux chargées ou corrosives, ou agressives (ou incrustantes)	2,00

Nous remarquons que la rugosité varie en fonction de l'âge de la conduite, de la nature du matériau et de la nature d'eaux et sa valeur est une moyenne de plusieurs prélèvements ; nous présentons ci-dessus l'approche statistique pour déterminer cette moyenne :

1-5 Approches statistiques pour la détermination de la rugosité:

« Une surface rugueuse peut être considérée comme un phénomène aléatoire. L'approche statistique est dès lors souvent utilisée pour étudier et modéliser la rugosité. Dans la littérature, on trouve, d'une part les paramètres basés sur la détermination de valeurs moyennes mesurées sur le profil (par exemple, la hauteur moyenne des pics) et, d'autre part les paramètres caractérisant la distribution statistique des hauteurs de pics. »[4]

Pour caractériser cette grandeur, on emploie plusieurs de paramètres tels que R_p , R_a , R_{max} Comme le montre le schéma ci-dessus :

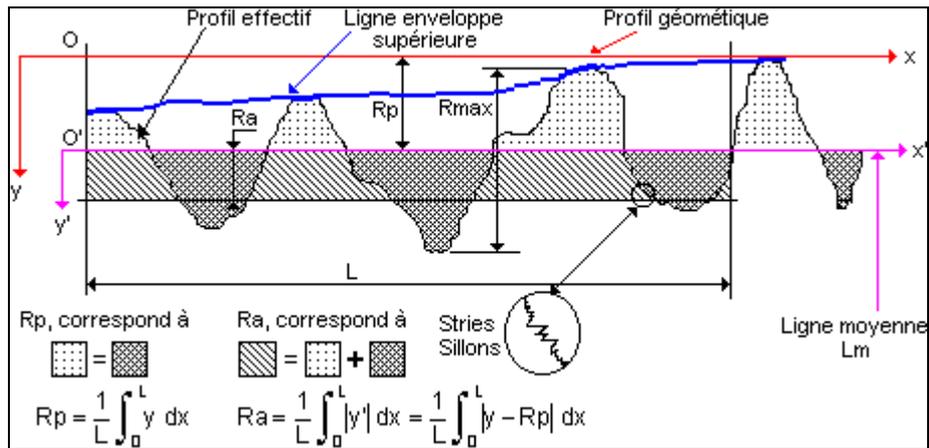


Figure 1-1 : paramètres de la mesure de la rugosité

D’où :

Ra : Rugosité moyenne arithmétique : Moyenne arithmétique de toutes les distances absolues du profil de rugosité R mesurée à partir de la ligne médiane du profil sur la longueur d’évaluation L, calculée par la formule : $Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y - R_p| \, dx$

Rp : Hauteur maximale des pics : Hauteur maximale du profil de rugosité R au-dessus de la ligne moyenne sur la longueur d’évaluation L ; calculée par la formule :

$$R_p = \frac{1}{L} \int_0^L y \, dx$$

Rmax Rugosité Maximale : Ecart vertical entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil de rugosité R, sur la longueur totale d’évaluation L.

Mais nous signalons qu’aucun de ces caractéristiques n’est plus pertinent qu’un autre, tout dépend de l’application que l’on veut en faire. [5]

1-5-1 Paramètres étudiés et fiabilité de leur estimation

Les trois paramètres statistiques R_a , R_p , R_{max} ont le grand avantage d’être calculables facilement et de manière très systématique. Les résultats expérimentaux montrent qu’ils possèdent en outre une assez bonne variabilité d’un type de surface à l’autre. Ils constituent historiquement le premier type de paramètres étudiés pour caractériser la rugosité. Bien que plusieurs études semblent montrer (voir notamment Greenwood et Williamson, 1966 et 1984 ; Whitehouse et Archard, 1970 ; Reeves, 1985) que l’écart-type¹ σ apporte une information complémentaire par rapport à la moyenne arithmétique des pics de rugosité R_a , les résultats expérimentaux montrent que ces deux variables (σ , R_a) sont intimement corrélées, en tout cas à l’échelle des échantillons étudiés.

Il faut cependant signaler que la moyenne arithmétique des pics de rugosité R_a , seul ne peut suffire pour représenter la complexité d'une surface. Comme on peut le voir sur la Figure 1-2 ci-dessous, à une même valeur de R_a peut correspondre une multitude de profils différents, dont la complexité peut varier énormément. Pour affiner le paramétrage statistique, une approche plus poussée est possible. (comme nous le démontrons ci-dessus § 1-5-3)

Plusieurs auteurs (Whitehouse et Archard, 1970 ; Capasso 2000) ont notamment étudié la manière dont se répartissent les pics sur une surface rugueuse (via des modèles d'auto-corrélation² de type loi normale³, loi exponentielle⁴ ou autre) en plus de l'approche traditionnelle, qui consiste à étudier la fonction de densité⁵ des hauteurs de pics. Ces modèles étant beaucoup plus délicats à manipuler (deux types de distributions statistiques à manipuler simultanément).

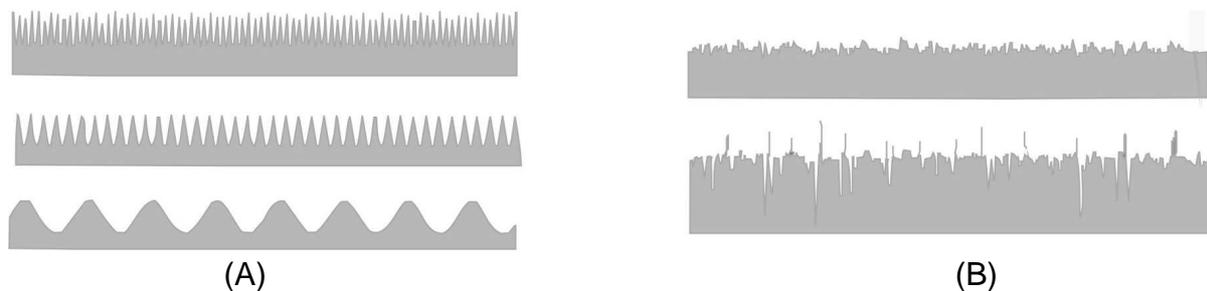


Figure 1-2 : La valeur de R_a n'est pas suffisante pour caractériser la rugosité : les 3 profils (A) ont la même valeur de R_a . Il en va de même pour les 2 profils (B).

1-5-2 Choix de paramètres pour caractériser la rugosité

Sans préjuger de l'influence de l'un ou l'autre paramètre sur l'écoulement en surface rugueuse et en tenant compte des observations reprises ci-dessus, des corrélations, des variabilités (particulièrement en fonction du type de la surface), et des fiabilités observées expérimentalement, deux paramètres apparaissent a priori comme préférentiellement intéressants pour caractériser la rugosité :

- Moyenne arithmétique de ces hauteurs
- l'écart-type sur les hauteurs d'aspérités (σ).

1-5-3 Distribution statistique des hauteurs d'aspérités

Par rapport aux paramètres décrits ci-dessus qui décrivent la magnitude de la rugosité, l'utilisation de fonctions de probabilités permet de mieux décrire la texture des surfaces. Dans la littérature, la plupart des modèles statistiques considèrent les hauteurs d'aspérité comme une variable aléatoire possédant une distribution

Gaussienne (Capasso 2000). C'est notamment le cas de Greenwood et Williamson (1966, 1984) qui montrent que même lorsque la distribution des hauteurs d'aspérité

n'est pas gaussienne⁶, la distribution des pics de la surface l'est. Leur travail était basé sur des mesures expérimentales réalisées sur des métaux mais il a tout de même servi de base pour les travaux de nombreux chercheurs (qui ont étudié l'effet de la rugosité sur le frottement).

Actuellement, une description raisonnable de procédés aléatoires, comme la topographie d'une surface rugueuse par exemple (voir carte ci-dessous)

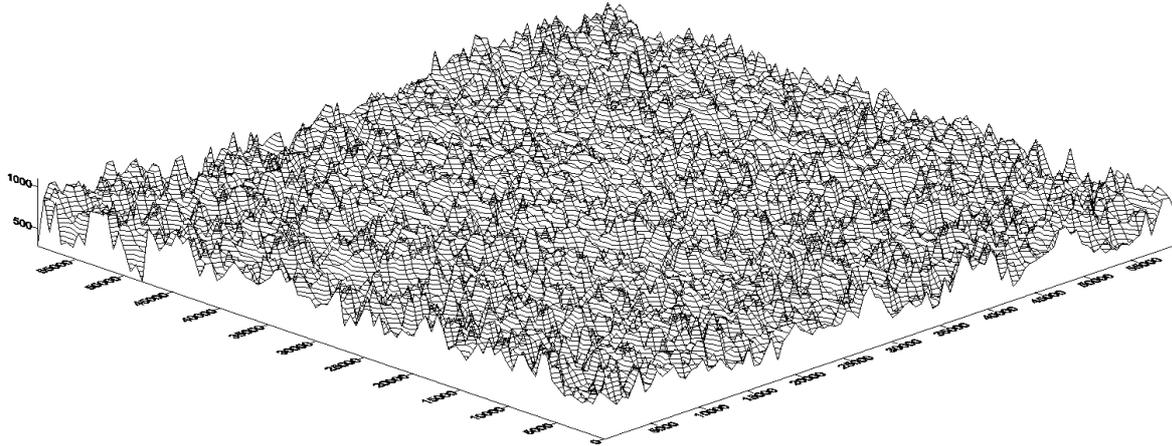


Figure 1-3 : Carte Numérique des altitudes (hauteur d'aspérités) d'un échantillon de surface tiré du parking de l'ENSHMG réalisé par un rugosimètre LASER avec une précision de 10^{-2}

Est souvent obtenue par une fonction de densité de probabilité⁷ pour les hauteurs d'aspérités et une fonction exprimant les caractéristiques de corrélation du procédé (Capasso 2000). Par exemple, Whitehouse et Archard (1970) considèrent la représentation d'une surface rugueuse comme un signal aléatoire ayant une distribution gaussienne des hauteurs et une fonction d'auto-corrélation de type exponentiel.

Brown et Scholz (1985) ont analysé en détail les mesures de topographie de surface réalisées avec des profilomètres. D'après eux, les profilométries étant linéaires, les mesures de hauteurs, courbures et nombre de maxima issus de profils, même fortement rapprochés, ne peuvent pas donner des valeurs exactes de la surface tri-dimensionnelle. Ils utilisent donc des théories de cartographie pour l'obtention d'informations tri-dimensionnelles sur la base des profils (Brown et Scholz, 1985). Ils utilisent la distribution gaussienne et la distribution de chi-carré inverse⁷ comme modèles de fonction de densité de probabilité. Il est à noter que leurs résultats expérimentaux montrent une meilleure représentation des surfaces de joint avec la distribution chi-carré inverse, qui possède en outre l'avantage d'avoir une hauteur maximale finie, alors que la distribution normale possède une probabilité finie pour des hauteurs d'aspérité tendant vers l'infini (voir Capasso, 2000).

L'utilisation de fonctions de distribution pour caractériser la rugosité a pris beaucoup d'ampleur depuis que les moyens informatiques modernes permettent la génération de surfaces par ce type de modèle à des fins de calcul numérique (étude de frottements, contacts, écoulements,...). Il faut cependant noter que l'une des raisons de l'utilisation fréquente de la distribution normale réside sans doute dans la simplification de certains aspects mathématiques des théories formulées. La prise en considération de l'écart-type σ sur les hauteurs d'aspérité, en plus de la valeur moyenne de ces hauteurs, permet d'avoir une information complémentaire sur la texture de la surface.

Signalons enfin que l'approche statistique a donné l'idée à plusieurs auteurs d'utiliser le spectre de puissance (notamment Brown et Scholz, 1985) et l'analyse géostatistique par variogramme (par exemple Roko et al., 1997) pour étudier l'auto-corrélation de ces surfaces [4]

1-5- 4 Analyse géostatistique par variogramme.

Avec l'analyse statistique conventionnelle, on ne peut pas fournir d'information sur la distribution spatiale des irrégularités et donc, sur l'homogénéité de la surface. Dans ce qui suit, on présente une nouvelle approche, utilisant la **géostatistique** qui tient compte de la localisation de chaque point de mesure de rugosité et produit **une fonction variogramme** pour chaque paramètre de rugosité. Cette fonction, caractéristique d'une surface donnée, fournit de l'information importante sur la distribution spatiale des irrégularités de la surface. [6]

Etymologiquement (l'origine du mot), le terme «géostatistique» désigne l'étude statistique des phénomènes naturels [7]

G.Matheron a été le premier à utiliser ce terme largement comme «l'application du formalisme des fonctions aléatoires à la reconnaissance et l'estimation des phénomènes naturels». [9]

Un phénomène naturel peut souvent être caractérisé par la répartition dans l'espace d'une ou plusieurs variables habituellement appelé "variables régionalisées". La distribution spatiale des "vallées" et "hauteurs" d'un profil de la surface, de la ligne moyenne est un exemple d'une variable régionalisée.

Soit $z(x)$ la valeur de la variable z au point x . Le problème est de représenter la variabilité spatiale de la fonction $z(x)$ (z en minuscules) lorsque x varie. Selon la géostatistique, chaque valeur de $z(x_i)$ est interprétée comme une réalisation particulière d'une variable aléatoire $Z(x_i)$ (Z en majuscule) au point x_i . L'ensemble de toutes ces variables aléatoires corrélés $Z(x)$ forme une fonction aléatoire.

Le problème de la caractérisation de la variabilités spatiale des $z(x)$ se réduit alors à celle de la caractérisation de la corrélation entre les différents hasards; variable

paires $Z(x_i)$ et $Z(x_j)$ qui forment la fonction aléatoire $Z(x)$. Cette approximation fondamentale est justifiée à posteriori ; si elle aboutit à une solution acceptable aux problèmes rencontrés dans la pratique.

L'ensemble de toutes les paires de corrélation d'une fonction aléatoire, tels que la variabilité dans l'espace des vallées et des hauteurs d'un profil de surface, est représentée par la fonction de covariance ou par ses fonctions variogramme équivalente $\gamma(h)$ qui est défini comme suit :

$$\gamma(h) = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\}/2 \quad (1-1)$$

Avec : $h = (\Delta i, \Delta j)$

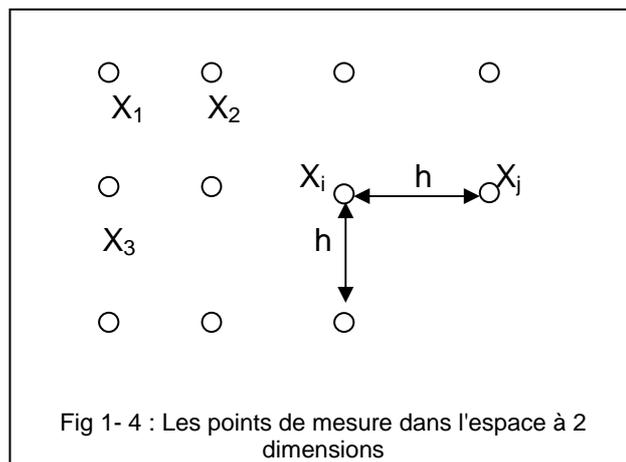
$E\{ \}$ représente l'espérance⁸ (moyenne), et h est une distance ». [5]

La fonction variogramme est l'outil fondamental dans le traitement des données géostatistiques [8], Cette fonction révèle la présence d'une «forme» quand les grandes valeurs et les petites formant des amas distinctes. Il révèle également la présence de «nuage blanc» lorsque les données considérées sont réparties de façon aléatoire dans l'espace. C'est dans le cas d'une variable homogène⁹ ou d'un phénomène.

Dans la pratique, la fonction 1 ne peut pas être estimée directement et elle est estimée donc par la fonction variogramme expérimentale. Cette fonction est calculée à partir des données de l'échantillon du variable régionalisée en utilisant approximativement la relation 1-2 où N_h est le nombre paires de points expérimentaux séparés d'une distance h . Comme cette fonction dépend directement de la distance, il est une pratique courante pour arranger les sites d'échantillonnage sur une grille régulière (Figure1-4) afin de calculer l'écart entre les multiples d'une unité de distance h .

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^{N_h} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2 \quad (1-2)$$

La figure 1-5 montre deux types caractéristiques du modèle de fonctions variogramme. Le modèle «sphérique» (dans le cas a), révèle une corrélation affaiblissement progressif entre deux valeurs de l'échantillon à une distance h jusqu'à une distance α . Au dessus de cette gamme, il n'ya pas de corrélation entre les échantillons. La valeur C_0 est appelé un "seuil". Le modèle «effet de la pépite pur » (dans le cas b), indique l'absence d'une corrélation spatiale entre les valeurs de la variable régionalisée et donc homogénéité.



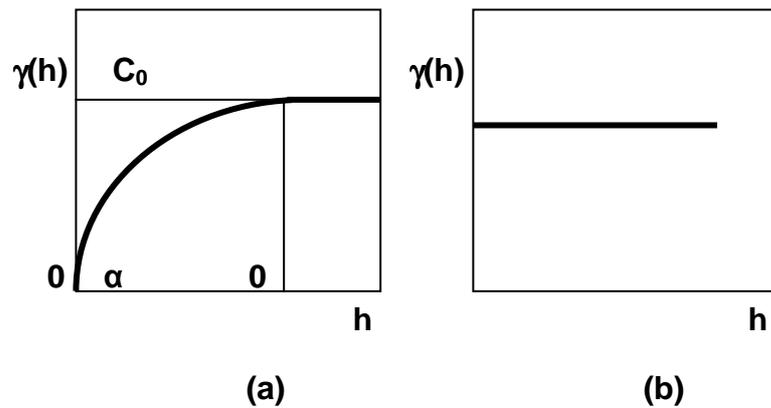


Fig 1-5 : Types caractéristiques des modèles de variogrammes

1-6 Paramètres de la Rugosité dans les canaux à ciel ouvert

Les canaux et cours d'eau sont des ouvrages hydrauliques linéaires qui transportent de l'eau à surface libre.

Les études entreprises dans ce sujet ont traité deux cas :

1. Canal artificiel
 - Canaux d'adduction
 - Canaux de restitution
 - Coursiers
 - Canaux de drainage
 - Canaux d'irrigation
 - Canaux d'évacuations des eaux de pluie et eaux usées
 - Canaux de navigation
2. Cours d'eau naturel
 - Rivières
 - Torrents

1-6-1 Rugosité dans les canaux artificiels :

« Il n'existe aucune méthode exacte qui permet d'évaluer la rugosité (k) dans les canaux. Évaluer k revient à estimer la résistance de l'écoulement dans un canal donné, ce qui nécessite beaucoup d'expérience et de pratique. » [10].

Nous citerons dans ce qui suit les résultats des expériences et des recherches d'une façon sommaire. Une étude détaillée sur le coefficient de la résistance hydraulique sera présentée dans la deuxième partie (chapitre 2).

La formule de base pour l'estimation de la résistance de l'écoulement peut être écrite sous sa forme générale suivante [10]:

$$U = C R_h^a I^b$$

où R_h : le rayon hydraulique; $R_h = \frac{I}{B}$; dont Ω : section mouillée, B : périmètre mouillé.

I : la pente de la ligne de charge,

C : un paramètre qui traduit la résistance de l'écoulement et dépend de la rugosité absolue ε des parois du canal, de la vitesse moyenne U , de R_h , de la viscosité du liquide et de beaucoup d'autres facteurs.

L'une des premières formules destinées au calcul de l'écoulement uniforme est probablement celle de **CHEZY**, correspondant à : $a = b = \frac{1}{2}$,

Le coefficient C de Chézy a été estimé par plusieurs auteurs (Ganguillet et Kutter, 1869; Bazin, 1897; Powell, 1950). Mais, la relation la plus largement utilisée pour les écoulements uniformes dans les canaux ouverts est celle de Manning (1891) en raison de sa forme simplifiée et aux résultats satisfaisants auxquels elle aboutit. Dans cette relation, $a = 2/3$ et $b = 1/2$ tandis que $C = k = 1/n$ où n est le coefficient de rugosité appelé aussi coefficient de Manning. La même forme de la relation ayant été introduite indépendamment par Strickler (1923), cette relation est souvent appelée formule de Manning-Strickler.»

D'où on peut écrire :

$$U = \frac{1}{n} R_h^{2/3} I^{1/2}$$

Les dimensions du coefficient n sont : $L^{-1/3} \cdot T$. sa valeur peut être calculée par :

$$n = \frac{R_h^{2/3} I^{1/2}}{U}$$

Les trois éléments U , R , et I peuvent être mesurés par jaugeage

Une autre relation qui servira de base à notre étude est celle de Darcy-Weisbach, initialement formulée par Weisbach (1845) et reprise par Darcy (1854) dans ses recherches expérimentales. Cette relation, développée pour les écoulements en conduites, se présente sous la forme :

$$j = f \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

où f est le coefficient de frottement, D est le diamètre de la conduite et g est l'accélération de la pesanteur. Le coefficient de frottement f dépend à la fois de la rugosité relative ε / D et du nombre de Reynolds R et la nature du régime d'écoulement dans la conduite peut être examiné à travers la variation de $f = \varphi (R, \varepsilon/D)$. Le graphique obtenu est communément appelé diagramme de Stanton (1914). Bien que la relation de Darcy-Weisbach ait été développée pour le cas des Conduites, elle est cependant applicable aux canaux ouverts, en remplaçant D par le diamètre hydraulique $D_h = 4 R_h$. [20]

1-6-2 Rugosités dans les cours d'eau naturels:

Le lit du cours d'eau est caractérisé par son instabilité dans le temps de sa rugosité et de sa morphologie. Pour estimer la rugosité des cours d'eau naturels les mêmes formules peuvent être utilisées (cas des canaux artificiels) avec un choix judicieux du coefficient de la rugosité [2]. Parmi les formules les plus utilisées nous pouvons citer deux types :

1. Formules qui tiennent compte du coefficient de rugosité (n) : parmi les plus utilisées :

- formule de MANNING-STRICKLER ;

$$C = k = \frac{1}{n} = 26 \left(\frac{R_h}{d_{35}} \right)^{1/16}$$

Dont R_h : rayon hydraulique en m

d_{35} : Diamètre en m au quel correspond 35% (en poids) de matériaux de diamètre supérieur.

n : coefficient qui dépend de la largeur du cours d'eau, la pente, et le type de matériaux constrictifs du lit du cours d'eau.

- Formule de BAZZIN ;

$$V = \frac{87 \cdot \sqrt{R_h \cdot I}}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R_h}}}$$

γ et k = constantes de rugosité des parois (voir tableau1-4).

Tableau 1-4 : Tableau des constantes γ et k

Nature des parois	k	γ
Parois très unies (enduit de ciment lissé ou bois raboté)	100	0,06
Parois avec enduit de ciment ordinaire	90	-
Parois unies (briques, pierre de taille, béton brut)	70-80	0,16
Parois peu unies (moellons)	60-70	0,46
Parois de nature mixte (talus dressés ou pierrées)	50-60	0,85

Canaux en terre (talus ordinaires)	40	1,30
Canaux en terre avec fond de galets (et parois herbeuses)	25-35	1,75

2. Formules qui ne tiennent pas compte du coefficient de rugosité (n) :
Ces formules dépendent seulement des caractères du cours d'eau (largeur superficielle, la profondeur moyenne et la pente du lit). On peut citer celles de HERMANCK (1905), GERALD Lacey (1939-40), MALHOTRA (1939-40). Ces formules ne sont pas trop utilisées à cause de leur caractère local.

Conclusion :

D'après ce qui précède, nous remarquons que les formules utilisées dans le cas des écoulements à surface libre sont moins précises à celle dans le cas des canalisations cela à cause de :

1. La forme de la section transversale des canalisations est parfaitement définie, par contre dans les canaux, elle est variable
2. La surface libre représente une résistance en plus sur la masse liquide

Les formules expérimentales de BAZZIN et de MANNING-STRICKLER sont les plus utilisées pour les canaux car elles utilisent les coefficients γ et k dont leur choix est plus commode au choix et à la détermination de ϵ . Néanmoins, ces formules sont limitées car ils résultent d'après des expériences, et sa généralisation en extrapolation n'est pas juste à 100%. Par contre les formules universelles (Darcy-Weisbach), présentent une structure plus conforme aux lois de la mécanique [2], ce qui justifie notre choix dans ce suit.

CHAPITRE II : ETUDE DE LA RESISTANCE HYDRAULIQUE DES CANAUX A CIEL OUVERTS

2 -1 – Introduction –contexte générale- :

Malgré le grand nombre de recherches effectuées par plusieurs chercheurs sur la résistance hydraulique des écoulements à surface libre; la prédiction précise de la résistance d'un écoulement dans les canaux ouverts reste un défi. En général, les relations entre les éléments qui influent sur la résistance hydraulique (la rugosité de surface, turbulence, les paramètres de la géométrie du canal) et les variables moyens de l'écoulement sont compliquées et ne sont pas parfaitement maîtrisées. Cela a entraîné de nombreuses approches pour calculer le frottement (friction) en utilisant plusieurs et diverses variables et aussi diverses prescriptions pour leur utilisation.

La résistance à l'écoulement sur une surface a deux sources principales :

- les frottements dus aux particules et microrugosités de la surface
- la résistance induite par la forme des macro-rugosités de la surface

Ces deux sources sont respectivement désignées comme la résistance granulaire à l'écoulement et la résistance de forme.

Les premières formules proposées ne considèrent que les frottements dus aux microrugosités. C'est à dire que les aspérités de la surface sont très petites par rapport à la profondeur de l'écoulement. Si une telle hypothèse est parfaitement justifiée pour l'étude d'écoulements en charge dans des conduites ou d'écoulements à surface libre dans des canaux de navigation, mais elle l'est beaucoup moins en ce qui concerne l'étude du ruissellement. [5]

Dans ce chapitre, on présente la loi de résistance causée par les surfaces rugueuses, pour les cas de : écoulement lisse ($Re^* < 4$), dans la phase transition ($4 < Re^* < 70$), et le régime turbulent rugueux pleinement développé ($Re^* > 70$) ou Re^* est le nombre de Reynolds en fonction de la vitesse de frottement et taille caractéristique de la rugosité k_s .

Avant de pouvoir étudier cette loi nous avons jugé utile de citer l'historique de toutes les lois élaborées dans ce sujet et les études qui ont traité la résistance hydraulique.

2-2 - Historique de l'étude de la résistance hydraulique:

Antoine Chézy (1718-1798), lors de ces travaux sur la dérivation de l'Yvette pour l'alimentation en eau de Paris, propose d'exprimer la vitesse moyenne de l'écoulement de la manière suivante :

$$V = C \sqrt{R J} \quad (2-1)$$

Où V est la vitesse moyenne de l'écoulement, R une dimension caractéristique du canal, J sa pente et C un coefficient de proportionnalité aujourd'hui appelé coefficient de Chézy.

En 1847, plus de 70 ans après Chézy, l'allemand Julius Albin Weisbach (1806-1871) propose d'exprimer la vitesse moyenne d'un écoulement par la formule suivante :

$$V = \sqrt{\frac{2g R J}{f}} \quad (2-2)$$

Où g est l'accélération de la gravité et f un coefficient dont Weisbach donnera une moyenne afin d'être en accord avec les résultats expérimentaux alors disponibles. Il suggère aussi que ce coefficient soit considéré comme une fonction de la vitesse moyenne de l'écoulement.

C'est la première fois que l'on considère ce coefficient comme un paramètre et non plus comme une constante à déterminer. Plus tard, Weisbach exprime la perte de charge le long d'une conduite de la manière suivante :

$$\Delta h = f \frac{L V^2}{2 g D} \quad (2-3)$$

Où D est le diamètre de la conduite considérée et L sa longueur.

Si on compare cette relation avec celle obtenue par Chézy on obtient une équivalence entre les coefficients f et C . (en posant $R=D/4$)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{C}{\sqrt{8g}} \quad (2-4)$$

Nous remarquons que la différence entre le coefficient Chézy et celui de Weisbach, est que celui de Chézy a une unité ($\frac{m^{1/2}}{s}$) et celui de Weisbach est adimensionnel.

En 1857, en se basant sur un grand nombre d'expériences, Henry Philibert Gaspard Darcy (1803-1858) est le premier à prendre en compte explicitement la rugosité de la

surface dans ces calculs. C'est pour cela que le coefficient f est aujourd'hui souvent appelé coefficient de Darcy-Weisbach. Le premier à associer les concepts de Weisbach et Darcy est J.T Fanning.

(1837-1911) qui publie en 1877 un large échantillon de valeurs de f en fonction du matériau de la conduite ou du canal, d'une grandeur caractéristique de sa géométrie et de la vitesse de l'écoulement.

Dans les années 1830, la différence entre les régimes à faible vitesse et à grande vitesse devient évidente. Osborne Reynolds (1842-1912) décrit la transition d'un régime à l'autre et la caractérise par un nombre qui aujourd'hui porte son nom, Re :

$$Re = \frac{\rho V R}{\mu} \quad (2-5)$$

où μ est la viscosité dynamique du fluide. Les faibles nombres de Reynolds correspondent à un régime lent dit laminaire tandis que les grands nombres de Reynolds sont caractéristiques d'écoulements rapides et désordonnés dits turbulents.

Au début du XXème siècle, avec le développement de nouvelles théories, on cherche enfin une expression analytique du coefficient de frottement. Ce sont Ludwig Prandtl (1875-1953), grâce à sa théorie de la couche limite turbulente, et ses étudiants, Théodore Von Karman (1881-1963), Paul Richard Heinrich Blasius (1883-1970) et Johann Nikuradse (1894-1979) qui feront les premières propositions d'expression du coefficient de Darcy-Weisbach en fonction du nombre de Reynolds.

En 1913, Balsius propose pour les conduits lisses et pour des nombres de Reynolds relativement élevés, la formule expérimentale suivante :

$$f = \frac{0.316}{Re^{1/4}} \quad (2-6)$$

En utilisant les données de NiKuradse, Karman et Prandtl proposent une formule qui approche mieux les résultats expérimentaux pour toute la gamme turbulente.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(Re\sqrt{f}) - 0.08 \quad (2-7)$$

En ce qui concerne les conduites rugueuses, pour les grands nombres de Reynolds, le coefficient f devient indépendant de la vitesse et est seulement fonction de la rugosité relative e/D (e est la taille des rugosités intérieures et D le diamètre de la conduite) introduite par Nikuradse. Karman propose la relation suivante en 1930 (elle sera confirmée par les expériences de Nikuradse trois ans plus tard) :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log\left(\frac{e}{D}\right) \quad (2-8)$$

Remarques sur la formule de NIKURADSE [2] :

1. Le type de rugosité utilisée est géométrique et homogène.
2. L'intérêt essentiel de ses expériences c'est qu'il a étudié l'influence de la rugosité (hauteur des aspérités qui représente dans ses expériences le rayon des grains de sables juxtaposés) sur la perte de charges.
3. La formule qu'il a établie n'est valable que pour le type de rugosité utilisé, donc elle est limitée car en pratique ce type n'existe pas.
4. Pour utiliser ses formules dans le cas d'une rugosité naturelle et hétérogène; on fait recours à une rugosité équivalente qui engendre la même perte de charge.

La zone de transition entre les régimes laminaires et turbulents a été définie empiriquement par Nikuradse pour des conduites avec rugosité uniforme.

En 1937, Colebrook et White montrent que pour les conduites ayant des rugosités non uniformes, la formule précédente ne donne pas des résultats très satisfaisants. Ils développent alors une formule pour régime de transition entre un écoulement turbulent lisse et un écoulement turbulent rugueux en conduites.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k_s}{3.7 D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2-9)$$

Où D : diamètre de la conduite, R_h son rayon hydraulique et K_s sa rugosité équivalente, notion introduite par Nikuradse. On constate deux termes ; le premier terme représente le formule de NUKARADSE pour les tuyaux rugueux, et le deuxième la formule de PRANDTL-VON KARMAN pour les tuyaux lisse. Ils généralisent ensuite cette équation aux écoulements à surface libre :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -C_1 \log \left(\frac{k_s}{C_2 R_h} + \frac{C_3}{4 Re \sqrt{f}} \right) \quad (2-10)$$

Où R_h est le rayon hydraulique du canal, Re le nombre de Reynolds et C_1, C_2, C_3 ; trois constantes dépendant notamment de la forme du canal considéré.

Cette formule sera testée par de nombreux ingénieurs et chercheurs qui proposeront de nombreuses tables pour les trois constantes.

La formule de Colebrook est la plus utilisée parce qu'elle donne des résultats proches de la réalité et en raison de son caractère universelle.

Remarque sur la formule COLEBROOK: [2]

Dans les expériences de COLEBROOK, il a utilisé des conduites de rugosité naturelle (c-à-dire hétérogène), et k représente une dimension moyenne des rugosités hétérogènes équivalente à la rugosité homogène du type « grain de sable ».

Il faut ensuite attendre 1942, pour qu'un premier effort d'intégration de toutes ces formules pour usage pratique soit fait. Un premier effort de synthèse sera fait par Hunter Rouse (1906-1996) puis Lewis Moody (1880-1953) dans les années 40. Ils proposèrent des diagrammes récapitulant les formules les plus usitées des coefficients de frottement de différents auteurs (Poiseuille, Prandtl, Blasius, etc). Ces diagrammes considèrent différents régimes d'écoulement en fonction du nombre de Reynolds et d'une taille caractéristique des rugosités de la surface (figure 2-1).

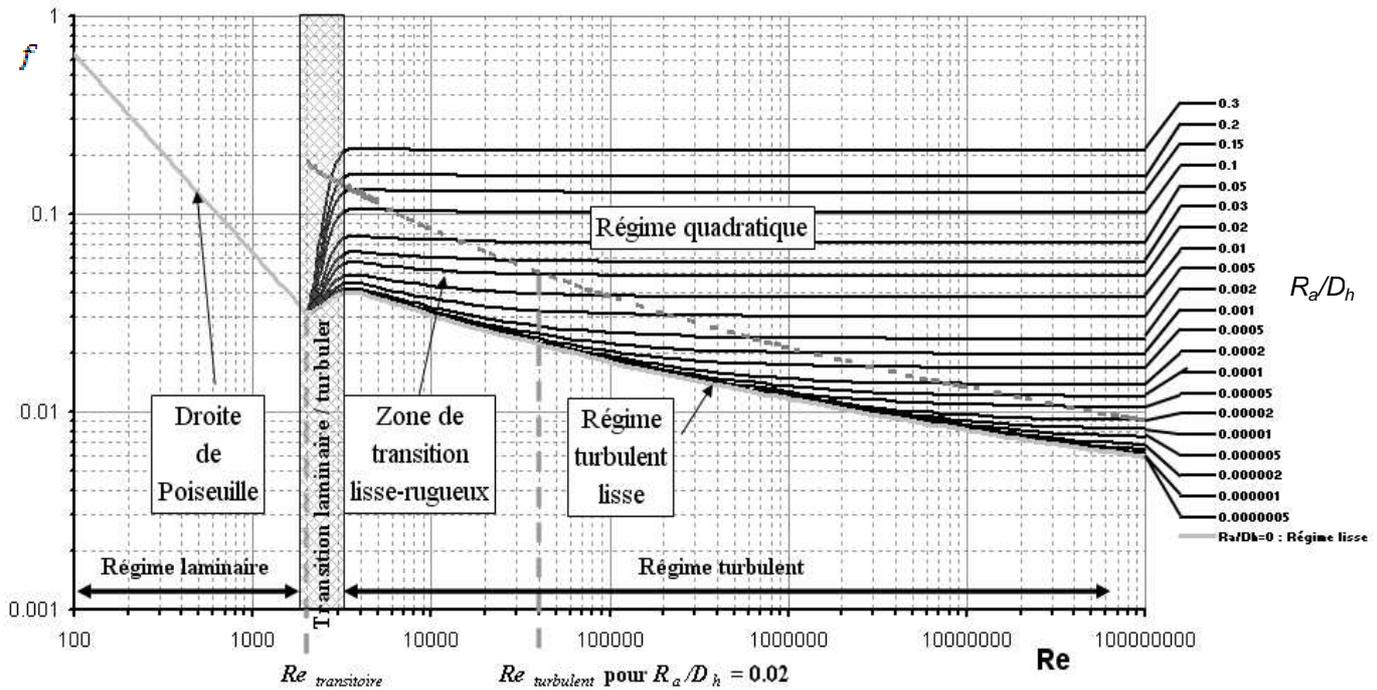


Figure 2-1 : Courbe de Moody .Coefficient de Darcy-Weisbach en fonction du nombre de Reynolds obtenues pour les conduites industrielles de rugosité hétérogènes (D'après Coussement, 2005). (R_a/D_h : rugosité relatif, R_a est la moyenne arithmétique des hauteurs d'aspérités prises en valeur absolue et D_h le diamètre hydraulique. Régime Quadratique : turbulent rugueux)

La taille caractéristique des rugosités est prise en compte par l'intermédiaire d'un nombre adimensionnel, la rugosité relative :

$$\varepsilon = \frac{k}{d} \quad (2 - 11)$$

Où k est la taille caractéristique des rugosités et d la profondeur caractéristique de l'écoulement.

Il faut attendre le milieu du 20^{ème} siècle pour que les premières études sur des surfaces naturelles se fassent et que l'influence des macros rugosités soit mise en évidence. En 1986, Abrahams étudie le ruissellement sur des échantillons de surfaces naturelles dans le désert d'Arizona. Ses échantillons sont recouverts de rochers et de végétation, si bien que suivant les débits considérés, tous les éléments constituant les rugosités ne sont pas recouverts. Dans cette étude, Abrahams cherche à obtenir sur chaque échantillon, la relation liant le coefficient de Darcy-Weisbach au nombre de Reynolds afin de les comparer aux relations similaires sur fond plat. Il constate alors que :

l'inondation progressive des aspérités de la surface augmente leurs trainées, ce qui a tendance à augmenter le coefficient de frottement.

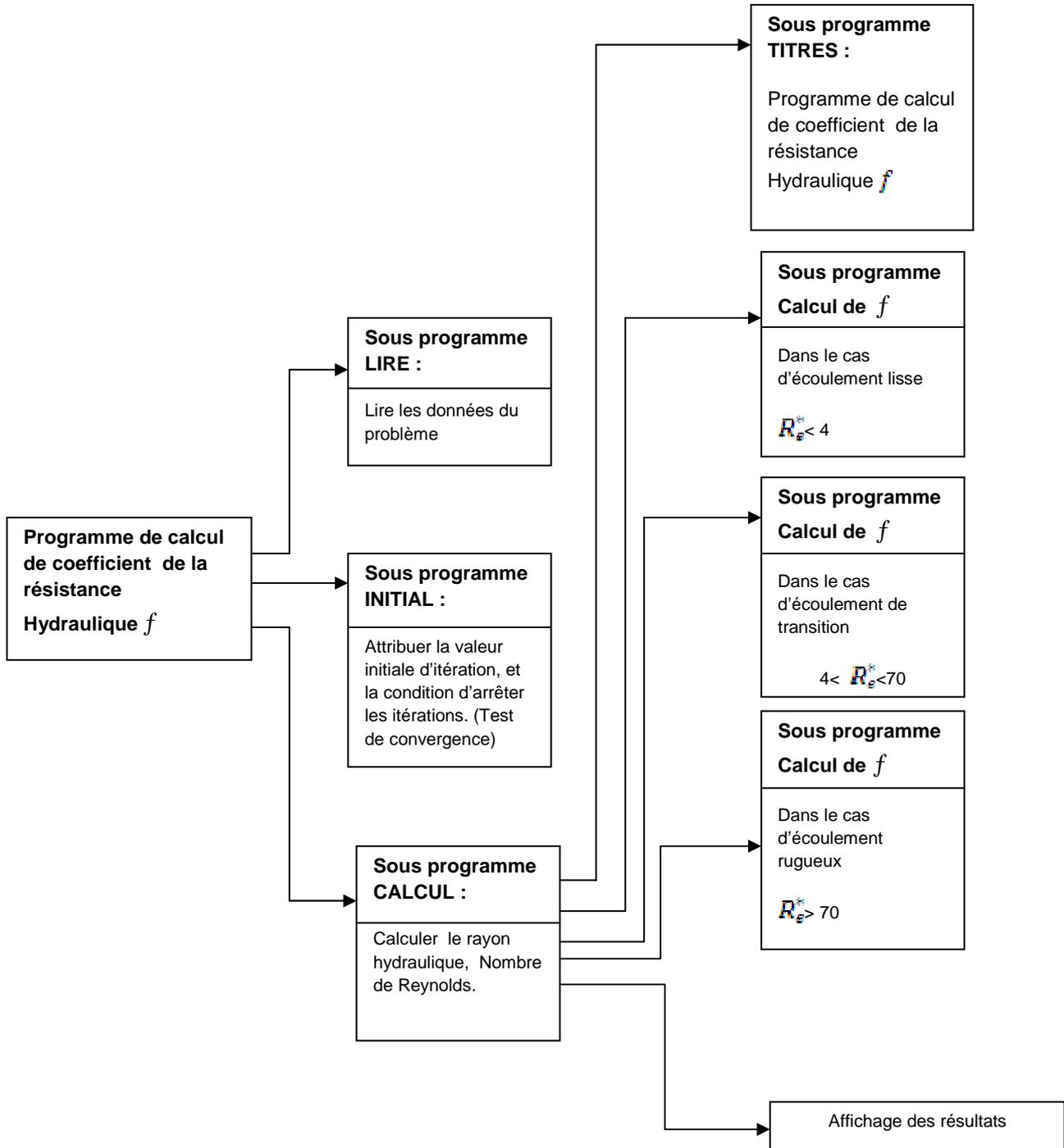
l'augmentation de la profondeur d'eau sur les parties déjà émergées a tendance à faire diminuer le coefficient de frottement.

De récentes études ont alors suggéré que, bien plus que le nombre de Reynolds, c'est le taux d'inondation qui est le paramètre important pour les écoulements peu profonds sur les surfaces rugueuses

L'application de la formule universelle du coefficient de résistance hydraulique présentée ci-dessus n'est pas facile et nécessite une méthode itérative pour sa résolution, et sa mise en œuvre dans un programme d'ordinateur est nécessaire. Dans ce cadre, nous avons élaboré ce programme qui calcule le coefficient f dans chaque régime d'écoulement. Les étapes sont les suivantes :

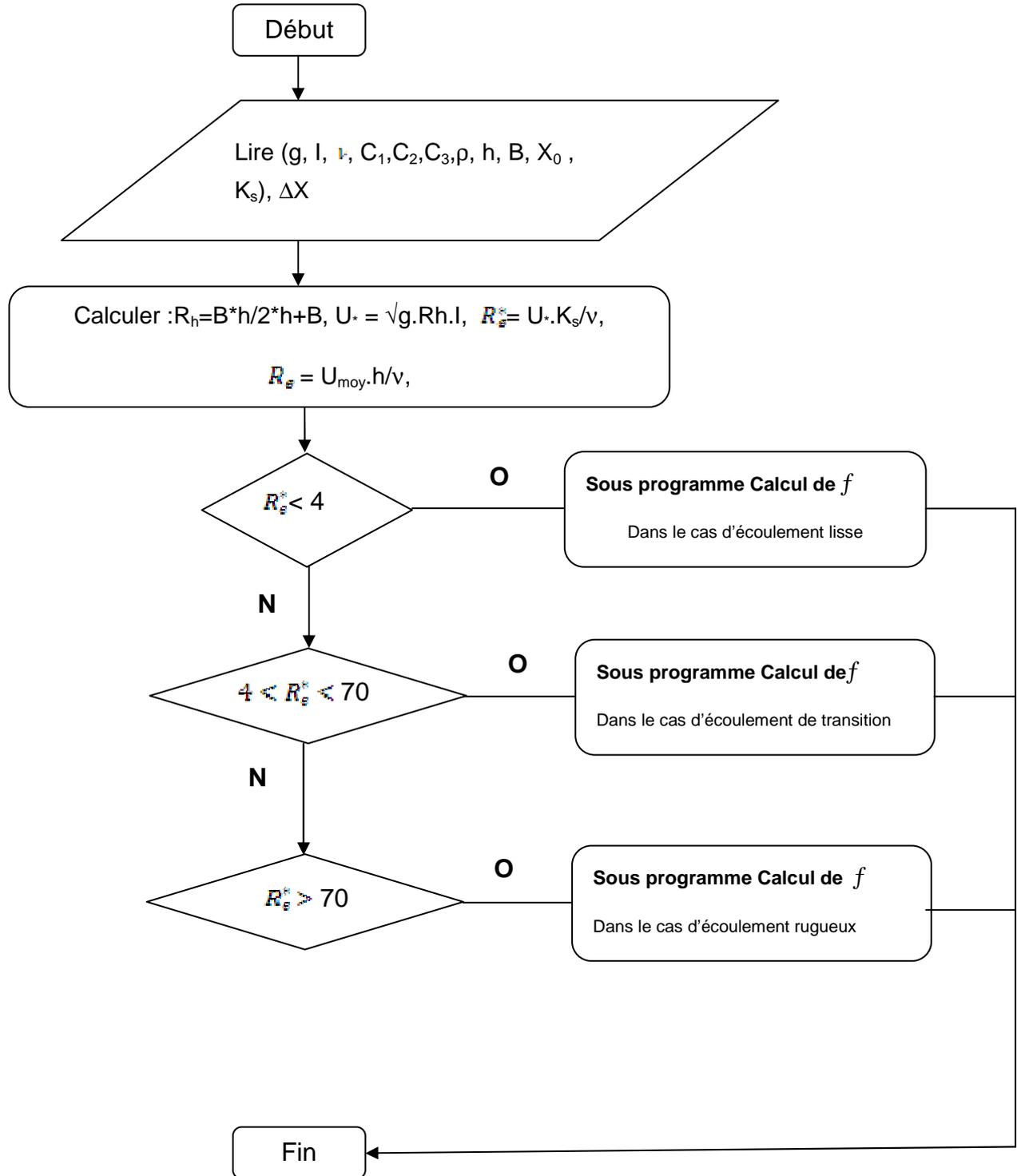
2-3 Programme de calcul de coefficient de la résistance Hydraulique f

Le programme de calcul informatique suit les étapes suivantes :

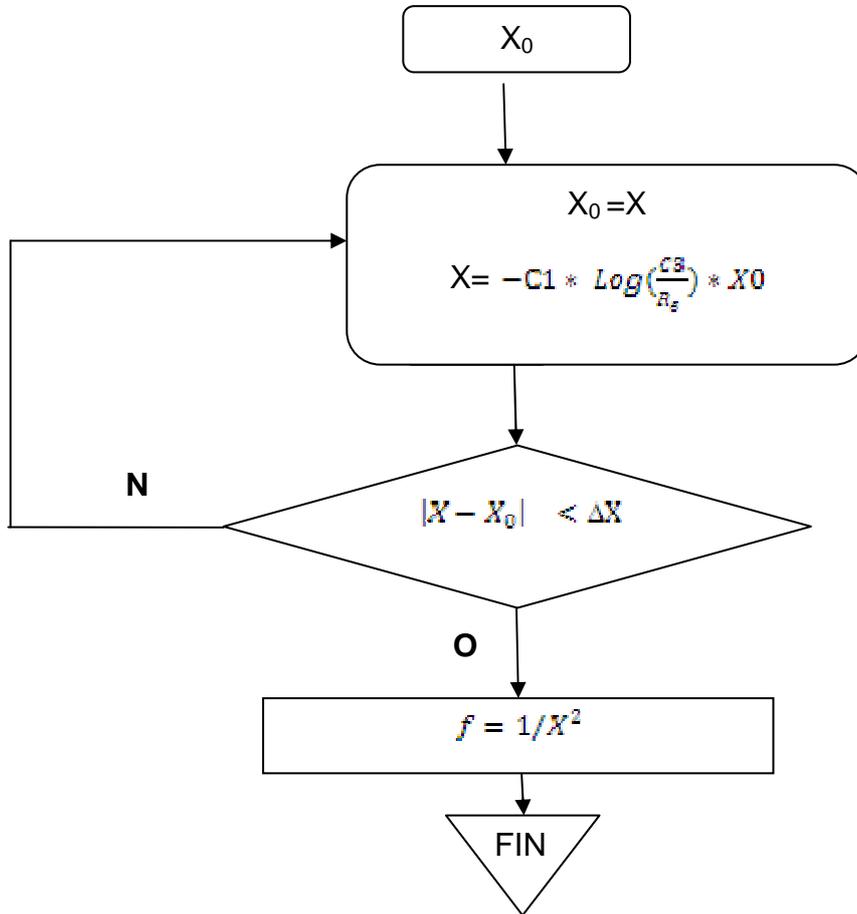


2-3-1 Organigramme du programme

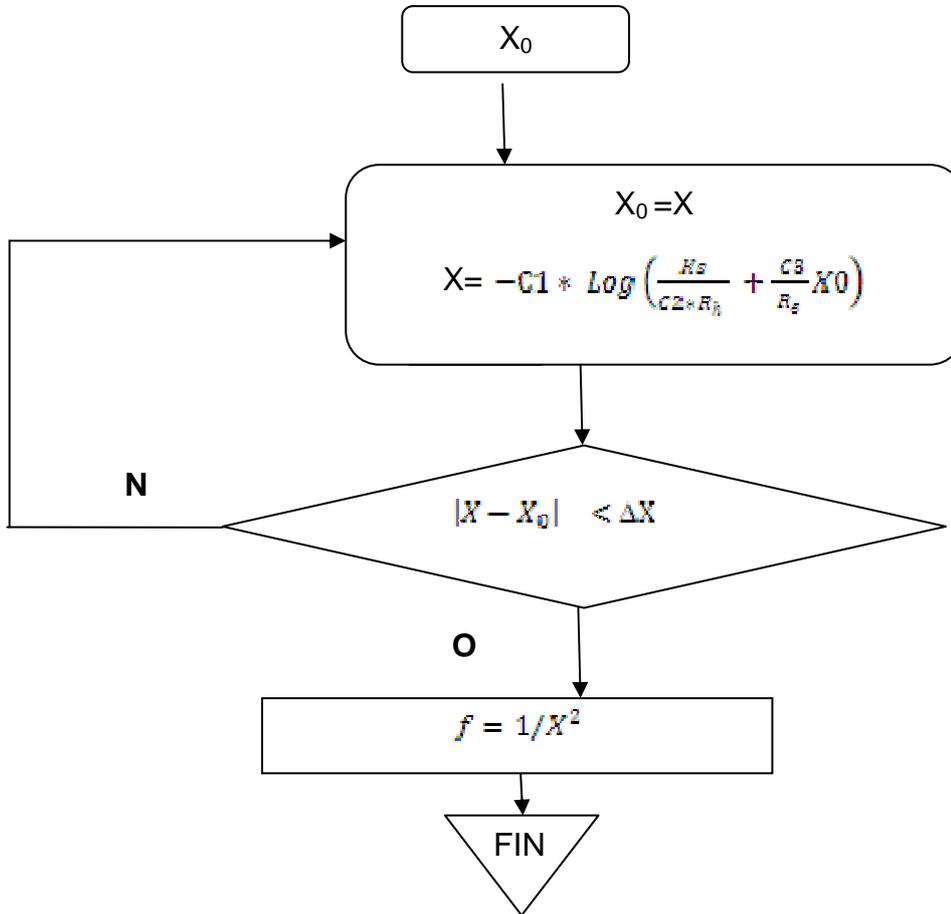
PROGRAMME PRINCIPAL :



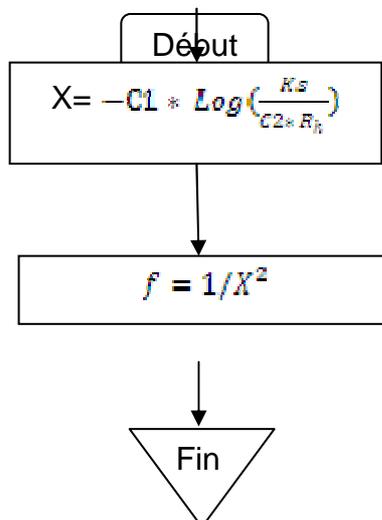
Sous programme pour calcul de f cas d'écoulement lisse:



Sous programme pour calcul de f cas d'écoulement transitoire:



Sous programme pour calcul de f cas d'écoulement rugueux:



APPLICATION

L'application est faite dans un canal de section rectangulaire dont les caractéristiques sont représentées dans le tableau ci-dessous:

Pente	H(cm)	B(cm)	B/h	R _h (cm)	Q(l/s)
0.002	7.8	52	6.7	6	22

U _m (cm/s)	Fr	R _e
54.2	0.617	1.296x10 ⁵

La rugosité du fond est aléatoire comme le montre le tableau et le profil ci-dessous:

X	Ks
0,01	0,0012
0,02	0,00123
0,03	0,0018
0,04	0,0019
0,05	0,0021
0,06	0,0035
0,07	0,0038
0,08	0,001
0,09	0,002
0,1	0,0025
0,11	0,003
0,12	0,0032
0,13	0,0041
0,14	0,0046
0,15	0,005
0,16	0,0043
0,17	0,0019
0,18	0,0005
0,19	0,0009
0,2	0,0001
0,21	0,0006
0,22	0,0003
0,23	0,0008
0,24	0,00389
0,25	0,00485

RESULTATS	$K_{Smoy} = 0,0039$	$,4 < R^* = 64,65 < 70$	$\Rightarrow f = 0,0074841$
	$K_{Smax} = 0,005$	$, R^* = 221,96 > 70$	$\Rightarrow f = 0,053665$
	$K_{Smin} = 0,0028$	$,4 < R^* = 46,41 < 70$	$\Rightarrow f = 0,0074841$

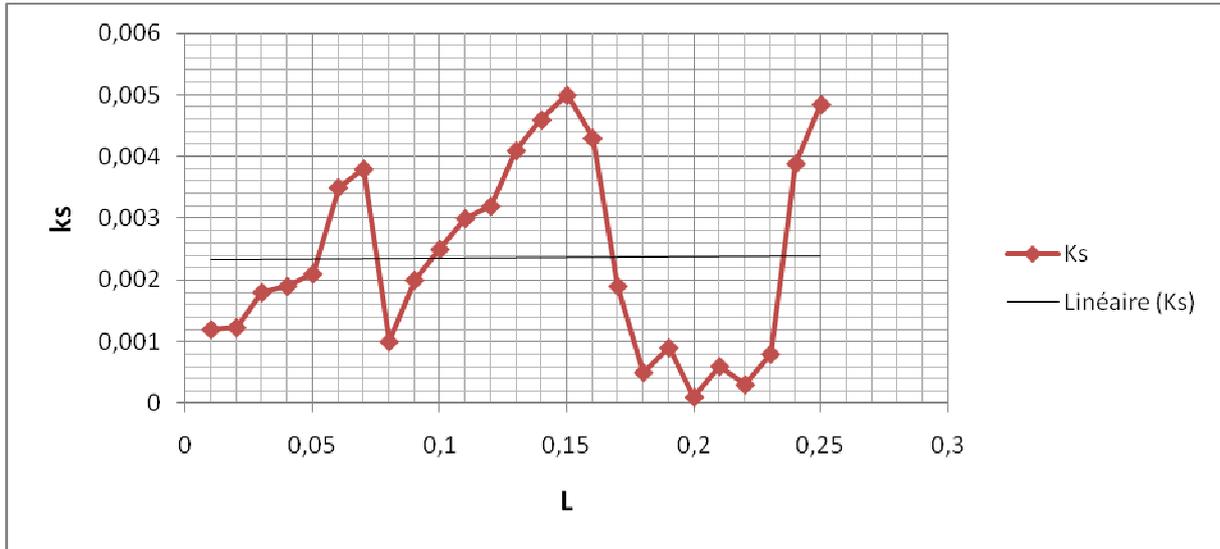


Figure 2-2 : Profil de la rugosité du fond choisie d'une façon aléatoire

CHAPITRE 3 : REVUE SUR LES ECOULEMENTS A CIEL OUVERT REVUE SUR LES ECOULEMENTS A CIEL OUVERT

3-1 Introduction

Comme nous l'avons démontré dans le chapitre précédent; Il est difficile de décrire mathématiquement l'influence de la rugosité sur l'écoulement et, en particulier, les pertes de charge qu'elle induit. Cette dernière est calculée par des relations de type semi-empirique pour décrire ces phénomènes. Ces relations sont le plus souvent fonction de la rugosité moyenne des aspérités ou de la rugosité relative.

D'une manière générale, la rugosité induira une non-linéarité de l'écoulement et, éventuellement, une turbulence pour des vitesses d'écoulement plus faibles que la vitesse d'apparition de la turbulence en surface lisse. **[4]**

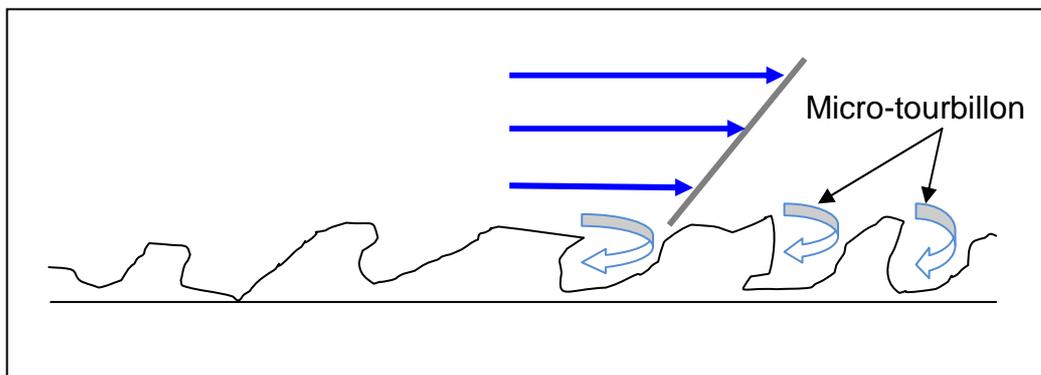


Figure 3-1 : la rugosité des surfaces perturbe l'écoulement d'autant plus que la taille des micro-tourbillons formés est importante (Coussement, 2005).

Des expériences qui ont été menées par différents chercheurs, montrent que pour des surfaces très lisses, l'écoulement laminaire est généralement respecté jusqu'à des valeurs du nombre de Reynolds Re , comprises entre 2000 à 3000. Au-delà de ces valeurs, l'écoulement devient transitoire puis turbulent.

Pour des rugosités plus importantes, l'écoulement peut devenir rapidement non linéaire, puis rotationnel et le phénomène de turbulence n'est plus dû uniquement à l'augmentation de la vitesse d'écoulement (ou plus exactement de Re) mais également de la rugosité (voir Figure 3-1) **[4]**. Ceci est illustré par une application dans le chapitre 4.

Donc on peut conclure que dans le cas d'un régime turbulent, la perte de charge n'est plus fonction que de la rugosité.

La différence entre régime hydrauliquement lisse et rugueux peut se visualiser sur la Figure 3-2, où l'on voit que pour les rugosités faibles (en fait, les rugosités inférieures à l'épaisseur de la sous-couche visqueuse), l'écoulement n'est pas

perturbé par la rugosité. Pour les rugosités plus importantes, des « bouffées turbulentes » sont provoqués par la rugosité.

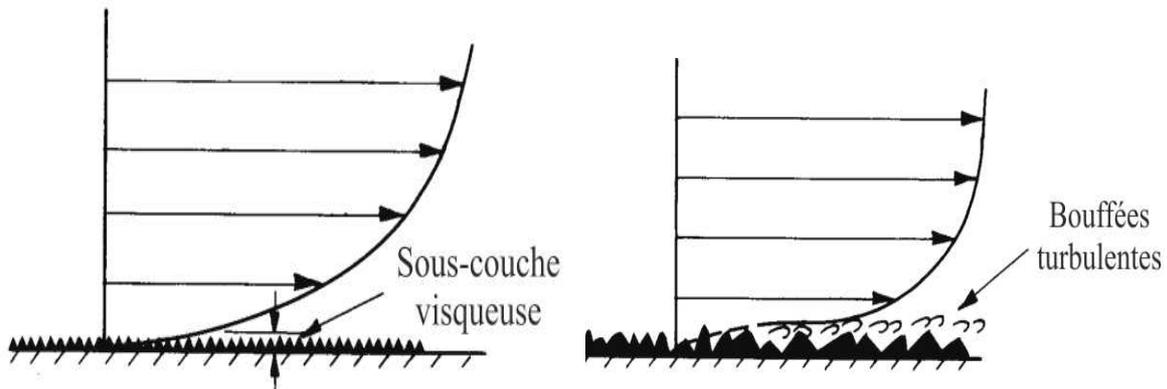


Figure 3-2 : lorsque la rugosité est faible (inférieure à l'épaisseur de la sous-couche visqueuse), l'écoulement n'est pas perturbé par les aspérités. Pour les rugosités plus importantes, des bouffées turbulentes sont provoquées par la rugosité. » [4]

Dans ce contexte, et pour illustrer les effets de la rugosité sur l'écoulement à surface libre, nous avons jugé utile d'élaborer une application sur un canal de fond rugueux, par une modélisation numérique (Chapitre 4). C'est le même canal utilisé dans l'application pour le calcul du coefficient de résistance hydraulique (chapitre 2).

Pour aborder ce problème, une revue sur les écoulements à ciel ouvert s'impose.

3- 2 Revue sur les écoulements à ciel ouvert

3-2-1 - Ecoulement d'eau Sur Fond lisse

On considère un courant d'eau, en régime permanent et uniforme, de vitesse moyenne u_f définie par $u_f = Q/(h.B)$, et de hauteur h en écoulement sur un plan incliné d'un angle θ par rapport à l'horizontal. Ce courant d'eau est soumis à la force extérieure de gravitation et on désigne par g la constante gravitationnelle. L'eau est caractérisée par sa masse volumique ρ et sa viscosité cinématique ν . D'après le principe de l'analyse dimensionnelle (théorème de Π ou (Vaschy Binckingham)), la relation entre ces six grandeurs avec trois unités fondamentales (kg, m, s) peut s'écrire sous la forme d'une relation entre trois (6-3=3) produits sans dimensions. On forme, généralement, les groupes adimensionnels suivant :

1. le nombre de Reynolds de l'écoulement :

$$Re = \frac{U_f \cdot h}{\nu}$$

où $\nu = \mu / \rho$ est la viscosité dynamique du fluide.

Ce nombre, représentant le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses, caractérise la turbulence de l'écoulement.

- Pour $Re < 500$ l'écoulement est laminaire et il est principalement dicté par les forces visqueuses.
- Pour $Re > 500$ l'écoulement devient turbulent et il est principalement dicté par les forces d'inertie.

2. le nombre de Froude :

$$Fr = u_f / \sqrt{g h \cos \theta}$$

Ce nombre est égal au rapport entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse caractéristique de la propagation des ondes de gravité dans l'eau. Pour $Fr < 1$ l'écoulement est dit fluvial et pour $Fr > 1$ il est torrentiel.

3. l'inclinaison du lit : $\tan \theta$.

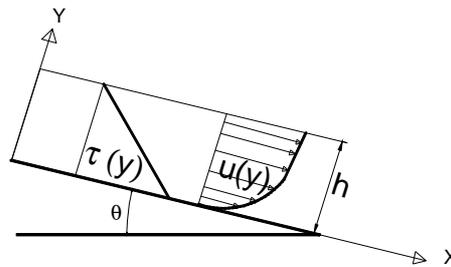


Figure 3-3: Ecoulement d'eau sur un fond lisse et infini

3-2-2 Répartition des contraintes à la paroi

La répartition des contraintes est obtenue à partir de l'équation du mouvement. En régime permanent et uniforme, cette équation suivant la direction x se réduit à :

$$g \sin \theta + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0 \quad (3-1)$$

La quantité τ_{yx} est la contrainte tangentielle totale, due à l'action du fluide sur une tranche de fluide de normale y, dirigée suivant x. La répartition de la contrainte tangentielle dans la hauteur de l'écoulement se calcule en intégrant (3-1) suivant y :

$$\tau_{yx}(y) = \tau_0 - \rho g y \sin \theta \quad (3-2)$$

ou : $\tau_0 = \rho g h \sin \theta$ est la contrainte tangentielle (ou contrainte de cisaillement) à la paroi. La répartition de la contrainte est linéaire par rapport à la distance au fond de l'écoulement quelle que soit la loi de comportement.

Pour un écoulement turbulent, la contrainte tangentielle totale τ_{yx} s'exprime:

$$\tau_{yx} = \rho \nu \frac{\partial u_f}{\partial y} - \overline{\rho u' v'} \quad (3-3)$$

Où $\rho \nu \frac{\partial u_f}{\partial y}$: est la contrainte visqueuse qui est due au frottement visqueux de deux filets liquides adjacents.

$\overline{\rho u' v'}$: est la contrainte turbulente qui est due à l'échange de quantité de mouvement qui s'opère entre deux filets liquides adjacents dans un écoulement d'eau turbulent.

Les quantités u' et v' désignent les fluctuations de vitesse instantanée dans les directions x et y respectivement.

On remarque que la répartition des contraintes est linéaire par rapport à la distance à la paroi pour un écoulement turbulent :

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du_f}{dy} - \overline{\rho u' v'} = \tau_0 \left(1 - \frac{y}{h}\right) \quad (3-4)$$

3-2-3 Contrainte turbulente et la Vitesse de frottement

La contrainte turbulente $-\overline{\rho u' v'}$ est explicitée en utilisant le concept de longueur de mélange due à Prandtl et VonKármán (1925). Cela consiste à relier l'échange de quantité de mouvement qui s'opère entre deux couches fluides au gradient de vitesse de l'écoulement :

$$\overline{\rho u' v'} = \rho l^2 \left(\frac{du_f(y)}{dy}\right)^2 \quad (3-5)$$

Où l est la longueur de mélange qui est une longueur caractéristique des tourbillons. En combinant les équations (3-4) et (3-5) on obtient l'équation qui nous permet de calculer les valeurs des contraintes et la répartition des vitesses dans l'écoulement :

$$\tau_{yx} = \left(\mu + \rho l^2 \frac{du_f(y)}{dy}\right) \frac{du_f(y)}{dy} = \tau_0 \left(1 - \frac{y}{h}\right) \quad (3-6)$$

Pour homogénéiser les formules en termes de vitesse, Prandtl a introduit une échelle caractéristique de vitesse dans la couche limite u_s , qui est telle que :

$$\tau_0 = \rho \cdot u_s^2 \quad (3-7)$$

La quantité u_s est aussi appelée la vitesse de frottement au fond ou la vitesse de cisaillement.

3-2- 4 Le profil de vitesse logarithmique

Il subsiste une inconnue qui est la longueur de mélange l . Prandtl l'a explicité, et a ainsi résolu le problème, en supposant qu'au voisinage de la paroi, $y/ h < 0,2$, la quantité l est proportionnelle à la distance à la paroi y :

$$l = \kappa y \quad (3-8)$$

Où κ est un coefficient de proportionnalité. Dans le cas d'un écoulement pleinement turbulent et en ne gardant que les termes du premier ordre de l'équation (3-6) il a obtenu une équation différentielle permettant de calculer la répartition des vitesses à proximité du fond :

$$\tau_0 \approx \rho \kappa^2 y^2 \left(\frac{du_f}{dy} \right)^2 \quad (3-9)$$

Après séparation des variables et intégration de l'équation différentielle obtenue, on parvient à la distribution des vitesses au voisinage de la paroi :

$$\frac{u_f(y)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln y + C \quad (3-10)$$

Où C est une constante d'intégration. Prandtl a ainsi montré analytiquement que la distribution de vitesse près du fond est de forme logarithmique. Cette forme de la distribution a ensuite été validée sur de nombreuses expériences. C'est à partir de ces mêmes expériences que le coefficient κ a été trouvé égal à **0,41** et invariant ; κ est appelé **la constante de VonKármán**.

La constante d'intégration C est évaluée à la distance y_0 à partir du fond lisse où la vitesse de l'écoulement est supposée nulle. D'où :

$$\frac{u_f(y)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{y_0} \quad (3-11)$$

3-2-5 Rugosité du fond

On considère maintenant un fond rugueux composé de rugosités de taille caractéristique k_s . Dans le cas d'un lit composé de particules juxtaposées de même taille, Nikuradse suggère de prendre pour k_s le diamètre des particules.

Deux conditions aux limites peuvent être choisies selon la valeur de k_s . Elle est choisie en introduisant le nombre de **Reynolds caractéristique** R_s de l'écoulement au fond défini par :

$$R_s = \frac{u_* k_s}{\nu} \quad (3-12)$$

- Pour $R_s < 4$ les rugosités du fond sont entièrement plongées dans la sous-couche visqueuse (ou sous couche laminaire) ; tout se passe comme si

l'écoulement ne voyait pas les rugosités du fond : l'écoulement est dit **hydrauliquement lisse**.

- Pour $R_h > 70$, les rugosités du fond dépassent de la sous couche visqueuse ; l'écoulement est alors influencé par les rugosités du fond : l'écoulement est dit **hydrauliquement rugueux**.

Dans le cas d'un fond rugueux, on introduit aussi un nombre adimensionnel supplémentaire qui est la hauteur relative de l'écoulement définie par :

$$h / k_s \quad (3-13)$$

Ce nombre permet d'apprécier à partir de quelle hauteur la répartition des vitesses et la surface libre sont perturbées par les rugosités du fond.

3-2-6 Les paramètres de la géométrie de l'écoulement

Ce que nous avons vu précédemment est valable pour un écoulement d'eau infiniment large. Si l'écoulement a lieu dans un canal de largeur finie, des paramètres supplémentaires, caractéristiques de la géométrie du canal, sont à prendre en compte. Dans la littérature, on introduit classiquement trois quantités : la surface mouillée, le périmètre mouillé, et le rayon hydraulique. Par exemple, dans le cas d'un canal rectangulaire de largeur B et d'un écoulement de hauteur h , ces trois grandeurs s'écrivent :

$$S = B h \quad (3-14)$$

$$P = B + 2h \quad (3-15)$$

Le rayon hydraulique peut s'écrire en fonction du rapport $B/(2h)$ qui est appelé le rapport d'aspect. Si ce dernier est grand, typiquement $B/(2h) > 5$, le rayon hydraulique peut s'identifier à la hauteur de l'écoulement. Dans le cas contraire, le paramètre caractéristique de la dimension de l'écoulement n'est plus h mais R_h . Dans ces conditions, il est d'usage de définir les quantités caractéristiques de l'écoulement en fonction de R_h et non plus de h . Ainsi, on définit une contrainte tangentielle effective moyenne agissant sur les parois du canal qui s'écrit :

$$\tau_0 = \rho \cdot g R_h \sin \theta \quad (3-16)$$

De la même façon on définit le nombre de Reynolds de l'écoulement suivant :

$$R_g = \frac{u_f \cdot 4 \cdot R_H}{\nu} \quad (3-17)$$

Avec $R_g = 2000$, la valeur séparant les régimes laminaire et turbulent.

3-2-7 Relation entre le Coefficient de frottement macroscopique et la vitesse de frottement

A l'échelle macroscopique, l'écoulement d'eau est caractérisé par la vitesse moyenne de l'écoulement u_f . A cette échelle, la loi d'écoulement reliant cette vitesse à la hauteur de l'écoulement fait intervenir un coefficient, noté f , qui est le coefficient de frottement macroscopique. Il est relié aux quantités u_f et u_s par :

$$\frac{u_f}{u_s} = \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (3 - 18)$$

Le coefficient f intègre toutes les formes de dissipations telles que le frottement sur les parois ou les recirculations du fluide, etc. Il dépend a priori de la nature de l'écoulement caractérisée par le nombre de Reynolds de l'écoulement Re , de la géométrie du canal caractérisée par le rapport d'aspect $B/(2h)$ et de la rugosité des parois relativement à la hauteur de l'écoulement caractérisée par h/k_s .

Dans le cas d'un écoulement large, tel que $B/(2h) \gg 5$, le coefficient f ne dépend plus de la géométrie du canal » [11]

3-2-8 Ecoulements sur fond rugueux

3-2-8-1- Hypothèses

On considère un écoulement d'eau (fluide réel et incompressible) complètement développé le long d'un canal composé de rugosité de taille caractéristique k_s . On admet que cet écoulement est bidimensionnel et unidirectionnel selon x ; il est permanent, uniforme, turbulent et de hauteur h .

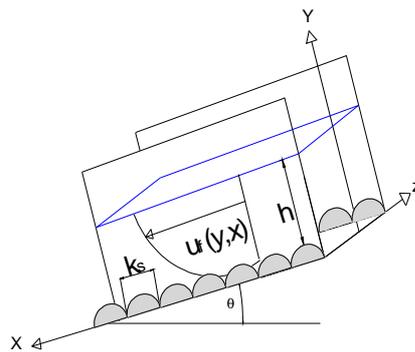


Figure 3-4 : paramètres caractérisant un écoulement d'eau sur un fond rugueux

Dans le début de la revue, on considère d'abord le cas d'un canal infiniment large. La répartition des vitesses $u_f(y)$ dépend alors seulement de la distance mesurée à partir

du fond y . dans le cas d'un canal de largeur finie la répartition des vitesses $u_f(y,z)$ peut aussi dépendre de la distance mesurée à partir du centre du canal z .

3-2-8-2- Découpage de l'écoulement en plusieurs zones

Pour décrire la répartition des vitesses dans un écoulement à surface libre en régime turbulent, on a l'habitude de diviser l'écoulement en plusieurs zones (Figure 3-5) :

- (1) une zone influencée par le fond du canal située dans le bas de l'écoulement pour $0 < y/h < 0,2$;
- (2) une zone influencée par la surface libre située au sommet de l'écoulement Pour $0,6 < y/h < 1$ et
- (3) une zone intermédiaire située entre les deux premières zones qui est à la fois sous l'influence du fond et sous l'influence de la surface libre.
- (4) Dans certains cas, une quatrième zone apparaît ; il s'agit de la sous-couche visqueuse (ou laminaire) qui est située au niveau des rugosités du fond. L'importance de cette couche relativement à la taille des rugosités est caractérisée par le nombre de Reynolds R_x .

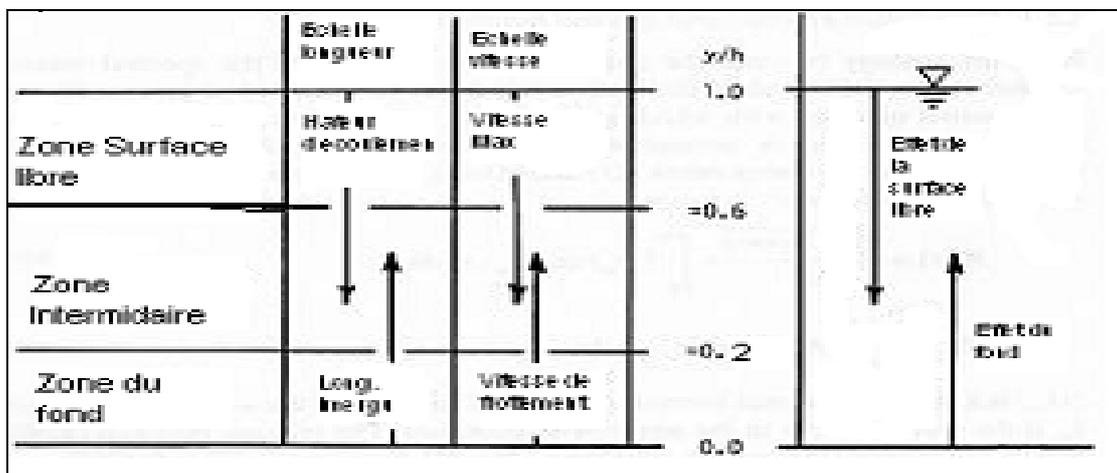


Figure 3-5 : Subdivision d'un écoulement à surface libre en plusieurs zones (d'après [11]).

3-2-8-3 Distribution des vitesses au voisinage du fond

Introduction

La distribution des vitesses dans la zone intérieure, pour $y/h < 0,2$, est de forme logarithmique (Equation (3-19)). Dans le cas d'un fond rugueux, ce profil reste valable à condition de faire les deux approximations suivantes :

- 1- Les variations de la contrainte tangentielle au voisinage du fond sont du second ordre.

- 2- La valeur de la contrainte tangentielle effective au voisinage du fond rugueux est identifiée à celle que l'on mesurerait au niveau d'un fond lisse τ_0 .

En supposant que la distribution des vitesses est de forme logarithmique, et donnée par l'équation suivante :

$$\frac{u_f(y)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y}{y_0} \quad (3-19)$$

Il reste encore une difficulté qui est liée à la détermination de la condition limite au fond et en particulier à la localisation de l'origine du profil des vitesses. La condition limite au fond dépend de la nature de l'écoulement au voisinage du fond qui est caractérisé par R_s .

Écoulement turbulent lisse

Pour $R_s < 4$ ou 5 (d'après autre auteur), l'écoulement est dit hydrauliquement lisse. Les rugosités du fond sont complètement plongées dans la sous-couche laminaire (voir figure 3-6). Pour un écoulement turbulent lisse, la distance y_0 à laquelle la vitesse de l'écoulement est nulle est proportionnelle au rapport ν/u_* , et des expériences réalisées en tuyau ont montré que $y_0 \cong \nu/(9u_*)$. En substituant y_0 dans la relation du profil de vitesse (Equation (3-19)), on obtient la distribution de vitesse dans la zone intérieure donnée par :

$$\frac{u_f(y)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{y u_*}{\nu} \right) + B_s \quad (3-20)$$

où $B_s = 2,5 \ln 9 \approx 5,5$, La valeur de B_s a ensuite été validée sur de nombreuses expériences D'écoulement uniforme à surface libre, et les différents auteurs ont trouvé $B_s = 5 \pm 25\%$. La variation de B_s dépend essentiellement du nombre de Reynolds, et pour $Re > 10^5$, on peut poser $B_s = 5.5$. En dessous de la zone logarithmique, il y a la sous-couche laminaire dans laquelle la répartition des vitesses est donnée au premier ordre par :

$$u_f(y) = u_* \cdot \frac{y}{\nu} \quad (3-21)$$

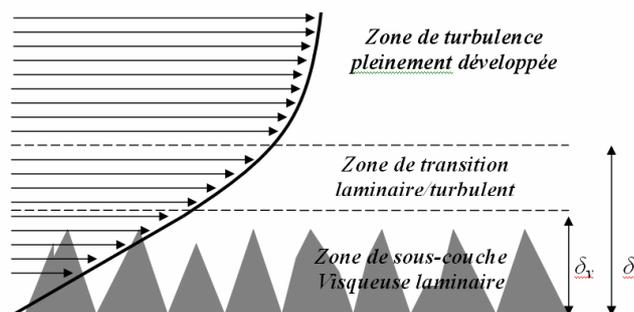


Figure 3-6 : Ecoulement turbulent lisse, δ_v : hauteur de la sous-couche visqueuse laminaire, δ_t : hauteur de la sous-couche de transition

Écoulement turbulent rugueux

Pour $R_* > 70$, l'écoulement est dit hydrauliquement rugueux. Les rugosités du fond dépassent la sous-couche visqueuse (voir figure 3-7). Ce type d'écoulement est celui que l'on considère le plus fréquemment dans le cas des torrents et des rivières torrentielles. Des expériences en tuyau ont montré que pour un tel écoulement

$y_0 = k_s / 30$. En substituant y_0 dans l'équation (3-19) on obtient la répartition des vitesses dans la zone intérieure donnée par :

$$\frac{u_f(y)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{y}{k_s} \right) + B_r \quad (3-22)$$

Où $B_r = 2,5 \ln 30 \approx 8,5$ La valeur de B_r a ensuite été validée à $\pm 15\%$ sur de nombreuses expériences pour les écoulements uniformes à surface libre.

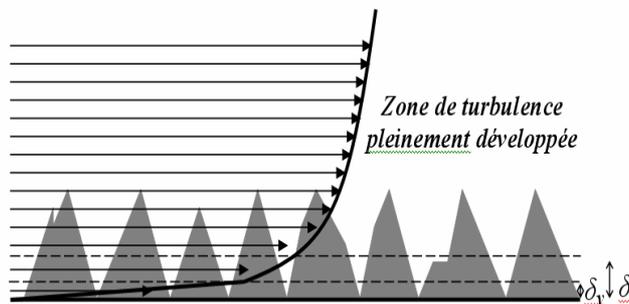


Figure 3-7 : Ecoulement turbulent rugueux, δ_v : hauteur de la sous-couche visqueuse laminaire, δ_t : hauteur de la sous-couche de transition

3-2-8-4 Distribution des vitesses loin du fond

Dans les deux zones situées au-dessus de la zone intérieure (ou zone logarithmique), la répartition des vitesses s'éloigne légèrement de la loi logarithmique. Dans la zone intermédiaire, la vitesse est légèrement supérieure à la vitesse prédite par la loi logarithmique et, dans la zone près de la surface libre, la vitesse augmente moins rapidement que la loi logarithmique. Pour rendre compte de ces deux effets, un terme supplémentaire, appelé la loi de sillage de Coles (Equation

(3-23), est classiquement ajouté à la loi logarithmique de l'écoulement lisse ou rugueux :

$$W(y) = \frac{2\Pi}{k} \sin^2\left(\frac{\pi y}{2\delta}\right) \quad (3-23)$$

Où Π est le paramètre de sillage qui peut varier entre $-0,1$ et $0,3$ dans le cas des écoulements turbulents lisses ou rugueux. La quantité δ est la hauteur de l'écoulement à laquelle la vitesse est maximale et elle dépend de la géométrie de l'écoulement.

3-2-9 Vitesse moyenne de l'écoulement

Hypothèse

Strictement, la vitesse moyenne de l'écoulement, notée u_f , est calculée en intégrant la répartition des vitesses sur toute la hauteur de l'écoulement à partir des lois propres à chaque zone de l'écoulement. Cependant, en première approximation, la loi logarithmique strictement valable dans la zone intérieure peut être extrapolée à tout l'écoulement. Ainsi, le calcul de la vitesse moyenne est fait par intégration de l'équation (3-20) pour un écoulement turbulent lisse et par intégration de l'équation (3-22) pour l'écoulement rugueux. Les lois d'écoulement obtenues sont répertoriées ci-dessous.

Écoulement turbulent lisse

La vitesse moyenne de l'écoulement turbulent lisse est donnée par :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{u_f}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{h u_*}{\nu}\right) + \overline{B_s} \quad (3-24)$$

où la constante d'intégration obtenue pour de nombreuses expériences vaut $\overline{B_s}=3,5$.

En introduisant le nombre de Reynolds caractéristique de l'écoulement dans la relation (3-24), on obtient :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{1}{k} \ln\left(Re \sqrt{\frac{f}{8}}\right) + \overline{B_s} \quad (3-25)$$

La formulation (3-24) n'est pas très commode si on veut calculer le coefficient de frottement Macroscopique f car il n'est pas explicité ; la formulation (3-25) ne peut être résolue que par récurrence. Aussi, nous citons la formule de Blasius, qui est pratiquement confondue avec la formule (3-25) pour $Re < 10^5$. La formule de Blasius est plus facile d'utilisation que la relation (3-25), et permet de décrire les écoulements turbulents lisses en tuyau ou à surface libre pour des nombres de Reynolds inférieurs à 10^5 :

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$$

Écoulement turbulent rugueux

La vitesse moyenne de l'écoulement turbulent rugueux est donnée par :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{u_f}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{h}{k_s}\right) + E_r \quad (3-26)$$

où la constante d'intégration obtenue pour de nombreuses expériences vaut $E_r = 6.25$, Cette relation est valable pour les écoulements fortement turbulents tels que $Re > 8.10^4$. Pour des nombres Re plus faibles, le coefficient de frottement f dépend aussi du nombre Re .

3-2-10 Spécificités des écoulements en canal à largeur finie

Considérons maintenant un canal de largeur B finie. La répartition des vitesses n'est plus nécessairement unidimensionnelle car elle peut être affectée par les bords. Pour un canal rectangulaire, la répartition schématisée des vitesses est donnée sur la figure 9. Cette figure indique que la vitesse de l'écoulement est plus importante au centre du canal qu'au niveau des parois latérales. D'après Graf [12], cet effet peut apparaître dès lors que $B \leq 3h$.

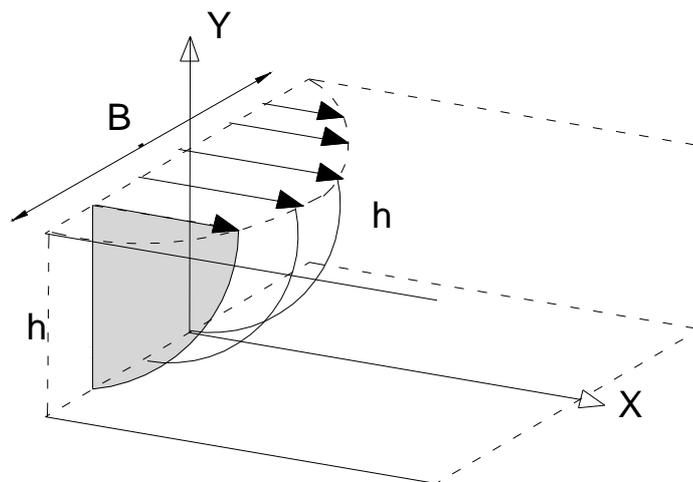


Figure 3-8 : Répartition schématisée des vitesses dans un écoulement influencé par les bords

Un autre effet caractéristique des écoulements de faible largeur est l'apparition de la vitesse maximale au-dessous de la surface libre [12]. Si on note d la hauteur à laquelle la vitesse maximale est atteinte, alors $d \approx h$ pour un écoulement de largeur tel que $B/(2h) > 2,5$, et d vaut 70 à 80 % de la hauteur d'eau pour $B/(2h) = 1$.

3-2-11 Spécificités des écoulements à forte pente

Si on considère maintenant un écoulement à forte pente, des difficultés supplémentaires apparaissent dans la description de l'écoulement d'eau. Elles sont, d'une part, liées à la faible hauteur de l'écoulement relativement à la taille des rugosités du fond, et, d'autre part, à l'apparition d'instabilités qui se développent au niveau de la surface libre.

3-2-11-1 Ecoulement de faible hauteur

Lorsque l'écoulement est de faible hauteur, typiquement $h/k_s < 3$ ou 4, les éléments rugueux influencent fortement l'écoulement. Les résultats développés dans les parties précédentes sont difficilement extrapolables à ce type d'écoulement. Par exemple, il est difficile de dire qu'en première approximation l'écoulement est uniforme car selon que l'on considère la répartition des vitesses au niveau du sommet d'un élément rugueux ou juste en aval ou en amont, elle peut être très différente.

Dans ces conditions, le calcul classique de la répartition des vitesses au voisinage du fond développé dans le cadre de la mécanique des milieux continus, n'est plus vraiment adapté. Bathurst [12] suggère que les distributions de vitesse de forme logarithmique du type de l'équation (3-23) ne sont plus valables pour les écoulements turbulents rugueux tels que $h/k_s < 3$ ou 4. Pour décrire un tel écoulement, il faut considérer chaque élément en particulier ce qui devient rapidement très compliqué à traiter à cette échelle. Aussi, ce type d'écoulement est plutôt traité à une échelle supérieure qui est celle de l'écoulement moyen.

A cette échelle, on observe que la surface libre est fortement chahutée par la présence des éléments rugueux. En plus des dissipations dues au frottement de l'écoulement sur les parois et le fond s'ajoutent alors des dissipations liées aux distorsions de l'écoulement d'eau. Ces effets se traduisent par un coefficient de frottement macroscopique f plus élevé et une vitesse moyenne de l'écoulement u_f plus faible par rapport à un écoulement de grande hauteur. Par exemple, Bayazit [14] a effectué des mesures de vitesse d'un écoulement d'eau de hauteur variant entre 1 et 5 cm sur un lit incliné à 1% et composé de billes juxtaposées de diamètre 23 mm ; il a observé que la vitesse moyenne de l'écoulement était d'autant plus faible que la hauteur d'eau relative diminuait pour $h/k_s < 3$. Dans le même sens, Song [15] et Cao [16], ont étudié un écoulement uniforme dans un canal fortement incliné ($1\% < \tan\theta < 9\%$) recouvert par un lit de gravier. Ils ont trouvé que la vitesse de l'écoulement moyen était toujours donnée par une relation de la forme (3-26) mais avec un coefficient Br

plus faible. Song suggère de prendre $\bar{E}_f = 3,25$ dans le cas où $R_h/k_s < 4$. A partir de nombreuses expériences, Cao a trouvé que ses mesures étaient encadrées par la relation (3-26) avec $\bar{E}_f = 3.38$ en borne supérieure et par la relation (3-26) avec $\bar{E}_f = 0.99$ en borne inférieure.

3-2-11-2 Instabilité des écoulements à fortes pentes

Pour des écoulements à forte pente, les perturbations de l'écoulement occasionnées par des facteurs divers (rugosités, présence de particules, etc.) peuvent s'amplifier et donner lieu à des instabilités.

Whitham [17] a montré par l'intermédiaire d'un calcul théorique de stabilité qu'un écoulement peut devenir instable dès lors qu'il présente un régime torrentiel soutenu tel que $Fr > 2$ ou encore dès lorsque l'inclinaison du fond $\tan\theta$ est supérieure à $f/2$. Dans ces conditions l'écoulement ne devient pas nécessairement complètement chaotique. Il peut se développer des mini-vagues périodiques (rollswaves) qui se propagent au niveau de la surface libre dans le sens de l'écoulement moyen.

L'apparition de ces structures périodiques est une source supplémentaire de dissipations de l'énergie de l'écoulement.

Dans un écoulement turbulent rugueux, tel qu'on le rencontre dans les rivières torrentielles ou en torrent, le coefficient de frottement macroscopique est de l'ordre de 0,01 à 0,1. Des instabilités pourront survenir pour des angles d'inclinaison satisfaisants les conditions $\tan\theta > 0,5\%$ ou $\tan\theta > 5\%$ selon la valeur de f . Cette condition est largement dépassée dans le contexte torrentiel où on peut rencontrer des pentes supérieures à 6 %.

Chapitre 4: APPLICATION AUX PROBLEMES DE L'ÉCOULEMENT A SURFACE LIBRE PAR MODELISATION NUMERIQUE. FLUENT

4-1 Introduction :

Actuellement, le calcul numérique permet une modélisation parfaite des phénomènes physiques en développant des modèles basés sur des équations mathématiques non linéaires.

Pour décrire l'influence de la rugosité du fond sur l'écoulement par modélisation numérique, objet de ce chapitre, nous avons utilisé un modèle bidimensionnel et instationnaire. Les équations de continuité, et de quantité de mouvement, (équation de Naviers Stokes) sont résolues par la méthode des volumes finis. Notre modélisation va utiliser le logiciel FLUENT. C'est un modèle numérique en volumes finis utilisant les équations de Navier-Stockes.

Nous avons considéré un l'écoulement en régime turbulent dans un canal à ciel ouvert.

Pour notre simulation nous utiliserons le modèle k- ϵ , ce modèle n'est applicable que dans le cas de la turbulence dont la rugosité du fond est supposée être à l'origine de celle-ci. C'est un modèle de turbulence qui fait partie de la catégorie de modèles qui tiennent en compte le transport des quantités turbulentes en leurs associant des équations de transport différentielles. Il était élaboré par Gibson et Launder (1978). Il est à ce jour le plus connu et le plus utilisé par les codes de calcul.

Des constantes empiriques C_μ , $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$, σ_k et σ_ϵ seront utilisées dans ce modèle. Selon leur valeur, les résultats des calculs peuvent différer. Cela constitue la faiblesse de ce modèle, dans notre cas on va considérer les valeurs suivantes :

C_μ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	σ_k	σ_ϵ
0.09	1.44	1.92	1	1.3

Ainsi, pour les écoulements à surface libre, sans transfert ni distribution, le modèle VOF (Volume Of fluid) est le plus adapté. Nous utiliserons ce dernier pour simuler les écoulements à surface libre.

4-2 Présentation du code de calcul

Pour réaliser nos simulations, nous avons choisi d'utiliser le code de calcul FLUENT que nous présentons dans cette partie.

4-2 .1. Architecture du logiciel

Le code Fluent est un code de calcul généraliste de mécanique des fluides. Il est composé de trois éléments : *le préprocesseur, le solveur et le postprocesseur* :

1. **Le Préprocesseur** La définition du problème à résoudre s'effectue à l'aide du préprocesseur GAMBIT. Il permet de représenter la géométrie du système, de définir le type de conditions limites aux frontières du domaine, de spécifier le type de matériau (fluide ou solide). Il fournit aussi la possibilité de discrétiser le domaine, en proposant plusieurs algorithmes de maillage suivant sa géométrie.
2. **Le solveur** : Le solveur permet de :
 - Définir numériquement les conditions opératoires (gravité, pression) dans lesquelles est effectuée la simulation.
 - Spécification des conditions aux limites.
 - Choisir le processus itératif, en proposant notamment plusieurs schémas numériques pour la discrétisation spatiale et temporelle, et pour le couplage de la vitesse et de la pression.
 - Contrôler et visualiser à tout moment l'état d'avancement des calculs.
3. **Le postprocesseur** : est l'élément qui permet de visualiser la géométrie et le maillage du domaine, mais surtout d'afficher les résultats obtenus. Il est ainsi possible de visualiser les champs de vecteur vitesse, les champs de pression, de turbulence ainsi que toutes les autres grandeurs calculées sur un segment, une section du domaine ou sur tout le volume. Il offre aussi la possibilité de tracer des courbes et de visualiser les lignes de courant ou la trajectoire de particules.

Fluent qui est un code largement utilisé, offre une interface sophistiquée qui facilite son utilisation. C'est pour ces raisons, nous avons choisi ce logiciel.

4-3 Application expérimentale

L'étude expérimentale utilisée pour la validation de la méthode de simulation est la configuration d'un écoulement à surface libre dans un canal dont le fond présente un contraste de rugosité. Cette rugosité est créée par des barrettes collées, à espaces réguliers, sur la zone centrale du fond d'un canal rectangulaire ouvert à la surface libre.

Cette configuration a été choisie pour ses états relativement simples de la géométrie. L'étude expérimentale en question a porté sur plusieurs cas d'essais, conduites dans des diverses conditions de fonctionnement et des modifications du type de rugosité. Le cas particulier utilisé pour la validation actuelle est désigné sous le nom de «Écoulement à surface libre sur fond de rugosité inhomogène» dans le rapport de laboratoire mécanique des fluides de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE de Toulouse, [1].

4-3.1 Description du dispositif expérimental :

L'étude a été réalisée dans un canal ouvert de section rectangulaire, d'une longueur de 13.5m, (dans notre simulation, on s'est limité à une longueur de 33 cm pour minimiser le temps de calcul). La hauteur est de 0.2 m et la largeur 0.52 m (Figure 4-1).

Les axes ox ($x=0$ à l'entrée du canal), oy ($y=0$ au centre du canal passant au dessous des sommets des éléments rugueux) représentent la direction longitudinale et verticale respectivement.

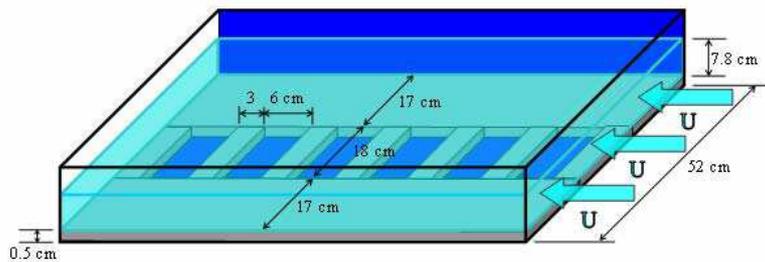


Figure 4-1 : Configuration du dispositif expérimental et la rugosité utilisée

4-4 Caractéristiques hydrodynamiques de l'écoulement étudié

La pente du canal a été fixée à $I = 0.002$ m/m. Le débit d'eau égal à 22 l/s et le tirant d'eau égal à 7.8 cm, par rapport au sommet des barrettes, ont été choisis de façon à assurer un écoulement uniforme, à hauteur constante, le long du canal.

Dans le tableau 4.1, nous résumons les principales caractéristiques hydrodynamiques de l'écoulement étudié. Nous désignons par h le tirant d'eau, mesuré à partir du sommet des barrettes, B la largeur du canal, R_h le rayon hydraulique, Q le débit, U_m la vitesse débitante, F_r le nombre de Froude ($F_r = U_m / \sqrt{g \cdot h}$) et R_e le nombre de Reynolds ($R_e = 4R_h U_m / \nu$).

Pente	H(cm)	B(cm)	B/h	R_h (cm)	Q(l/s)	U_m (cm/s)	F_r	R_e	ρ Eau kg/m ³	ν Eau m ² /s
0.002	7.8	52	6.7	6	22	54.2	0.617	1.296×10^5	998.2	1.00×10^{-6}

Tableau 4.1 : caractéristiques hydrodynamiques de l'écoulement étudié

4- 5 Modélisation mathématique

Dans la pratique les écoulements turbulents sont généralement modélés par R.A.N.S. (Reynolds Averaged Navier-Stokes) ; (les équations de Navier-Stokes sont ramenées à une moyenne en utilisant la décomposition de Reynolds).

Le code Fluent résout les équations de Reynolds présentées ci-dessous, en incluant le modèle de Gibson et Launder (1978), ou en option le modèle quadratique de Speziale et al. (1991):

Equation de continuité :

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (4.1)$$

U_j : Composantes du champ moyen de vitesse

Equation de la quantité de mouvement :

$$\rho \frac{DU_i}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\rho\nu U_{ij} - \rho \overline{u_i u_j} + \rho g_i) \quad (4.2)$$

Dans l'équation (4.2), l'opérateur de dérivée matérielle est défini par rapport à la vitesse moyenne $\frac{D}{Dt} = \left(\frac{\partial}{\partial t} + U_j \frac{\partial}{\partial x_j} \right)$, ν est la viscosité cinématique du fluide, P champ de pression moyenne.

$U_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$: est le tenseur des taux de déformation par le gradient de vitesse moyenne, g_i est le vecteur accélération de la pesanteur.

$-\rho \overline{u_i u_j}$: les contraintes de Reynolds.

Équation de transport du tenseur de Reynolds :

Le taux de dissipation étant calculé par l'équation suivante :

$$\frac{D \rho \overline{u_i u_j}}{Dt} = \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j} U_j}{\partial x_k} = \underbrace{-\left(\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k}\right)}_{P_{ij}} - \underbrace{2\nu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k}}_{\varepsilon_{ij}} + \underbrace{\frac{p}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)}_{\Phi_{ij}} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left(\overline{u_i u_j u_k} + \frac{p}{\rho} (\delta_{kj} u_i + \delta_{ik} u_j)\right)}_{d_{ij}} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u_i u_j}}{\partial x_k^2} \quad (4.3)$$

Dans l'équation (4.3), à l'exception du terme explicite P_{ij} de génération par cisaillement et du terme de diffusion moléculaire (d'ailleurs négligeable dans les zones de turbulence développée), les termes de dissipation, ε_{ij} , de corrélation pression - déformation, Φ_{ij} , de diffusion turbulente, d_{ij} , constituent des champs inconnus en surnombre.

Équation du taux de dissipation :

En écoulement à grand nombre de Reynolds, l'hypothèse d'isotropie locale de la turbulence, au niveau des petits tourbillons où se produit la dissipation, conduit à exprimer ε_{ij} par :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \varepsilon \delta_{ij}$$

Le taux de dissipation, ε , de l'énergie cinétique turbulente doit être prédit par une équation supplémentaire qui, dans la formulation la plus couramment utilisée, s'écrit :

$$\frac{D \varepsilon}{Dt} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon U_j}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{u_i \varepsilon}{\sigma_\varepsilon} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_r - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.4)$$

Où $Pr = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i}$ est la production d'énergie cinétique turbulente et les constantes ont les valeurs standard : $(C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_\varepsilon) = (1.44, 1.92, 1.3)$

4- 6 Modélisation Numérique

4- 6 - 1 Généralités

Pour modéliser les écoulements à ciel ouvert, les deux approches principales sont : Euler-Euler et Euler-Lagrange.

Fluent (2003) propose trois modèles principaux fondés sur l'approche Eulérienne, à savoir le modèle VOF (Volume Of Fluid), le modèle de mélange ou «Mixture» et le modèle d'Euler.

Les critères de choix d'un modèle approprié dépendent du type d'écoulement, des forces mises en jeu. Ainsi, pour les écoulements à surface libre, sans transfert ni distribution, le modèle VOF est le plus adapté. Nous utiliserons ce dernier pour simuler les écoulements à surface libre.

Le modèle VOF repose sur une méthode dite méthode de la fraction volumique. Elle permet de localiser l'interface entre deux domaines fluides différents. Elle est applicable pour des fluides qui n'y ont pas d'interpénétration entre eux (eau-air par exemple).

Fluent dispose de quatre schémas numériques pour localiser l'interface eau-air par exemple : Euler Explicit, implicit, geometric reconstruction, donor-acceptor.

Le schéma « implicit » est adapté en régime permanent. En régime transitoire, l'utilisation des méthodes VOF implique la donnée du nombre de Courant. C'est un nombre sans dimension qui compare le pas de temps de calcul Δt au temps caractéristique durant lequel un élément fluide transite à travers le volume de contrôle.

4- 6 - 2 Conditions initiales et aux limites

a) Conditions initiales :

Les conditions initiales imposées sont :

- Les valeurs initiales de la Vitesse d'entrée dans différentes phase ; eau et air.
- les valeurs initiales pour la turbulence k , ϵ calculées comme suit : $k=3/2 (U \cdot I_{tur})^2$; dont $I_{tur} = 0.16 Re^{-1/8}$, d'où : $k=2.33 E^{-04}$, $\epsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l}$; dont $l = 0.07 D_h$, d'où : $\epsilon = 6.98 E^{-06}$
- La valeur initiale de la pression

- la fraction volumique (position initiale de la surface libre)

Remarque : Si les variables possèdent des valeurs initiales constantes, il est possible de les livrer directement au logiciel. Dans le cas contraire, l'utilisateur peut créer un sous-programme (fonctions définies par l'utilisateur ou User Define Fonction) dans lequel il est possible d'établir des profils initiaux non uniformes pour chacune des variables de l'écoulement.

b) Conditions aux limites

Une fois que nous avons représenté la géométrie du système étudié, nous devons fixer des conditions aux limites du système sur les valeurs de la pression P , de la vitesse U , de l'énergie cinétique turbulente k et du taux de dissipation d'énergie cinétique turbulente ϵ .

Nous en utilisons dans notre cas trois conditions:

- vitesse d'entrée « velocity-inlet », en fonction du débit injecté et les données géométriques (surface mouillée et périmètre mouillé)
- pression de sortie « pressure-outlet » est appliquée au niveau des sorties (sortie de fluide à la pression atmosphérique).
- conditions de rugosité des parois « type wall » en faisant varier la rugosité selon le régime d'écoulement turbulent (c-a-d pour des valeurs du nombre de *Reynolds* supérieures ou égales à 2300 et à des valeurs de rugosité comprises en 0 et 0,05). Trois cas sont étudiés :

Type d'écoulement	La formule associée	R_s	$C_f=f/4$	k_s	u_s (m/s)
Ecoulement lisse	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -C_1 \text{Log} \left(\frac{C_2}{4Re\sqrt{f}} \right)$	0,00	0,0018955	0	0,01669
Ecoulement transitoire	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -C_1 \text{Log} \left(\frac{ks}{C_2 Rh} + \frac{C_2}{4Re\sqrt{f}} \right)$	$4 < 33,16 < 70$	0,001871	0,002	0,01658
Ecoulement rugueux	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -C_1 \text{Log} \left(\frac{ks}{C_2 Rh} \right)$	$221,96 > 70$	0,0134163	0,005	0,04439

Dont :les valeurs de u_s et R_s sont calculés d'après les équations (3-7) et (3-12).

Les coefficients $C_1=2$, $C_2=12$, $C_3=2.5$.

f : Coefficient de frottement calculé en utilisant le programme (voir chapitre 2 (2-3)).

4- 6 - 7 Méthode de résolution

Le code FLUENT utilise **la méthode des volumes finis** [18]. Le volume de la géométrie est discrétisé en volumes élémentaires (hexaèdres, tétraèdres, prismes ou un mélange des trois) qu'on appelle aussi mailles. Il résout les équations de transport de la matière : équation de continuité ; de la quantité de mouvement ; de l'énergie cinétique turbulente et du taux de dissipation d'énergie cinétique turbulente.

4- 6 - 8 Etapes de calcul par FLUENT :

Etape1 : Choix du Solutionneur

Dans une première étape, nous devons choisir le code qui doit modéliser et résoudre les équations du Système: **Solver _ FLUENT5/6**

Etape2 : Création de la Géométrie.

1er cas : Ecoulement rugueux ($k_s=0.005$)

On crée la surface à partir des points, des lignes, et puis des surfaces.

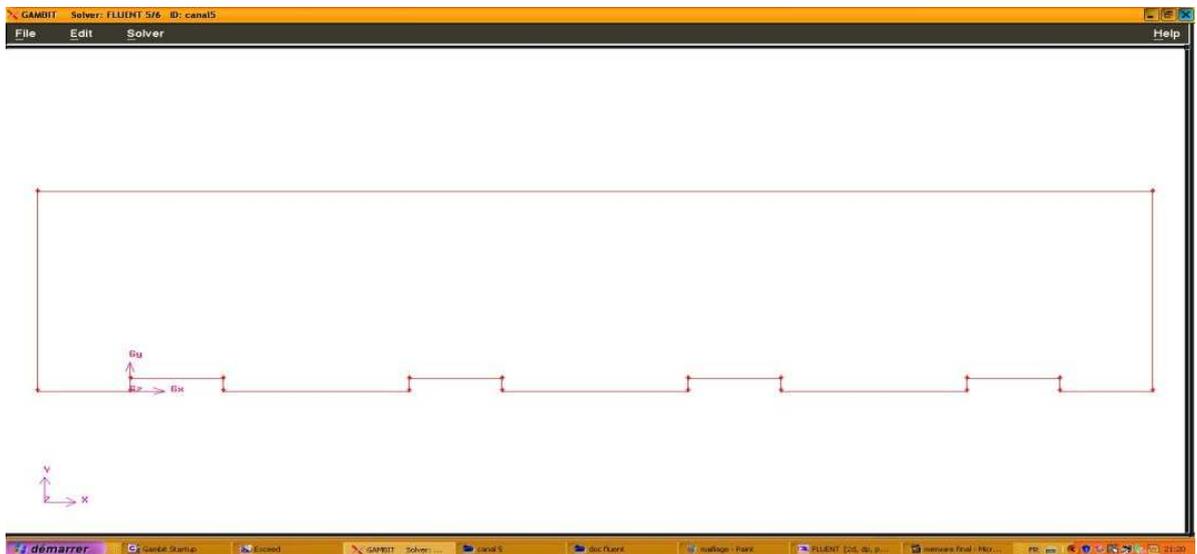


Figure 4-2 : création de la géométrie

Etape3 : Maillage des parois et de la surface

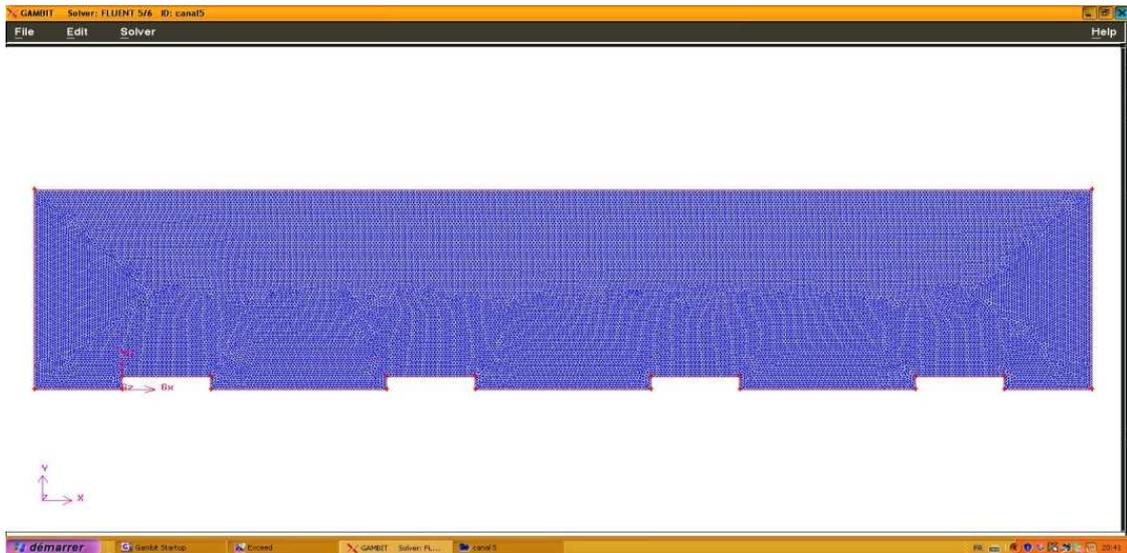


Figure 4-3 : création du maillage 58226 nœuds

Etape 4 : Les conditions aux limites

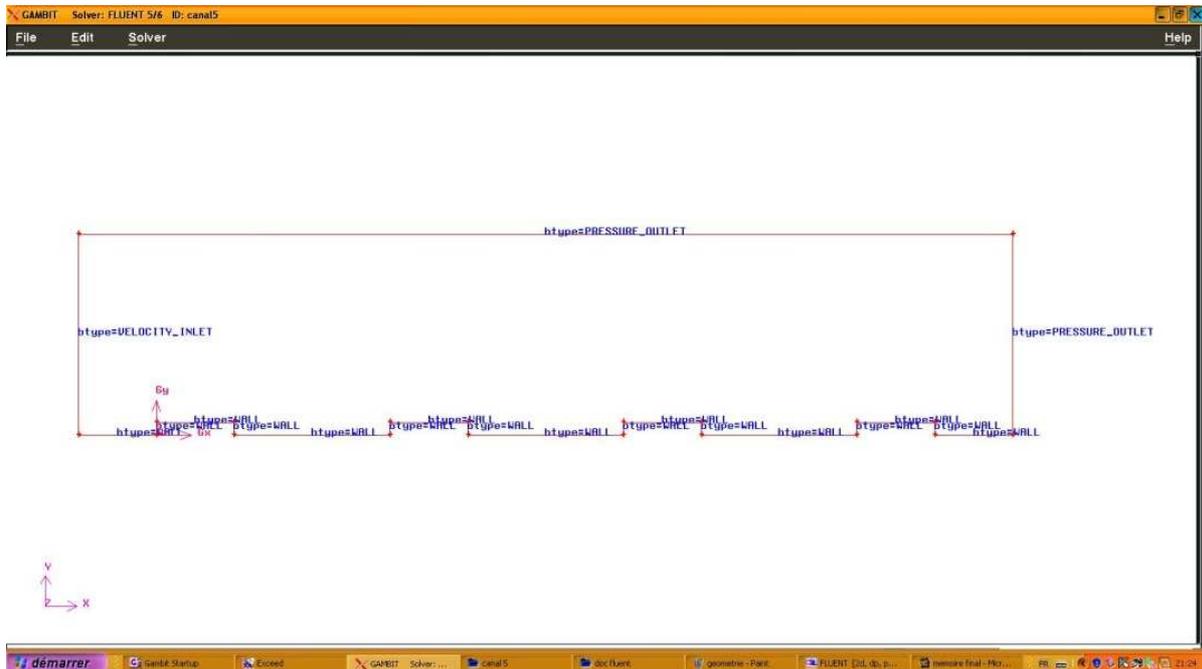


Figure 4-4 : création des conditions aux limites

Etape5 : Sauvegarde et Exportation du fichier vers Fluent

Etape6 : Test de Convergence des calculs :

Pour s'assurer de la convergence des calculs, nous nous aidons de deux critères

visuels. Le premier consiste à observer les courbes des résidus tracées par Fluent, en fonction des itérations. Lorsque les résidus sont faibles (inférieurs à 10^{-3} au moins) et que les courbes deviennent plates comme illustrées ci-dessous, nous pouvons considérer que la solution est atteinte. Un autre critère consiste à suivre l'évolution des champs de vitesse, de pression, au fur et à mesure des itérations. Lorsqu'ils n'évoluent plus, cela signifie que le calcul a convergé. En combinant ces deux critères visuels, nous avons déduit que la solution est obtenue au bout de 1000 itérations.

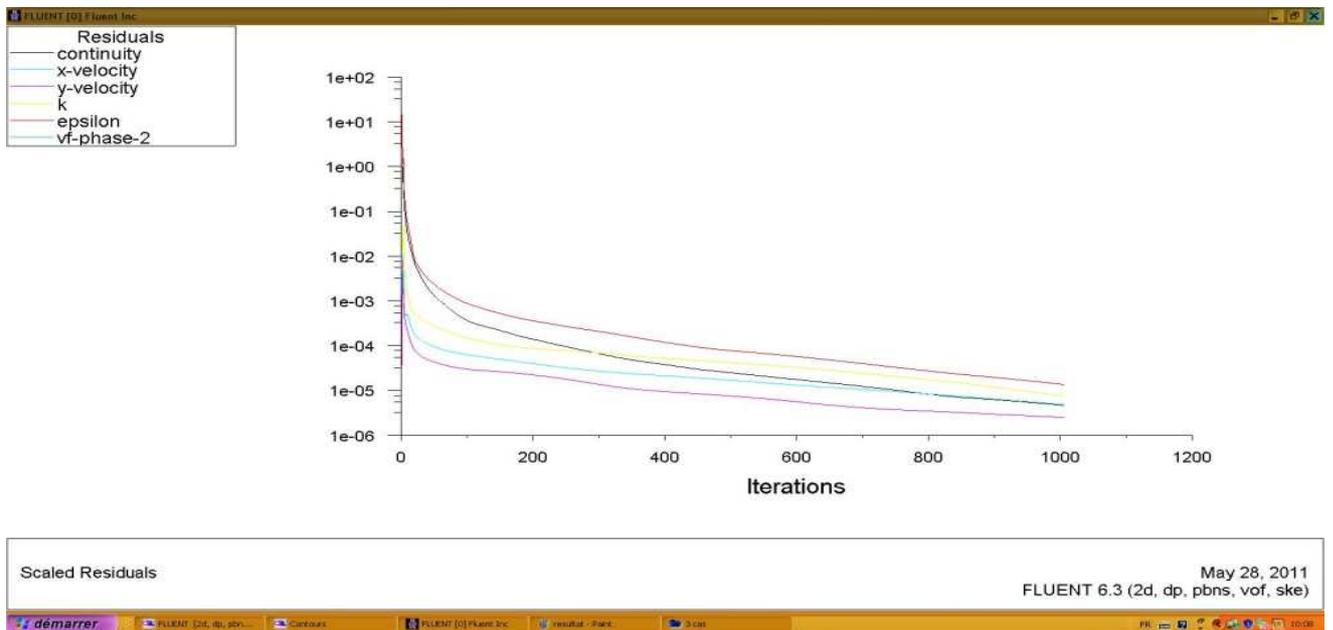


Figure 4-5 : courbes des résidus nombre d'itérations 1000

2^{eme} cas : Ecoulement transitoire ($K_s=0.2$ mm)

Etape1 : Création de la Géométrie.

On crée la surface à partir des points, et des lignes.

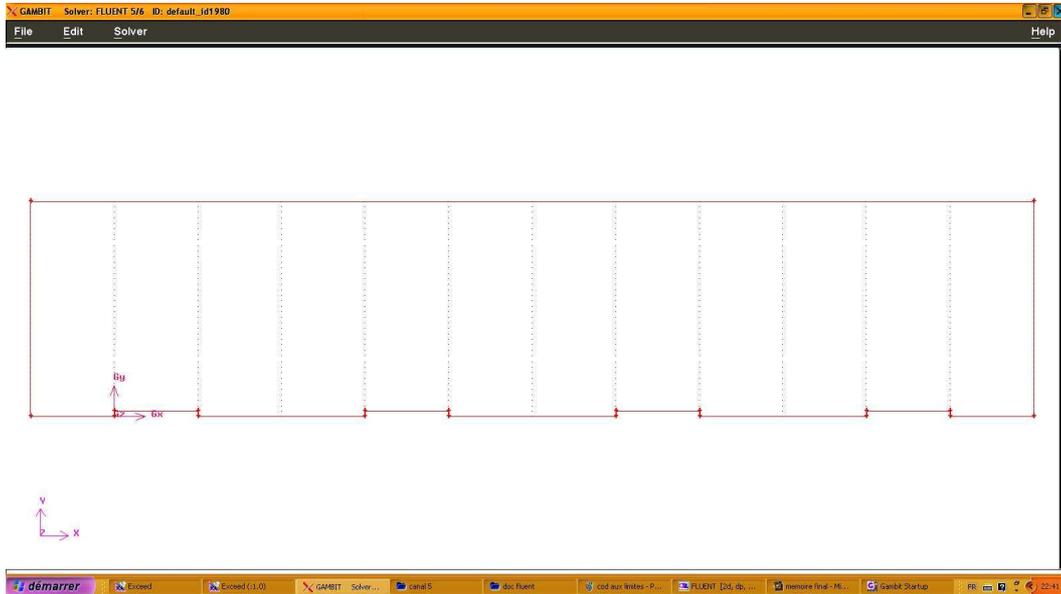


Figure 4-6 : création de la géométrie ($K_s=0.2$ mm)

Etape2 : Maillage des parois et de la surface

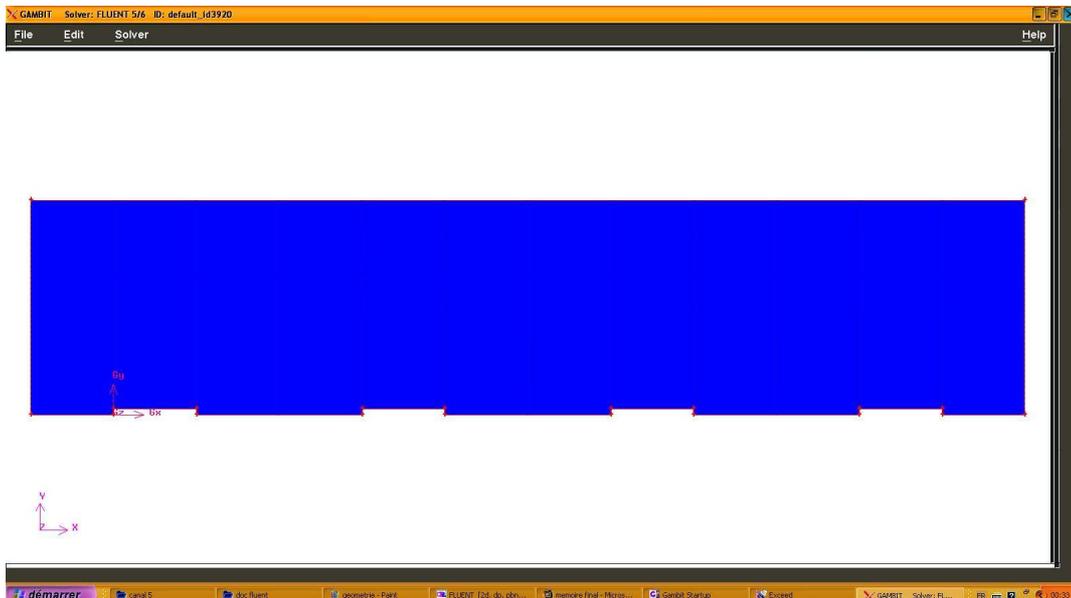


Figure 4-7: création du maillage 404025 nœuds

Etape3 : Les conditions aux limites

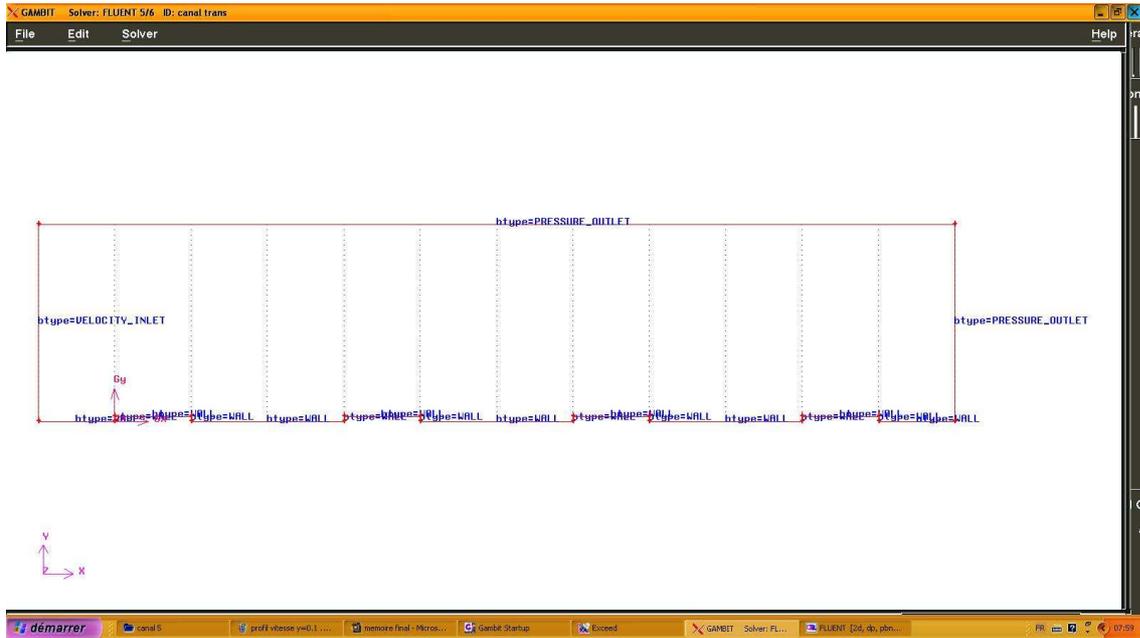


Figure 4-8 : création des conditions aux limites

Etape4 : Sauvegarde et Exportation du fichier vers Fluent

Etape5 : Test de Convergence des calculs :

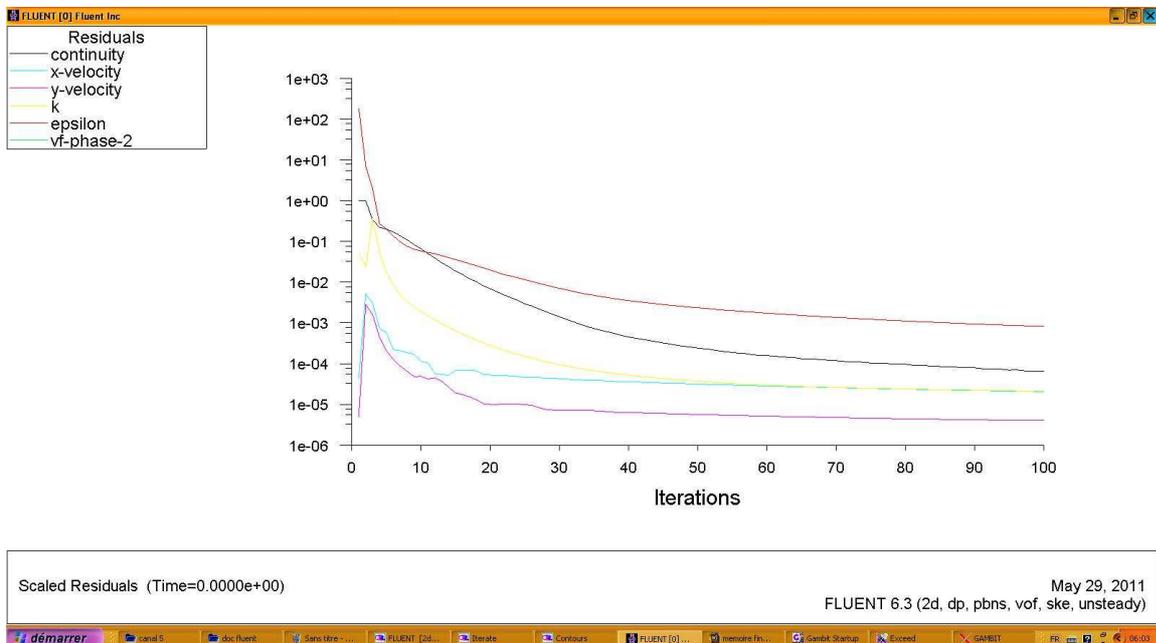


Figure 4-9 : courbes des résidus nombre d'itérations 100

3^{eme} cas : Ecoulement lisse ($k_s=0$)

On crée les lignes à partir des points, et on crée la surface à partir des lignes.

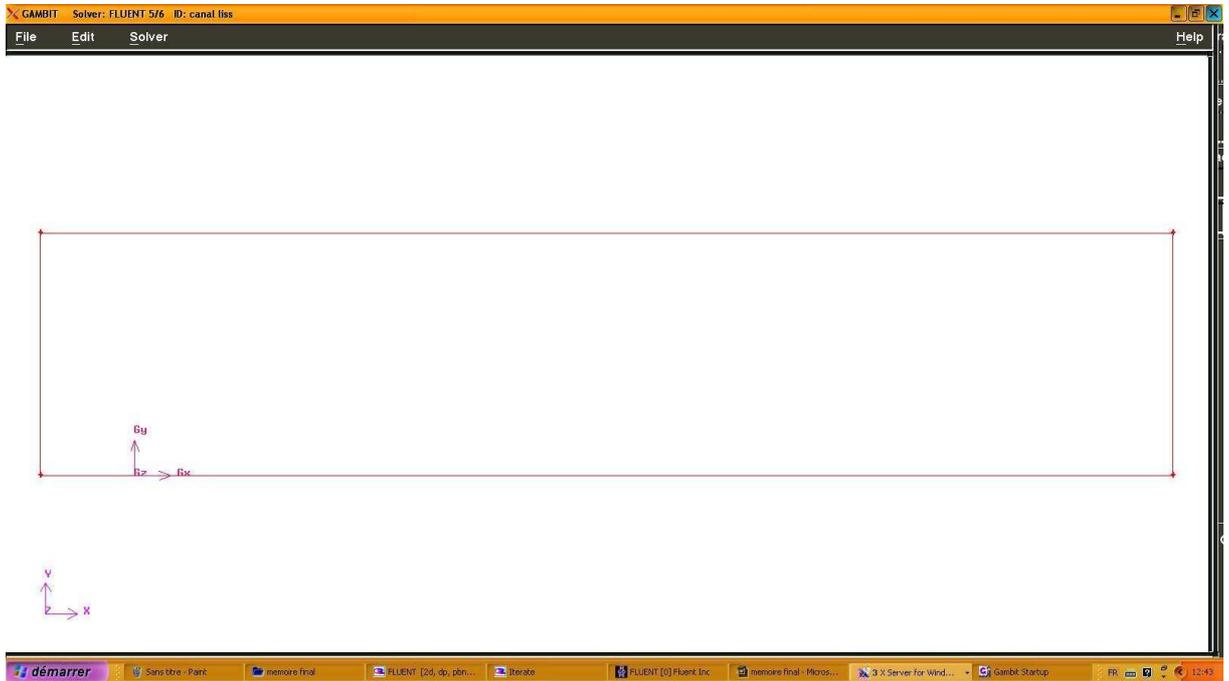


Figure 4-10 : création de la géométrie

Etape1 : Maillage des parois et de la surface

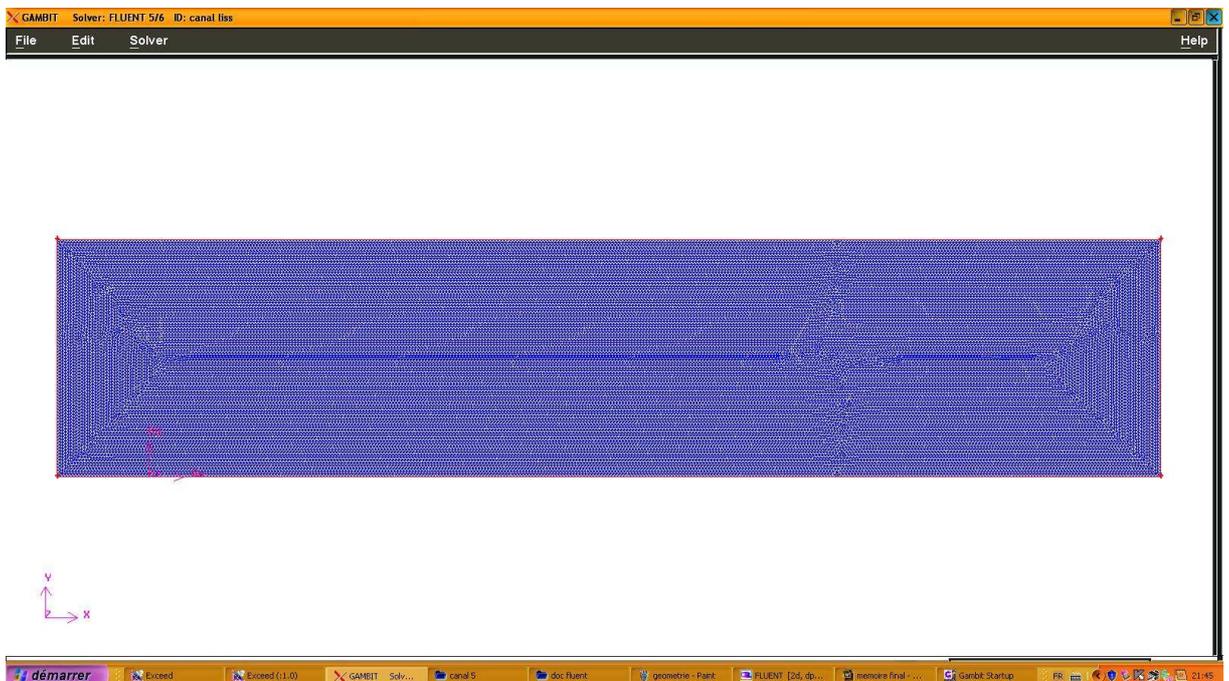


Figure 4-11: création du maillage 63748 Nœuds

Etape2 : Les conditions aux limites

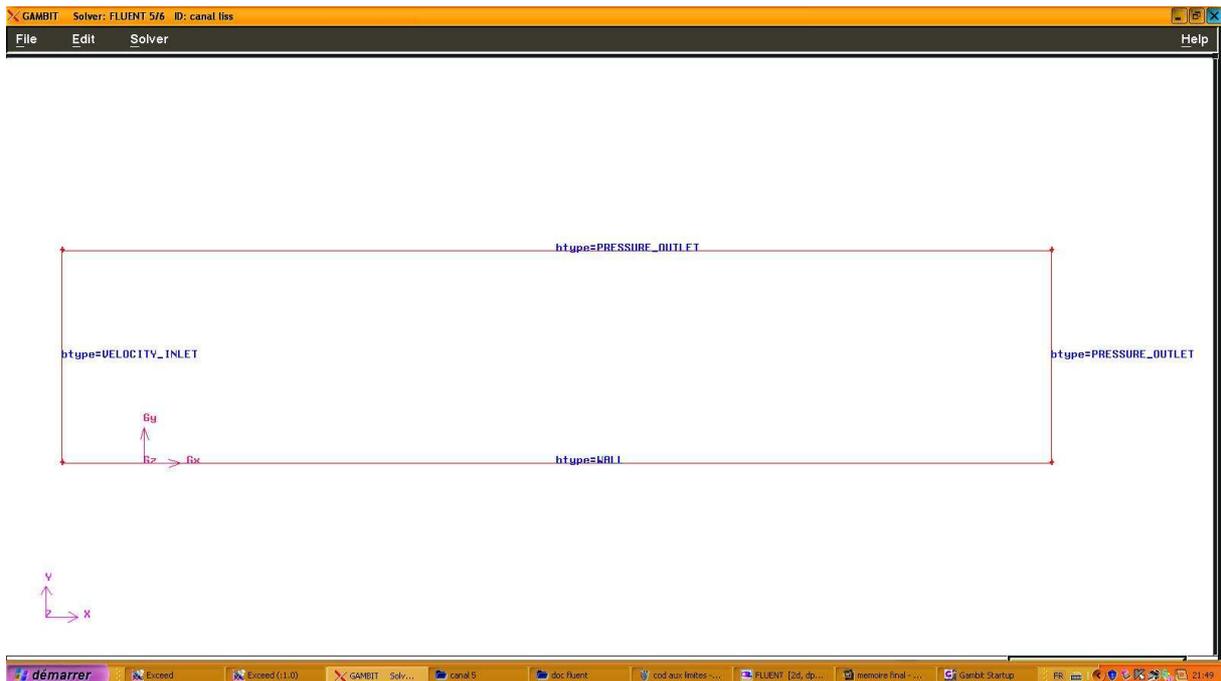


Figure 4-12 : création des conditions aux limites

Etape3: Sauvegarde et Exportation du fichier vers Fluent

Etape4 : Test de Convergence des calculs :

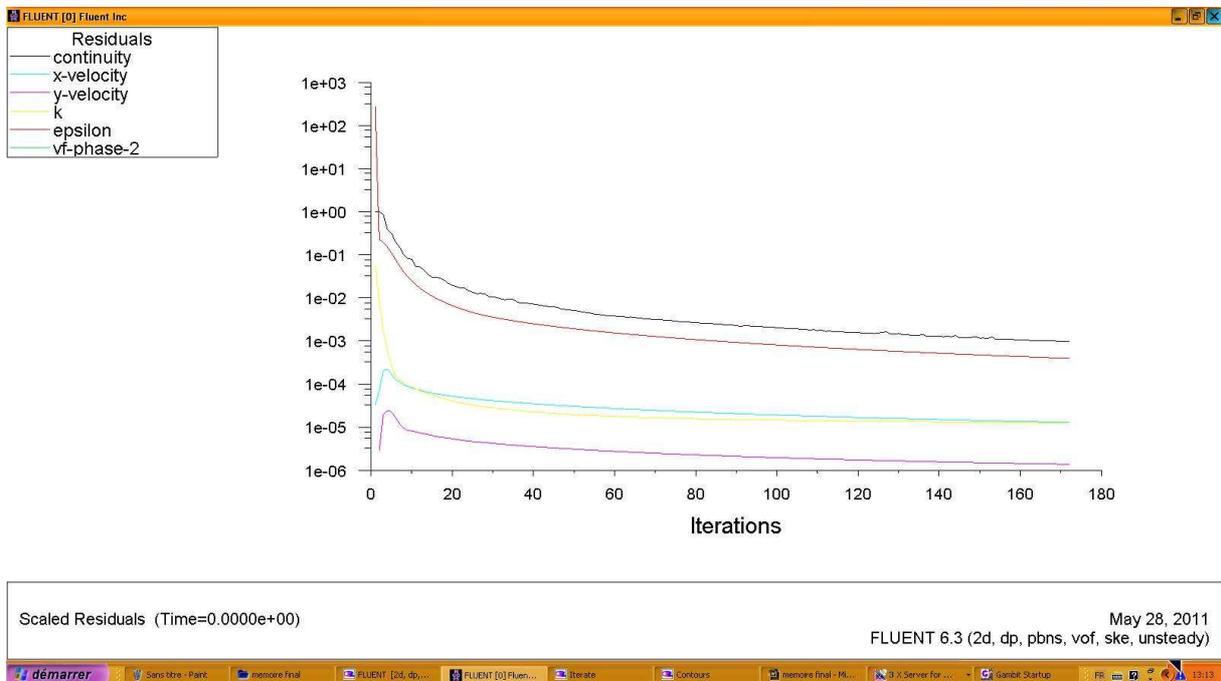


Figure 4-13 : courbes des résidus nombre d'itérations 172

Chapitre 5 : RESULTATS ET INTERPRETATION

5.1. La description des caractéristiques de l'écoulement

Dans ce qui suit, nous allons décrire les résultats obtenues pour les trois régimes d'écoulements et dans chaque zone d'écoulement (étudiées dans le paragraphe 3-2-8-2); subdivisée comme suit :

1. Zone du fond entre : $y= 0$ et $y= 1.56$ cm
2. Zone intermédiaire : $y= 1.56$ et $y= 4.68$ cm
3. Zone surface libre : $y= 4.68$ et $y= 7.80$ cm

1^{er} cas écoulement rugueux

La présence de la rugosité a crée de fortes perturbations dans l'écoulement figures de (4-1 à 4-5). Cela se traduit notamment par : l'apparition d'une zone de recirculation à faibles vitesses (quelques cm/s), située dans l'alignement de la rugosité et qui s'étend jusqu'au seuil aval, avec apparition des cellules de courants secondaires.

5.1.1 Champs de vitesses

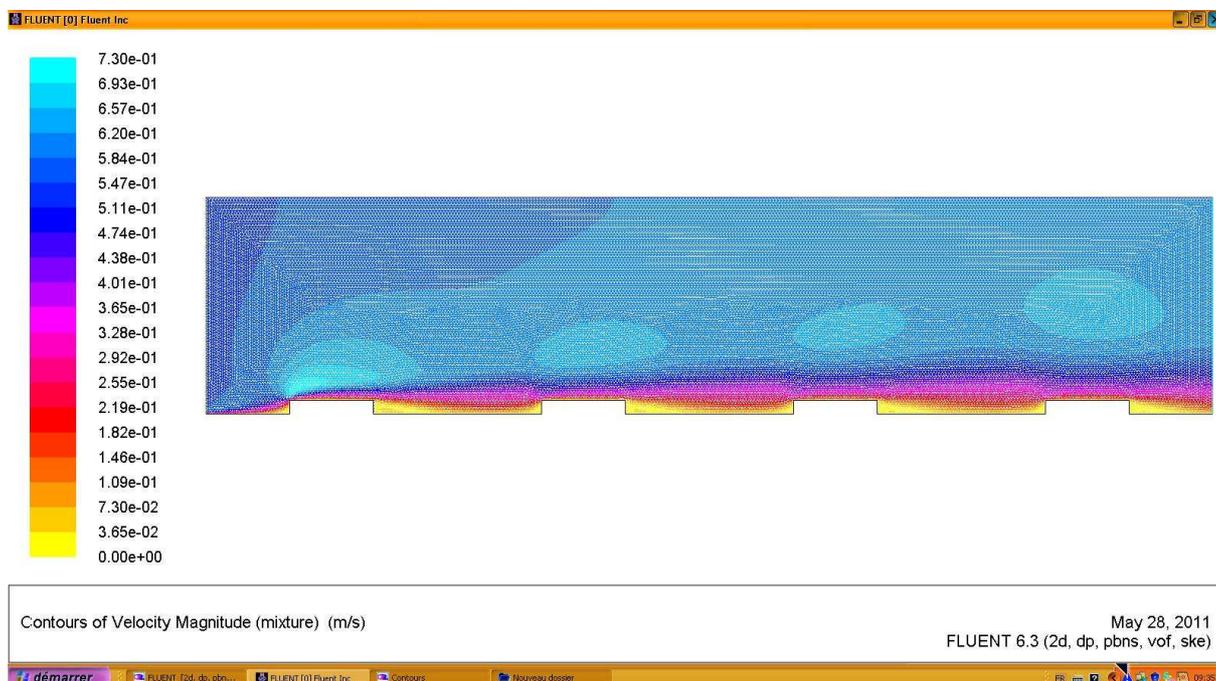


Figure 5.1: Champs de vitesses (m/s) calculé en 2 D

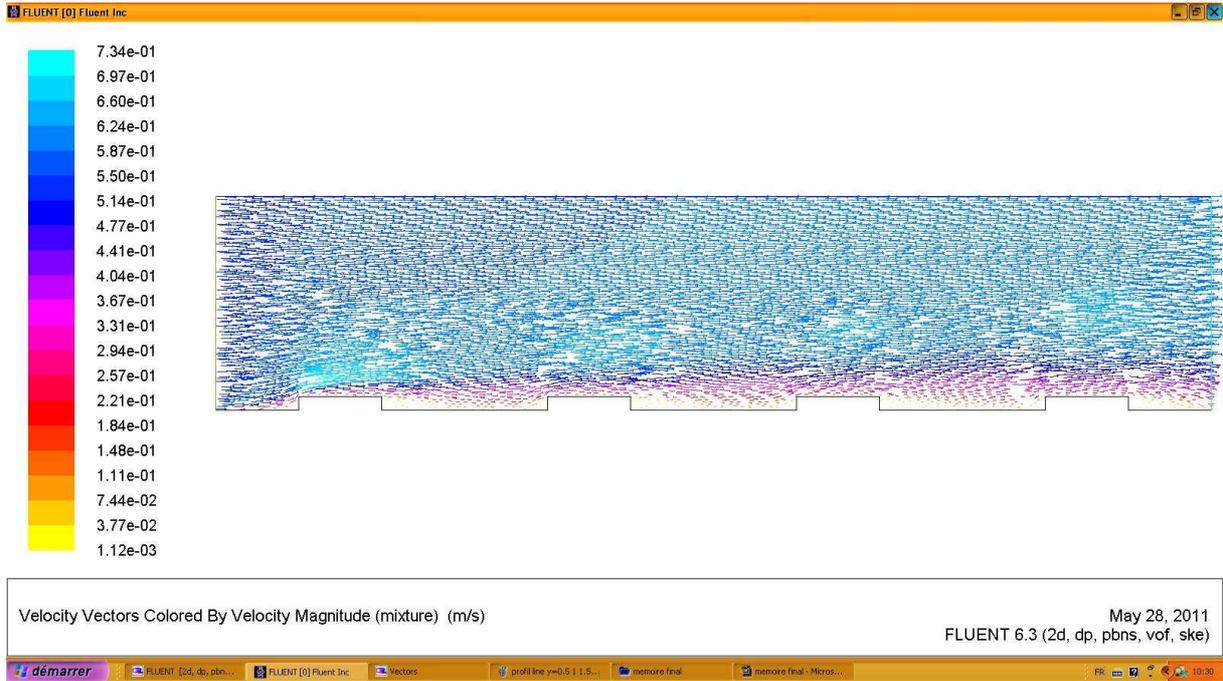


Figure 5.2: Vecteurs de vitesses (m/s) calculé en 2 D



Figure 5.3 : agrandissement vecteurs de vitesses (m/s) au niveau du fond rugueux

5.1.2 Profils de vitesses (coupe longitudinale)

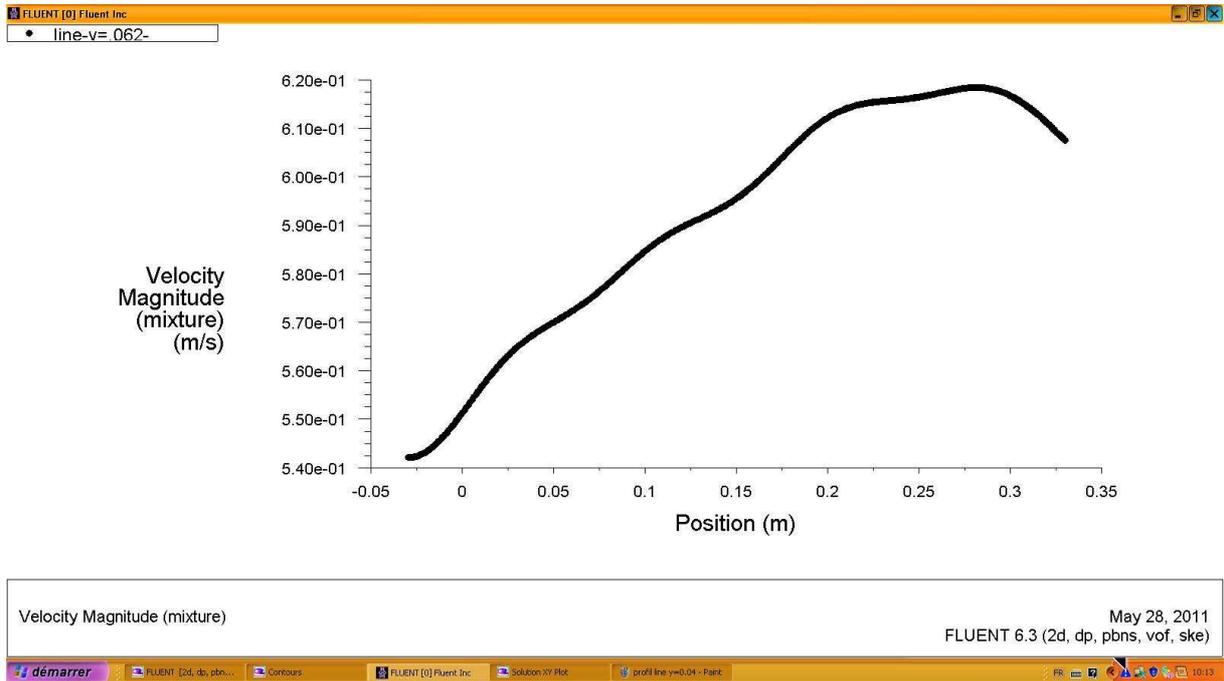


Figure 5.4: profil des vitesses V_x (m/s) à $y=6.20$ cm (zone de surface libre) d'où la vitesse augmente puis décrois

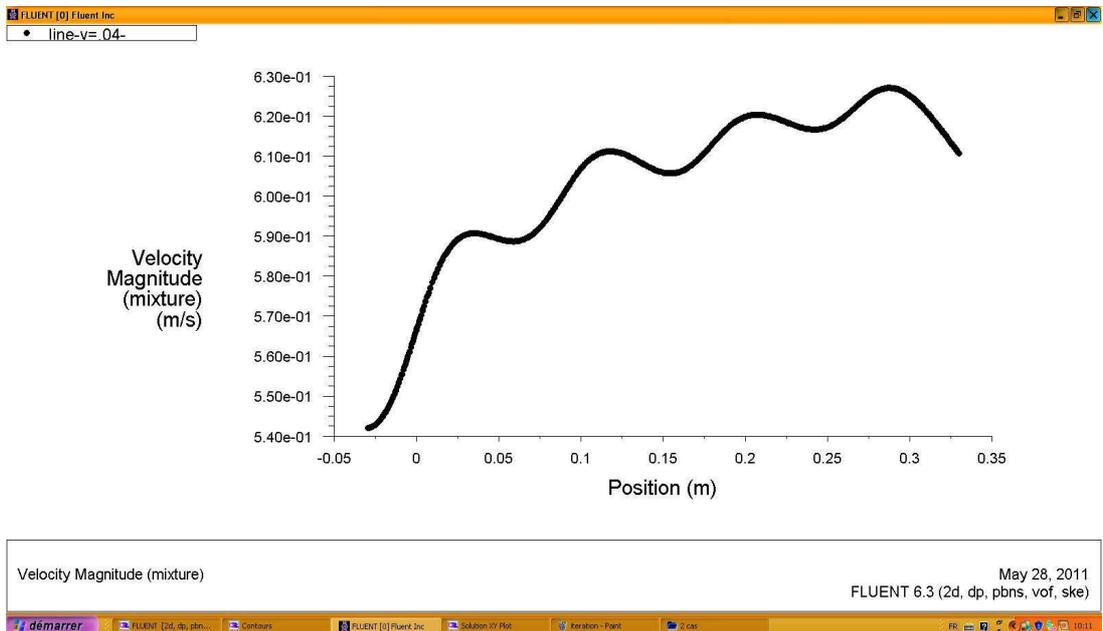


Figure 5.5: profil des vitesses V_x (m/s) à $y=4$ cm (zone intermédiaire près de la zone de la surface libre d'où l'allure la vitesse augmente puis décrois)

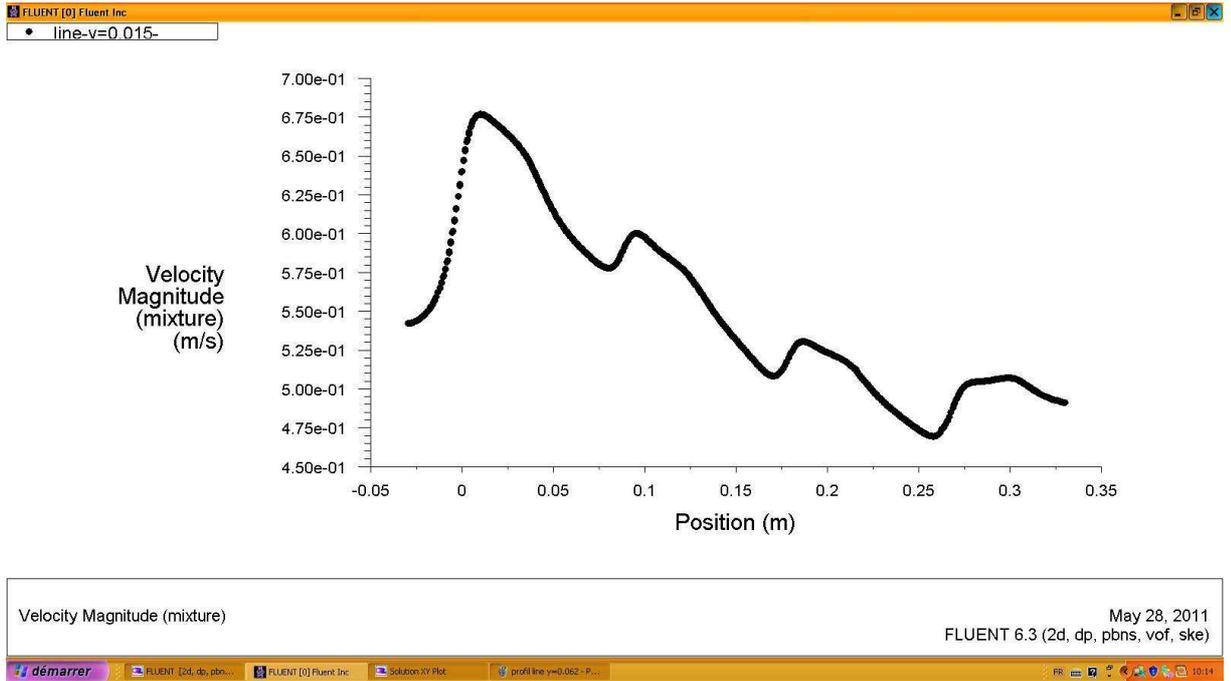


Figure 5.6: profil des vitesses V_x (m/s) à $y=1.5\text{cm}$ (zone du fond d'où l'allure la vitesse décroît avec perturbation)

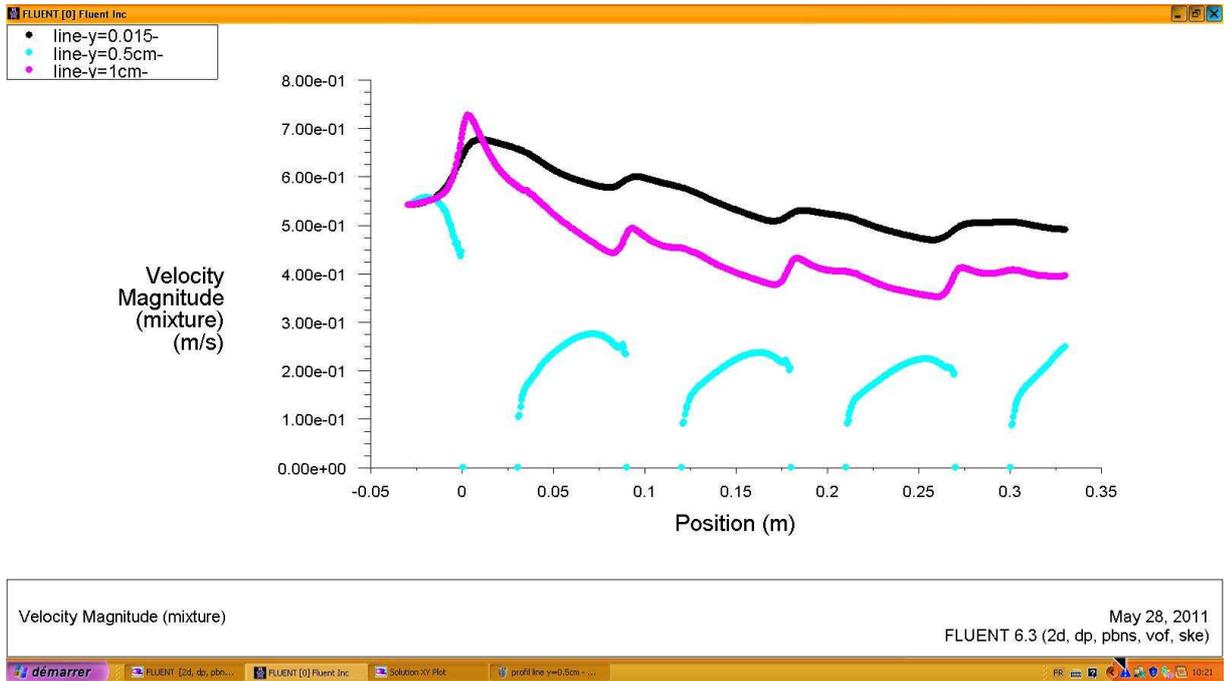


Figure 5-7: profil des vitesses V_m (m/s) des 02 zones du fond et intermédiaire. D'où l'allure de la vitesse décroît en générale, dans la zone $y=0.5\text{cm}$; sommets des dents, on remarque l'apparition de la recirculation

5.1.3 Profils de vitesses (coupe transversale)

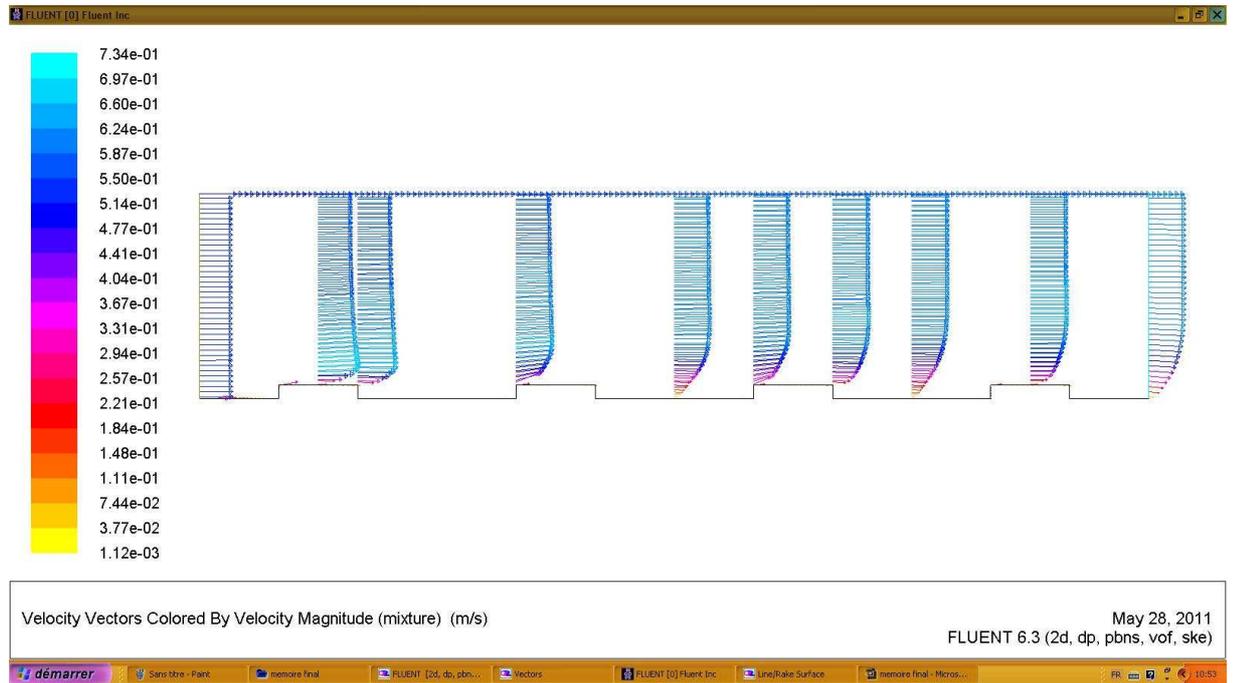


Figure 5.7: coupes transversales des vitesses V_x (m/s) dans : l'entrée $x=0$ vitesse débitante, au dessus de la dent $x=1.50$ cm, à la fin de la dent $x=3$ cm, au début de la dent $x=9$ cm, $x=15$ cm, $x=18$ cm, $x=21$ cm, $x=24$ cm, $x=28.50$ cm, et à la sortie. On remarque que les profils au centre de cavité sont les plus représentatifs de l'écoulement moyen)

2^{ème} cas : Ecoulement transitoire

5.1.3 La description des caractéristiques de l'écoulement

La présence de la rugosité a créé des perturbations dans l'écoulement moins que celles du cas précédent figures de ci-dessus. Cela se traduit notamment par : L'apparition de zones de différentes vitesses, située dans l'alignement de la rugosité et qui s'étend jusqu'à l'aval, avec des cellules de courants secondaires plus ou moins importantes.

5.1.4 Champs de vitesses

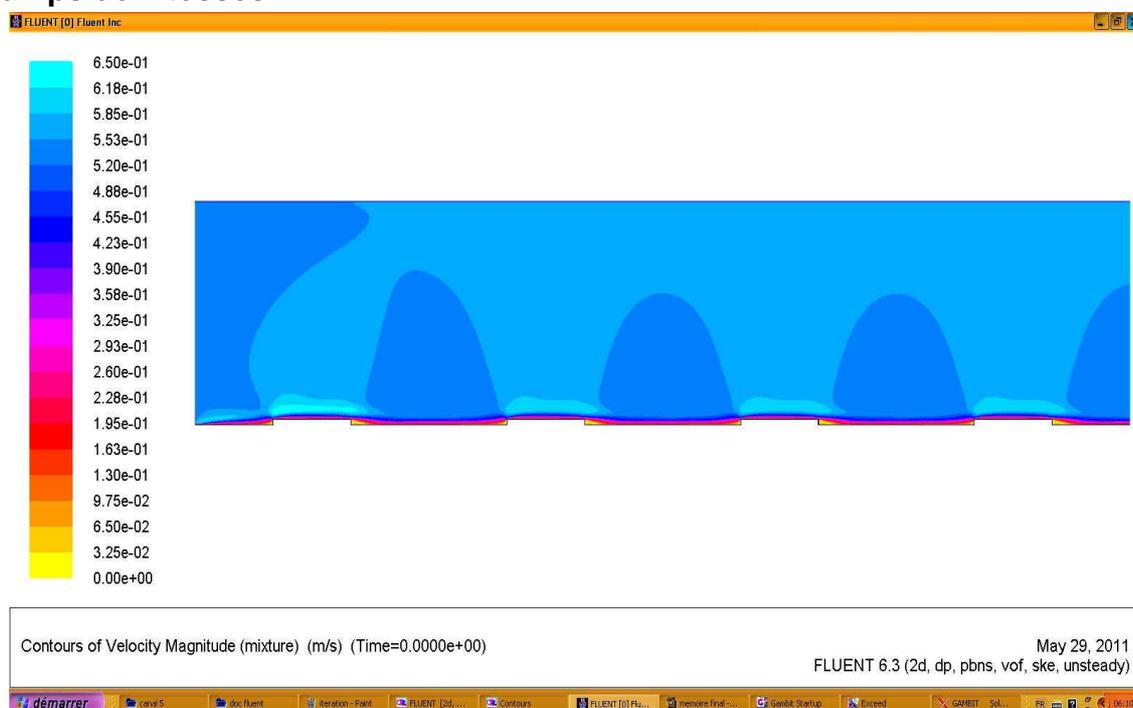


Figure 5.8: Champs de vitesses (m/s) calculé en 2 D

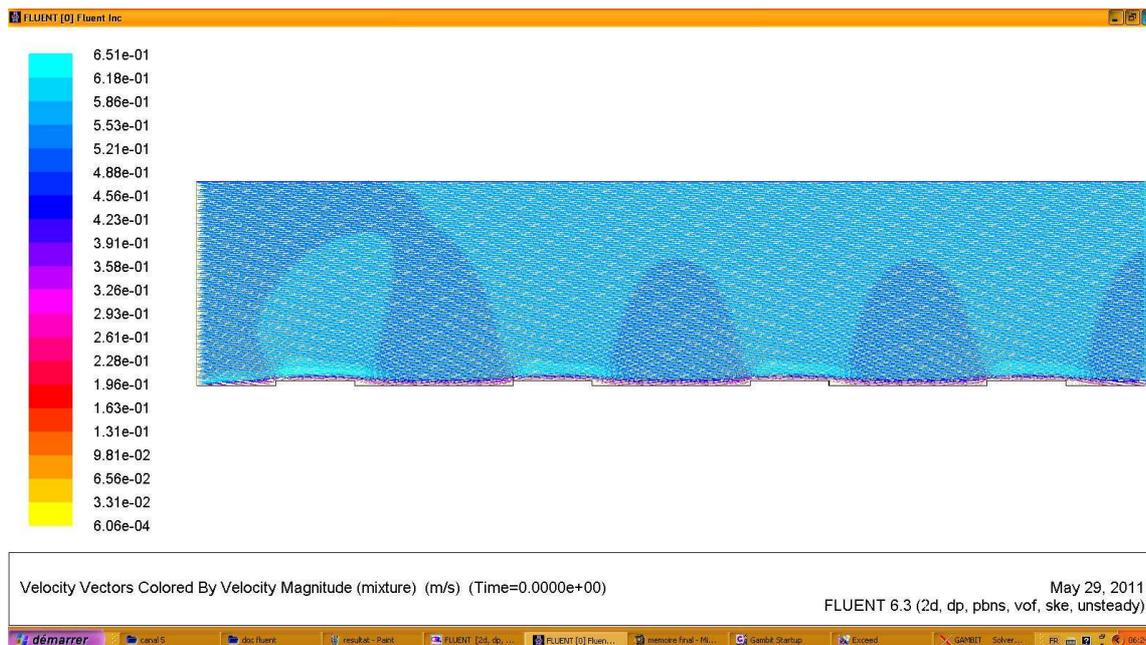


Figure 5.9: Vecteurs de vitesses (m/s) calculé en 2 D

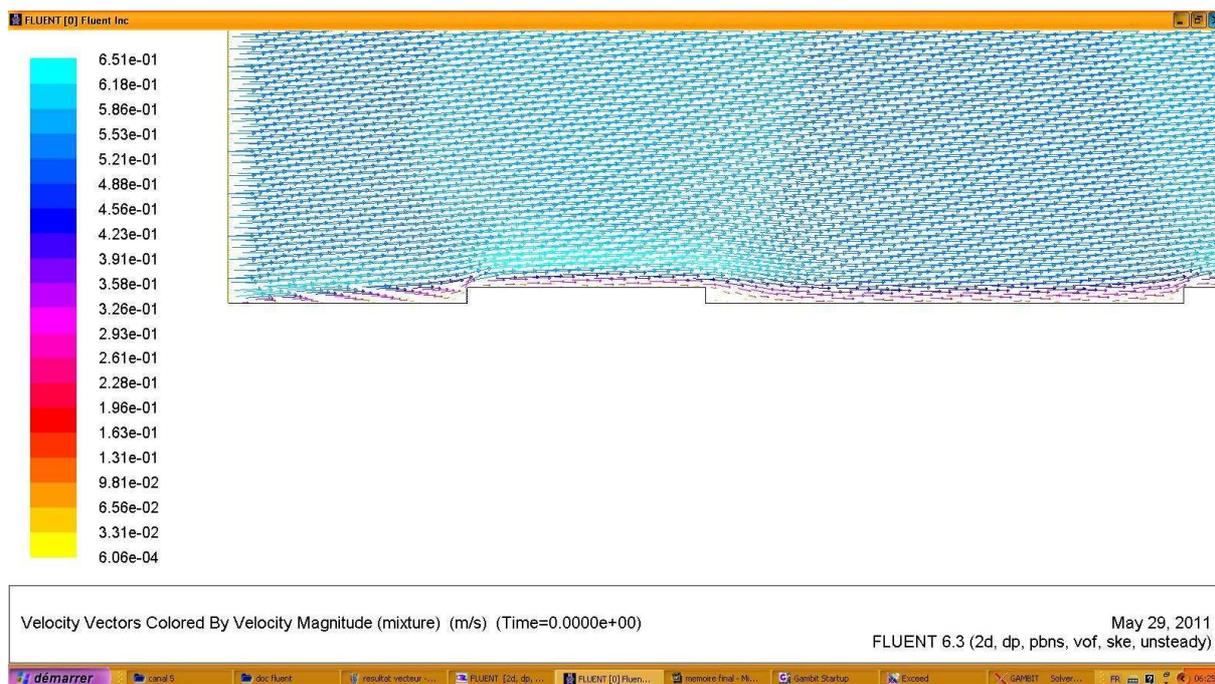


Figure 5.10 : agrandissement Champs de vitesses (m/s) au niveau du fond rugueux

5.1.5 Profils de vitesses (coupe longitudinale)

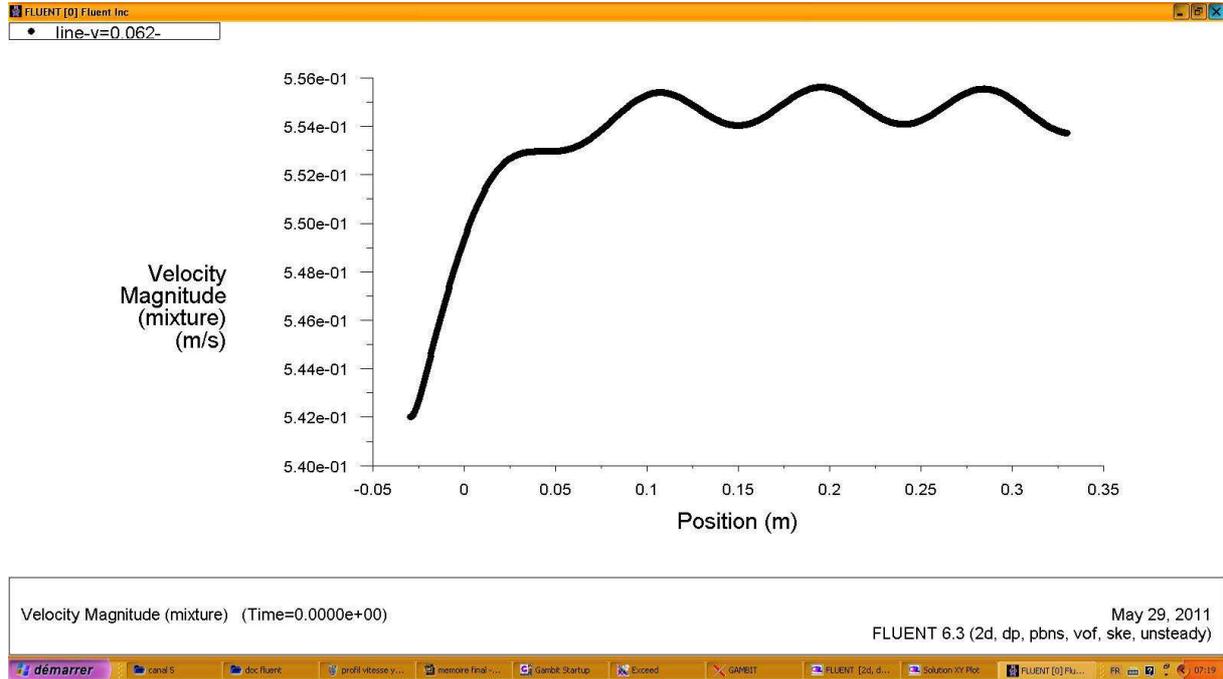


Figure 5.11: profil des vitesses V (m/s) à $y=6.20$ cm (zone de surface libre d'où l'allure de la vitesse augmente puis tend vers se stabilisé avec ondulations)

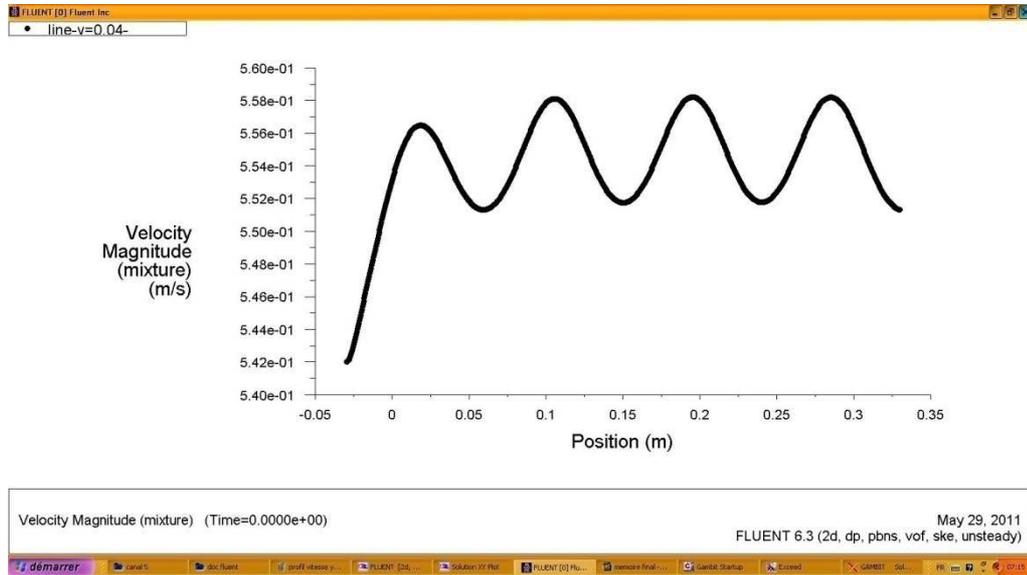


Figure 5.12: profil des vitesses V_m (m/s) à $y=4$ cm (zone intermédiaire d'où l'allure de la vitesse augmente puis tend vers se stabiliser avec des ondulations plus grandes)

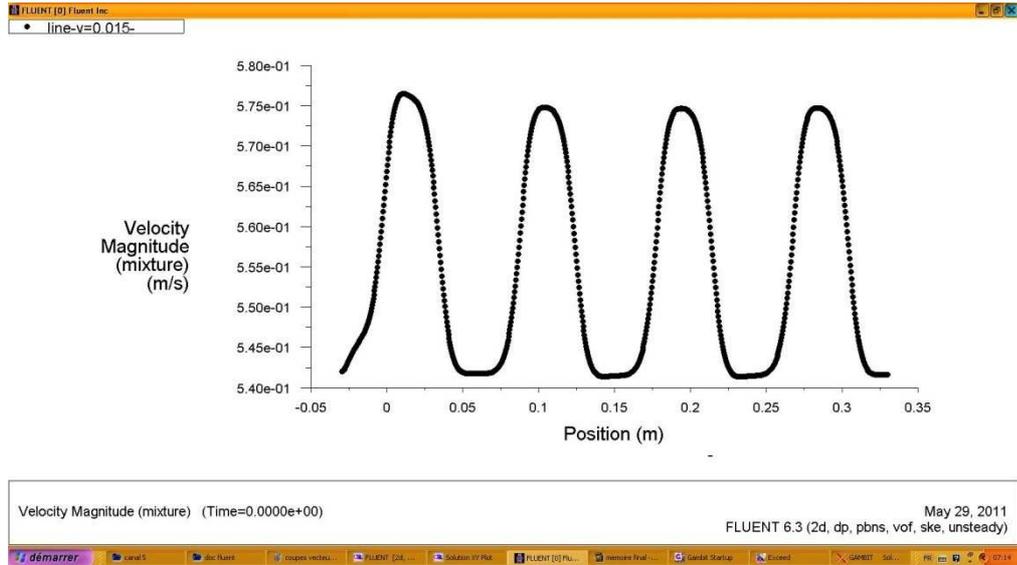
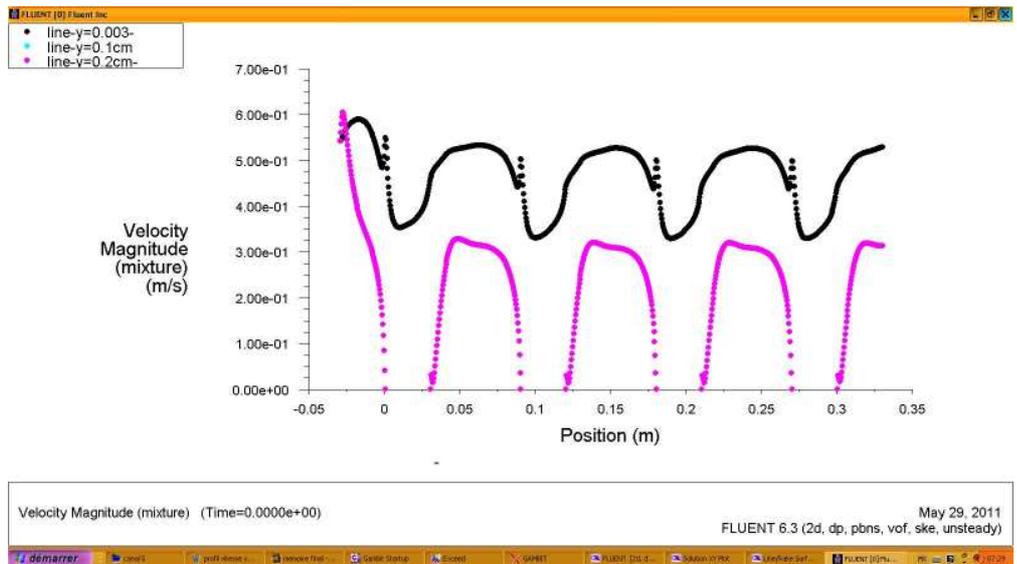


Figure 5.13 : profil des vitesses V_m (m/s) à $y=1.5\text{cm}$ (zone rugueuse d'où l'allure de la vitesse prend une forme sinusoïdale)



5.14: profil des vitesses V (m/s) la zones du fond: (lignes $y=0.1\text{cm}$, $y=0.2\text{cm}$ sont superposées). D'où l'allure de la vitesse prend une forme sinusoïdale. Dans les zones $y=0.1\text{cm}$ et $y=0.2\text{cm}$; a l'intérieure de la cavité des dents, on remarque l'apparition de la recirculation

5.1.6 Profils de vitesses (coupe transversale)

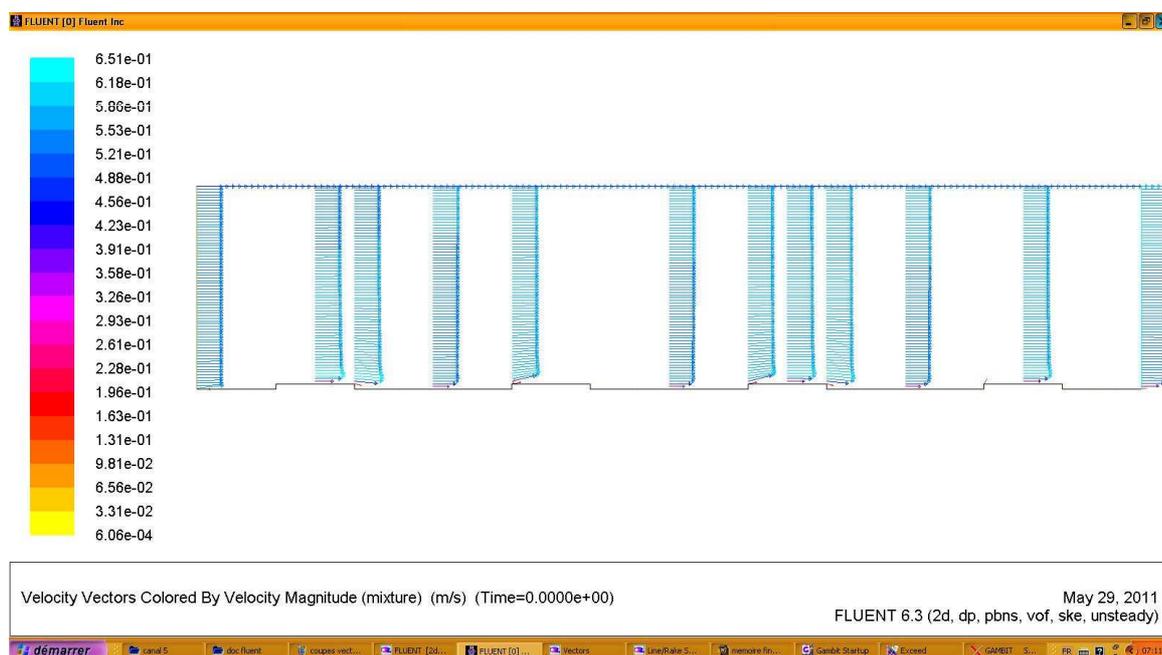


Figure 5.15: coupes transversales des vitesses V_x (m/s) dans : l'entrée $x=0$ vitesse débitante, au dessus de la dent $x=1.50$ cm, à la fin de la dent $x=3$ cm, au début de la dent $x=9$ cm, $x=15$ cm, $x=18$ cm, $x=21$ cm, $x=24$ cm, $x=28.50$ cm, et à la sortie. **On remarque que les profils au centre de cavité sont les plus représentatifs de l'écoulement moyen)**

3^{eme} cas : Ecoulement lisse

Le cas d'un écoulement lisse est étudié pour voir la différence entre La présence de la rugosité et le cas de l'absence de celle-ci. Dans ce cas, figure (5.16), nous remarquons l'apparition d'une sous couche visqueuse située dans l'alignement du fond et qui s'étend jusqu'à l'aval, et l'écoulement n'est pas perturbé par la rugosité.

5.1.6 Champs de vitesses

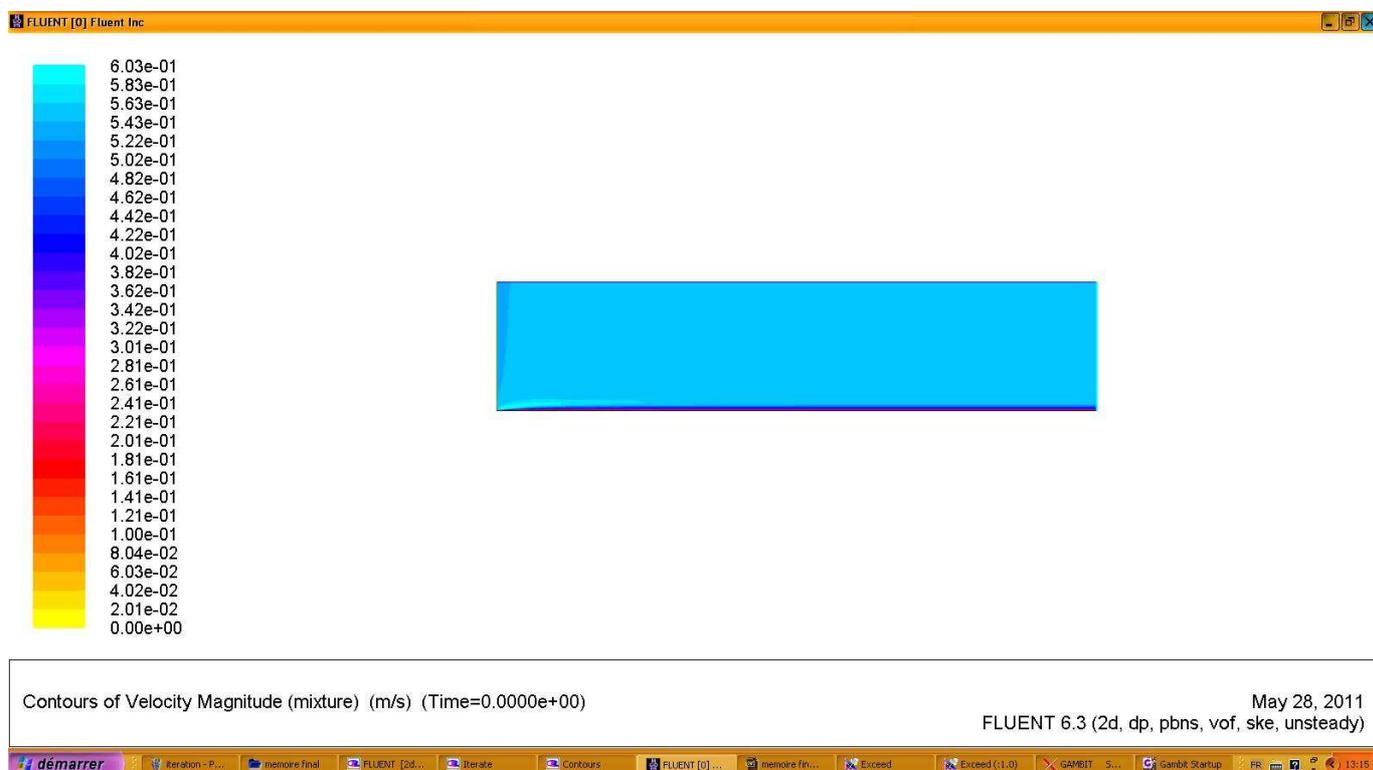


Figure 5.16: Champs de vitesses (m/s) calculé en 2 D

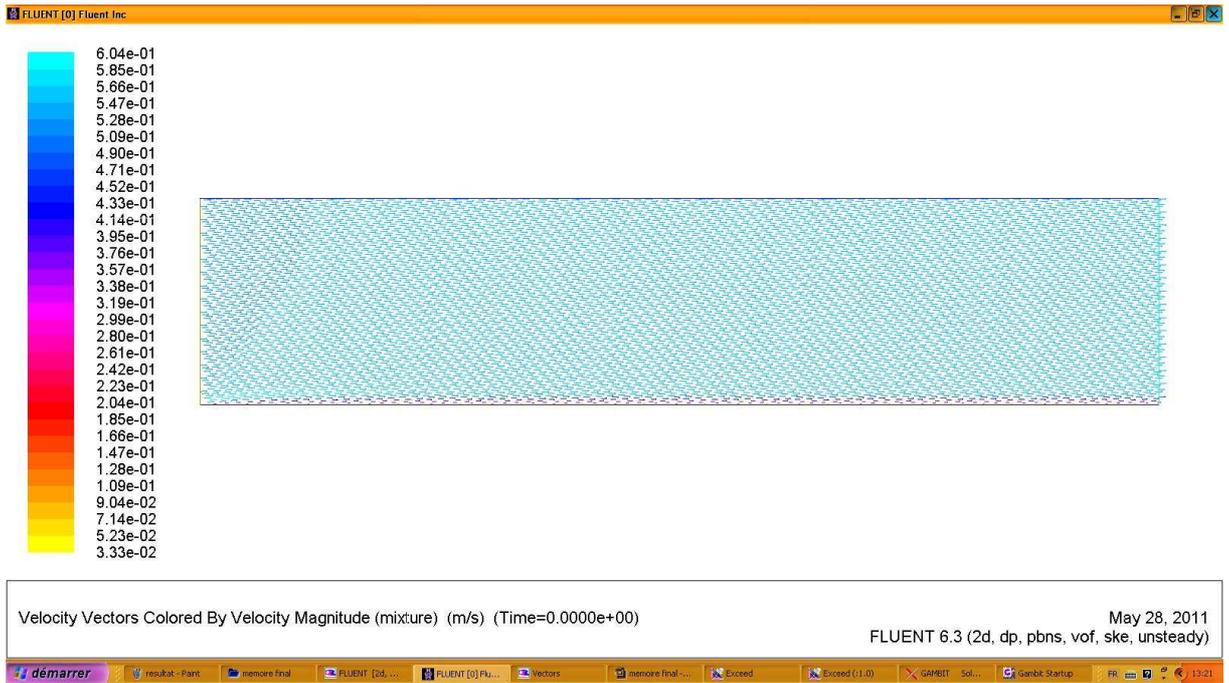


Figure 5.17: Vecteurs de vitesses (m/s) calculé en 2 D

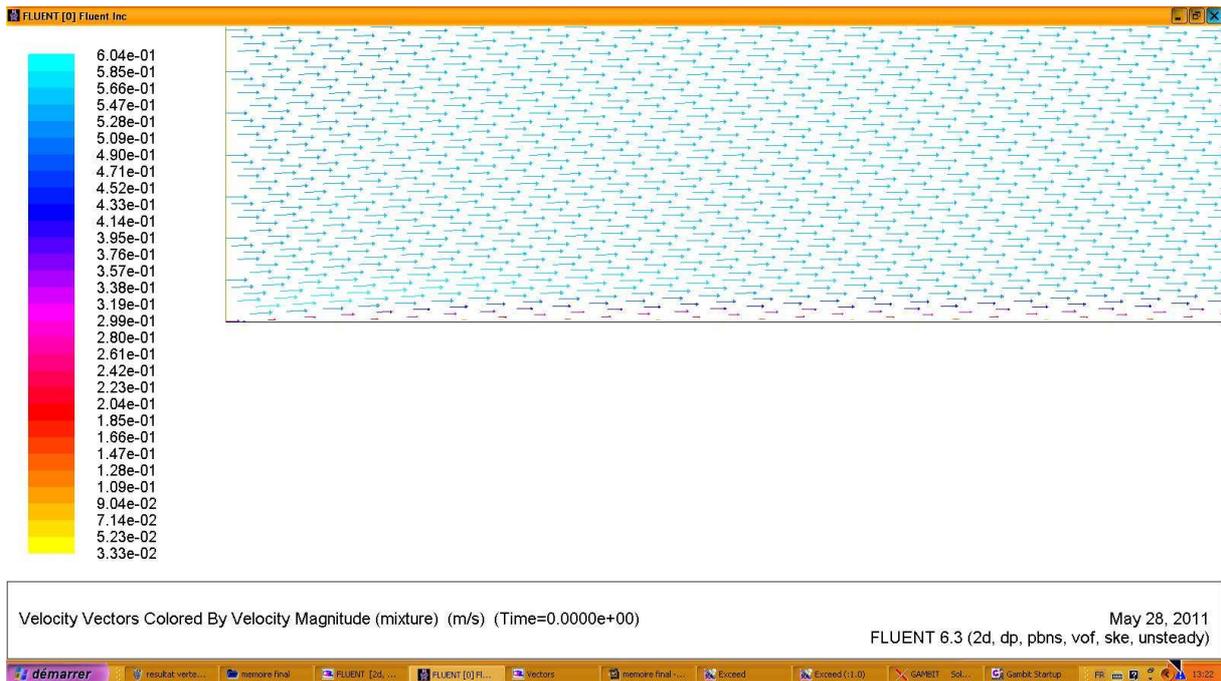


Figure 5.18 : agrandissement Champs de vitesses (m/s) au niveau du fond.

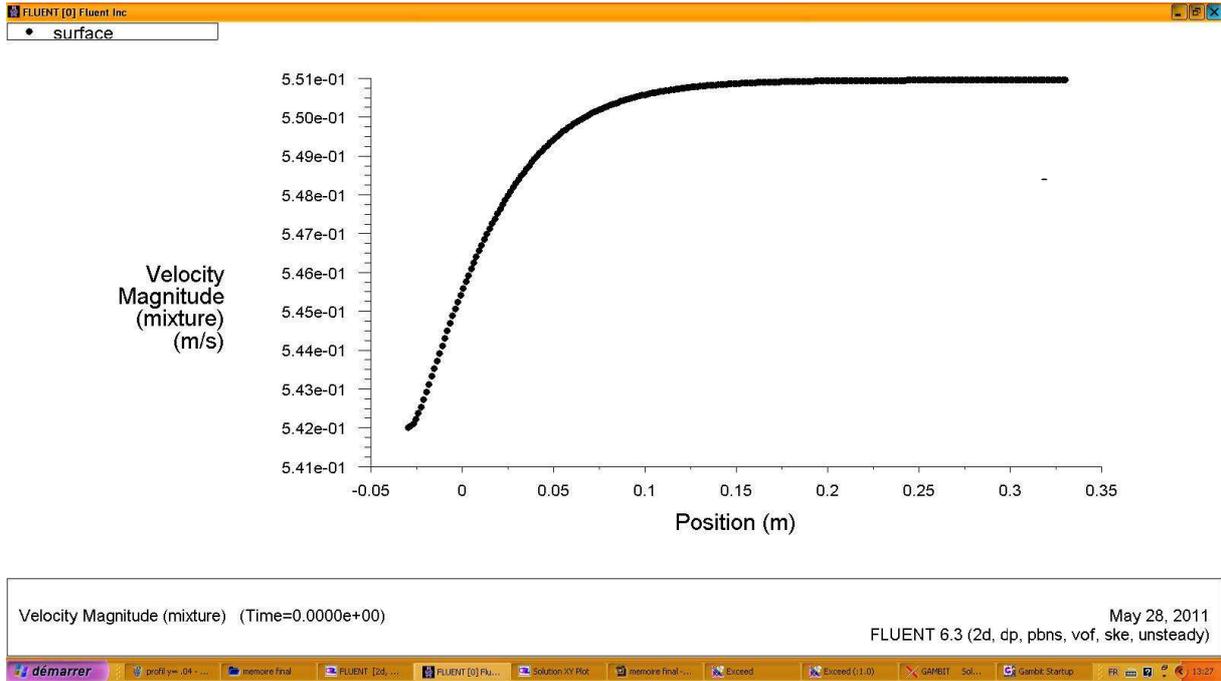


Figure 5.19: profil des vitesses V_x (m/s) à $y=4$ cm (zone de surface libre)

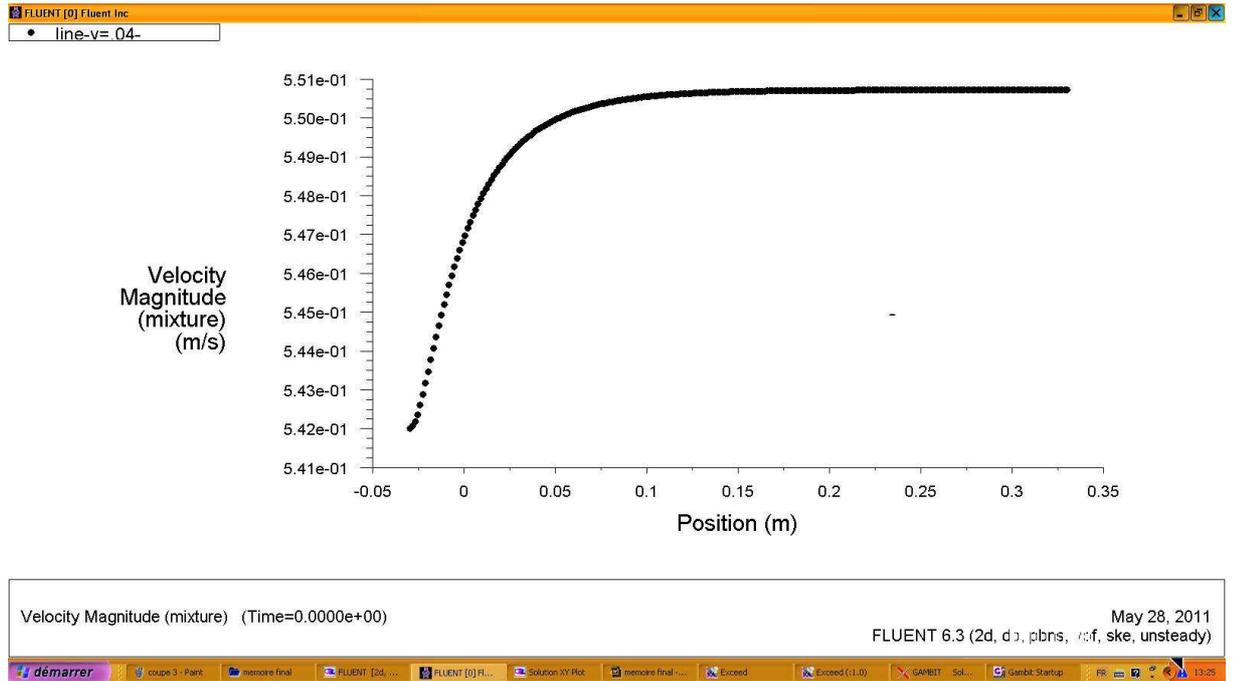


Figure 5.20 : Profil des vitesses V_x (m/s) à $y=4$ cm (zone intermédiaire)

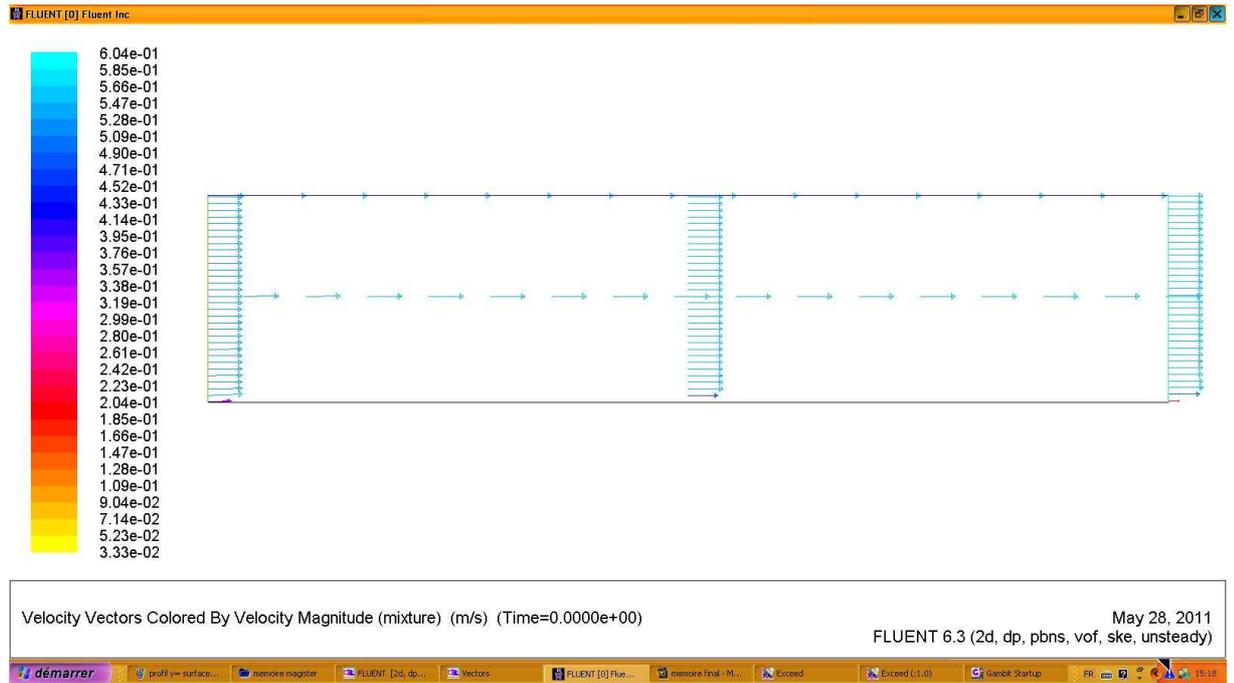


Figure 5.21: coupes transversales des vitesses V_x (m/s) dans entrée, $x=15$ cm, et dans la sortie

4^{ème} cas : Ecoulement avec le rapport $K_s/L_{\text{creux}}=0.83$

Dans ce cas nous avons augmenté la hauteur de la rugosité K_s et la hauteur d'eau (h) dix fois plus que le cas étudié précédemment, et nous avons étudié seulement le cas d'un écoulement rugueux. Nous avons gardé la même longueur ($L=33\text{cm}$) du canal. Le rayon hydraulique $R_h=0.195\text{ m}$, le rapport entre la hauteur de la rugosité K_s et la largeur du creux L_{creux} est $5/6 = 0.83$. Ce rapport est choisi après plusieurs tests dont nous avons changé sa valeur jusqu'à l'obtention des résultats voulus (voir résultats et interprétation).

Etape1 : Création de la Géométrie.

On crée la surface à partir des points, des lignes, et puis des surfaces.

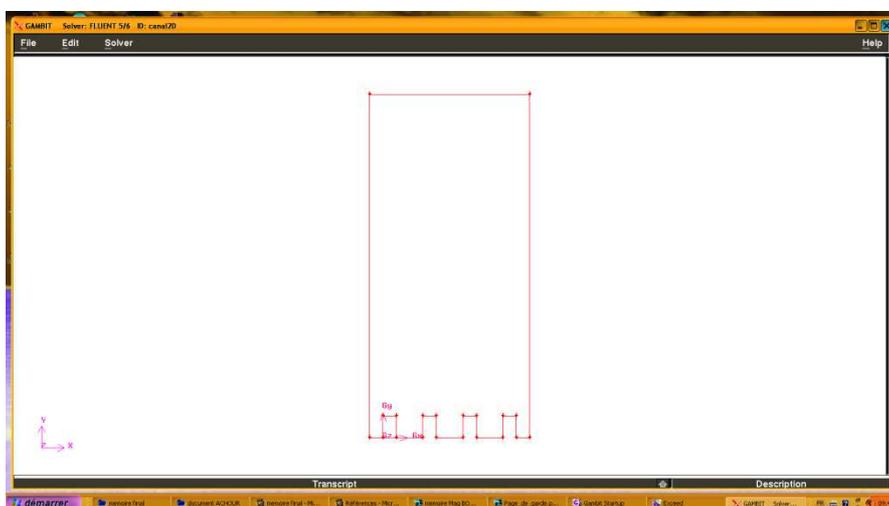


Figure 5.22 : création de la géométrie ($K_s=5\text{ cm}$)

Etape3 : Maillage des parois et de la surface

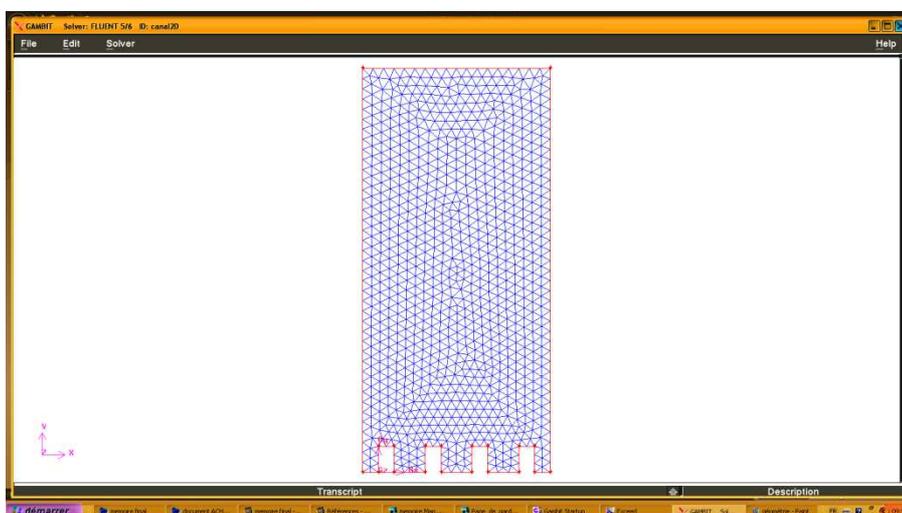


Figure 5.23 : création du maillage 1020 nœuds

Etape4 : Les conditions aux limites

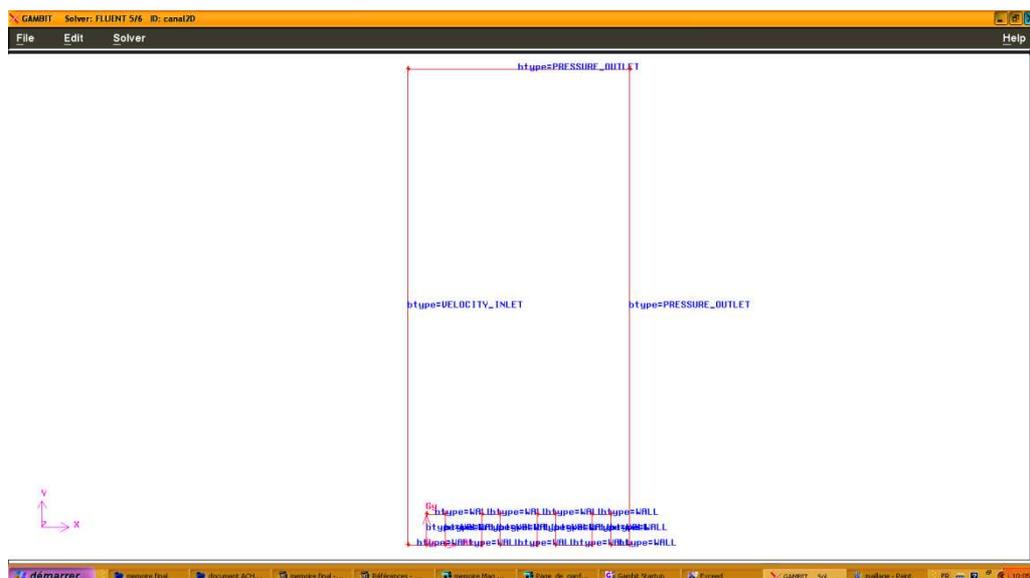


Figure 5.24 : création des conditions aux limites

Etape5 : Sauvegarde et Exportation du fichier vers Fluent

Etape6 : Test de Convergence des calculs :

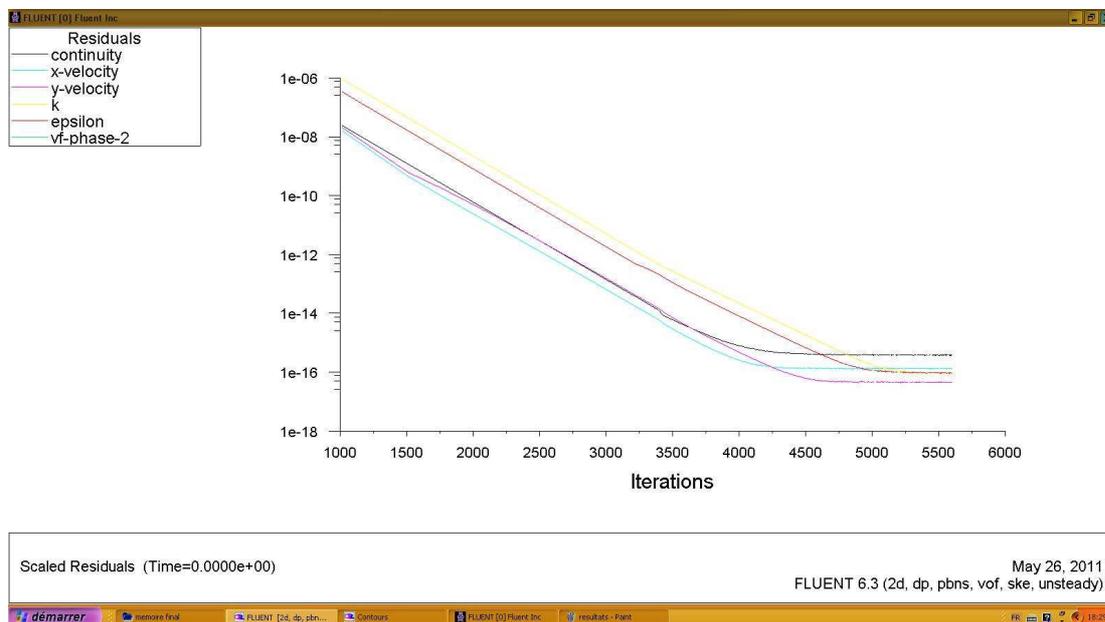


Figure 5.25 : courbes des résidus nombre d'itérations 5500

RESULTATS ET INTERPRETATION

Dans ce cas nous remarquons clairement l'apparition de la zone de recirculation (écoulement rotationnel) au niveau de la cavité figures ci-dessus.

Les champs de vitesses

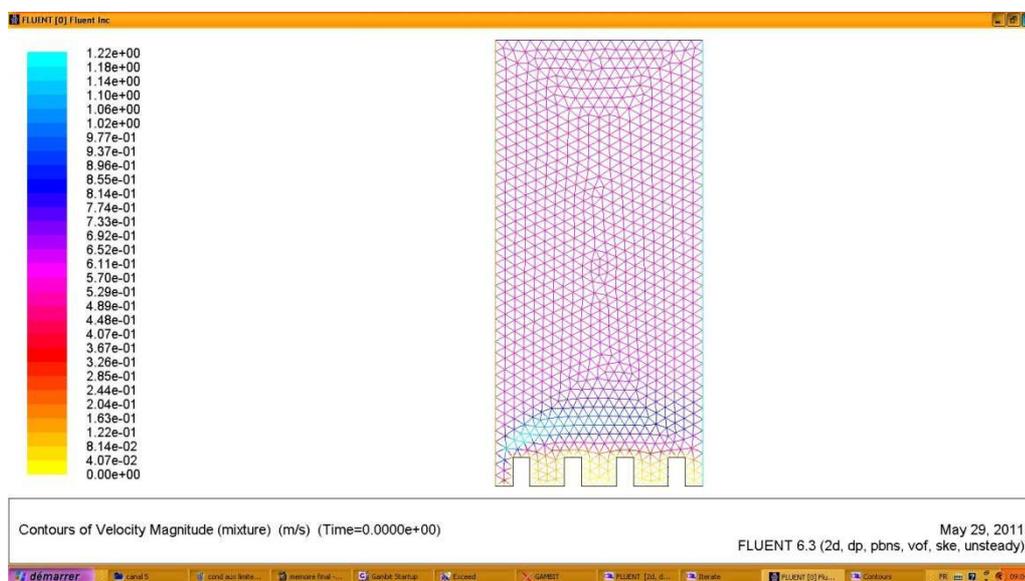


Figure 5.26: Champs de vitesses (m/s) calculé en 2 D

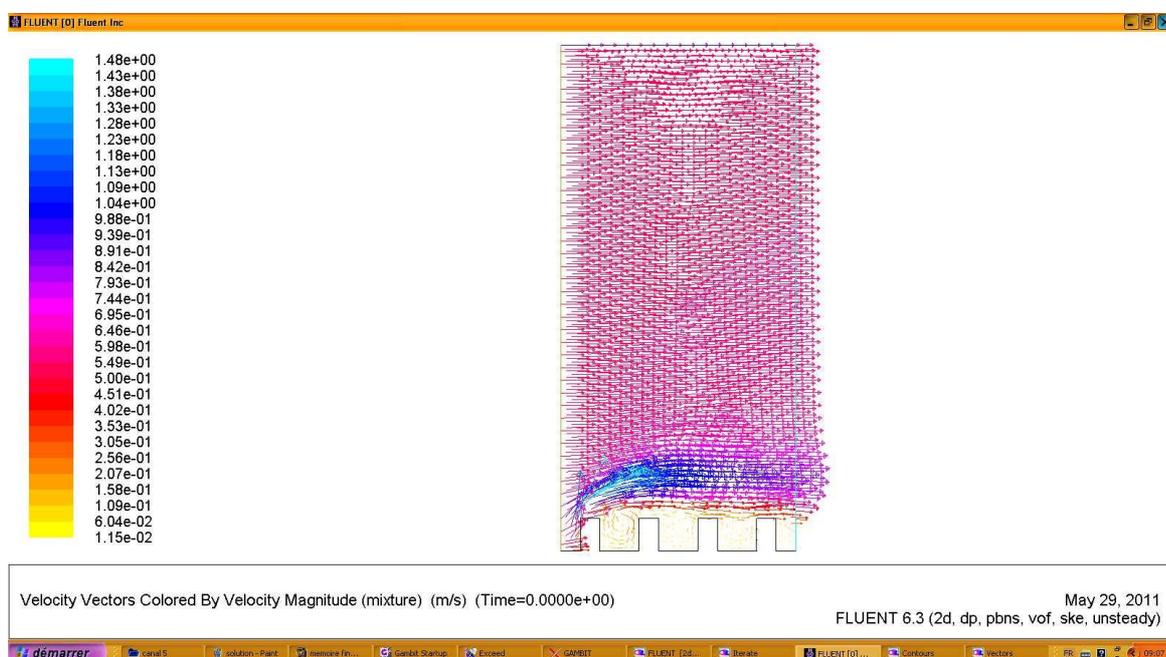


Figure 5.27: Vecteurs de vitesses (m/s) calculé en 2 D

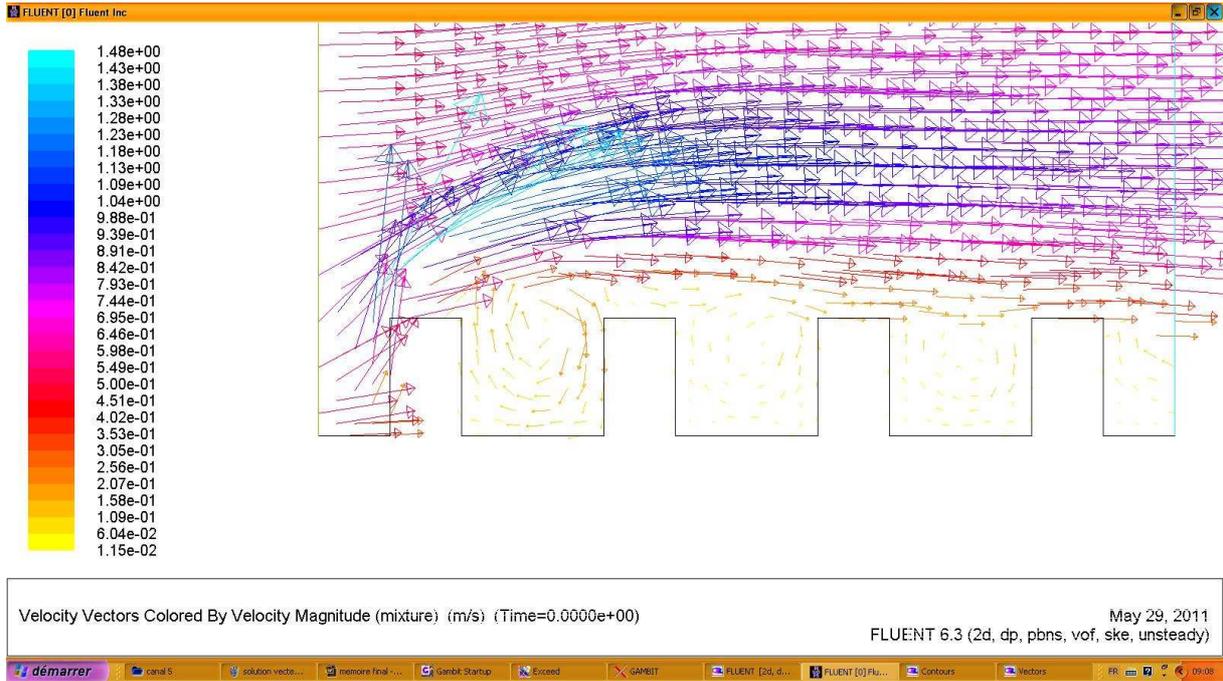
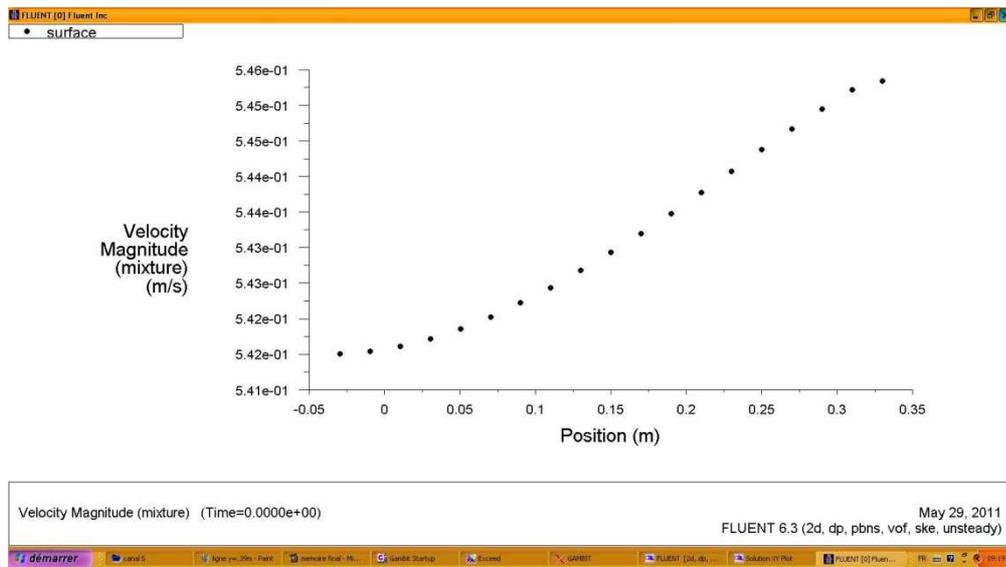
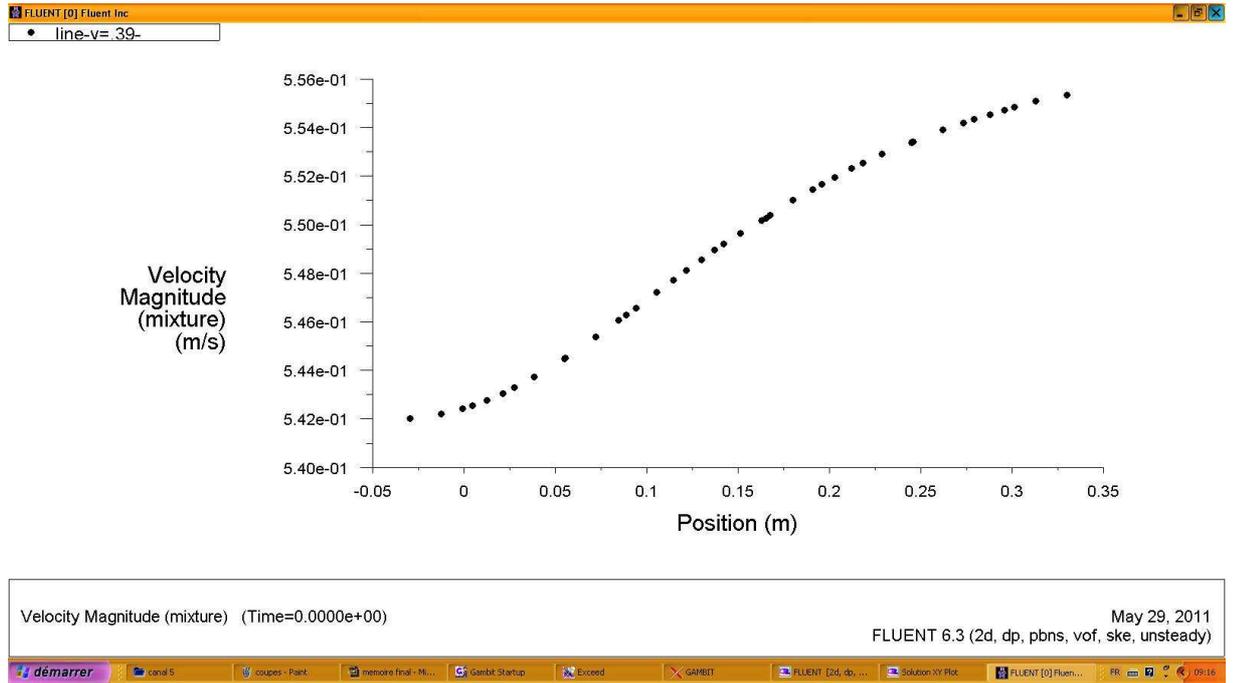


Figure 5.28 : agrandissement Champs de vitesses (m/s) au niveau du fond rugueux



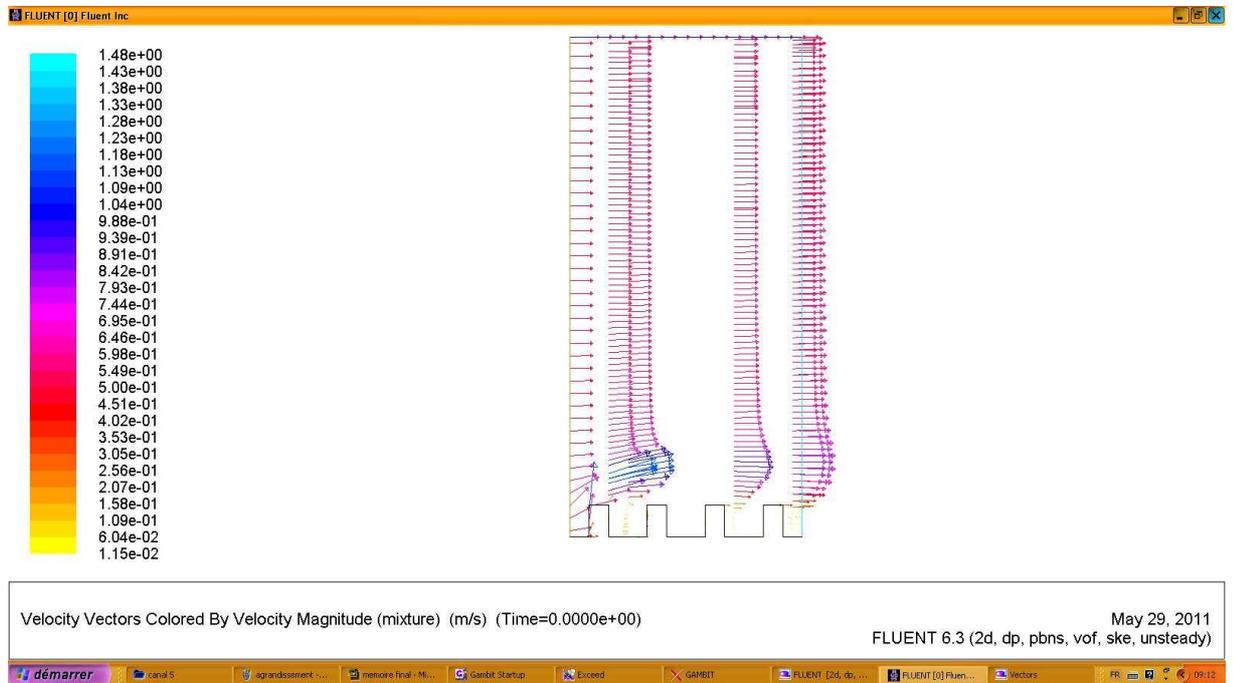
5.29: profil des vitesses V_m (m/s) à $y=78$ cm (zone de surface libre)

Profil de vitesse (longitudinale)



5.30: profil des vitesses V_m (m/s) à $y=39$ cm (zone intermédiaire)

Profil de vitesse (transversale)



5.31: coupes transversales des vitesses V m/s à l'entrée, à $x=3$ cm, $x=4.5$ cm, $x=21$ cm, $x=30$ cm, et à la sortie

Conclusion

Les calculs effectués, après avoir fixé les conditions initiales et aux limites, nous ont permis d'aboutir aux résultats suivants : une formation de zones de recirculation dans les creux entraînant une dissipation d'énergie importante dans les zones d'obstacles que forment la rugosité de fond.

La comparaison des résultats a montré des écarts plus ou moins importants au niveau des résultats obtenus et expérimentaux. Ces écarts se trouvent au niveau des zones loin du fond surtout la zone de surface libre juste après la zone rugueuse. Elles sont probablement dues aux constantes expérimentales utilisées par le modèle $k-\varepsilon$, car celles-ci représentent la faiblesse de ce modèle.

Certain résultats que nous avons obtenus doivent donc être confirmés en utilisant autres constantes expérimentales du modèle $k-\varepsilon$.

Conclusion générale

Dans la première partie de ce travail, nous avons démontré le caractère statistique de la rugosité et nous avons cité les différentes méthodes pour la quantifier, ainsi que les paramètres permettant de caractériser la rugosité. Ces paramètres peuvent se classer en 2 catégories.

1. Les paramètres de type statistique, ou nous avons cité R_p , R_a , R_{max} , et nous avons donné une application dans la deuxième partie pour déterminer le coefficient de résistance hydraulique pour chaque paramètre et dans le cas d'un fond aléatoirement rugueux.
2. Les paramètres utilisant les fonctions de probabilités permettant de définir la distribution spatiale des irrégularités. Nous avons présenté la méthode d'analyse géostatistique par variogramme.

Dans la deuxième partie, nous avons étudié la résistance hydraulique, on a présente la loi de résistance causée par les surfaces rugueuses, la résistance due aux effets de l'écoulement visqueux dans un canal avec une surface rugueuse pour les cas de l'écoulement lisse, transitoire, et rugueux.

Finalement pour quantifier l'impact de la rugosité d'un canal sur les conditions d'écoulement, nous avons utilisé une application en c'est référant à une expérimentation réalisée au laboratoire mécanique des fluides de l'INPT de Toulouse sous le nom de «Ecoulement à surface libre sur fond de rugosité inhomogène». L'étude expérimentale en question a porté sur un écoulement dans un canal dont le fond forme un contraste de rugosité inhomogène. Grâce à ces données expérimentales nous avons pu valider nos résultats de simulation en 2D. Notons enfin que nous avons utilisé le code de calcul FLUENT version 6.3.26 pour faire nos calculs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. Chouaib LABIOD, « Structure et modélisation d'écoulements a surface libre dans des canaux de rugosité inhomogène », Thèse de doctorat 2005.
- [2] M.Carlier, « hydraulique générale et appliquée », EYROLLES, 1986, p.228
- [3] M. ZAOUALI Sahbi, « Structure et modélisation d'écoulements a surface libre dans des canaux de rugosité inhomogène », Thèse de doctorat 2008, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE
- [4] Hughes LEGRAIN, « Etude De L'influence De La Rugosité sur L'écoulement De Fluide Dans Les Fissures Rocheuses. »Thèse de docteur en Sciences Appliquées, FACULTE POLYTECHNIQUE DE MONS, 2006, p 3-4 , p7-9
- [5] Nicolas ROCHE « modélisation du ruissellement sur surfaces rugueuses », Thèse de doctorat 2006 , université JOSEPH FOURRIER ,p.3, 36
- [6] K. MODIS, D. KALIAMPAKOS and D. LABRAKIS 2002, "A NEW APPROACH TO SURFACE ROUGHNESS CHARACTERIZATION USING GEOSTATISTICS", National Technical University of Athens,p243
- [7] A.G. Journel and Ch.J. Huijbreghts. "Mining Geostatistics", 1981, Academic Press, London.
- [8] I. Clark. "Does Geostatistics Work?", *Proceedings of the 16th APCOM Symposium*, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Arizona, 1979..
- [9] G. Matheron. "Traite de géostatistique appliquée", 1962, vols. 1 and 2, Technip, Paris.
- [10] B. ACHOUR, A. BEDJAOUI, M. KHATTAOUI, M. DEBABECHE, 2002 , « Contribution au calcul des écoulements uniformes a surface libre et en charge (Première partie) », LARHYSS Journal, N°.01, Mai 2002,p8
- [11] Nezu, I. et H. Nakagawa, *Turbulence in open channel flows*. Balkema ed. IAHR Monograph. 1993.
- [12] Graf, W.H. et M.S. Altinakar, *Hydraulique fluviale. Tome 1 : Ecoulement permanent uniforme et non uniforme*. Vol. 1. 1993, Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes. p. 259
- [13] Bathurst, J.C. et D.B. Simons, *Hydraulics of Mountain Rivers*. 1979, Civil Engineering Department: Forts Collins.
- [14] Bayazit, M., *Free surface flow in a channel of large relative roughness*. Journal of Hydraulic Research, 1976. 2.
- [15]. Song, T., W.H. Graf, et U. Lemmin, *Uniform flow in open channels with movable gravel bed -Ecoulement uniforme sur lit mobile de gravier dans un canal à pente*. Journal of Hydraulic Research, 1994. 32(6): pp. 861-876.

- [16]. Cao, H.H., *Résistance hydraulique d'un lit de gravier mobile à pente raide. Etude expérimentale.*, in *Sciences techniques*. 1985: Lausanne.
- [17]. Whitham, G.B., *Linear and nonlinear waves*. 2 ed, New York: John Wiley & Sons. 636 p.
- [18] Fluent Inc. *Fluent User's Guide* vol. 1, 2, 3, 4,10, 6, 22, 24 (2003)
- [19] Bachir ACHOUR, *Calcul des conduites et canaux par la MMR - Conduites et canaux en charge- Tome 1*, 1^{ère} Edition / Décembre 2007
- [20] B. ACHOUR, A. BEDJAOU, M. KHATTAOUI, M. DEBABECHE « Contribution au calcul des écoulements uniformes a surface libre et en charge (première partie) », *LARHYSS Journal*, N°.01, Mai 2002,p8
- [21] *Mémento Technique de l'Eau / DEGRÉMONT - ONDÉO (78)*
- [22] Françoise BIGILLON, « *Etude du mouvement bidimensionnel d'une Particule dans un courant d'eau sur forte pente* » *Thèse de doctorat 2001, UNIVERSITE GRENOBLE 1 – JOSEPH FOURIER.*

Résumés

Résumé

Le présent mémoire se résume en l'étude des différentes méthodes de la quantification de la rugosité, en présentant certaines approches statistiques telle que la méthode de la moyenne arithmétique et l'analyse géostatistique par variogramme, pour la détermination de valeurs représentatives.

Ainsi, dans une deuxième partie, nous avons étudié la résistance hydraulique et son effet sur les écoulements à surface libre, en préférant prendre comme modèle un canal rectangulaire dont le fond présente un fort contraste transversal de rugosité. Nous avons arrivé à des résultats assez concluants en utilisant le code numérique de calcul FLUENT destiné aux simulations numériques des écoulements à surface libre stationnaire et instationnaires.

Le processus de simulation étant à priori compliqué et par conséquent une discrétisation préalable du système d'équations de Reynolds R.A.N.S. (Reynolds Averaged Navier-Stokes) gouvernant le problème a été nécessaire la résolution de ce système d'équation aux dérivés partielle a été effectuée après avoir fixé les conditions initiales et aux limites, à l'aide de la méthode des différences finies (schémas implicite).

Les résultats obtenus concernant la résistance hydraulique des canaux découvert donnent une image très claire sur la dissipation de l'énergie hydraulique dans les canaux à fond rugueux. Ces résultats ont été comparé à ceux du l'expérimental.

Abstract

This memo is summarized in the study of different methods of quantification of the roughness, preferring to take as a model a rectangular channel whose bottom has a high contrast transverse roughness. We arrived at results rather inconclusive using the numerical code FLUENT calculation for numerical simulations of free surface flows steady and unsteady.

The simulation process is complicated a priori, therefore a prior discretization of the system of equations of Reynolds RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) governing the issue was necessary, solving this system of equations for partial derivatives was carried out after setting the initial and boundary conditions , using the finite difference method (implicit scheme.

Résumés

The results for the hydraulic resistance of channels give a very clear picture of the dissipation of hydraulic energy in the channels with fully rough. These results were compared with those of experimental.

ملخص:

تتلخص هذه المذكرة في دراسة الطرق المختلفة لحساب الحروشة، خاصة الطرق الإحصائية و المتمثلة في طريقة المتوسط الحسابي و التحليل الجيوستاتيكي وهذا لتحديد القيم الحقيقية، هذا من جهة .

أما الجزء الثاني للدراسة، فقد قمنا بدراسة المقاومة الهيدروليكية و تأثيراتها على الجريان السطحي للسوائل، و هذا باختيار قناة مستطيلة الشكل ذات قاعدة شديدة الحروشة، وقد توصلنا إلى نتائج جد مرضية عندما استعملنا البرنامج الرقمي للحسابات "الفليانت"، والذي صمم لدراسة المحاكاة الرقمية للجريان السطحي الثابت و المتقلب.

إن عملية المحاكاة مبنية معقدة، لذلك فإن تفريد نظام المعادلات "رينولدس" الذي يتحكم في الظاهرة يعد ضروريا، و حل هذا النظام المتشكل من التفاضلات الجزئية تم بطريقة التفاضلات المتناهية و هذا بعد تحديد الشروط الابتدائية و النهائية.

إن النتائج المتحصل عليها والمتعلقة بالمقاومة الهيدروليكية في القنوات الغير مغطاة تعطي صورة جد واضحة لتناقص الطاقة الهيدروليكية في القنوات ذات القاعدة الحرساء.

كما تم مقارنة هذه النتائج بنتائج تجريبية .