

50376
1966
32 bis
UNIVERSITÉ DE LILLE

N° D'ORDRE 142

50376
1966
ANNÉE 1966
32 Bis

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

Jacques ESTRADE

Ingénieur I.D.N.

PREMIÈRE THÈSE

Contribution à l'étude de la suppression d'un barrage
Phase initiale de l'écoulement

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

Visualisation par corps entraînés

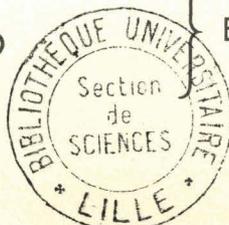
Soutenues, le 2 mars 1966, devant la Commission d'examen

JURY

MM. MARTINOT-LAGARDE Président

PEREZ
GONTIER
NOUGARO
FAURE

Examineurs



UNIVERSITÉ DE LILLE, FACULTÉ DES SCIENCES

Doyens honoraires

MM. PRUVOST, LEFEBVRE, PARREAU.

Professeurs honoraires

MM. ARNOULT, BEGHIN, CAU, CHAPELON, CHAUDRON, CORDONNIER, DEHEUELS, DEHORNE, DOLLE, FLEURY, GERMAIN, KOURGANOFF, LAMOTTE, LELONG, Mme LELONG, MM. MAZET, MICHEL, NORMANT, PARISELLE, PASCAL, PAUTHENIER, ROIG, ROSEAU, ROUBINE, WIEMANN, ZAMANSKY, KAMPÉ DE FÉRIET.

Doyen

M. TILLIEU Professeur de Physique

Assesseurs

M. DURCHON Professeur de Zoologie

M. HEUBEL Professeur de chimie minérale

Professeurs

MM. BACCHUS Astronomie, Calcul numérique
 BECART Physique
 BERKER Mécanique des Fluides
 BLOCH Psychophysiologie
 NONNEMAN-BEMIA Chimie et Physico-Chimie industrielles
 BONTE Géologie appliquée
 BOUGHON Mathématiques
 BOUISSET Physiologie animale
 BOURIQUET Botanique
 CELET Géologie
 CORSIN Paléobotanique
 DECUYPER Mathématiques
 DEDEKER Professeur associé de Mathématiques
 DEFRETIN Biologie marine
 DEHORS Physique industrielle
 DELATTRE Géologie
 DELEAU Géologie
 DELHAYE Chimie minérale
 DESCOMBES Calcul différentiel et intégral
 GABILLARD Radioélectricité et Electronique
 GERMAIN Chimie générale et Chimie organique
 GLACET Chimie
 GONTIER Mécanique des fluides
 HEIM DE BALZAC Zoologie
 HOCQUETTE Botanique générale et appliquée
 LEBEGUE Botanique

Mme LEBEGUE Physique
 M. LEBRUN Radioélectricité et électronique
 Mlle LENOBLE Physique
 MM. LIEBART Radioélectricité
 LINDER Botanique
 LUCQUIN Chimie minérale
 MARION Chimie
 Mlle MARQUET Mathématiques
 MM. MARTINOT-LAGARDE Mécanique des fluides
 MAUREL Chimie
 MENESSIER Géologie
 MONTREUIL Chimie Biologie
 PARREAU Mathématiques
 PEREZ Physique expérimentale
 PHAM MAU QUAN Mécanique rationnelle et expérimentale
 POUZET Calcul numérique
 PROUVOST Géologie
 SAVARD Chimie générale
 SCHALLER Zoologie
 SCHILTZ Physique
 Mme SCHWARTZ Analyse supérieure
 MM. TRIDOT Chimie
 VIVIER Biologie animale
 WATERLOT Géologie et Minéralogie
 WERTHEIMER Physique

Maîtres de conférences

MM. BEAUFILS Chimie appliquée
 BLANCHARD Chimie générale
 BOILLET Physique
 BUI TROUG LIEU Mathématiques
 CHASTRETTE Chimie générale
 COMBET Mathématiques
 CONSTANT Physique
 DERCOURT Géologie et Minéralogie
 DEVRAINNE Chimie minérale
 Mme DRAN Chimie appliquée
 FOATA Mathématiques
 FOURET Physique
 GAVOURET Physique
 HERZ Mathématiques
 HUARD DE LA MARRE Calcul numérique

MM. LACOMBE Mathématiques
 MAES Physique
 MONTARIOL Chimie
 MORIAMEZ Physique
 MOUVIER Chimie
 NGUYEN PHONG CHAU Physique
 PANET Electromécanique
 RAUZY Mathématiques
 SAADA Physique
 SEGARD Chimie biologique
 TUDO Chimie minérale Appliquée
 VAZART Botanique
 VAILLANT Mathématiques
 VIDAL Physique Industrielle

Secrétaire Général, Attaché Principal

M. LEGROS

Attachés d'administration

MM. COLLIGNON
 FACON

MM. JANS
 LEROY

Table des matières

	Pages
INTRODUCTION	13
SOMMAIRE	15
NOTATIONS	17
CHAPITRE I - ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	19
Equations fondamentales	
1.1. - Onde de choc	19
1.2. - Écoulement graduellement varié	20
1.21 - Equations de Saint-Venant	20
1.22 - Résolution	21
1.3. - Rappels sur les caractéristiques	21
1.31 - Caractéristiques d'un système de deux équations aux dérivées partielles	21
1.32 - Résolution graphique	24
1.33 - Application aux équations de Saint-Venant	24
Principales solutions	
1.4. - Écoulement sans frottement	26
1.41 - Rupture sans eau à l'aval	26
1.42 - Rupture avec eau à l'aval	27
1.5. - Écoulement avec frottement	29
1.6. - Expérimentation	30
1.7. - Objet du travail	30
CHAPITRE II - ÉTUDE EXPÉRIMENTALE	33
Canaux d'essais	
2.1. - Canal A	33
2.2. - Canal B	33
Dispositif permettant une vidange brusque	
2.3. - Vanne barrage à effacement vertical	36

	Pages
2.31 - Vanne barrage	36
2.32 - Force motrice	36
2.33 - Amortisseur hydraulique	36
2.34 - Durée de rupture	37
2.4. - Paroi de verre trempé	38
Appareillage de mesure	
2.5. - Canal A	39
2.6. - Canal B	40
2.7. - Essais effectués	41
 CHAPITRE III - CONSÉQUENCES D'UNE MISE EN VITESSE INSTANTANÉE	 43
Étude théorique	
3.1. - Introduction	43
3.2. - Concavité de la surface libre à l'amont	44
3.21 - Loi de débit	44
3.22 - Équation de la surface libre, à l'amont	44
3.23 - Étude de la concavité	45
3.3. - Effacement vertical d'une vanne barrage	47
3.31 - Équations fondamentales	47
3.32 - Résolution graphique	48
3.33 - Concavité du profil amont	48
3.34 - Profil et répartition des vitesses	49
3.35 - Vitesse du front aval	49
Étude expérimentale	
3.4. - Essais effectués	49
3.5. - Comparaison avec nos calculs	50
3.6. - Conclusion	52
 CHAPITRE IV - ÉTUDE DU CHAMP DES VITESSES	 53
Étude expérimentale	
4.1. - Installation expérimentale	53
4.2. - Programme des essais	54
4.3. - Dépouillement des résultats	54
Suppression avec aval à sec	
4.4. - Calculs de Pohle	58
4.41 - Principe	58
4.42 - Résultats	60
4.43 - Conclusions	64
4.5. - Vérification expérimentale	64
4.51 - Présentation des résultats expérimentaux	64
4.52 - Calculs de Ritter et de Pohle	65
4.6. - Conclusion	68

	Pages
CHAPITRE V - ÉTUDE DE LA SURÉLÉVATION FRONTALE	71
5.1. - Rappel des notations	71
5.2. - Expériences de Lévin	73
5.3. - Étude expérimentale	73
5.31 - Essais effectués	73
5.32 - Résultats expérimentaux	74
5.33 - Comparaison avec les résultats de Lévin	80
5.34 - Comparaison avec les calculs de Stoker	81
5.4. - Étude de la surélévation en tant que mascaret	81
5.5. - Formation et évolution de la surélévation	83
5.6. - Calcul approché de la zone inondable	85
5.7. - Conclusion	86
CONCLUSION GÉNÉRALE	87
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	89
ANNEXES	91
I - Résumé du film réalisé pour illustrer les résultats	92
II - Planches	93
III - Répartition expérimentale des vitesses	111

Préface

Monsieur Jacques ESTRADE, Ingénieur I. D. N., Docteur-ès-Sciences et Ingénieur au Centre de Recherches et d'Essais d'Electricité de France à Chatou, me demande une préface pour son ouvrage résumant son travail récent sur certains des phénomènes consécutifs à la suppression d'un barrage dans un canal. C'est très volontiers que j'essaierai d'insister dans ces quelques lignes sur les points les plus importants d'une étude que j'ai pris grand plaisir à suivre.

Le Centre de Chatou, en la personne de Monsieur FAURE, s'inquiétait d'insuffisances graves des théories jusqu'ici utilisées dans ce problème, au sujet de la forme de la surface libre et de la célérité du front de la première onde. Il est usuel, devant un désaccord entre l'expérience et des calculs faits sans tenir compte des forces de frottement, de chercher à réintroduire ces forces au prix de coefficients plus ou moins empiriques. Mais il était permis aussi de se demander si une autre explication n'existait pas, où tout pouvait être obtenu en considérant seulement les forces d'inertie, du fait que celles-ci, du moins au début du phénomène, sont grandes et sans doute prépondérantes.

Monsieur ESTRADE a remarqué que la durée, en temps réduit, de la suppression du barrage, dans les essais sur modèle usuels, était notable, alors que les calculs antérieurs la considéraient comme nulle. Cette remarque, jointe à une hypothèse à première vue peut-être trop simplificatrice mais heureuse, a conduit à un succès. Cela fut une occasion de constater une fois de plus combien est féconde la méthode des caractéristiques de Cauchy.

La plupart des expériences sur ce phénomène avaient été faites en déterminant seulement la surface libre ; il est vrai que les calculs le plus souvent supposent un écoulement par tranches. Mais il est bon que les essais soient en avance sur les calculs : Monsieur ESTRADE a fait de la visualisation avec chronophotographie de particules entraînées et il a pu déterminer les écarts entre la réalité et un écoulement par tranches. Puis il a comparé une partie des résultats, ceux des premiers instants, avec une solution asymptotique en écoulement plan, connue, mais non encore utilisée. L'auteur, dans ce domaine, a su très bien se servir des améliorations récentes de l'équipement en calculatrices binaires du Centre de Chatou.

Pour terminer cette introduction, je dirai combien j'ai été heureux d'être témoin de la bonne humeur, de l'ingéniosité et de la ténacité avec laquelle Monsieur ESTRADE a fait front aux difficultés théoriques ou expérimentales de son travail et je citerai l'existence d'une chose que le lecteur ne rencontrera pas dans ces pages, mais qu'il prendrait grand intérêt à voir, un très bon film en couleurs et parlant synthétisant les résultats.

Professeur André MARTINOT-LAGARDE
Directeur de l'Institut de Mécanique des Fluides de Lille
Université de Lille
20 septembre 1966

Avant-propos

Le présent travail entre dans le cadre des études entreprises au Département Mécanique des Fluides du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou. Nous remercions la Direction des Etudes et Recherches de l'Electricité de France de nous avoir permis de conduire ce travail dans ses Laboratoires, et les nombreux collaborateurs dont le concours nous a été très précieux.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Monsieur le Professeur MARTINOT-LAGARDE qui nous a fait le grand honneur d'assurer la direction scientifique de nos recherches.

Nous remercions vivement Messieurs les Professeurs PEREZ, GONTIER et NOUGARO et Monsieur FAURE, Chef du Département Mécanique des Fluides, d'avoir bien voulu accepter de faire partie du jury de cette thèse.

Introduction

Les hydrauliciens ont été amenés, dès le siècle dernier, à étudier le problème de la propagation des ondes de crues dans les canaux découverts. Si ces ondes peuvent être d'origines très diverses (inondations consécutives à une rapide et intense averse, à une manoeuvre désordonnée d'une chaîne d'usines hydroélectriques, à une vidange brusque d'un réservoir), elles possèdent toutes cependant la particularité d'avoir en commun des hauteurs et des célérités rapidement variables dans le temps. Elles entrent de ce fait dans l'étude générale des mouvements non permanents, mais c'est sur l'exemple particulier de la suppression d'un barrage que nous nous proposons d'étudier ce type d'écoulement.

De telles catastrophes sont heureusement assez rares, car la technique acquise de nos jours dans la construction des barrages assure la sécurité des riverains. Malheureusement, le passé et certains conflits internationaux ont montré que ce problème n'était pas purement théorique :

- au troisième siècle avant J. C., 3000 millions de mètres cubes d'eau sont libérés par la destruction du barrage du lac Moeris ;
- en 1889, un violent orage provoque l'effondrement du barrage de Johnstown, en Amérique du Nord : en 45 minutes, 20 millions de mètres cubes d'eau traversent la vallée et causent une surélévation de niveau de 10 à 12 m de hauteur se déplaçant à une vitesse de 22 m/s ;
- le 13 août 1935, une crue subite provoque la destruction complète du barrage de La Sella Di Zerbino, en Italie ; la masse d'eau libérée s'est déplacée à une vitesse environ trois fois plus grande que celle des crues artificielles créées par lâchure de vanne de fond ;
- en 1941, les Allemands détruisent le barrage de Dnieproghes, en Ukraine,
- le 2 décembre 1959, la rupture accidentelle du barrage de Malpasset, sur le Reyran, provoque la destruction des bas quartiers de Fréjus, faisant plus de 400 victimes.

Pour limiter les conséquences de telles catastrophes, une étude même approchée devrait permettre de dresser, pour chaque barrage, une carte des zones sujettes à submersion et d'évaluer, de façon plus précise, les caractéristiques de l'onde de crue.

Nombreuses et fort variées sont cependant les difficultés rencontrées dans une telle étude de mouvement non permanent, aussi bien du point de vue théorique qu'expérimental. Il est en effet difficile de traduire en chiffres l'effet du passage à des vitesses supérieures à 10 m/s de la masse liquide lâchée par la suppression du barrage ; il en est de même pour les érosions, les éboulements et les dépôts produits, le comportement hydraulique de la vallée, la différence de végétation entre le lit et les berges ... Il est

donc nécessaire de schématiser l'écoulement et d'appliquer, faute de mieux, des formules valables pour des écoulements idéaux et bien définis. Et malgré toutes ces simplifications, les équations obtenues peuvent être difficiles à résoudre.

Notre travail est relatif à la phase initiale de l'écoulement consécutif à la suppression d'un barrage. Nous avons simplifié le problème en supposant l'écoulement par tranches -sauf dans un chapitre où nous prenons le schéma de l'écoulement plan- et le canal horizontal et de section rectangulaire constante.

Ces travaux entrent dans une étude générale menée au Centre de Recherches et d'Essais de Chatou en étroite collaboration avec notre camarade Gras qui a étudié plus spécialement les singularités de section.

Sommaire

Dans le chapitre premier, nous rappelons les équations fondamentales des écoulements par tranches non permanents et les travaux antérieurs effectués sur le problème de la suppression d'un barrage. La résolution d'un système de deux équations aux dérivées partielles par la méthode des courbes caractéristiques y est reprise sous une forme générale.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons notre installation d'essais et l'appareillage de mesure : deux canaux ont été concurremment utilisés, l'un de 24 m de longueur et l'autre de 2 m, et un mode particulier de rupture de barrage a été essayé sur l'un d'entre eux. Les profils de la surface libre ont été cinématographiés dans le petit canal ; dans le grand canal, ils ont été obtenus à partir des enregistrements de quinze capteurs de niveau à impédance électrique.

Dans le troisième chapitre, nous étudions l'influence sur l'écoulement d'une durée de rupture non nulle. Nous donnons ainsi une explication d'un désaccord existant entre l'expérience et la théorie de la rupture instantanée de Ritter.

Au quatrième chapitre, nous supposons l'écoulement plan. Nous décrivons nos essais de visualisation effectués avec des gouttelettes liquides : une répartition expérimentale des vitesses est obtenue. Les nombreux essais effectués dans le cas d'une rupture sans eau à l'aval ont été dépouillés par machine électronique et ces résultats nous ont conduits à préciser le domaine de validité des calculs de Pohle effectués en supposant l'écoulement plan.

Dans le cinquième chapitre, nous étudions expérimentalement la surélévation qui se produit au voisinage du front aval, phénomène qui peut augmenter notablement l'étendue de la zone inondable. L'influence de cette surélévation frontale se fait sentir jusqu'à une distance voisine de neuf fois la hauteur initiale de la retenue amont.

Enfin, nous donnons en annexe nos résultats expérimentaux obtenus au quatrième chapitre, ainsi que le résumé du film qui a été tiré de l'ensemble de ce travail.

Notations

NOTATIONS GÉNÉRALES

b	Largeur de la surface libre
B	Périmètre mouillé
D	Diamètre équivalent ($D = 4 S/B$)
i	Pente du fond du lit, comptée positivement si le fond descend
i_f	Pente fictive due au frottement ($i_f = \psi u^2/2gD$)
j	Pente de la surface libre
L	Longueur de la surélévation frontale prise égale à la différence des abscisses pour lesquelles la hauteur d'eau est $(z_f + z_r)/2$
q	Débit volume par unité de largeur
q_f	Débit de fuite par unité de longueur
R_e	Nombre de Reynolds ($R_e = uD/\nu$, ν étant la viscosité cinématique de l'eau)
S	Aire de la section d'écoulement
u	Composante moyenne de la vitesse suivant \vec{ox} (vitesse de débit)
V_{12}	Vitesse absolue d'une onde de choc séparant deux domaines de hauteurs d'eau z_1 et z_2 (grandeur calculée par Stoker),
w	Composante verticale de la vitesse dans le plan longitudinal de symétrie de l'écoulement
x	Abscisse comptée à partir de la section du barrage le long d'un axe parallèle à la direction moyenne de l'écoulement
z	Altitude de la surface libre comptée dans chaque section à partir du fond du canal
z_0	Valeur initiale de z en amont du barrage
z_1	Valeur initiale de z en aval du barrage
z_2	Hauteur de l'onde aval calculée par Stoker
φ	Coefficient de débit
ψ et ψ'	Coefficients de perte de charge linéique ($\psi = 8\psi'$)
τ	Durée de rupture du barrage.

GRANDEURS RÉDUITES

Les grandeurs directement mesurées sont représentées par des lettres surlignées et, sauf indication expresse contraire, les grandeurs que nous considérons sont des grandeurs réduites : les longueurs sont rapportées à \bar{z}_0 , les vitesses à $\sqrt{g\bar{z}_0}$ et les dates à $\sqrt{\frac{\bar{z}_0}{g}}$.

$$c = \sqrt{\frac{\bar{z}}{\bar{z}_0}} = \sqrt{\bar{z}}, \quad u = \frac{\bar{u}}{\sqrt{g\bar{z}_0}},$$

$$q = \frac{\bar{q}}{\sqrt{g\bar{z}_0^3}}, \quad x = \frac{\bar{x}}{\bar{z}_0}, \quad z = \frac{\bar{z}}{\bar{z}_0},$$

$$t = \sqrt{\frac{g}{\bar{z}_0}} \bar{t}, \quad y_1 = \frac{\bar{z}}{\bar{z}_0}.$$

Chapitre I

Étude bibliographique

Les différentes théories utilisées pour résoudre le problème de la suppression d'un barrage se classent d'après les hypothèses adoptées : l'écoulement peut être supposé par tranches ou plan ; le profil de la surface libre peut être schématisé en supposant que sa courbure est faible ou qu'il comporte des discontinuités de cote.

L'écoulement à deux dimensions ne sera considéré qu'au chapitre IV. Partout ailleurs, l'écoulement sera supposé se faire par tranches. Nous redirons d'abord la forme que prennent les équations fondamentales et rappellerons la méthode des caractéristiques. Nous résumerons ensuite les principaux résultats précédemment connus et nous indiquerons quels points nous avons essayé d'élucider dans le problème de la suppression d'un barrage dans un canal horizontal de section rectangulaire constante.

ÉQUATIONS FONDAMENTALES

Au sujet de la suppression d'un barrage, nous prenons d'abord le schéma de l'écoulement par tranches : pour exprimer la conservation de la masse et celle de l'impulsion, on écrit usuellement les équations du choc quand le front de l'onde aval présente une grande courbure et les équations de Saint-Venant quand la courbure est faible.

Nous rappelons ici ces équations en les écrivant sous la forme qui nous a paru la plus commode en vue du calcul sur machine, et nous précisons leur domaine respectif de validité.

1.1. - ONDE DE CHOC

Nous supposons pour l'étude de l'onde de choc que :

- le canal est de section rectangulaire constante et de faible pente i (i de l'ordre de 0,01 à 0,001),
- l'écoulement est uniforme avant l'apparition de l'onde,
- le front de l'onde forme une discontinuité de longueur négligeable,
- l'arrière de l'onde présente une épaisseur d'eau uniforme,
- les forces de frottement et celles de pesanteur dues à la pente sont supposées négligeables ou se compensant mutuellement.

Soient D_1 et D_2 deux domaines séparés par une onde positive à front vertical d'amplitude $z_2 - z_1$ et de célérité absolue \bar{V}_{12} en valeur algébrique (figure 1.1-a), et soient u_1 et u_2 les vitesses du fluide dans D_1 et dans D_2 . Posons :

$$F_1 = \frac{\bar{u}_1}{\sqrt{g\bar{z}_1}}, \quad F_2 = \frac{\bar{u}_2}{\sqrt{g\bar{z}_2}} \quad \text{et} \quad F_{12} = \frac{\bar{V}_{12}}{\sqrt{g\bar{z}_1}}.$$

La formule classique [24] :

$$\bar{W}^2 = g \frac{\bar{z}_1 + \bar{z}_2}{2} \frac{\bar{z}_2}{\bar{z}_1}, \quad (1.1. a)$$

donnant la vitesse relative \bar{W} du mascaret par rapport au fluide du domaine D_1 , fournit les relations ($\varepsilon = \pm 1$) :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{12} - F_1 = \varepsilon \sqrt{\frac{z_2}{2z_1} \left(1 + \frac{z_2}{z_1}\right)} \\ F_{12} \sqrt{\frac{z_1}{z_2}} - F_2 = \varepsilon \sqrt{\frac{z_1}{2z_2} \left(1 + \frac{z_1}{z_2}\right)} \end{array} \right. \quad (1.1. b)$$

Le signe + correspond à une onde descendant le courant ($\bar{V}_{12} \cdot \bar{u}_1 > 0$) et le signe - à une onde remontant le courant ($\bar{V}_{12} \cdot \bar{u}_1 < 0$).

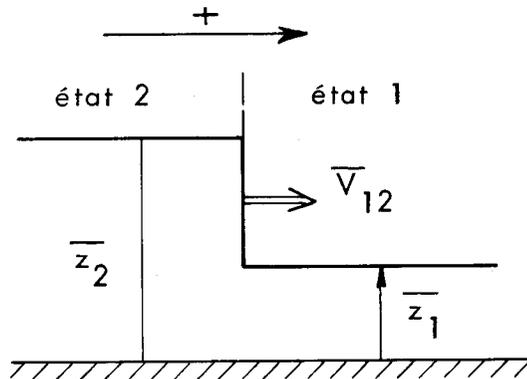


Figure 1.1-a - Schéma de l'onde de choc

Dans le cas général, le problème consistera en la détermination de l'état 2, à partir de la connaissance de l'état 1 et d'une relation supplémentaire (voir § 1.42).

1.2. - ÉCOULEMENT GRADUELLEMENT VARIÉ

1.21 - Equations de Saint-Venant

Lorsque les lignes de courant ont des rayons de courbure grands vis à vis de l'épaisseur d'eau, c'est-à-dire lorsque le canal a une pente faible et qu'il ne présente

que des variations continues de section, on considère comme valables les équations de Saint-Venant [2]. Nous les écrivons sous la forme généralisée :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(uS)}{\partial x} + q_f = 0 \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} = j - i_f \end{array} \right. \quad (1.2. a)$$

où :

q_f représente un débit latéral par unité de longueur, compté positivement s'il s'agit d'un débit de fuite,

j est la pente de la surface libre, liée à la pente i du fond par

$$i = j + \frac{\partial z}{\partial x},$$

i_f est la pente fictive correspondant au frottement.

Avec Darcy [1] et Boussinesq [3], nous complétons les hypothèses du mouvement graduellement varié en considérant les pertes de charge comme proportionnelles au carré de la vitesse de débit. On a [24] :

$$i_f = \frac{\psi u^2}{2gD},$$

où ψ est une constante et D le diamètre équivalent défini par $D = 4 S/B$.

1.22 - Résolution

Pour résoudre analytiquement ces équations, il a été fait des hypothèses simplificatrices supplémentaires, mais elles ont conduit à des solutions sous la forme d'expressions souvent peu pratiques (Deymié [6], Massé [9]).

Au contraire, les intégrations graphiques ou numériques fondées sur la méthode des caractéristiques permettent de traiter des problèmes plus complexes et sont d'une application plus aisée.

1.3. - RAPPELS SUR LES CARACTÉRISTIQUES

On étudie avec une bonne approximation le mouvement graduellement varié en le considérant comme la juxtaposition d'ondes élémentaires. Cette méthode fut introduite par L. Bergeron [10] et Henry [12], et développée par Craya [13], puis Ré [14]. C'est en fait une présentation de la méthode des caractéristiques pour l'étude des équations aux dérivées partielles. Nous allons rappeler cette méthode sous une forme générale.

1.31 - Caractéristiques d'un système de deux équations aux dérivées partielles

Soit un système de deux équations aux dérivées partielles du premier ordre :

$$\left\{ \begin{array}{l} A u_x + B u_t + C v_x + D v_t = E \\ A' u_x + B' u_t + C' v_x + D' v_t = E' \end{array} \right. \quad (1.3. a)$$

où les notations u_x , u_t , v_x et v_t représentent les dérivées partielles des inconnues u et v par rapport aux variables données x et t , et où les coefficients A , A' , ..., E , E' sont fonction de x , t , u et v (équations quasi linéaires).

On cherche une solution :

$$\left\{ \begin{array}{l} u = u(x, t) \\ v = v(x, t) \end{array} \right. \quad (1.3.b)$$

qui prenne sur une courbe donnée L dans le plan (x, t) ,

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \hat{x}(\sigma) \\ t = \hat{t}(\sigma) \end{array} \right. \quad (1.3.c)$$

les valeurs données

$$\left\{ \begin{array}{l} u = \hat{u}(\sigma) \\ v = \hat{v}(\sigma) \end{array} \right. \quad (1.3.d)$$

On doit donc avoir :

$$\left\{ \begin{array}{l} u[\hat{x}(\sigma), \hat{t}(\sigma)] = \hat{u}(\sigma) \\ v[\hat{x}(\sigma), \hat{t}(\sigma)] = \hat{v}(\sigma) \end{array} \right. \quad (1.3.e)$$

La solution cherchée est une correspondance ponctuelle faisant passer d'une façon univoque du plan des données (x, t) au plan des inconnues (u, v) . Les équations (1.3.d) représentent dans le plan (u, v) une courbe Λ .

On cherche une solution de proche en proche par le calcul des quatre dérivées partielles le long de la courbe L ; le point de départ de la correspondance ponctuelle entre les domaines de (x, t) et de (u, v) est la correspondance ponctuelle entre les courbes L et Λ .

Dérivons les équations (1.3.e) par rapport à la variable unique σ :

$$\left\{ \begin{array}{l} u_x \frac{d\hat{x}}{d\sigma} + u_t \frac{d\hat{t}}{d\sigma} = \frac{d\hat{u}}{d\sigma} \\ v_x \frac{d\hat{x}}{d\sigma} + v_t \frac{d\hat{t}}{d\sigma} = \frac{d\hat{v}}{d\sigma} \end{array} \right. \quad (1.3.f)$$

Nous avons en (1.3.a) et (1.3.f) quatre équations linéaires pour les quatre dérivées partielles cherchées, u_x , u_t , v_x et v_t . Pour simplifier l'écriture nous omettons maintenant les signes $\hat{\quad}$ nécessaires au début de l'exposé :

$$\left\{ \begin{array}{l} A u_x + B u_t + C v_x + D v_t = E \\ A' u_x + B' u_t + C' v_x + D v_t = E' \\ dx u_x + dt u_t = du \\ dx v_x + dt v_t = dv \end{array} \right. \quad (1.3.g)$$

La solution existe et est unique si le déterminant principal Δ est différent de zéro :

$$\Delta = \begin{vmatrix} A & B & C & D \\ A' & B' & C' & D' \\ dx & dt & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dx & dt \end{vmatrix}$$

L'idée essentielle de Cauchy est de considérer dans l'espace à quatre dimensions x, t, u, v les courbes pour lesquelles la solution est indéterminée, ce qui correspond au cas où sont nuls à la fois les déterminants Δ et δ , où δ est l'un des déterminants obtenus en remplaçant dans Δ une colonne par la colonne des seconds membres des équations (1.3.g).

La condition $\Delta = 0$ détermine les directions $\frac{dx}{dt}$ des deux familles de caractéristiques dans le plan (x, t) : elle s'écrit :

$$(AC' - A'C) dt^2 - (AD' - A'D + BC' - B'C) dx dt + (BD' - B'D) dx^2 = 0 \quad (1.3.h)$$

Les caractéristiques sont réelles quand ces deux racines sont réelles : on dit alors que le système (1.3.a) est hyperbolique.

La condition $\delta = 0$ s'écrit :

$$(AB' - A'B) dx du + (AC' - A'C) dv dt - (AE' - A'E) dx dt - (BC' - B'C) dx dv + (BE' - B'E) dx^2 = 0 \quad (1.3.i)$$

Elle détermine dans le plan (u, v) , les deux directions $\frac{dv}{du}$ en fonction de $\frac{dx}{dt}$ qui vient d'être fixé par (1.3.h) et de $\frac{du}{dt}$ arbitraire. Dans le cas particulier où $E = E' = 0$, $\frac{dv}{du}$ ne dépend pas de $\frac{du}{dt}$; si de plus, $A, A' \dots D, D'$ ne sont fonctions que de u et v , les directions $\frac{dx}{dt}$ et $\frac{du}{dv}$ ne dépendent que de u et v . Nous avons une équation différentielle déterminant v en fonction de u .

La propriété fondamentale des courbes caractéristiques dans l'espace (x, t, u, v) est que toute solution du système (1.3.a) est représentée dans (x, t, u, v) par une variété de dimension 2 qui contient une infinité de caractéristiques des deux familles et, réciproquement, toute variété de dimension 2 engendrée par des caractéristiques des deux familles représente une solution.

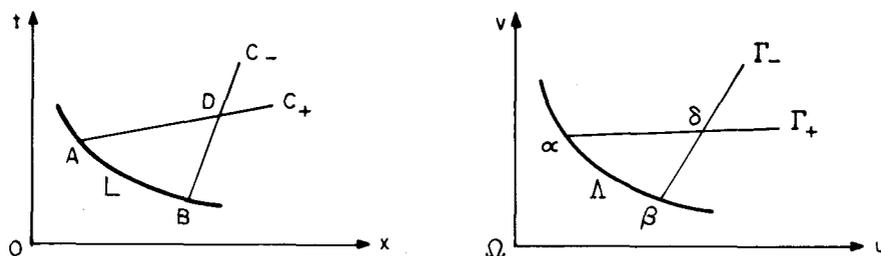
Rappelons une preuve du premier énoncé : nous allons raisonner ici dans l'espace de dimension 3.

Soient dans cet espace, les deux surfaces $u = u(x, t)$ et $v = v(x, t)$ formant une solution, et soit L la projection sur le plan (x, t) d'une courbe caractéristique. Le cylindre de base L coupe les surfaces formant solution suivant des courbes \mathcal{L}_u et \mathcal{L}_v . Le long de ce cylindre, nous avons $\Delta = 0$: pour le système d'équations (1.3.a) et (1.3.g), on a donc soit impossibilité, soit indétermination. - Du fait que \mathcal{L}_u et \mathcal{L}_v sont sur les surfaces solution, c'est que nous sommes dans le cas de l'indétermination, $\delta = 0$: le système des courbes \mathcal{L}_u et \mathcal{L}_v définit une caractéristique.

1.32 - Résolution graphique

La résolution purement analytique des équations (1.3.a) est alors avantageusement remplacée par la construction graphique des courbes caractéristiques qui forment un système d'équations équivalent au précédent.

Aux points A et B de la courbe L dans le plan (x, t) correspondent dans le plan (u, v) les points α et β de la courbe Λ . Par A et α on trace les courbes C_+ et Γ_+ , prises dans l'une des deux familles de caractéristiques : on sait qu'il y a correspondance ponctuelle entre les points de C_+ et Γ_+ , mais on ne connaît pas cette correspondance, sauf en A et α . On trace alors par B et β les courbes C_- et Γ_- de la seconde famille ; de même il y a correspondance ponctuelle entre ces courbes. De là, on conclut qu'au point de rencontre D de C_+ et C_- correspond le point de rencontre δ de Γ_+ et Γ_- . En fait, on trace les tangentes aux courbes précédentes et on obtient ainsi de proche en proche la correspondance point par point des régions voisines de AB et $\alpha\beta$.



Le calcul graphique exécuté conformément à cette méthode est d'une application relativement aisée grâce à l'emploi de calculatrices numériques.

1.33 - Application aux équations de Saint-Venant

Si l'on introduit la notion de pente de la ligne d'eau fictive, c'est-à-dire la pente de la ligne d'eau qu'on aurait si la section de la veine d'eau était constante [29] :

$$\eta = i + \frac{S}{b^2} \frac{\partial b}{\partial x}$$

où b est la largeur de la surface libre, les équations (1.2.a) s'écrivent

$$\left\{ \begin{array}{l} S \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = -q_f \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial S}{\partial x} = (\eta - i_f). \end{array} \right.$$

Les équations des caractéristiques sont données par $\Delta = 0$ et $\delta = 0$ avec :

$$\Delta = \begin{vmatrix} S & 0 & u & 1 \\ u & 1 & \frac{1}{b} & 0 \\ dx & dt & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dx & dt \end{vmatrix} \quad \text{et} \quad \delta = \begin{vmatrix} -q_f & 0 & u & 1 \\ \eta - i_f & 1 & \frac{1}{b} & 0 \\ du & dt & 0 & 0 \\ dS & 0 & dx & dt \end{vmatrix}$$

On obtient ainsi les équations des deux familles ($\varepsilon = \pm 1$) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = u + \varepsilon \sqrt{\frac{S}{b}} \\ du + \varepsilon \sqrt{\frac{1}{Sb}} = \left[(\eta - i_f) - \varepsilon q_f \sqrt{\frac{1}{Sb}} \right] dt . \end{array} \right.$$

Dans le cas général où la section du canal est quelconque et où les frottements ne sont pas négligeables, l'intégration graphique est avantageusement remplacée par une intégration numérique sur calculateur (Faure et Nahas [25]).

Dans le cas particulier où le canal est horizontal ($i = 0$) et de section rectangulaire, avec une largeur grande par rapport à la profondeur d'eau (c'est-à-dire où l'on a approximativement $D = 4z$) et où le débit de fuite q_f est nul, on obtient, en introduisant la célérité réduite $c = \sqrt{z}$, les équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} c \frac{\partial u}{\partial x} + 2u \frac{\partial c}{\partial x} + 2 \frac{\partial c}{\partial t} = 0 \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} + 2c \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\psi}{8} \left(\frac{u}{c} \right)^2 = 0, \end{array} \right. \quad (1.3.j)$$

dont les caractéristiques sont déterminées par les équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = u + \varepsilon c \\ d(u + 2 \varepsilon c) = - \frac{\psi}{8} \left(\frac{u}{c} \right)^2 dt . \end{array} \right.$$

Si nous supposons en outre (cf. § 1.41) que les frottements sont négligeables et si nous posons $\psi = 0$, la dernière de ces relations devient :

$$u + 2 \varepsilon c = Cte.$$

Pour la famille ($\varepsilon = +1$), la valeur constante de la quantité $(u + 2c)$ est déterminée au front amont où l'on a :

$$u = 0, \quad c = 1.$$

Nous avons, dans tout le domaine du plan (x, t) limité par les droites $x = -t$ (trajectoire du front amont) et $x = 2t$ (trajectoire du front aval), la relation :

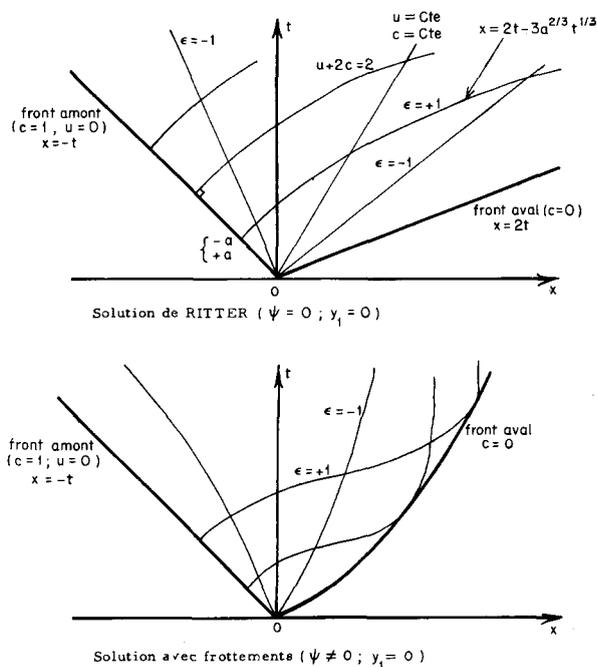
$$u + 2c = u_\infty + 2c_\infty = 2. \quad (1.3.k)$$

Comme nous avons, sur chaque caractéristique ($\varepsilon = -1$), la relation :

$$u - 2c = m,$$

où m est constant seulement sur la caractéristique considérée, nous en déduisons que les caractéristiques ($\varepsilon = -1$) sont des droites dans le plan (x, t) le long desquelles les valeurs de u et c sont constantes. Ce résultat reste valable dans toute région du plan (x, t) où nous avons la relation (1.3.k).

Sur la figure 1.3-a, nous avons représenté l'allure de la projection dans le plan (x, t) des caractéristiques correspondant aux cas $\psi = 0$ et $\psi \neq 0$: le graphique des deux

Figure 1.3-a - Projection dans le plan (x, t) du réseau des caractéristiques

familles de caractéristiques fournit la solution puisque, en chaque point (x, t) , on peut lire par interpolation les valeurs de $u + 2c$ et $u - 2c$ et, par suite, les valeurs de u et c (cf. § 1.4).

PRINCIPALES SOLUTIONS

Les solutions proposées pour représenter la suppression d'un barrage dans un canal horizontal de section rectangulaire constante sont tirées des équations (1.1.a) et (1.3.j). Deux types de solutions sont alors possibles, suivant l'importance du frottement.

1.4. - ÉCOULEMENT SANS FROTTEMENT

Si, dans le problème avec eau à l'aval, on peut considérer que les frottements sont négligeables en première approximation, il n'en est pas de même lorsque l'aval du barrage est initialement à sec. Ce dernier cas est cependant étudié, car il sert de base aux principales solutions établies en tenant compte du frottement.

1.41 - Rupture sans eau à l'aval ($y_1 = 0$)

Le frottement étant négligeable ($\psi = 0$), les équations (1.3.j) concernant les grandeurs réduites s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} c \frac{\partial u}{\partial x} + 2u \frac{\partial c}{\partial x} + 2 \frac{\partial c}{\partial t} = 0 \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} + 2c \frac{\partial c}{\partial x} = 0. \end{array} \right.$$

La projection sur le plan (x, t) du réseau des caractéristiques est indiquée sur la figure 1.3-a. Mais l'intégration directe de ces équations est possible dans ce cas particulier ; faite par Ritter [4], elle conduit à la solution :

$$\left\{ \begin{array}{l} u^o = \frac{2}{3} \left(1 + \frac{x}{t} \right) \\ c^o = \frac{1}{3} \left(2 + \frac{x}{t} \right), \end{array} \right. \quad (1.4. a)$$

qui est représentée sur la figure 1.4-a en fonction de x/t .

Le profil de la surface libre est parabolique et concave vers le haut, et la célérité du front aval est égale à 2. Dans la section du barrage $(x = 0)$, l'écoulement devient instantanément critique $(u = c = 2/3)$ et le débit volume par unité de largeur est égal à $q_R = 8/27$.

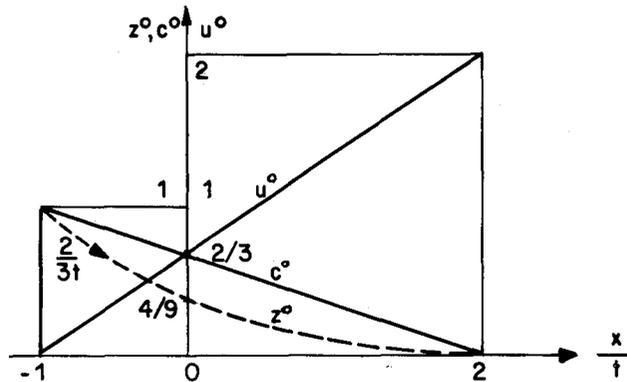


Figure 1.4-a - Solution de Ritter

Remarque :

Une seconde solution de la rupture avec aval à sec sera précisée au quatrième chapitre, dans le cadre des écoulements plans.

1.42 - Rupture avec eau à l'aval ($y_1 \neq 0$)

On suppose avec Stoker [16] que l'écoulement peut être schématisé de la façon suivante : en aval à partir du barrage, une portion de la surface libre calculée par Ritter est réalisée jusqu'à une abscisse X_2 ; au-delà, pour $X_2 < x < X_F$, on a un domaine D_2 à vitesse u_2 et hauteur d'eau z_2 uniformes, puis un mascaret de vitesse absolue V_{21} (figure 1.4-b).

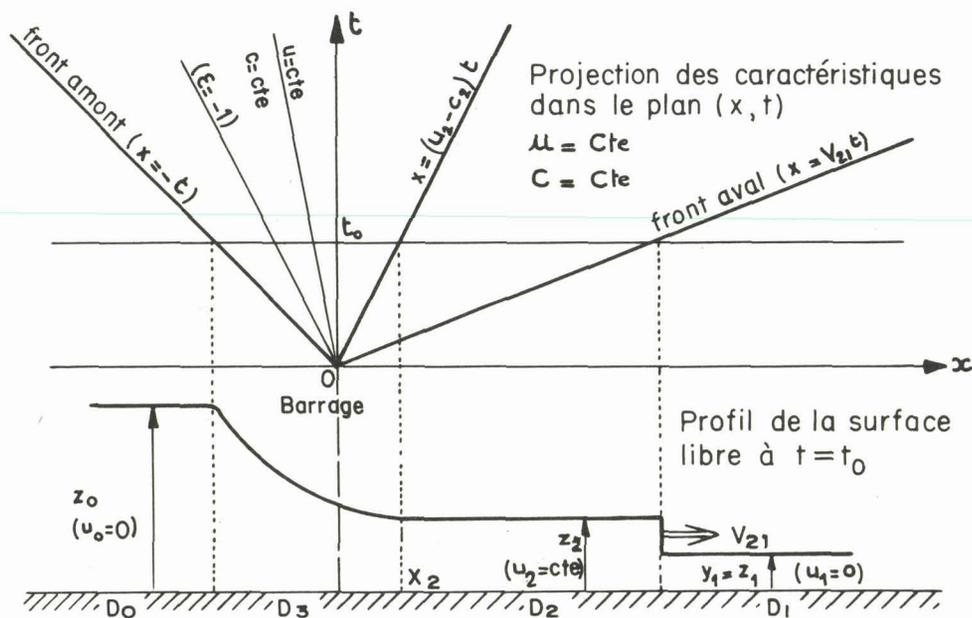


Figure 1.4-b - Schéma de la solution de Stoker

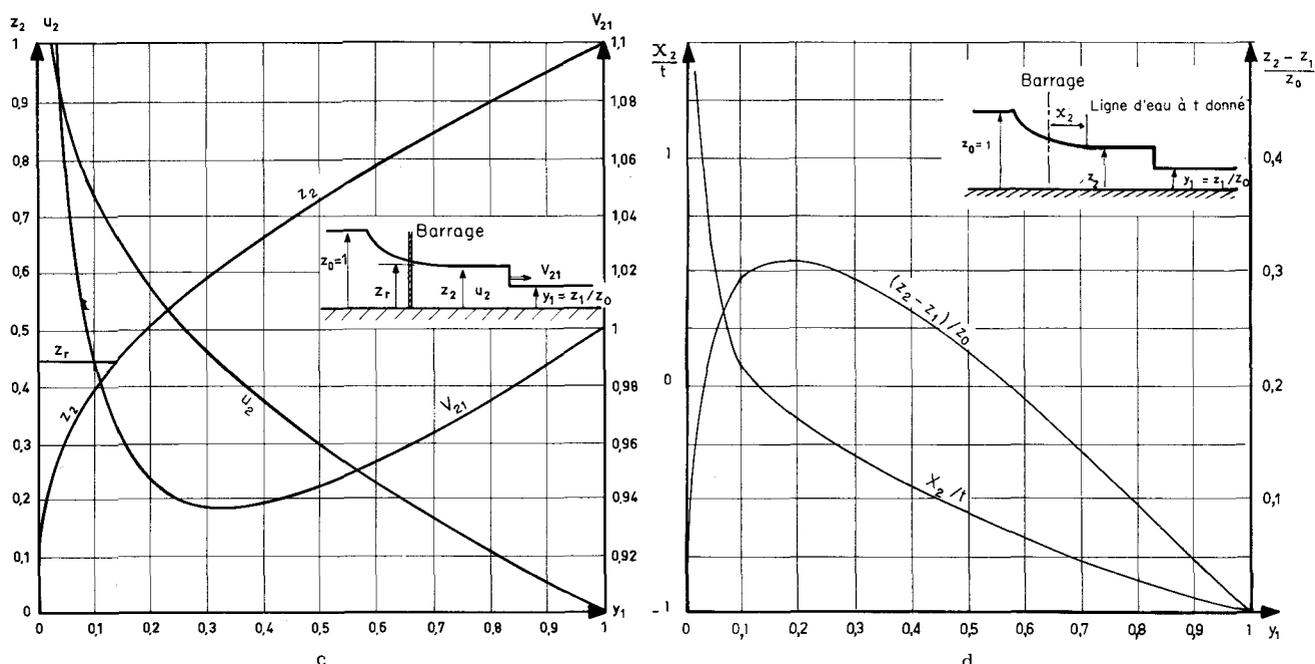
Nous avons quatre inconnues u_2 , z_2 , V_{21} et X_2 . Les trois inconnues u_2 , z_2 et V_{21} doivent satisfaire aux trois équations suivantes; les deux premières sont celles du mascaret (cf. 1.1.b) et la troisième exprime le raccordement avec la solution continue de Ritter (cf. 1.4.a) :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{21} = \sqrt{\frac{z_2}{2} (1 + z_2/y_1)} \\ u_2 = V_{21} - \sqrt{\frac{y_1}{2} (1 + y_1/z_2)} \\ u_2 + 2\sqrt{z_2} = 2. \end{array} \right.$$

L'abscisse X_2 elle-même se déduit de la solution de Ritter. La résolution de ces équations a été faite graphiquement par Cavaillé [26] et a été reprise par nous sur la calculatrice du Centre (pl.1). Le paramètre choisi a été le rapport y_1 des profondeurs initiales des retenues amont et aval ($0 \leq y_1 \leq 1$). Pour y_1 donné et à l'instant $t = t_0$, les valeurs de u_2 , z_2 et V_{21} sont données par la figure 1.4-c pour les sections d'abscisse x supérieure à celle X_2 donnée par la figure 1.4-a. Au contraire, pour $x < X_2$, le profil de la surface libre est parabolique et les valeurs de u et $z = c^2$ sont données par (1.4.a).

On note que, pour $y_1 \approx 0,2$, l'amplitude de l'onde de choc passe par un maximum (figure 1.4-d) et que pour $y_1 \geq 0,05$ la profondeur initiale aval z_1 a relativement peu d'influence sur la célérité du front de l'onde de choc ($V_{21} \approx 1$).

Ce calcul de la suppression d'un barrage avec eau à l'aval, bien que très schématique, donne, comme nous le verrons, des résultats dans l'ensemble satisfaisants. Aussi s'est-on davantage penché sur le problème de la suppression d'un barrage sans eau à l'aval, cas où le frottement ne peut plus être négligé.



Figures 1.4-c et d - Solution de Stoker.

1.5. - ÉCOULEMENT AVEC FROTTEMENT

L'influence du frottement se fait sentir en particulier sur la célérité $\frac{dX_F}{dt}$ du front aval, qui est inférieure à la valeur 2 trouvée par Ritter. Deux calculs dont les résultats sont très voisins ont été proposés.

Dans le calcul de Dressler [19], connu sous le nom de "théorie de l'onde arrière", la propagation du front est supposée ne dépendre que de l'écoulement en amont du front : à partir des équations de Saint-Venant écrites sous la forme (1.3.j), on obtient des équations asymptotiques qui, limitées aux termes du premier degré, sont de la forme :

$$\begin{cases} u(x, t, \psi') = u^0(x, t) + h \left(\frac{x}{t} \right) \psi' t \\ c(x, t, \psi') = c^0(x, t) + k \left(\frac{x}{t} \right) \psi' t \end{cases} \quad \text{avec} \quad \psi' = \frac{\psi}{\delta}$$

où u^0 et c^0 sont la solution de Ritter (1.4.a).

Dressler obtient :

$$X_F = t[2 - 2,69 (\psi' t)^{1/3}].$$

Whitham [22] obtient des résultats voisins à partir d'hypothèses différentes. Il suppose que le frottement n'intervient que dans la zone frontale et arrive à l'expression :

$$X_F = t[2 - 2,59 (\psi' t)^{1/3}].$$

Mais ces calculs ne donnent aucun renseignement sur la forme du front aval et ne sont valables que pour de faibles valeurs du temps ($\psi' t < 0,2$).

1.6. - EXPÉRIMENTATION

L'étude expérimentale du mouvement non permanent des eaux dans les canaux découverts a retenu depuis longtemps l'attention des expérimentateurs - Bidone, Russel - et, grâce à la collaboration de Darcy, Baumgarten, Ritter, Bazin, il paraît en 1863 un premier mémoire sur la propagation des ondes. Des expériences plus précises, réalisées en 1935 aux Laboratoires de Zurich par Favre [8], mettent en évidence derrière le front d'une onde positive l'existence d'une série d'ondulations (ondes de Favre) étudiées plus tard par Lemoine [15].

Les premières expériences relatives aux ruptures de barrage ont été faites en 1914 par Zeitlinger, suivies par celles de Schoklitsh [5] - qui a étudié en particulier le cas d'une rupture partielle - et celles de Eguiasaroff [7]. Leurs résultats sont en bon accord avec les calculs de Ritter -excepté au voisinage du front aval- et avec les observations faites par Favre sur les ondulations de la région frontale.

En 1954, Dressler [21] mesure la vitesse du front aval lors de rupture avec aval initialement à sec. Il compare ses résultats expérimentaux à sa propre théorie et à celle de Whitham : les calculs, bien que très voisins entre eux, donnent un coefficient de frottement ψ' supérieur de 50 % au coefficient mesuré. Puis il les compare à la théorie de Pohle⁽¹⁾ pour des temps très faibles : dans cette théorie, on a un point anguleux qui se déplace verticalement dans le plan du barrage, alors que l'expérience donne une trajectoire inclinée d'environ 45° vers l'amont. Dressler constate en outre que la surélévation au-dessus du profil de Ritter prévue par sa théorie est pratiquement inexistante pour le fond lisse ($\psi' = 0$), mais devient d'autant plus visible que ψ' et t augmentent, et, par opposition à Eguiasaroff, il enregistre une décroissance monotone de la hauteur jusqu'à zéro.

En 1961, les expériences de Cavallé [26] effectuées sur fond aval à sec donnent des résultats en accord avec ceux de Dressler sur la vitesse du front ; les essais avec eau à l'aval donnent également des célérités de l'onde de crue très voisines de celles obtenues par le calcul (§ 1.42) et confirment les observations de Lévin qui montrait l'existence d'une surélévation locale importante dans la région frontale.

1.7. - OBJET DU TRAVAIL

L'écoulement consécutif à la suppression d'un barrage dans un canal horizontal de section rectangulaire constante et avec eau à l'aval peut donc être considéré comme résolu pour l'ensemble de l'écoulement (calculs de Stoker, expériences de Cavallé). Mais il n'en est pas de même pour les phénomènes secondaires qui se superposent à cet écoulement, comme la surélévation de niveau par rapport aux calculs de Stoker enregistrée au voisinage du front aval.

Plusieurs désaccords ont également été constatés entre nos expériences et les calculs sans eau à l'aval (solution de Ritter) ; en particulier la concavité de la surface libre est opposée à celle donnée par le calcul, et la célérité du front aval est inférieure à 2.

Nous nous sommes proposé d'apporter quelques précisions sur ces points particuliers en étudiant d'abord, dans le cas d'une rupture sans eau à l'aval, l'influence d'une

(1) voir § 4.4

durée de rupture non négligeable. Nos résultats théoriques, en meilleur accord avec les résultats expérimentaux sur le profil de la surface libre et la célérité du front aval, nous ont conduit à effectuer ensuite des essais de visualisation pour évaluer les vitesses du fluide : nos expériences sans eau à l'aval nous ont permis une comparaison de nos résultats avec ceux du calcul de Pohle, et celles effectuées en présence d'eau à l'aval nous ont aidé dans l'étude de la surélévation frontale.

Chapitre II

Étude expérimentale

Décrivons nos installations et nos appareils de mesure.

CANAUX D'ESSAIS

Deux canaux ont été concurremment utilisés: un grand canal (canal A) et un canal plus petit (canal B). Le canal A étant décrit par ailleurs [29], nous rappellerons simplement ses caractéristiques principales.

2.1. - CANAL A

Le canal A, ou grand canal, a pour cotes (figure 2.1-a) :

Longueur totale	: 23,65 m
Longueur de la partie amont (en tôle)	: 13,65 m
Longueur de la partie aval (vitrée)	: 10 m
Largeur intérieure	: 0,50 m
Profondeur d'eau maximale	: 0,50 m

Le fond a une pente nulle en moyenne (figure 2.1-b) ; initialement lisse, sa rugosité peut être augmentée par bouchardage.

2.2. - CANAL B

Le canal B, ou petit canal, a pour cotes (figure 2.2-a) :

Longueur totale	: 2 m
Longueur de la partie amont	: 0,70 m
Longueur de la partie aval	: 1,30 m
Largeur intérieure	: 0,25 m
Profondeur d'eau maximale	: 0,34 m

Il est constitué d'une structure métallique posée sur deux piliers de façon à pouvoir éventuellement pivoter autour du pilier le plus central, le second permettant le ré-

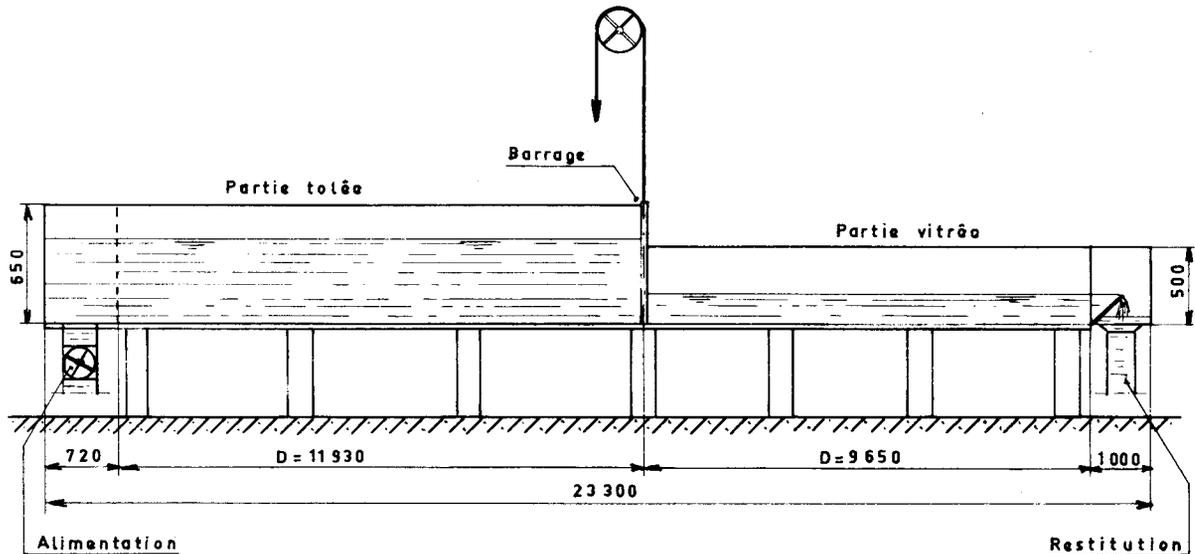


Figure 2.1-a - Schéma du Canal A

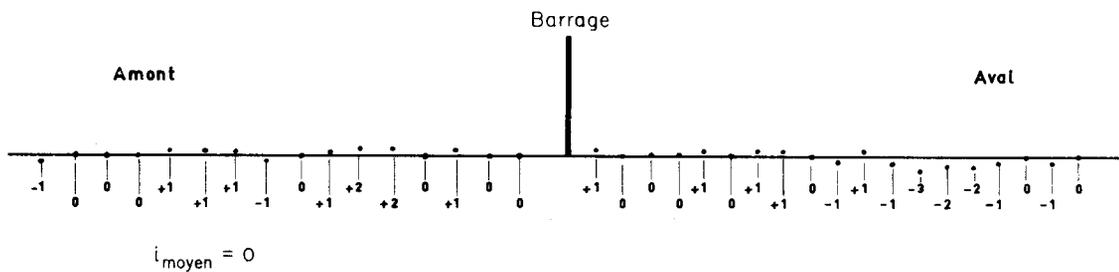


Figure 2.1-b - Profil longitudinal du canal A (relevé dans l'axe du fond du canal)

glage de la pente - les expériences rapportées ici sont faites avec une pente nulle -. Le radier et la paroi arrière sont en afcodur ; la paroi avant est une glace de verre de longueur 2 m.

Pour qu'on puisse faire usage de colorants, l'alimentation d'eau n'est pas en circuit fermé : elle se fait simplement en eau de ville à l'amont et éventuellement à l'aval.

La rugosité du radier peut être changée par la pose sur le fond lisse initial d'une plaque portant des aspérités définies sur la figure 2.2-b.

DISPOSITIF PERMETTANT UNE VIDANGE BRUSQUE

Deux dispositifs sont utilisés dans nos expériences pour simuler la suppression du barrage : l'un a pour principe l'effacement vertical d'une vanne, l'autre utilise une paroi en verre trempé, brisée sous l'effet d'un choc extérieur.

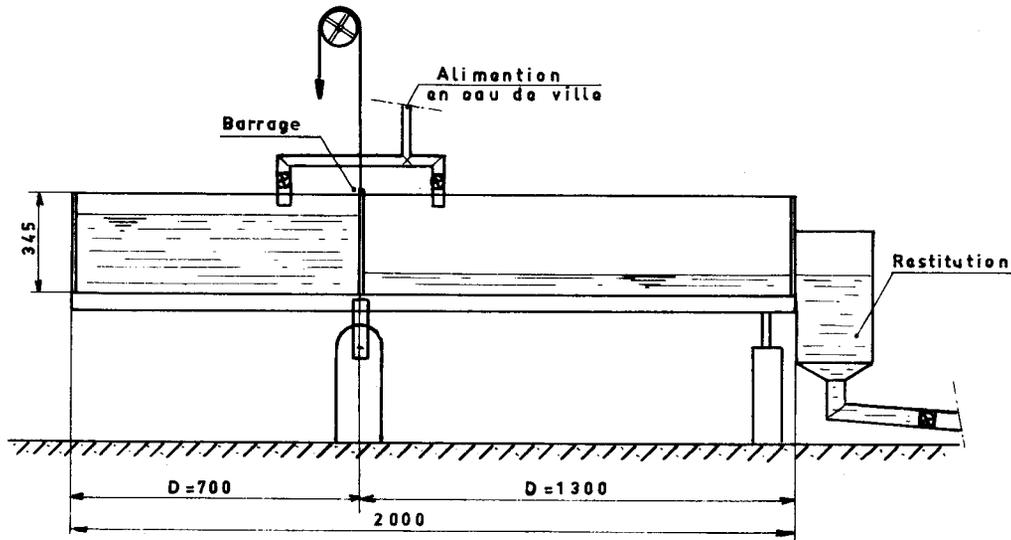


Figure 2.2-a - Schéma du Canal B

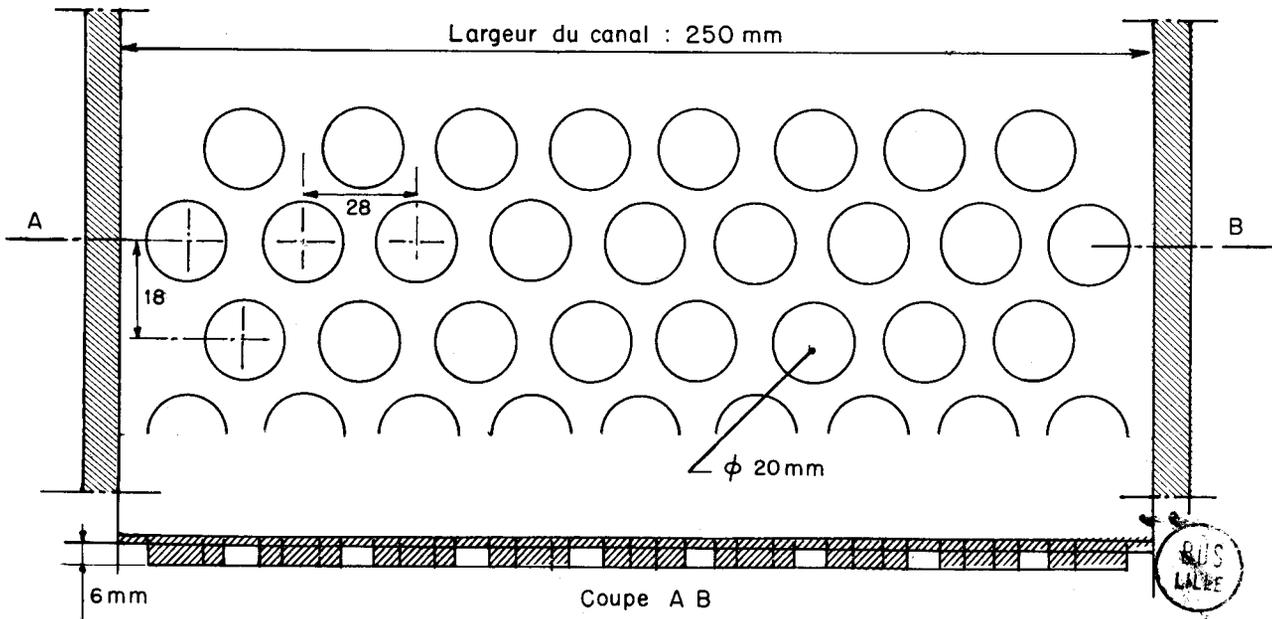


Figure 2.2-b - Aménagement du fond rugueux (canal B)

2.3. - VANNE BARRAGE À EFFACEMENT VERTICAL

C'est le mode de vidange brusque qui est le plus souvent réalisé (Dressler [21] ; Cavaillé [26]) : il permet une rupture totale ne laissant aucune trace dans le canal. L'ensemble se compose de trois parties : la vanne barrage proprement dite, le système moteur et l'amortisseur hydraulique.

2.31 - Vanne barrage

Par suite de la différence de volume de la retenue d'eau à l'amont, il a dû être réalisé une vanne adaptée à chaque canal.

Canal A [29]

La vanne est constituée par une pelle métallique de $0,5 \times 0,6$ m (poids 7 kg environ) guidée verticalement par deux rails latéraux. En position de verrouillage, la vanne comprime une bande de caoutchouc mousse disposée sur le fond du canal. L'étanchéité latérale est assurée par un système pneumatique encastré dans les parois du canal : mis sous pression avant le remplissage de la retenue, ce système est vidangé automatiquement par deux électro-valves au moment de la rupture, permettant ainsi à la vanne de s'effacer librement.

Canal B

De conception plus légère, la pelle métallique de $0,25 \times 0,31$ m (poids 2 kg environ) est constituée par un coin trapézoïdal de serrage qui s'appuie sur deux coins triangulaires mobiles (figure 2.3-a). L'ensemble est enveloppé d'une feuille de caoutchouc de $2/10^{\text{es}}$ de mm qui assure l'étanchéité de la pelle et le retrait des coins mobiles. En position de verrouillage, la poussée verticale d'un ressort écrase sur le fond du canal un bourrelet de caoutchouc solidaire de la pelle et applique étroitement les deux coins mobiles d'étanchéité contre les parois vitrées du canal. Le guidage de l'ensemble s'effectue simplement par une glissière centrale. Ce dispositif présente l'avantage de permettre des prises de vues dans la section même du barrage.

2.32 - Force motrice

La levée verticale de la vanne est réalisée, dans nos deux canaux, par un faisceau de sandows situé dans un plan vertical voisin de celui de la vanne : une des extrémités est fixée au bâti du canal, et l'autre est reliée, par l'intermédiaire d'un câble et d'une poulie folle, à la tige de commande de la vanne.

Ce système a l'avantage d'être de mise en œuvre facile et de produire une grande force initiale nécessaire à l'obtention de levées rapides.

2.33 - Amortisseur hydraulique

Bien que la force motrice diminue au fur et à mesure de la levée de la vanne, il est nécessaire cependant d'intercaler entre la vanne et l'ensemble moteur un dashpot permettant, d'une part, d'éviter les chocs de fin de course et, d'autre part, de régler la durée de la levée de vanne.

Dans le canal A, ce réglage se fait par action sur la valve qui permet au liquide amortisseur de passer du maître-cylindre traversé par la tige de commande-dashpot proprement dit- au cylindre secondaire en circuit fermé avec le premier et de section plus faible.

Dans le canal B, seul existe le maître-cylindre, et le réglage se fait par rotation de la partie inférieure de la tige de commande : on modifie ainsi, par ouverture plus ou

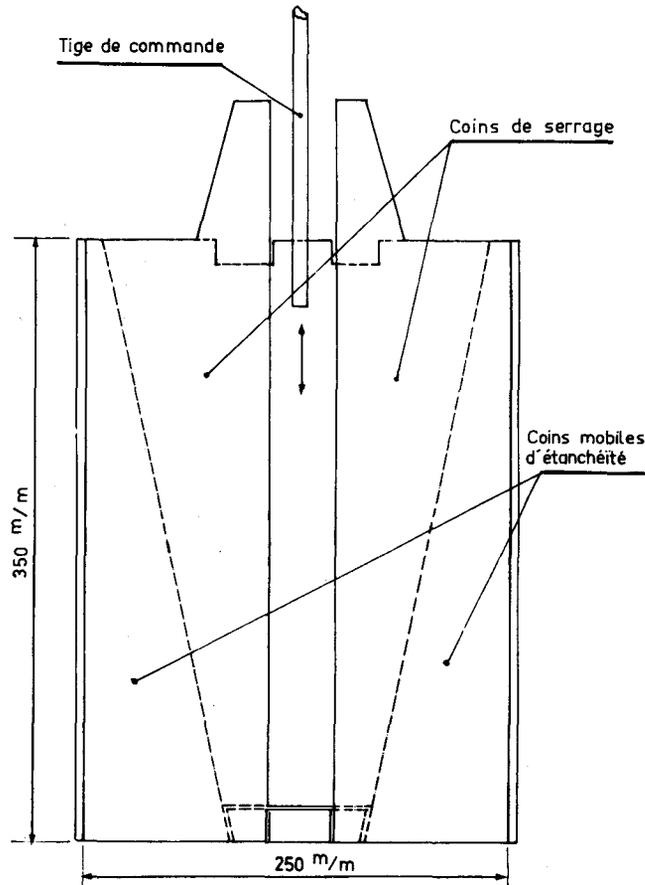


Figure 2.3-a - Vanne à effacement rapide (canal B)

moins grande de lumières ménagées dans le piston, la section de passage du liquide amortisseur.

2.34 - Durée de rupture

La durée de levée de vanne dépend essentiellement du réglage du dashpot, et du nombre des sandows utilisés : on peut d'ailleurs montrer [26] que la loi de levée obtenue avec un tel dispositif, est de la forme :

$$\left(\frac{dz}{dt}\right)^2 = a(1 - e^{-a'z}) - a''z,$$

où a , a' et a'' sont des constantes positives dépendant des paramètres précédents⁽¹⁾.

 (1) En particulier, pour un amortisseur possédant une section de maître cylindre grande par rapport à la section de passage du liquide amortisseur, on peut avoir a' grand et a'' petit, de telle sorte que l'on pourra, en première approximation, supposer une variation linéaire de la forme $z = \alpha t$.

Expérimentalement, l'instant τ où la vanne quitte la surface libre peut être obtenu soit par un micro-rupteur lié au bâti et actionné par le passage de deux bossages liés à la vanne, mais situés à distance réglable⁽¹⁾ (canaux A et B), soit par enregistrement cinématographique à grande vitesse (canal B). On a pu ainsi obtenir les durées indiquées dans le tableau ci-dessous :

	Durée maximale		Durée minimale	
	avec dimension (en seconde)	réduite	avec dimension (en seconde)	réduite
Canal A	0,41	2	0,1	0,5
Canal B	0,34	2,4	0,014	0,1

Au cours de mesures préliminaires faites dans des sections voisines du barrage, on a pu vérifier que des durées de levée inférieures à $3/10^{\text{es}}$ de seconde pour le canal A et à $1/10^{\text{e}}$ de seconde pour le canal B n'ont pas d'influence sensible sur l'écoulement. Aussi, les expériences sont-elles en majorité⁽²⁾ réalisées dans ces conditions : elles peuvent être considérées comme des ruptures instantanées.

2.4. - PAROI DE VERRE TREMPÉ

En vue de l'étude de l'influence du mode de rupture, une série d'expériences a été effectuée, dans le canal B, avec un barrage simulé par une paroi de verre trempé que l'on a brisée sous l'effet d'un choc extérieur.

La plaque de verre de $0,35 \times 0,25$ m de surface et de 4 mm d'épaisseur, est tenue verticalement par deux glissières en afcodur collées sur les parois latérales du canal. L'étanchéité, en particulier sur le fond, est obtenue par du mastic. La façon la plus efficace de produire la rupture s'est révélée être un coup de poinçon donné dans la partie haute de la plaque.

Ce nouveau mode de rupture, expérimenté par nous sur des verres du commerce, ne nous a pas permis de réaliser des expériences de rupture totale : à la différence du dispositif précédent, des morceaux de verre de différentes grandeurs adhèrent, immédiatement après la rupture, aux parois du canal dans la section du barrage, et, quelques instants plus tard, sont à leur tour emportés par l'écoulement.

Néanmoins, après une étude plus spéciale sur les verres à utiliser, il semble être intéressant d'envisager de généraliser ce dispositif à des essais de rupture avec faible retenue d'eau amont, l'écoulement obtenu étant plus représentatif du phénomène réel.

(1) La distance des deux bossages a été prise égale à la valeur $4 \bar{z}_0/9$ correspondant à la hauteur d'eau \bar{z}_r au droit du barrage, d'après la solution de Ritter.

(2) Certaines expériences ont été effectuées dans le canal B avec des durées de levée de l'ordre de $3/10^{\text{es}}$ de seconde pour mettre en évidence l'influence de la durée de rupture (chap. III).

APPAREILLAGE DE MESURE

Sur chacun des canaux d'essais, le même appareillage sert aux mesures des hauteurs d'eau et des vitesses en fonction du temps et de l'abscisse.

2.5. - CANAL A

Dans le grand canal A, l'altitude de la surface libre est enregistrée en fonction du temps par quinze capteurs à impédance électrique conçus au Centre de Recherches et d'Essais de Chatou. Chaque capteur de niveau est composé d'un archet isolant supportant deux fils fins de platine de diamètre 0,3 mm et d'entre-axes 10 mm (figure 2.5-a). Il est parcouru par un courant dont l'intensité, sensiblement proportionnelle à la profondeur d'eau, est enregistrée graphiquement. Le circuit de mesure et d'amplification comporte, pour chaque groupe de cinq voies, un générateur basse fréquence et un adaptateur, et, pour chaque voie, un amplificateur démodulateur avec gain variable et correction de zéro.

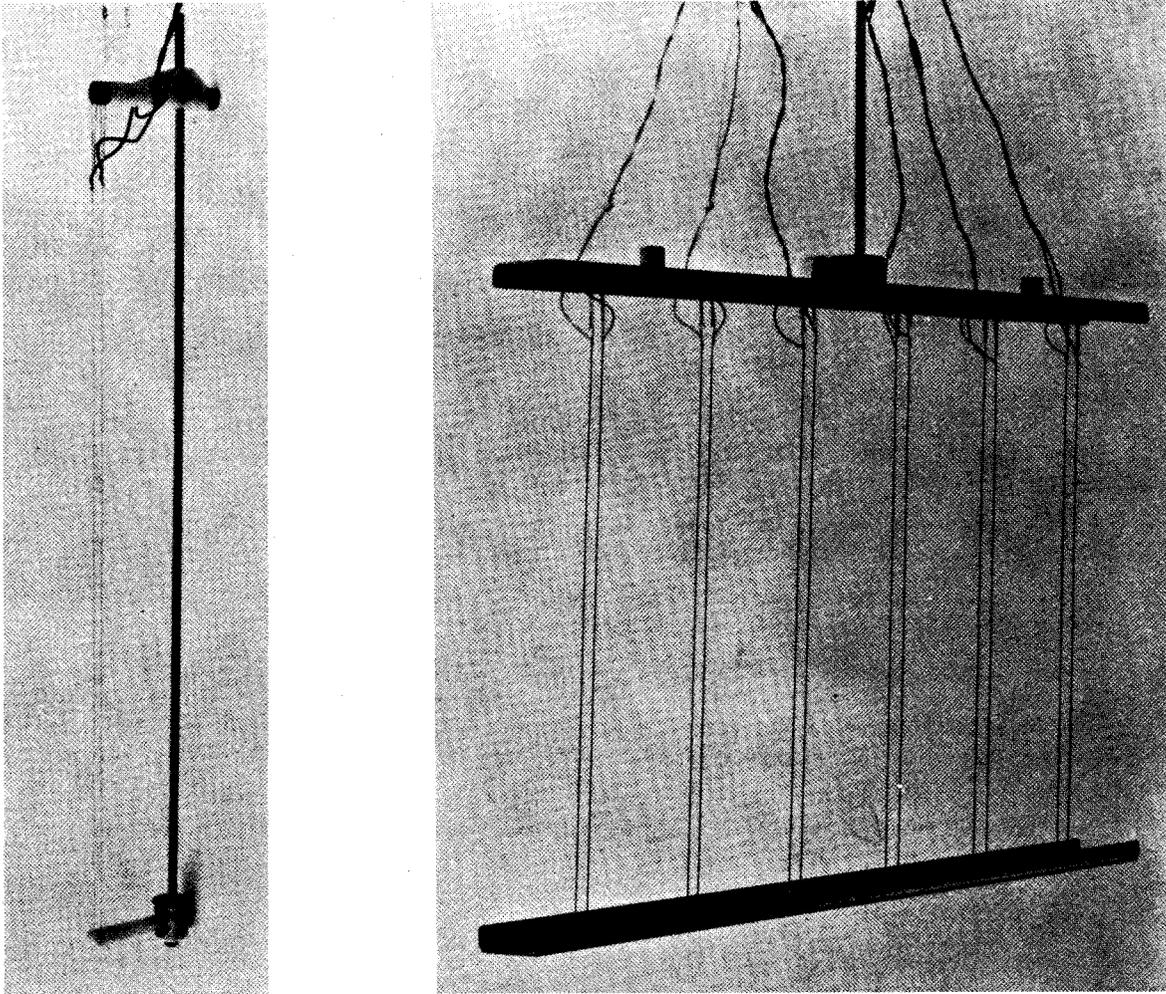


Figure 2.5-a - Appareillage de mesure. Capteurs à impédance du canal A

Les capteurs, appelés "lyres", sont placés dans l'axe du canal en quinze sections fixes, précisées sur la figure 2.5-b. Nous obtenons ainsi, en une abscisse donnée, la variation de la profondeur d'eau en fonction du temps. Pour obtenir de façon plus précise l'évolution, en fonction du temps, de la surface libre au voisinage de la région frontale, nous avons groupé sur un seul support ("lyre multiple") six capteurs identiques aux précédents, mais placés à une distance respective de 100 mm ; cinq capteurs au maximum sont en service simultanément (figure 2.5-a).

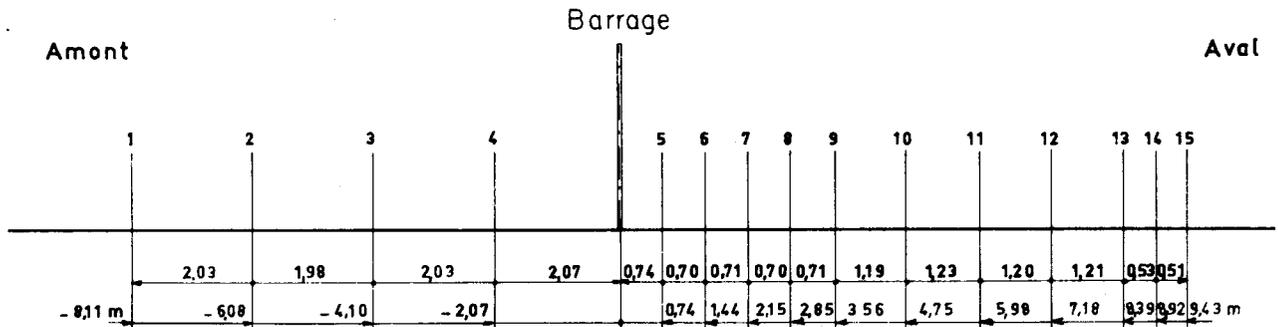


Figure 2.5-b - Position des sections de mesure (canal A)

En vue d'éliminer le plus possible l'influence de la dérive de l'appareillage de mesure, chaque expérience est précédée et suivie d'un étalonnage des dix capteurs dans une cuve en ciment située à l'amont du canal.

Compte tenu de l'influence de différents facteurs - température et viscosité de l'eau, état de propreté des lyres - l'incertitude maximale sur les profondeurs d'eau est de 10 mm, et celle sur la date de 0,1 seconde. Cette dernière erreur est essentiellement due au temps de réponse de l'appareillage.

2.6. - CANAL B

Dans le petit canal, le profil de la surface libre est cinématographié en 16 mm : deux cadences de prises de vues sont utilisées :

- pour les essais sur fond sec, 1000 images par seconde avec une caméra Zeiss-Ikon chargée d'une pellicule Eastman Tri-X 7233.

- pour les essais avec eau à l'aval, 80 images par seconde avec une caméra Webo-Pathé chargée d'une pellicule Ektachrome 7255.

Pour cette dernière série d'essais, la retenue aval contient une solution d'amidon colorée en vert par quelques gouttes de fluorescéine, alors que la retenue d'eau amont est colorée en brun par une solution d'iode. Un dosage de l'amidon est effectué avant chaque essai pour obtenir l'apparition d'une couleur violacée dans la zone de mélange des deux eaux.

L'échelle des hauteurs est donnée par un quadrillage amovible placé contre la paroi vitrée : il est constitué par un cadre métallique de longueur 2 m et de hauteur 0,35 m sur lequel sont tendus en créneaux deux fils fins métalliques de façon à former un quadrillage de 50 x 50 mm.

Le dépouillement est effectué par l'intermédiaire d'un agrandisseur : l'incertitude maximale est de 5 mm sur les hauteurs d'eau, de 0,02 seconde sur la date.

2.7. - ESSAIS EFFECTUÉS

L'étude expérimentale a été faite concurremment dans les deux canaux : cependant, les principales expériences citées dans ce rapport ont été exécutées dans le petit canal, le grand canal étant essentiellement utilisé pour l'étude de la vitesse du front aval et des singularités de section [29].

Dans le canal A, une centaine d'expériences ont été exécutées en faisant varier la profondeur initiale de la retenue amont ($\bar{z}_0 = 0,20$ et $0,40$ m) et le rapport y_1 des hauteurs d'eau initiales aval et amont :

$$y_1 = 0 - 0,045 - 0,175 - 0,350 - 0,700.$$

Dans le canal B, la profondeur d'eau initiale de la retenue amont a été prise égale à $\bar{z}_0 = 0,30$ m, sauf pour les essais relatifs à l'étude de l'influence d'une durée de rupture (chap. IV), où \bar{z}_0 valait $0,20$ m et $y_1 = 0$.

Pour les autres expériences, plusieurs valeurs du rapport y_1 ont été considérées :

- pour les expériences relatives à la surélévation frontale (chap. IV) :

$$y_1 = 0 - 0,02 - 0,04 - 0,05 - 0,06 - 0,2 - 0,25 - 0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6 - 0,7 - 0,8$$

- pour les essais de visualisation (chap. V) :

$$y_1 = 0 \text{ et } 0,3.$$

Les conditions de toutes ces expériences sont précisées au cours des trois chapitres suivants.

Chapitre III

Conséquences d'une mise en vitesse instantanée

Le calcul de Ritter, qui suppose l'aval à sec et l'écoulement par tranches, donne une vitesse réduite du front aval de 2 et un profil de la surface libre parabolique et concave vers le haut⁽¹⁾. Or, les expériences effectuées par Dressler [21], puis Cavallé [26], avec une rupture simulée par l'effacement vertical d'une vanne, donnent une vitesse plus petite et un profil concave vers le bas, à l'amont.

Pensant que la durée de la rupture jouait un rôle dans ce désaccord, nous supposons d'abord une loi de débit dans la section du barrage et nous analyserons par la méthode des caractéristiques la rupture non instantanée. Nous comparerons ensuite ces résultats à l'expérience.

ÉTUDE THÉORIQUE

3.1. - INTRODUCTION

Nous étudions l'écoulement consécutif à la suppression non instantanée d'un barrage dans un canal horizontal et de section rectangulaire constante. Nous supposons que la rupture se produit sur fond aval à sec et nous négligeons les frottements.

Le barrage gênant l'écoulement pendant la durée τ , il en résulte une loi de débit $q = g_1(t)$ dans la section du barrage. Sans autre hypothèse, nous allons faire, sur la forme du profil amont de la surface libre, des conclusions générales que nous précisons ensuite par l'étude d'une suppression de barrage réalisée par l'effacement vertical d'une vanne barrage.

Le calcul est fait dans le cadre des écoulements à une dimension, en utilisant la méthode des caractéristiques dont les deux familles sont :

$$\frac{dx}{dt} = u + \varepsilon c, \quad u + 2\varepsilon c = \text{Cte}, \quad \varepsilon = \pm 1. \quad (3.1.a)$$

L'origine des temps est prise au premier instant de la rupture et les indices 1 et 2 désignent les grandeurs au droit du barrage, en amont et en aval.

(1) voir § 1.41.

3.2. - CONCAVITÉ DE LA SURFACE LIBRE À L'AMONT

3.21 - Loi de débit

Nous allons supposer que l'écoulement de Ritter est réalisé à partir de la date $t = \tau$ ⁽¹⁾. Le débit par unité de largeur q , la vitesse u_1 et la hauteur $\bar{z}_1 = c_1^2$ au droit du barrage en amont ne sont plus des constantes, mais dépendent du temps :

$$q = g_1(t); u_1 = g_2(t); c_1^2 = g_3(t).$$

Si l'on suppose que l'aire de la partie du barrage touchant l'eau est une fonction décroissante du temps, les fonctions g_1 , g_2 et g_3 sont monotones pour des valeurs de t inférieures à τ . En particulier, il existe, pour $t < \tau$, une relation biunivoque entre c_1 et t que nous écrirons :

$$t = f(c_1) \quad \text{avec} \quad \frac{df}{dc_1} < 0. \quad (3.21.a)$$

Pour des valeurs du temps supérieures à τ , la section du barrage est une section critique ; nous y avons :

$$u_1 = u_2 = c_1 = c_2 = \frac{2}{3}.$$

Sachant que la relation fournie par les équations des caractéristiques ($\varepsilon = +1$) :

$$u + 2c = u_\infty + 2c_\infty, \quad \text{soit} \quad u + 2c = 2,$$

est valable jusqu'au barrage, le débit q vaut :

$$q = u_1 z_1 = (2 - 2c_1) c_1^2.$$

La connaissance de la fonction g_1 détermine donc la fonction f .

3.22 - Équation de la surface libre, à l'amont

Nous savons que dans le plan des données (x, t) , les courbes caractéristiques ($\varepsilon = -1$) sont, pour $x < 0$, des droites de pente $\frac{dx}{dt} = u - c$ le long desquelles les valeurs de u et c sont constantes⁽²⁾ ; l'équation d'une caractéristique de cette famille issue du point $(0, t_1)$, avec $t_1 < \tau$, est dans ces conditions :

$$\frac{x}{t - t_1} = u(0^-, t_1) - c(0^-, t_1),$$

soit, compte tenu de la relation $u + 2c = 2$, valable dans tout le domaine,

$$\frac{x}{t - t_1} = 2 - 3c(0^-, t_1) \quad \text{avec} \quad x < 0 \quad \text{et} \quad t > t_1. \quad (3.22.a)$$

(1) Cette hypothèse est justifiée par le fait que si l'on considérait un écoulement plan, il serait irrotationnel par suite de l'absence supposée de frottement et de la continuité des conditions aux frontières ; donc il serait déterminé par les conditions aux frontières à chaque instant.

(2) Voir § 1.33.

Or $c(0^-, t_1)$ est ce que nous avons appelé précédemment $c_1(t_1)$, quantité liée à t_1 par la relation (3.21.a) :

$$t_1 = f(c_1) \quad (3.22.b)$$

Éliminons t_1 , paramètre de chaque caractéristique, entre (3.22.a) et (3.22.b):

$$x = (t - f(c_1)) (2 - 3c_1) . \quad (3.22.c)$$

Or, la quantité c est constante le long de chaque caractéristique : $c = c_1$. Par suite, en remplaçant c_1 par c dans (3.22.c), nous obtenons, pour chaque date t , l'équation du profil de la surface libre :

$$x = (t - f(c)) (2 - 3c), \quad (3.22.d)$$

ce que l'on peut écrire comme la somme de la solution de Ritter, $x_R = (2-3c)t$, et du terme complémentaire $x_c = (3c - 2)f$. Ce terme est positif car, d'après (3.22.a), c est supérieur à $2/3$.

Le profil (3.22.d) ainsi obtenu est donc au-dessus du profil parabolique de Ritter.

3.23 - Étude de la concavité

Calculons la pente j du profil amont de la surface libre à la date t :

$$j = -\frac{dz}{dx} \quad (j > 0).$$

Dérivons, à t constant, l'équation (3.22.d). Il vient :

$$dx = -\frac{dz}{2c} \left[3(t - f) + \frac{df}{dc} (2 - 3c) \right] ;$$

d'où :

$$j = \frac{2c}{3(t - f) + (2 - 3c) \frac{df}{dc}} ,$$

qui donne en particulier la valeur de la pente j_0 au front amont ($c = 1$, $f(1) = 0$) :

$$j_0 = \frac{2}{3t - \frac{df(1)}{dc}}$$

On retrouve bien la pente du profil de Ritter ($j_0 = 2/(3t)$) quand $f \equiv 0$. En outre, la pente restera nulle, quel que soit t , si $\frac{df}{dc}$ est infinie, c'est-à-dire si la loi de débit est telle que $\frac{dq}{dt} = 0$ pour $t = 0$. Le profil de la surface libre présentera, dans ce cas, une partie toujours concave vers le bas au voisinage du front amont.

Dans le cas général, le sens de la concavité est donné par le signe de $\frac{\partial j}{\partial x}$ qui est le même que celui de l'expression :

$$3(t - f) + (2 + 3c) \frac{df}{dc} + c(3c - 2) \frac{d^2f}{dc^2} . \quad (3.23.a)$$

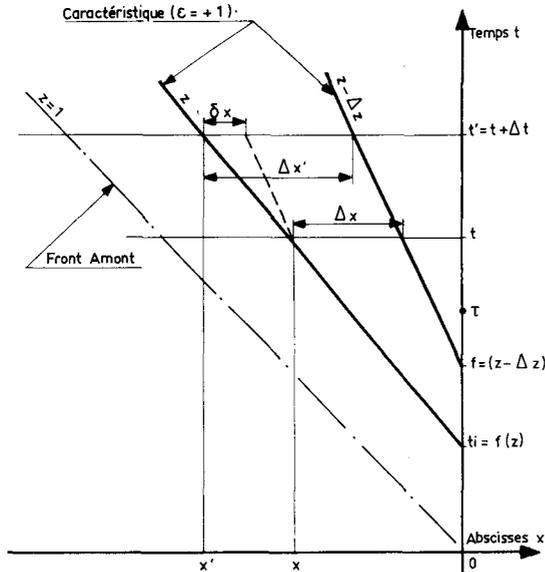


Figure 3.2-a - Concavité du profil amont

Le profil sera alors concave vers le bas tant que cette expression sera négative.

Comme nous ne connaissons pas la fonction f , cherchons à déterminer le sens de la concavité d'une autre façon (figure 3.2-a).

Calculons d'abord la valeur j' de la pente $j = \frac{\Delta z}{\Delta x}$ à la date $t = t + \Delta t$. Pour cela, fixons Δz à une valeur constante en considérant deux droites caractéristiques ($\varepsilon = -1$) le long desquelles nous avons les cotes z et $z - \Delta z$ ($\Delta z > 0$), et cherchons la valeur $\Delta x'$ de Δx à la date t' . Nous avons :

$$\Delta x' = \Delta x + \delta x$$

où δx dépend de la différence de pente entre les deux caractéristiques considérées. D'après (3.22.a), nous obtenons :

$$\delta x = \frac{3}{2\sqrt{z}} \Delta z \cdot \Delta t,$$

d'où l'expression :

$$\Delta x' = \Delta x + \frac{3}{2\sqrt{z}} \Delta z \cdot \Delta t, \quad (3.23.b)$$

qui ne contient pas f et qui montre que $\Delta x'$ varie linéairement avec Δt . La pente j' du profil de la surface libre à l'instant $t' = t + \Delta t$ est donc :

$$j' = \frac{j}{1 - \frac{3}{2} \frac{\Delta t}{\sqrt{z}} j} \quad \text{avec} \quad j' > j > 0.$$

Supposons le profil concave vers le haut à l'instant t : on peut dire qu'à l'instant $t' = t + \Delta t$ il sera encore concave vers le haut : en effet, si deux points d'abscisses x_a et x_b sont tels que $x_a < x_b < 0$, soit $z_b < z_a$, nous avons bien, d'après (3.23.b) :

$$\Delta x'_a < \Delta x'_b,$$

sachant que $\Delta x_a < \Delta x_b$ par hypothèse.

Si, au contraire, nous envisageons le cas d'un profil concave vers le bas à la date t , nous pouvons dire, d'après ce qui précède, qu'il était de même concavité à la date 0^+ et que, pour des dates postérieures à t , il présentera un point d'inflexion. En effet, d'après (3.23.b) et sachant que $\Delta x_a > \Delta x_b$, il est en général possible de trouver Δt tel que, à $t' = t + \Delta t$, on ait des pentes égales aux points x_a et x_b ($\Delta x'_a = \Delta x'_b$). A l'amont de ce point d'inflexion, le profil est encore concave vers le bas, puisque, d'après (3.23.b), il est toujours possible de trouver, quel que soit Δt , un point d'abscisse x_c tel que, si $x_a < x_c < x_b < 0$ (soit $z_a > z_c > z_b$) et $\Delta x'_c < \Delta x'_a$, on ait :

$$\Delta x_c < \Delta x_a.$$

Par ailleurs, ce point d'inflexion se déplace vers l'amont : il existe en effet un $\Delta t'$ tel que pour $x_d > x_b > x_a$ on ait, à l'instant $t + \Delta t'$:

$$\Delta x_d = \Delta x_b,$$

et que le profil soit concave vers le bas en x_b , donc $\Delta t' < \Delta t$. Le point d'inflexion situé à la date $t + \Delta t'$ entre x_d et x_b se trouve à la date postérieure $t + \Delta t$ en un point situé entre x_a et x_b .

Un profil initial concave vers le bas se transforme donc toujours pour donner naissance à un profil possédant un point d'inflexion se déplaçant vers l'amont. Le profil est concave vers le bas à l'amont de ce point, jusqu'à l'instant où la concavité change de sens au front amont : d'après (3.23.a), le profil est alors totalement concave vers le haut pour :

$$t > \frac{1}{3} \left(-5 \frac{df}{dc} - \frac{d^2f}{dc^2} \right) \quad \text{pour } c=1$$

3.3. - EFFACEMENT VERTICAL D'UNE VANNE BARRAGE

Considérons le cas d'une suppression de barrage réalisée par l'effacement vertical d'une vanne qui sort de l'eau à l'instant $t = \tau$: à cet instant, l'écoulement devient critique dans la section du barrage, le débit q étant égal à celui de Ritter ($q = q_r = 8/27$).

Nous pouvons alors préciser les résultats précédents, à l'aide de deux hypothèses supplémentaires qui schématisent le mode de rupture et qui permettent d'étudier la région à l'aval du barrage où le réseau des caractéristiques n'est plus linéaire.

3.31 - Équations fondamentales

Entre les grandeurs amont et aval, on a la relation exprimant la conservation de la masse :

$$u_1 c_1^2 = u_2 c_2^2, \quad (3.31.a)$$

et on va supposer⁽¹⁾ que la vanne est levée linéairement en fonction du temps :

$$z_2 = c_2^2 = \alpha t \quad (\alpha = \text{Cte}). \quad (3.31.b)$$

Aux trois équations (3.1.a), (3.31.a), (3.31.b), il est nécessaire d'ajouter une quatrième relation pour résoudre le problème. Nous avons convenu de poser, pendant toute la durée τ de la levée, la relation simple :

$$u_2 = c_1, \quad \text{c'est-à-dire} \quad \bar{u}_2 = \sqrt{gz_1}. \quad (3.31.c)$$

En effet, d'une part, cette condition est réalisée exactement, selon le calcul de Ritter, au moment où la vanne quitte l'eau. D'autre part, elle est approximativement valable au début de la levée de la vanne : on le voit en raisonnant, à ce moment là,

(1) voir § 2.34

comme si le mouvement était permanent : en appliquant le théorème de Bernoulli, on aurait, avec un coefficient de débit φ , un débit par unité de largeur :

$$\bar{u}_2 \bar{z}_2 \cong \varphi \bar{z}_2 \sqrt{2g \bar{z}_1};$$

ainsi la relation (3.31.c) équivaut à donner à φ la valeur acceptable :

$$\varphi = 1/\sqrt{2}$$

Des équations (3.1.a), (3.31.a), (3.31.b) et (3.31.c) on déduit, pour $t \leq \tau$, respectivement en amont et en aval,

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 = 1 - \sqrt{1 - 2\alpha t} \\ c_1 = \alpha \frac{t}{u_1}, \end{array} \right. \quad (3.31.d)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_2 = c_1 \\ c_2 = \sqrt{\alpha t} \end{array} \right. \quad (3.31.e)$$

d'où la date où la vanne quitte l'eau ($c_1 = c_2$) : $\tau = 4/(9\alpha)$.

A partir de l'instant où la discontinuité disparaît ($t > \tau$), au droit du barrage, u et c prennent les valeurs qu'ils avaient dans la solution de Ritter (cf. § 1.41) :

$$u_1 = c_1 = u_2 = c_2 = \frac{2}{3}.$$

3.32 - Résolution graphique

On a tracé le réseau des caractéristiques (3.1.a) dans le plan des données (x, t) vers l'amont et vers l'aval, à partir du barrage où les équations (3.31.d) et (3.31.e) fournissent les valeurs des inconnues u_1 et c_1 . La construction a été faite pour une durée de rupture $\tau = 2$; nous avons pris pour pas $\Delta t = \tau/20$ pour $t \leq 0,2$, et $\Delta t = \tau/10$ pour $t > 0,2$.

L'épure ainsi obtenue (pl.2) permet de connaître les valeurs de u et c de l'écoulement en chaque section, pour toute valeur du temps. Les régions I et II correspondent à l'aval : leur frontière est la caractéristique ($\varepsilon = +1$) qui passe par le point $(x = 0, t = \tau)$. La région III correspond à l'amont. Les caractéristiques ($\varepsilon = -1$) des régions II et III sont rectilignes.

3.33 - Concavité du profil amont

Avec ces hypothèses, les résultats du paragraphe 3.2 peuvent être alors précisés. Nous déduisons en effet l'expression de f :

$$f = \frac{2}{\alpha} c_1(1 - c_1),$$

qui, d'après (3.22.a), donne l'équation du profil amont de la surface libre :

$$6c^3 - 10c^2 + (4 + 3\alpha t) c - 2\alpha t + \alpha x = 0.$$

D'après (3.23.a), ce profil sera d'abord concave vers le bas pour :

$$\frac{t}{\tau} < \frac{27}{2} c^3 - 3,$$

soit, *a fortiori*,

$$t < 3 \tau,$$

puis deviendra totalement concave vers le haut pour $t > \frac{21}{2} \tau$.

3.34 - Profil et répartition des vitesses

Sur la planche 3 nous avons porté, en fonction de x/t , le profil unique de la surface libre calculé par Ritter (il est concave vers le haut) et les profils obtenus à partir de l'épure précédente pour les valeurs du temps $t = 0,5 - 1 - 1,5 - 2$ et 4 ; ils sont concaves vers le bas et, par rapport à la solution de Ritter, au-dessus à l'amont du barrage, et au-dessous à l'aval.

La planche 4 donne de même la répartition linéaire des vitesses calculées par Ritter, puis les vitesses calculées à partir de l'épure pour les mêmes valeurs du temps ; à l'amont du barrage, ces vitesses sont inférieures à celles de Ritter, tandis qu'à l'aval elles sont d'abord supérieures, puis inférieures pour des valeurs de x/t telles que $x/t > 0,3$.

3.35 - Vitesse initiale du front aval

Pour avoir une précision convenable dans la région du front aval, nous avons été conduit à prendre un pas initial $\Delta t = \tau/20$ pour $t \leq 0,2$.

Compte tenu de (3.31.c) et (3.31.d), la vitesse initiale du front aval est $V_F = 1$; en effet :

$$V_F = \frac{dx}{dt} = u_2 + c_2,$$

avec $c_2 = 0$ et $u_2 = c_1 = 1$.

Contrairement à la solution de Ritter où V_F garde la valeur constante 2, la vitesse du front est ici variable : elle part de la valeur initiale 1 pour tendre comme le montre l'épure vers la valeur 2 (figure 3.3-a).

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

3.4. - ESSAIS EFFECTUÉS

L'étude expérimentale d'une suppression non instantanée a été faite dans les deux canaux A et B :

- Dans le canal A, nous avons plus spécialement étudié l'évolution de la vitesse du front aval en fonction du temps ; à partir des enregistrements donnés par les onze capteurs placés à l'aval, un programme a été mis au point sur machine électronique

afin de lisser la courbe trajectoire du front et d'en déduire sa vitesse V_f . Les conditions des expériences étaient :

$$\bar{z}_0 = 0,40 \text{ m} \quad \text{et} \quad 0,20 \text{ m} \quad \text{pour} \quad \tau \cong 1,2$$

- Dans le canal B, le profil de la surface libre a été cinématographié à 1000 images par seconde par une caméra Zeiss-Ikon avec une pellicule Eastman Tri-X 16 mm, type 7233. La profondeur d'eau était $\bar{z}_0 = 0,20$ m. Deux modes de rupture ont été réalisés, l'un avec levée de vanne verticale, l'autre avec rupture d'une paroi en verre trempé. Dans le mode classique de suppression par levée de vanne, nous avons pu mesurer la valeur de la durée $\bar{\tau}$ avec la précision de $1/500^e$ de seconde ; deux valeurs de τ ont été réalisées, $\tau = 0,1$ et $\tau = 2,38$.

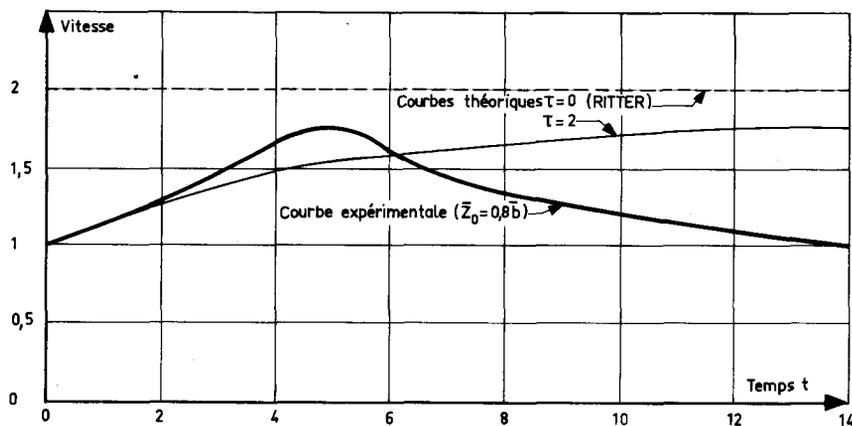


Figure 3.3-a - Vitesses du front aval

3.5. - COMPARAISON AVEC NOS CALCULS

Nos expériences avec paroi de verre ne représentent généralement pas des ruptures totales ; on observe cependant des résultats analogues à ceux obtenus par la levée verticale d'une vanne, en particulier en ce qui concerne la courbure de la surface libre.

Les résultats quantitatifs sont obtenus à partir des essais avec effacement vertical d'une vanne (pl. 5 à 9). Bien que la durée de rupture réalisée ne soit pas exactement égale à la valeur prise pour la construction de notre épure, elle n'en est pas moins très voisine (0,34 s au lieu de 0,29 s) et la comparaison de nos résultats expérimentaux avec ceux de notre épure est très satisfaisante, aussi bien pour le profil de la surface libre que pour la vitesse du front aval.

Sur la planche 3 et la figure 3.3-a, nous avons reporté respectivement le profil expérimental obtenu à $t = 1$ (canal B), et la vitesse du front aval (canal A) obtenue comme il a été indiqué. Sur la figure 3.5-a, nous comparons avec les expériences du canal A, pour deux sections $\bar{x} = -2$ m et $\bar{x} = +0,74$ m, l'évolution, en fonction du temps, de la hauteur d'eau calculée par Ritter et celle déduite de notre épure.

Nous constatons que le profil calculé reste bien, à l'amont, concave vers le bas jusqu'à des valeurs du temps grandes devant τ , et que la vitesse mesurée du front aval est en bon accord avec notre vitesse calculée pour $t < \tau$; au-delà, la vitesse diminue par suite du frottement.

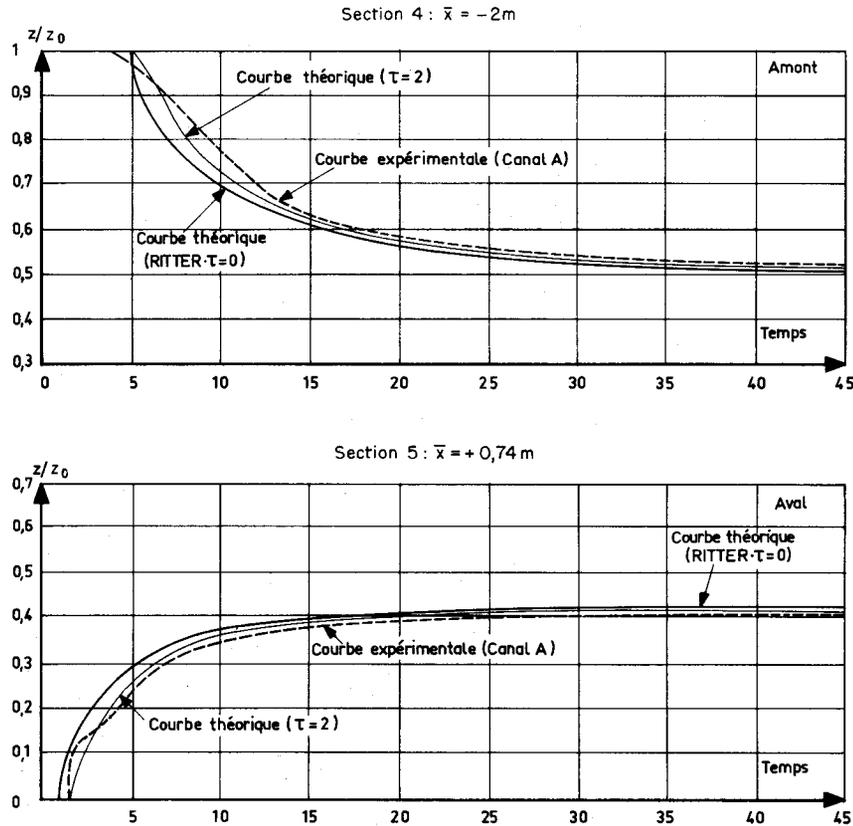


Figure 3.5-a - Évolution de la profondeur d'eau en fonction du temps

Canal A. $\bar{z}_0 = 0,40\text{ m}$. $y_1 = 0$

Ce dernier résultat est en bon accord, d'une part avec les expériences faites à Toulouse sur l'influence de la rugosité [27], d'autre part avec le calcul de Dressler qui a montré que la résistance hydraulique était négligeable au voisinage immédiat de l'origine [19].

Dans ses expériences, Dressler a par ailleurs observé, sur la surface libre, un point anguleux qui, initialement dans la section du barrage, se déplacerait vers l'amont suivant une trajectoire inclinée d'environ 45° [21]. Nous reviendrons au chapitre IV, lors du rappel du calcul de Pohle, sur l'existence de ce point singulier, mais d'ores et déjà, remarquons le bon accord qui existe entre nos calculs du § 3.23, les expériences de Dressler et les nôtres effectuées en particulier dans le canal A avec une durée moyenne de rupture de 0,8 (figure 3.5-b). Cette donnée jusqu'alors négligée semble donc avoir plus d'importance que celle attribuée par Dressler à la tension superficielle et au volume fini de la retenue amont⁽¹⁾.

(1) Des expériences effectuées par Dressler avec des liquides de viscosités très différentes semblent indiquer que la viscosité n'est pas responsable de ce phénomène.

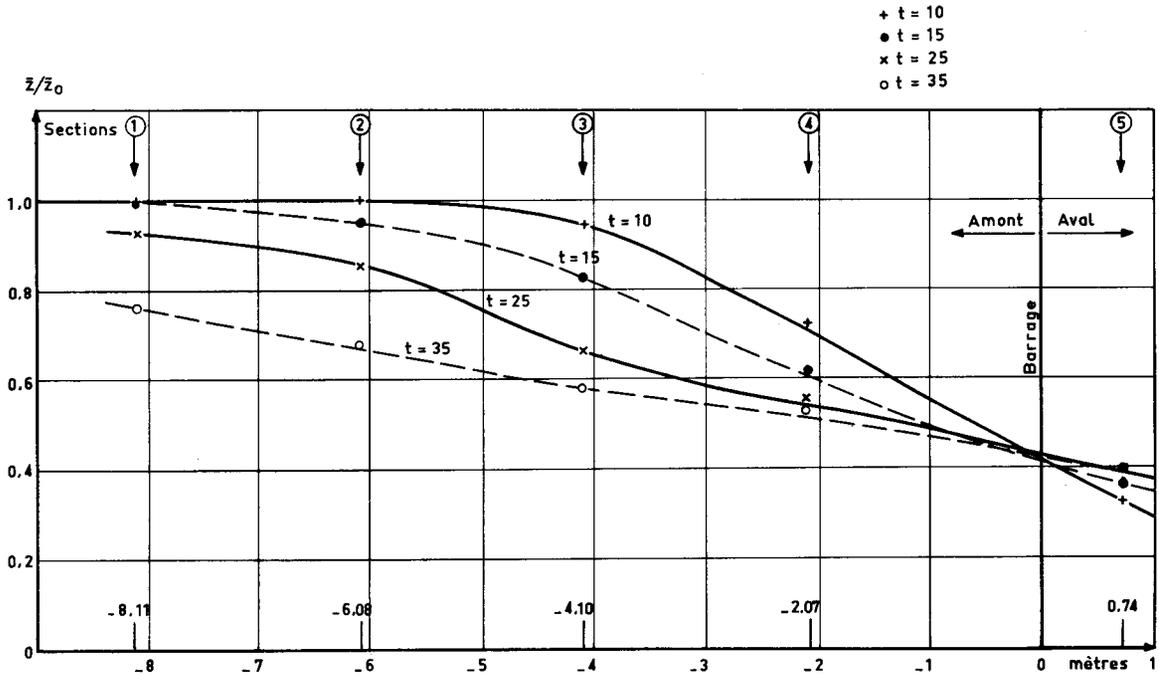


Figure 3.5-b - Profils expérimentaux de la surface libre.
Evolution de la concavité
Canal A - $\bar{z}_0 = 0,40 \text{ m} - y_1 = 0$

Signalons que nous avons obtenu des profils de même forme lors de quelques expériences complémentaires faites dans le canal B où différentes sections transversales avaient été réalisées [29].

3.6. - CONCLUSION

Nous venons de donner, dans le cadre des écoulements par tranches, une explication satisfaisante des désaccords existant entre le profil de la surface libre fourni par l'expérience et celui calculé par Ritter : le profil enregistré est, à l'amont, concave vers le bas, et présente un point anguleux qui remonte vers l'amont, à partir du barrage.

Notre démonstration tient compte de la durée de la rupture et repose sur le seul fait que les caractéristiques de l'une des deux familles sont des droites dans le plan (x, t) à l'amont du barrage ($x < 0$), propriété valable pour un écoulement sans frottement dans un canal horizontal de section rectangulaire ou non (§ 1.33).

En pratique, la rupture n'est pas instantanée, et, de plus, l'écoulement ne se fait pas par tranches. Aussi allons-nous, au chapitre suivant, étudier les conséquences de ce dernier fait.

Chapitre IV

Étude du champ des vitesses

Ne connaissant l'existence d'aucun résultat expérimental sur la répartition des vitesses dans chaque section quand on supprime un barrage, nous avons essayé de visualiser l'écoulement dans les premiers moments du phénomène en présence ou non d'une hauteur d'eau initiale à l'aval.

La rapidité de l'évolution de cette phase rend difficile la réalisation des expériences : les particules, d'abord immobiles, acquièrent très rapidement une vitesse grande ; par ailleurs, une zone très turbulente avec emprisonnement d'air se crée dans la région de rencontre des deux eaux et diminue la netteté de l'observation.

Dans ce quatrième chapitre, nous résumons le mode opératoire qui a été finalement adopté, et nous comparons, dans le cas d'une rupture sur fond aval à sec, nos résultats avec ceux que l'on peut calculer à partir de la théorie de Pohle qui considère un écoulement plan et le suppose irrotationnel.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Plusieurs procédés de visualisation ont été essayés ; en particulier, des essais avec des particules solides de formes différentes (grains de polystyrol, de manolène, de stivarrène) ont donné des résultats peu satisfaisants. Les difficultés de réglage de la densité de ces particules étaient d'autant plus grandes que la température de l'eau augmentait par suite de l'éclairage artificiel en lumière blanche. Après plusieurs recherches, nous avons adopté un éclairage en lumière ultra-violette et des particules liquides.

4.1. - INSTALLATION EXPÉRIMENTALE

Les essais sont réalisés dans le petit canal B où le dispositif expérimental de levée de vanne est utilisé en fonctionnement normal (durée de rupture voisine de $\tau = 0,8$). L'éclairage en ultra-violet se fait par neuf projecteurs paraboliques de 115 W placés au-dessus du canal, et deux projecteurs linéaires de 50 W et de 1,20 m de long dont l'un éclaire la face avant du canal comportant le quadrillage et l'autre la partie supérieure. L'alimentation se fait en 50 Hz. Le quadrillage de 50 x 50 mm, l'arête visible de la vanne barrage et les différents repères sont recouverts d'une peinture luminescente jaune.

Le liquide retenu est un mélange, dans le rapport de un à quatre, de trichloréthylène et de benzine⁽¹⁾ ; quelques gouttes de peinture luminescente y sont ajoutées. La production de particules de diamètre inférieur à 2 mm se fait à l'aide d'une aiguille hypodermique de diamètres 1,3 et 1,8 mm.

Avant chaque expérience, on s'assure de l'homogénéité du mélange et on règle la densité de la solution en jouant sur le volume de l'un des deux composants. Une sélection initiale des particules se fait d'elle-même, étant donné que l'eau à l'amont, et éventuellement à l'aval, est initialement au repos.

L'enregistrement cinématographique est fait avec deux caméras Caméflex de 35 mm, d'ouverture 2,8 et d'objectifs 40 mm ou 50 mm munis de deux filtres Kodak Wratten 2 B. Elles sont entraînées par deux moteurs électriques régulés par transistors. Vu l'ordre de grandeur des vitesses à déterminer (inférieures à 3,5 m/s, ou à 2 en grandeur réduite), la cadence de prise de vues a été fixée à 16 images par seconde, ce qui correspond à une durée d'exposition de $1/32^{\circ}$ de seconde.

Une pellicule noir et blanc Kodak Eastman Tri-X 5233 de sensibilité 250 ASA a été utilisée. Les deux caméras sont réglées de façon à ce qu'elles aient chacune un champ de 700 mm environ, dont 100 mm de champ commun ; leur emploi simultané permet ainsi d'enregistrer au cours d'une même expérience l'évolution du phénomène dans la partie la plus intéressante du canal. L'instant origine - pris quand la vanne quitte le fond du canal - est enregistré directement par l'une des deux caméras ; il est déterminé sur l'enregistrement de l'autre caméra par l'intermédiaire d'une lampe placée dans le champ commun : son extinction fournit un repère qui permet de déterminer les dates de prises de vues au $1/32^{\circ}$ de seconde près.

4.2. - PROGRAMME DES ESSAIS

Deux séries d'expériences ont été effectuées, la première avec aval à sec ($y_1 = 0$) et la seconde avec eau à l'aval ($y_1 = 0,3$). La profondeur de la retenue amont est dans les deux cas $\bar{z}_0 = 0,30$ m et la rupture peut être considérée comme instantanée ($\tau = 0,8$).

Dans chacune des deux séries, les mêmes conditions d'essais sont répétées. L'injection des particules de visualisation se fait le plus uniformément possible. D'une expérience à l'autre, le nombre de particules peut être différent ; on a ainsi réalisé sept essais pour $y_1 = 0$ et dix pour $y_1 = 0,3$ (figure 4.2-a).

4.3. - DÉPOUILLEMENT DES RÉSULTATS

L'alimentation de l'éclairage se faisant en 50 Hz, on obtient sur chaque vue du film et pour une même particule, une trajectoire constituée par une succession de "points lumineux" - deux ou trois, compte tenu de la cadence de prise de vues - séparés par un intervalle de temps de $1/100^{\circ}$ de seconde (figure 4.3-a).

Nous nous proposons de relever, pour chaque particule P, les six grandeurs suivantes (figure 4.3-b) :

T : instant de prise de vue (multiple de $1/32^{\circ}$ de seconde)

X_p : abscisse de la position moyenne de la particule

Z_p : cote correspondante de la particule

(1) Masses volumiques respectives du trichloréthylène et de la benzine: 1470 et 890 kg/m³.

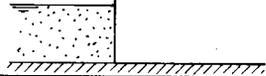
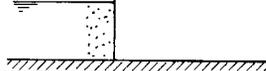
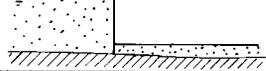
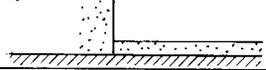
X	Numéros des expériences	Schéma de la répartition des particules de la visualisation
1 ^{re} série : $\gamma_1 = 0$	1 - 2 - 11 - 12	
	3 - 13 - 21	
2 ^e série : $\gamma_1 = 0,3$	3 - 14 - 24	
	6 - 16 - 36 - 26	
	5 - 15 - 25	

Figure 4.2-a - Essais effectués

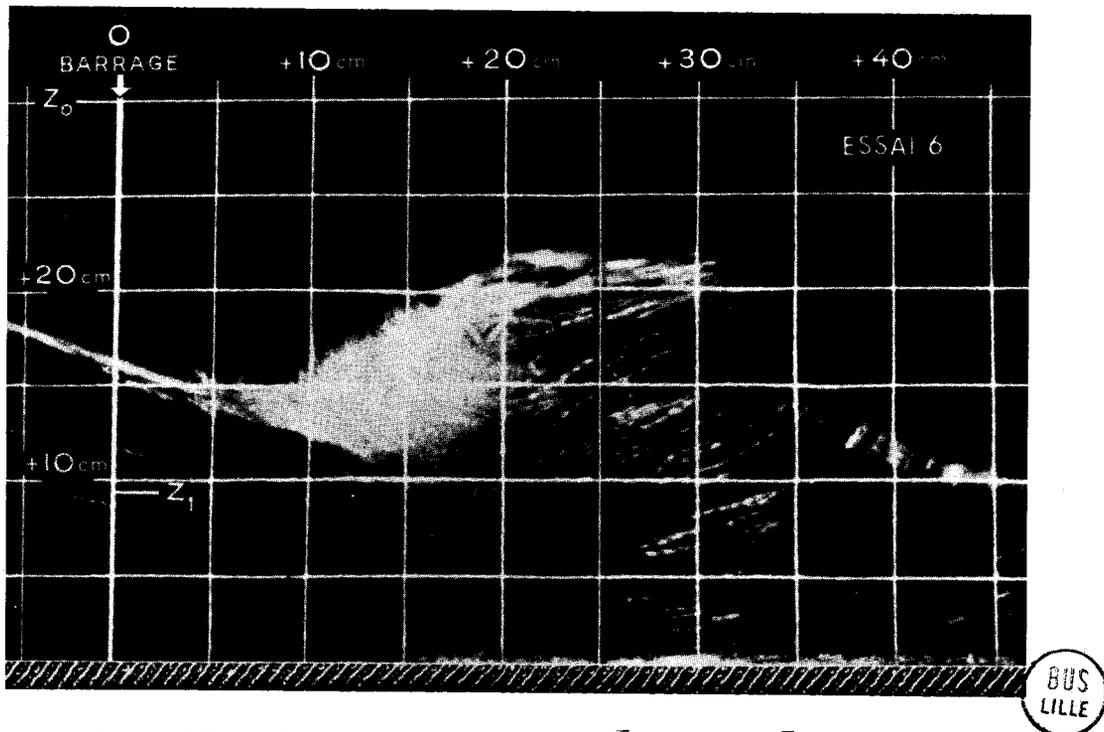


Figure 4.3-a - Champ des vitesses. Canal B - $\bar{z}_0 = 0,30$ m - $\bar{z}_1 = 0,09$ m

Z_s : cote correspondante de la surface libre

L : longueur séparant deux ou trois points lumineux successifs

α : inclinaison de la trajectoire de la particule sur l'horizontale.

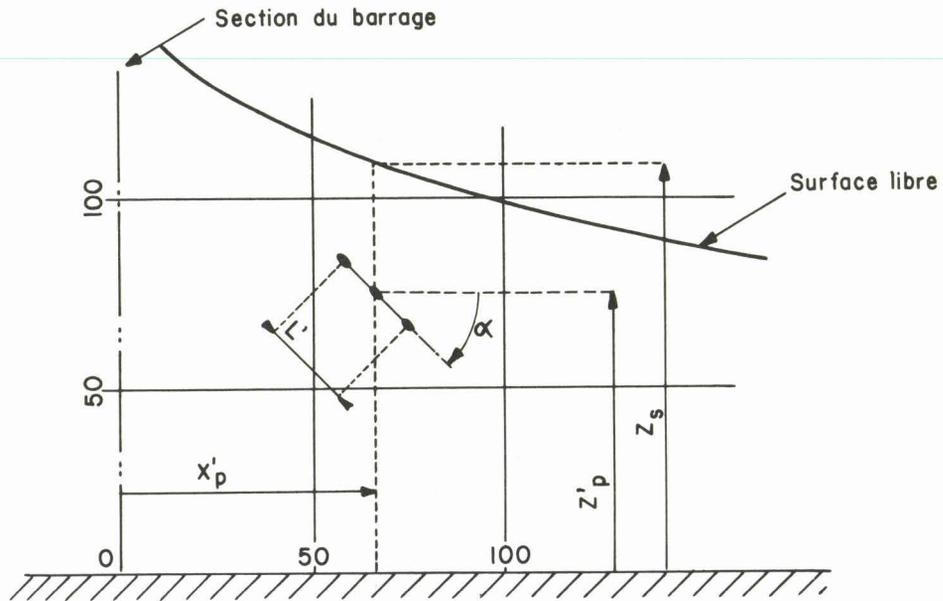


Figure 4.3-b - Définition des grandeurs mesurées

En fait, les mesures sont effectuées sur le quadrillage de 50×50 mm placé contre la paroi vitrée du canal, ce qui donne des mesures X'_p , Z'_p et L' généralement inférieures aux grandeurs réelles correspondantes ; seule la cote de la surface libre Z_s est obtenue sans erreur de parallaxe.

Pour tenir compte du fait que les particules sont injectées dans la masse même du fluide, supposons que l'écoulement soit à deux dimensions, c'est-à-dire que le mouvement des particules ait lieu dans des plans parallèles au plan du quadrillage.

Les figures 4.3-c montrent alors que la correction à apporter à la grandeur mesurée \overline{ef} sur le quadrillage, pour une particule qui se déplace de \overline{EF} dans le plan situé à la distance x , est donnée par :

$$\overline{EF} = \overline{ef} \left(1 + \frac{x}{d} \right),$$

où d représente la distance de l'objectif de la caméra au plan du quadrillage ($d \cong 1,50$ m).

Les grandeurs X'_p , Z'_p et L' devront donc subir cette correction. Mais comme la distance x n'est pas connue, nous supposons une répartition uniforme des particules, et nous multiplierons les trois grandeurs précédentes par le coefficient :

$$1 + \frac{b}{2d} \cong 1,08,$$

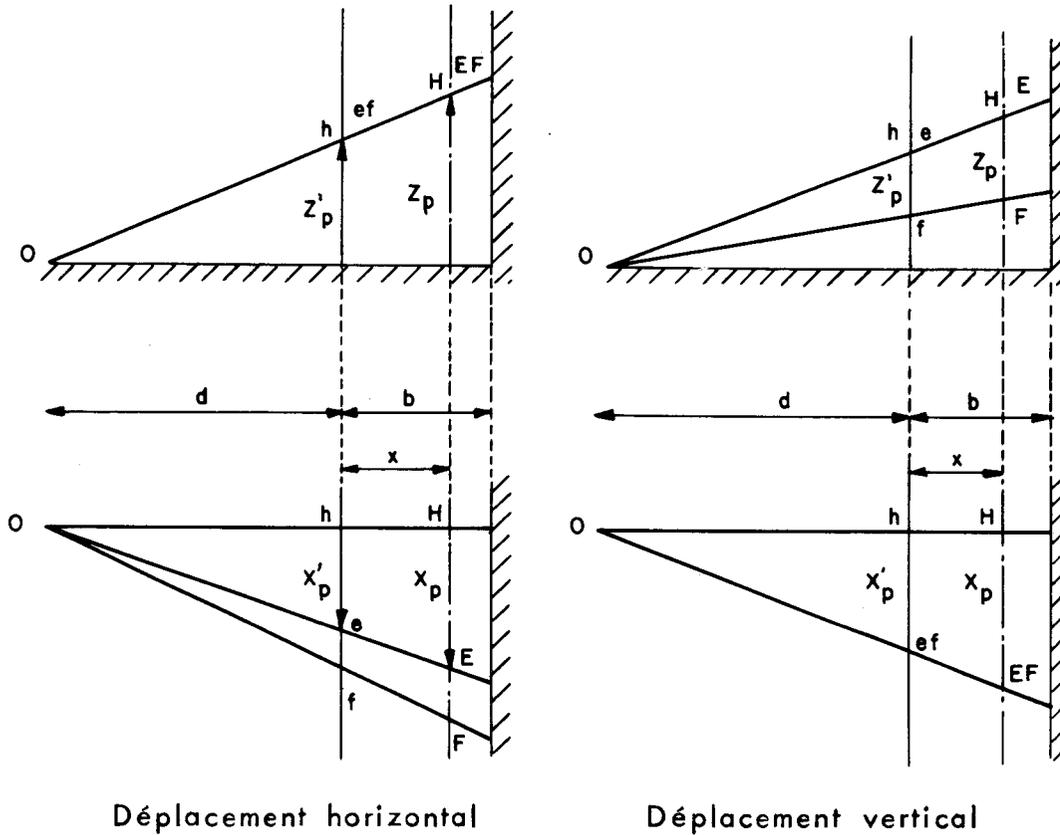


Figure 4.3-c - Correction de parallaxe

où b est la largeur du canal ($\bar{b} = 0,25$ m). L'erreur ainsi commise est de l'ordre de grandeur de $\frac{b}{4d} \times \bar{ef}$, soit $0,04 \bar{ef}$.

Au sujet des erreurs de lecture sur photo agrandie, nous admettrons que leur ordre de grandeur est de $0,3$ mm. Il en résulte sur les grandeurs réelles une incertitude de $\frac{0,3}{A}$, où A est le rapport de similitude entre la photo et le réel (A est voisin de $0,4$) ; d'où une erreur d'environ $0,8$.

Si l'on applique à ces ordres de grandeur la formule valable pour les erreurs types, on obtient l'incertitude résultante :

$$\sqrt{(0,04 \bar{ef})^2 + 0,8^2}$$

En prenant pour x et z un ordre de grandeur de 100 mm et 200 mm respectivement, nous obtenons des incertitudes sur la position de la particule qui sont de 4 mm sur les abscisses et de 8 mm sur les hauteurs. La partie principale de l'erreur est alors due au fait que les particules ne sont pas dans le plan médian.

Au contraire, pour la détermination des vitesses, le déplacement d'une particule pendant $1/100^e$ de seconde est inférieur à 10 mm ; la partie principale de l'erreur est alors due à l'erreur de lecture. L'incertitude sur la vitesse est voisine de 100 mm/s.

Le dépouillement des essais avec eau à l'aval sera traité au chapitre suivant relatif à l'étude de la surélévation frontale (chap. V). Les essais sans eau à l'aval font l'objet de la fin de ce chapitre, où nous allons d'abord rappeler les résultats théoriques obtenus en supposant l'écoulement à deux dimensions.

SUPPRESSION AVEC AVAL À SEC

4.4. - CALCULS DE POHLE

En 1950, Pohle [17] propose une solution au problème du mouvement de l'eau immédiatement après la suppression instantanée d'un barrage dans un canal horizontal, de section rectangulaire constante, sans eau à l'aval. Mais notre exposé est fait à partir d'un extrait [18] qui seul a été publié au sujet de ce travail⁽¹⁾.

4.41 - Principe

Pohle suppose l'écoulement irrotationnel et les effets dissipatifs négligeables pour ne considérer que les forces de pesanteur. Il écrit les équations de la dynamique et les conditions d'incompressibilité et d'irrotationnalité en coordonnées de Lagrange. Il admet une solution générale sous la forme d'un polynôme en t , et fait l'identification en supprimant le temps petit. La résolution est relativement facile dans le cas de la rupture instantanée.

Dans ce paragraphe, exceptionnellement, les symboles des grandeurs avec dimension ne seront pas surlignés. En désignant par :

- λ et μ l'abscisse et l'ordonnée d'une particule à $t = 0$; $\lambda < 0$, $\mu > 0$;

- $X(\lambda, \mu, t)$ et $Z(\lambda, \mu, t)$ les coordonnées de la même particule à $t > 0$,
 $X > \lambda$, $0 < Z < \mu$,

- $\hat{P}(X, Z) = P(\lambda, \mu, t)$ la pression s'exerçant à $t \geq 0$ sur cette particule, et
 $\hat{u}(X, Z) = u(\lambda, \mu, t)$ et $\hat{w}(X, Z) = w(\lambda, \mu, t)$ les composantes de sa vitesse,

les équations de la dynamique et les conditions d'incompressibilité et d'irrotationnalité s'écrivent respectivement :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{P}}{\partial X} \\ \frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{P}}{\partial Z} - g, \end{array} \right. \quad (4.4.a)$$

$$\frac{\partial(X, Z)}{\partial(\lambda, \mu)} = 1, \quad (4.4.b)$$

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial Z} = \frac{\partial \hat{w}}{\partial X} \quad (4.4.c)$$

(1) Une analyse détaillée de ce travail se trouve aussi dans Stoker.

Reportons les valeurs de $\frac{\partial \hat{P}}{\partial X}$ et $\frac{\partial \hat{P}}{\partial Z}$ tirées de (4.4.a) dans le système :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial P}{\partial \lambda} = \frac{\partial \hat{P}}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial \lambda} + \frac{\partial \hat{P}}{\partial Z} \frac{\partial Z}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial P}{\partial \mu} = \frac{\partial \hat{P}}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial \mu} + \frac{\partial \hat{P}}{\partial Z} \frac{\partial Z}{\partial \mu} ; \end{array} \right. \quad (4.4.d)$$

nous obtenons :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial \lambda} + \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} \frac{\partial X}{\partial \lambda} + \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} + g \right) \frac{\partial Z}{\partial \lambda} = 0 \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial \mu} + \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} \frac{\partial X}{\partial \mu} + \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} + g \right) \frac{\partial Z}{\partial \mu} = 0. \end{array} \right. \quad (4.4.e)$$

Pour chacune des vitesses u et w , nous avons un système de deux relations parallèles à celles du système (4.4.d) ; nous en tirons $\frac{\partial \hat{u}}{\partial X}$ et $\frac{\partial \hat{w}}{\partial Z}$ que nous reportons dans (4.4.c).

Nous obtenons :

$$\frac{\partial^2 X}{\partial \lambda \partial t} \frac{\partial X}{\partial \mu} + \frac{\partial^2 Z}{\partial \lambda \partial t} \frac{\partial Z}{\partial \mu} = \frac{\partial^2 X}{\partial \mu \partial t} \frac{\partial X}{\partial \lambda} + \frac{\partial^2 Z}{\partial \mu \partial t} \frac{\partial Z}{\partial \lambda}. \quad (4.4.f)$$

Remplaçons dans les équations (4.4.b), (4.4.e) et (4.4.f) X , Z et P par des polynômes en t de la forme :

$$X(\lambda, \mu, t) = \lambda + \sum_{p=1}^n X^{(p)}(\lambda, \mu) t^p,$$

et égalons à zéro les coefficients de t . On arrive, pour chaque fonction inconnue $X^{(p)}$, à une équation aux dérivées partielles faisant intervenir les fonctions $X^{(p-1)}$ et $Z^{(p-1)}$; c'est ainsi que, pour $p = 2$, nous obtenons :

$$\Delta^2 X^{(2)} = - \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[\frac{\partial(X^{(1)}, Z^{(1)})}{\partial(\lambda, \mu)} \right] ; \quad \Delta^2 Z^{(2)} = - \frac{\partial}{\partial \mu} \left[\frac{\partial(X^{(1)}, Z^{(1)})}{\partial(\lambda, \mu)} \right],$$

en utilisant le jacobien $\frac{\partial(X, Z)}{\partial(\lambda, \mu)} = \frac{\partial X}{\partial \lambda} \frac{\partial Z}{\partial \mu} - \frac{\partial X}{\partial \mu} \frac{\partial Z}{\partial \lambda}$,

et l'opérateur $\Delta^2 = \frac{\partial^2}{\partial \lambda^2} + \frac{\partial^2}{\partial \mu^2}$.

Dans le cas particulier de la suppression d'un barrage, nous supposons que l'eau est initialement au repos, soit, pour $t = 0$,

$$\frac{\partial X}{\partial t}(\lambda, \mu, 0) = \frac{\partial Z}{\partial t}(\lambda, \mu, 0) = 0,$$

et que les particules qui forment initialement la frontière forment toujours cette frontière :

- les particules qui se trouvent initialement sur le fond du canal y restent,

$$Z(\lambda, 0, t) = 0 ;$$

- les particules qui se trouvent initialement sur la surface libre y restent, ce qui revient à écrire que la pression correspondante est égale à la pression atmosphérique, soit pour $\mu = z_0$ et $\lambda < 0$:

$$P(\lambda, z_0, t) = 0 ;$$

- les particules initialement au contact du barrage sont ensuite aussi sur la surface libre, soit, pour $\lambda = 0$,

$$P(0, \mu, t) = 0.$$

Dans les conclusions de son étude, Pohle arrive, pour de faibles valeurs du temps, aux équations ci-dessous, écrites sous forme réduite (voir Notations) et ne contenant que les termes en t^2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} X(\lambda, \mu, t) = \lambda + \frac{t^2}{2\pi} \operatorname{Log} \frac{\cos^2 \frac{\pi\mu}{4} + \operatorname{sh}^2 \frac{\pi\lambda}{4}}{\sin^2 \frac{\pi\mu}{4} + \operatorname{sh}^2 \frac{\pi\lambda}{4}} \\ Z(\lambda, \mu, t) = \mu + \frac{t^2}{\pi} \operatorname{Arctg} \frac{\sin \frac{\pi\mu}{2}}{\operatorname{sh} \frac{\pi\lambda}{2}} \end{array} \right. \quad (4.4.g)$$

4.42 - Résultats

Ce calcul donne une trajectoire rectiligne pour chaque particule et met en évidence :

- d'une part, l'existence d'un point anguleux ($\lambda = 0, \mu = 1$) qui se déplace verticalement, dans la section du barrage, ($X = 0$) à la vitesse $w = -t$;

- d'autre part, la différence de concavité qui existe de part et d'autre de ce point singulier : en effet, à l'amont, on a le profil d'équation $\mu = 1$, c'est-à-dire :

$$Z_s = 1 + \frac{t^2}{\pi} \operatorname{Arctg} \frac{1}{\operatorname{sh} \frac{\pi X}{2}} .$$

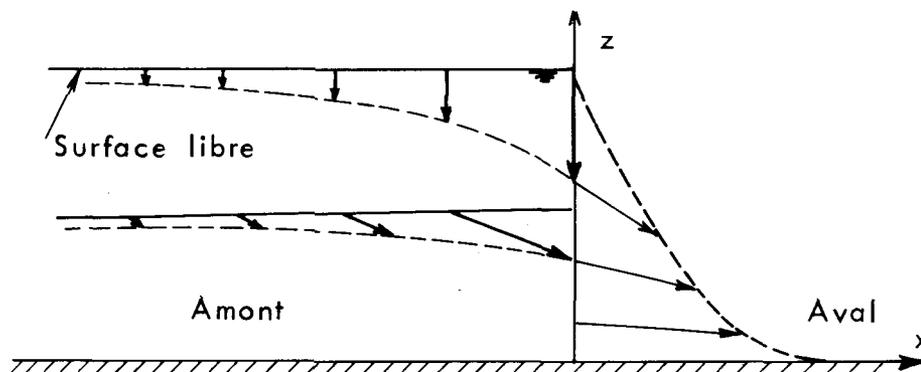
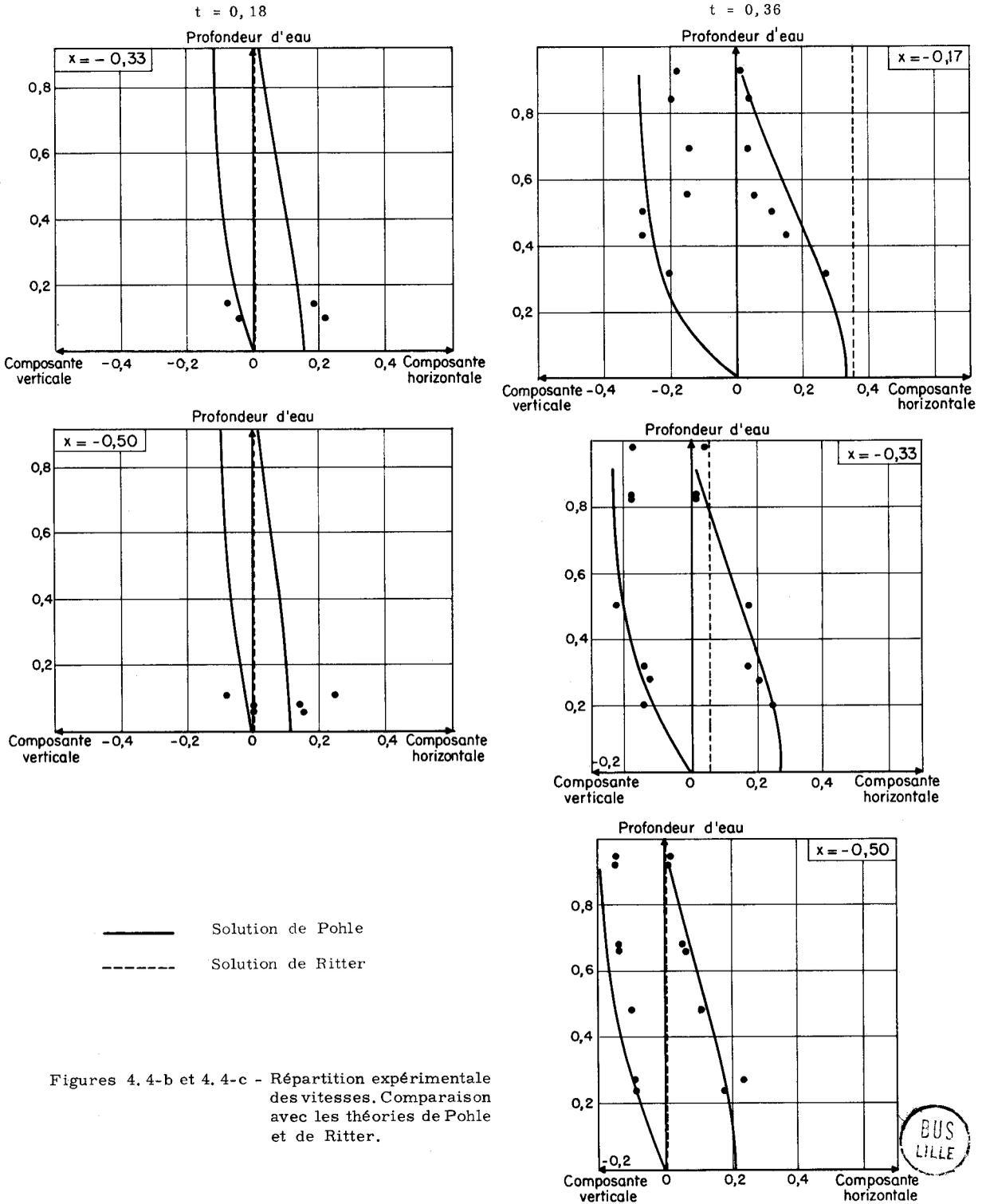
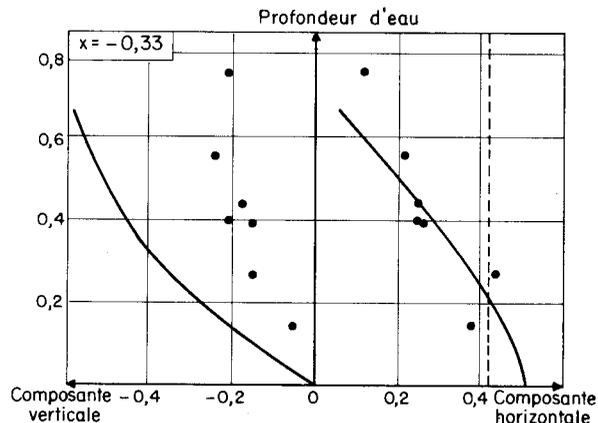
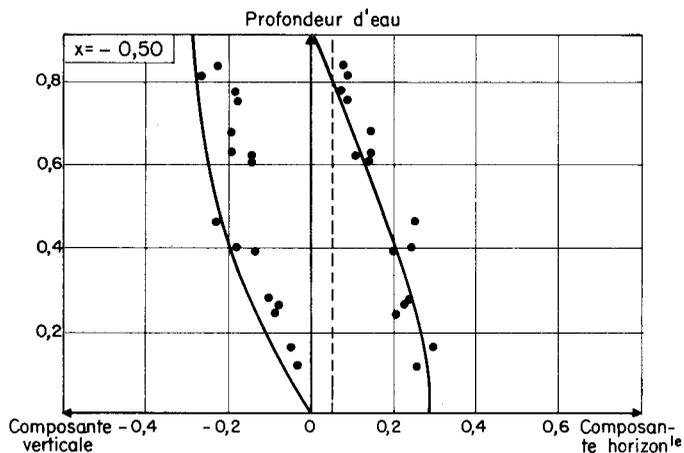
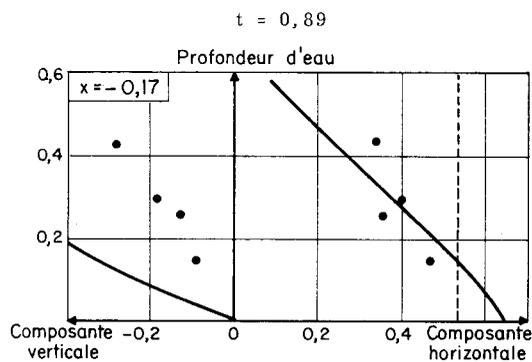
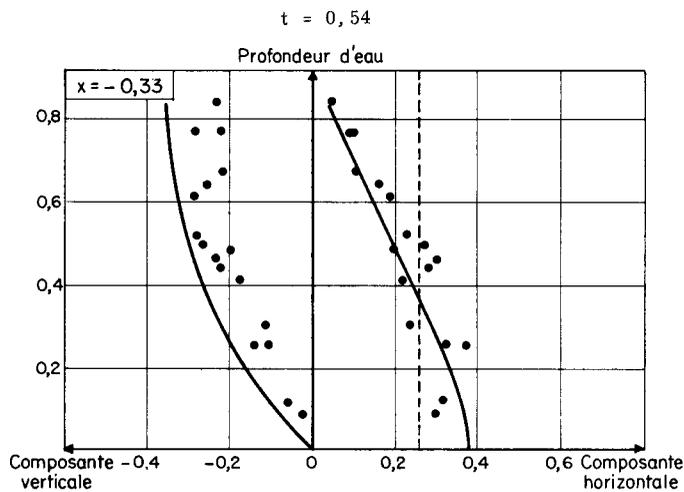


Figure 4.4-a - Répartition des vitesses (calcul de Pohle)

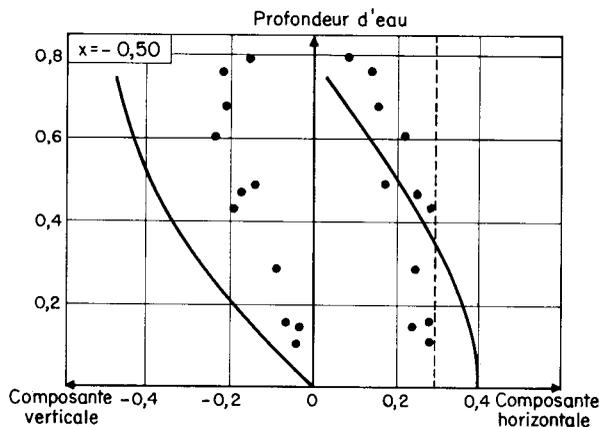


Figures 4. 4-b et 4. 4-c - Répartition expérimentale des vitesses. Comparaison avec les théories de Pohle et de Ritter.



— Solution de Pohle
 - - - Solution de Ritter

Figures 4.4-d et 4.4-e - Répartition expérimentale des vitesses. Comparaison avec les théories de Pohle et de Ritter.



Il est concave vers le bas ; à l'aval, on a le profil $\lambda = 0$, c'est-à-dire :

$$Z_s = \frac{4}{\pi} \operatorname{Arctg} e^{-\frac{\pi x}{t^2}} - \frac{t^2}{2},$$

il est concave vers le haut.

En outre, des équations (4.4.g), nous déduisons la répartition des vitesses :

$$\left\{ \begin{array}{l} u = \frac{2}{t} (X - \lambda) \\ w = - \frac{2}{t} (\mu - Z), \end{array} \right.$$

représentée qualitativement sur la figure 4.4-a .

Pour t et x donnés, les composantes verticales w de la vitesse augmentent en valeur absolue avec la cote de la particule, et les composantes horizontales u diminuent, dz/du étant infini pour $z = 0$, alors que, pour t et z donnés, les composantes horizontales et verticales diminuent quand on remonte vers l'amont.

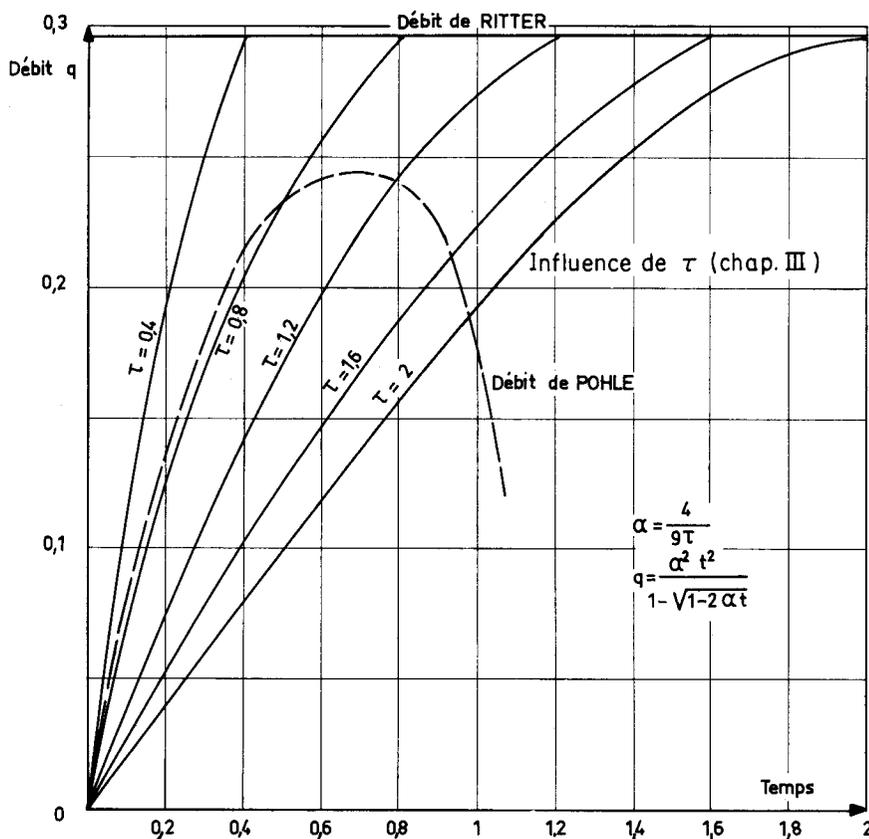


Figure 4.4-f - Variation du débit en fonction du temps. Comparaison avec les théories de Ritter et de Pohle

Un programme de calcul sur machine numérique nous a permis de préciser ces résultats qualitatifs. Il donne en particulier les coordonnées initiales (λ , μ) et la vitesse (u , w) de la particule qui est au point (X , Z) à la date t (t variant de 0,18 à 1,07 par pas de 0,18). Sur les figures 4.4-b à 4.4-e, nous avons tracé les variations des composantes de la vitesse en plusieurs sections amont ($x = -0,17$; $-0,33$ et $-0,50$), pour une date donnée ($t = 0,18$; $0,36$; $0,54$ et $0,89$), et sur la planche 10, nous avons porté les valeurs du débit et de la vitesse de débit, dite vitesse moyenne.

Nous constatons en outre (figure 4.4-f) que, pour $t > 0,7$, le débit dans la section du barrage diminue après avoir atteint un maximum voisin de 0,24, valeur inférieure au débit de 0,29 calculé par Ritter.

4.43 - Conclusions

Dans ses calculs, Pohle ne propose aucune valeur limite du temps, mais les remarques précédentes montrent que les développements effectués ne sont déjà plus valables pour des dates supérieures à 0,7. Aussi nous prendrons cette valeur comme date limite pour l'application des équations (4.4.g).

Signalons cependant dans ce calcul une difficulté de principe en ce que la suppression du barrage a instantanément une influence à l'infini aval et à l'infini amont. Mais cette influence est très petite en raison des fonctions logarithme et exponentielle contenues dans les équations (4.4.g).

C'est pourquoi, malgré cette difficulté, nous avons cherché à faire une vérification expérimentale des résultats de Pohle, du fait que l'écoulement réel n'est manifestement pas un écoulement plan.

4.5. - VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE

4.51 - Présentation des résultats expérimentaux

Vingt-quatre valeurs du temps ont été considérées de $t = 0,18$ à $t = 4,47$; pour chaque grandeur, environ 700 valeurs ont été obtenues. Nous avons alors mis au point un programme de traitement de ces résultats, sur l'ordinateur IBM 7094 du Centre de Recherches EDF de Fontenay⁽¹⁾.

Après un classement initial de ces résultats en vingt-quatre catégories correspondant à l'instant de prise de vue, deux nouveaux classements sont successivement faits à l'intérieur de chaque catégorie :

- le premier est un classement par "tranches verticales" de largeur $L = 0,066$ (ou $L/2$) de part et d'autre des sections d'abscisses réduites 0 - 0,17 - 0,33 - 0,50 ;

- le second est un classement par "tranches horizontales" de mêmes largeurs et de part et d'autre des cotes 0,17 - 0,34 - 0,50 - 0,67 - 0,83 et 1.

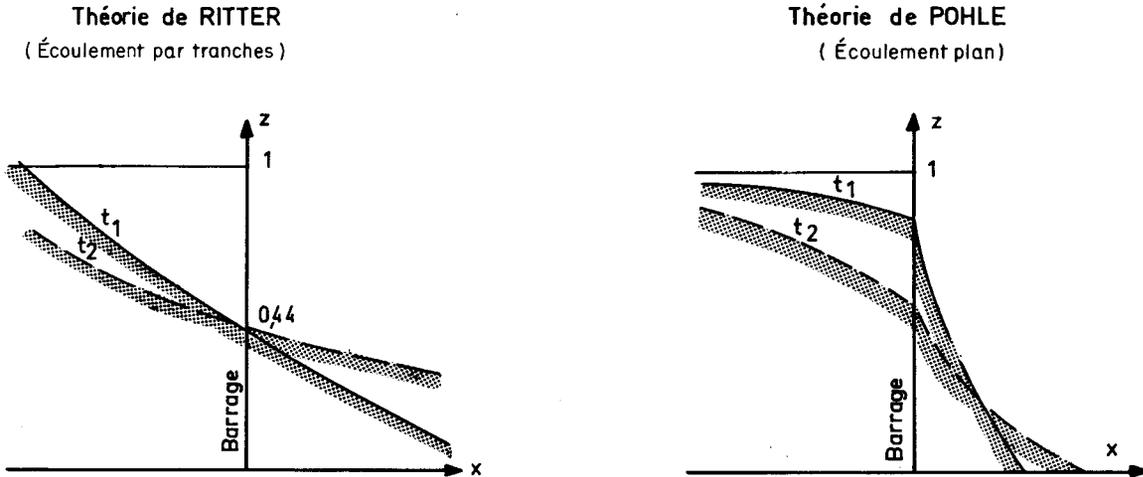
A l'intérieur de chacune de ces tranches, les résultats sont rangés par valeurs croissantes, soit de la cote Z_p dans le cas des tranches verticales, soit de l'abscisse X_p dans le cas des tranches horizontales.

Nous obtenons ainsi, pour les différentes valeurs du temps, la répartition expérimentale des vitesses dans un plan vertical ou horizontal et la vitesse moyenne dans le cas du classement par tranches verticales. L'organigramme général et les résultats complets sont donnés en annexe III.

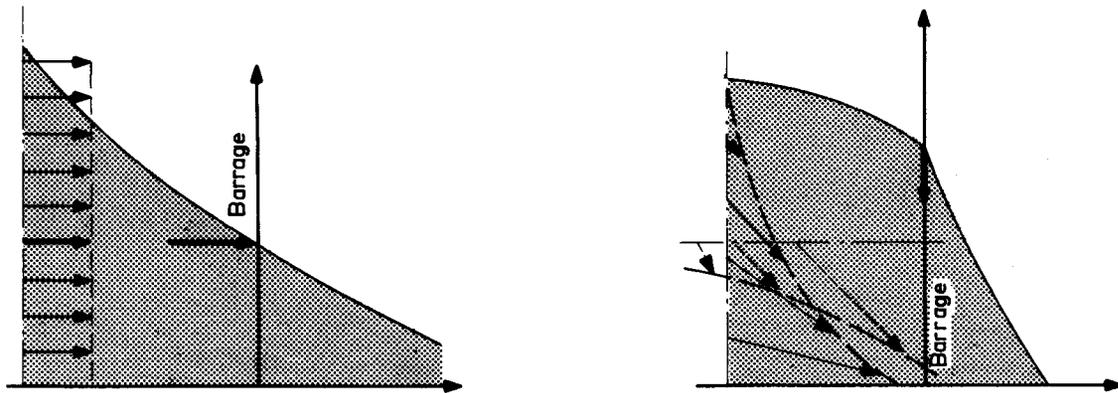
(1) Cet ordinateur, équipé d'une mémoire à tores magnétiques capable d'enregistrer plus de 33 000 mots, utilise en particulier un "compilateur" qui effectue la traduction du langage FORTRAN dans le langage propre de la machine.

4.52 - Calculs de Ritter et de Pohle

Pour compléter les résultats qualitatifs de la figure 4.5-a nous avons comparé graphiquement pour la région amont - domaine où se trouve le plus grand nombre de nos mesures - nos résultats expérimentaux relatifs aux vitesses moyennes et aux profondeurs d'eau avec les résultats obtenus en supposant soit l'écoulement par tranches (calculs de Ritter), soit l'écoulement plan (calculs de Pohle).



Évolution de la surface libre aux premiers instants de l'écoulement ($t_2 > t_1$)



Répartition des vitesses à l'instant t_1

Figure 4.5-a - Comparaison des théories de Ritter et de Pohle ($y_1 = 0 \ \psi = 0$)

Pour comparer nos résultats avec ceux calculés en supposant l'écoulement par tranches, nous avons représenté les variations de la profondeur d'eau et de la vitesse moyenne en fonction du paramètre x/t (pl. 11 et 12) ; sur les figures 4.5-b et 4.5-c, les points expérimentaux ne sont seulement classés qu'en deux catégories, la première rassemblant les points obtenus pour des valeurs faibles du temps ($0,18 < t < 1,7$), et la seconde, les points obtenus pour des temps plus grands ($1,7 < t < 5$). Nous constatons ainsi que les

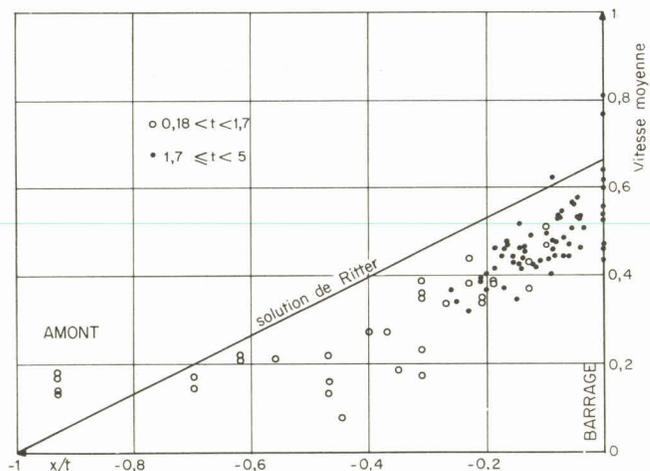


Figure 4.5-b - Répartition des vitesses moyennes. Comparaison avec la théorie de Ritter

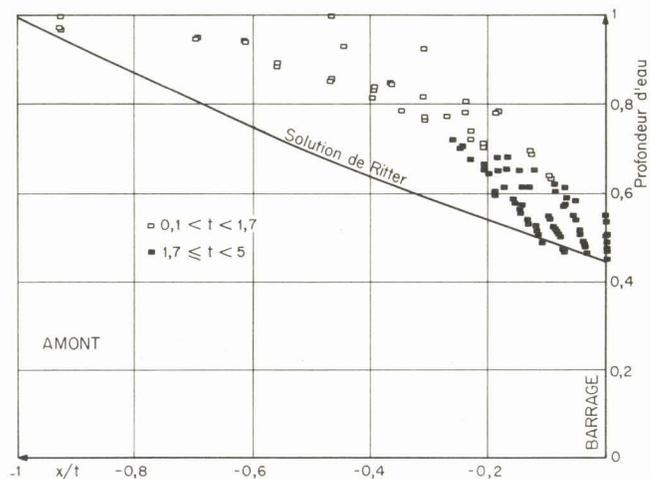


Figure 4.5-c - Variation de la profondeur d'eau. - Comparaison avec la théorie de Ritter

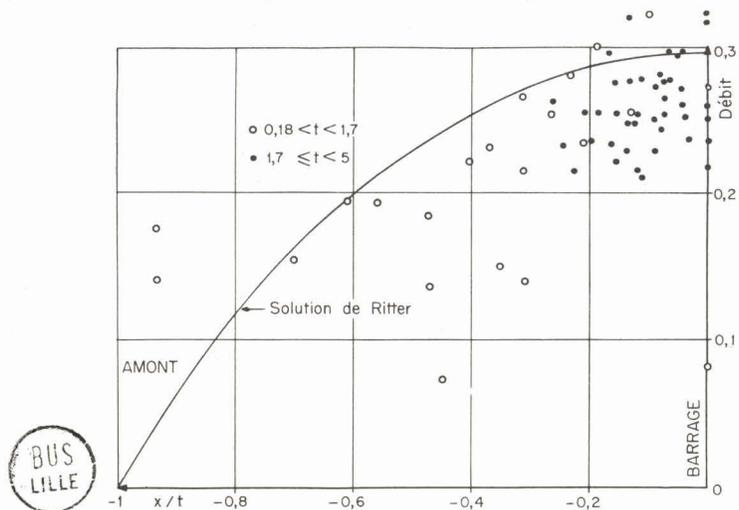


Figure 4.5-d - Variation du débit. - Comparaison avec la théorie de Ritter

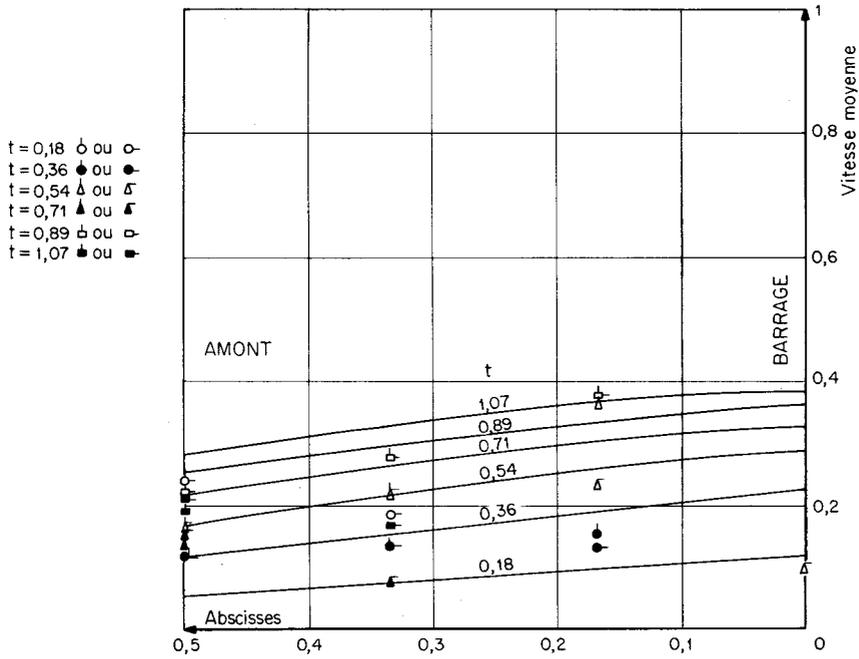


Figure 4.5-e - Répartition des vitesses moyennes.- Comparaison avec la théorie de Pohle

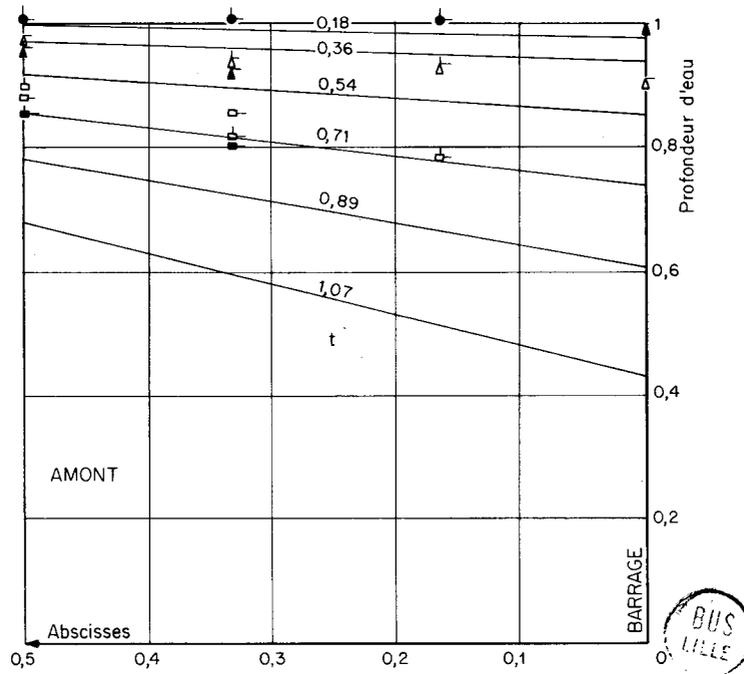


Figure 4.5-f - Variation de la profondeur d'eau.- Comparaison avec la théorie de Pohle



valeurs expérimentales sont, pour les vitesses, plus petites et, pour les profondeurs d'eau, plus grandes que celles calculées ; le débit que l'on obtient à partir de ces résultats expérimentaux (figure 4.5-d) reste cependant plus petit que le débit calculé :

$$q = \frac{2}{27} \left(1 + \frac{x}{t}\right) \left(2 - \frac{x}{t}\right)^2.$$

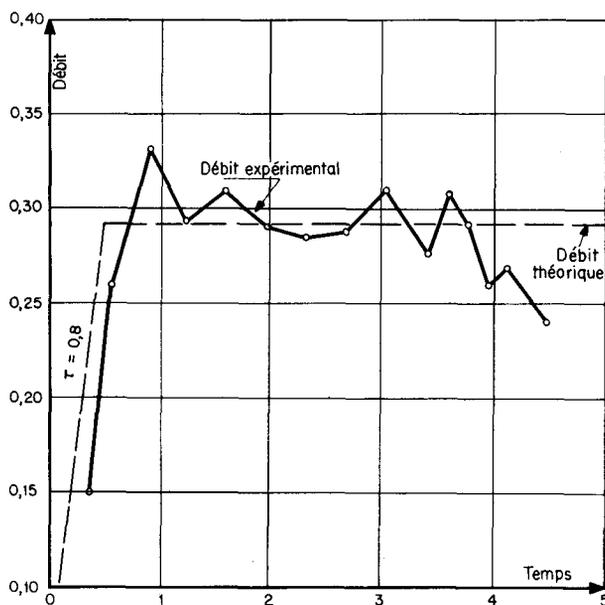


Figure 4.5-g - Débit dans la section du barrage.- Canal
 $B - \bar{z}_0 = 0,30 \text{ m. } \bar{z}_1 = 0$

La comparaison avec les résultats calculés en supposant l'écoulement plan est faite sur les figures 4.5-e et 4.5-f qui représentent les variations des vitesses moyennes et profondeurs d'eau en fonction de l'abscisse, à une date donnée ($t = 0,18 - 0,36 - 0,54 - 0,71 - 0,89$ et $1,07$) ; un bon accord est constaté pour des temps inférieurs à 0,7.

Nous avons par ailleurs comparé à l'expérience les différentes répartitions des vitesses que l'on peut obtenir par chacune de ces deux théories : sur les figures 4.4-b à 4.4-e, nous avons reporté pour t et x donnés, les variations des composantes horizontales et verticales de la vitesse en fonction de la profondeur d'eau.

De façon générale, pour de faibles valeurs du temps ($t < 0,7$), les valeurs expérimentales des vitesses horizontales et verticales sont en meilleur accord avec les calculs de Pohle qu'avec ceux de Ritter ; c'est la théorie qui suppose l'écoulement plan qui donne les résultats les plus satisfaisants au début de l'écoulement.

Au fur et à mesure que le temps augmente, les calculs de Ritter donnent des pentes de la surface libre relativement faibles (inférieures à 0,3 dans la section du barrage pour $t > 0,7$), et une valeur du débit qui est une très bonne moyenne du débit mesuré (figure 4.5-g) : c'est la théorie de l'écoulement par tranches qui conduit alors à des résultats acceptables.

4.6. - CONCLUSION

Nous voyons donc que la solution de Pohle, qui suppose l'écoulement plan, donne des résultats très satisfaisants pour la phase initiale de l'écoulement consécutif à la suppression d'un barrage sans eau à l'aval. Pour des dates inférieures à 0,7, elle est en effet en bon accord avec l'expérience sur plusieurs points, dont principalement :

- la répartition des vitesses dans le fluide,
- le sens de courbure de la surface libre,

- la loi de débit dans la section du barrage.

En particulier, ces deux derniers résultats sont à rapprocher de ceux obtenus par nous au chapitre précédent, où nous avons supposé l'écoulement par tranches, mais la durée de la rupture non négligeable : ces deux calculs donnent en effet un profil amont de la surface libre et une loi de débit dans la section du barrage en bon accord avec l'expérience. Mais il est probable qu'en réalité ces deux facteurs, écoulement plan et durée de rupture, ont une influence simultanée dans les problèmes de suppression de barrage sans eau à l'aval.

Chapitre V

Étude de la surélévation frontale

Lorsque la suppression du barrage a lieu avec eau à l'aval, on connaît la solution de Stoker qui suppose la surface libre constituée par un arc de parabole se raccordant à un profil horizontal limité à l'aval par une onde de choc.

Il apparaît cependant, aux premiers instants de l'écoulement et au voisinage de la région frontale, une surélévation de niveau par rapport à ces calculs. Ce phénomène local a été mis en évidence pour la première fois par Lévin en 1952, et son importance a été confirmée par les expériences de Cavallé en 1961. Mais aucune étude précise de ce phénomène n'a été faite, à notre connaissance.

Après avoir résumé les principales observations de Lévin, nous avons étudié expérimentalement l'évolution, en fonction du temps, de cette surélévation, et nous proposons un calcul approché de la hauteur moyenne de la zone inondable.

5.1. - RAPPEL DES NOTATIONS

La figure 5.1-a est un schéma des différents profils de surface libre que nous avons obtenus lors de nos essais avec eau à l'aval (figures 5.1-b et 5.1-c). Elle précise les principales notations relatives à la surélévation frontale mais déjà définies dans les notations générales.

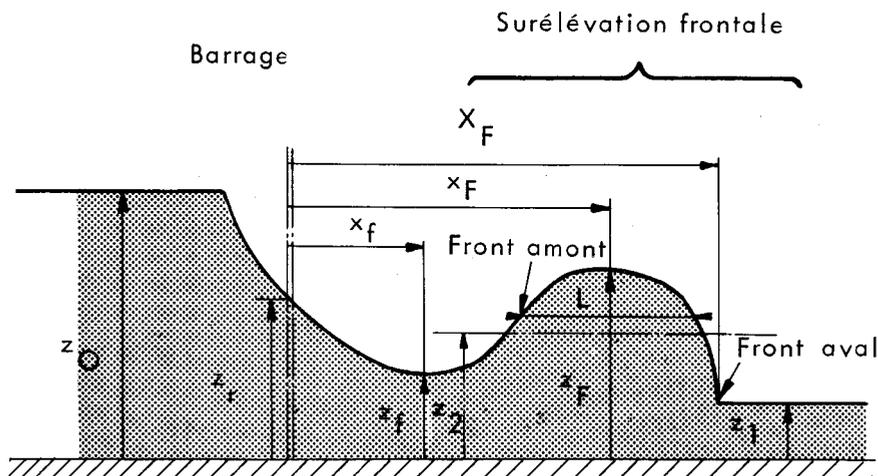


Figure 5.1-a - Notations utilisées

Rappelons en particulier que la longueur L de la surélévation est égale à la différence des abscisses pour lesquelles la hauteur d'eau est $(z_p + z_f)/2$ et que V_{21} est la vitesse du front aval de la surélévation calculée par Stoker connaissant $y_1 = z_1/z_0$.

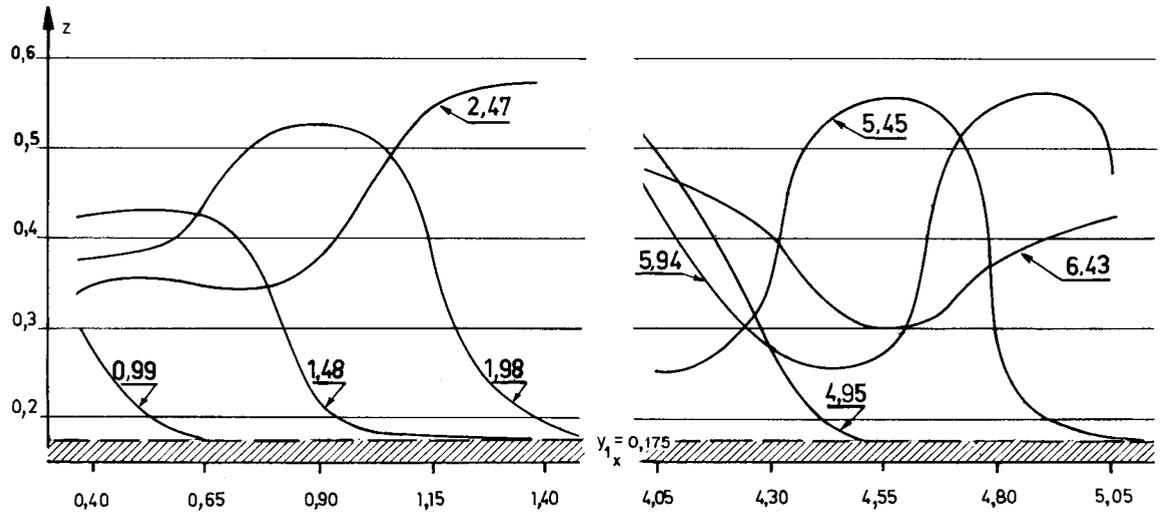


Figure 5.1-b - Profils instantanés de la région frontale - Canal A - $\bar{z}_0 = 0,40$ m - $y_1 = 0,175$

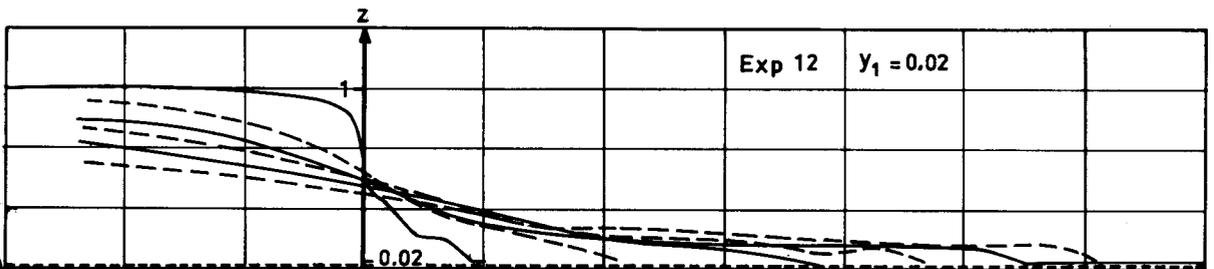
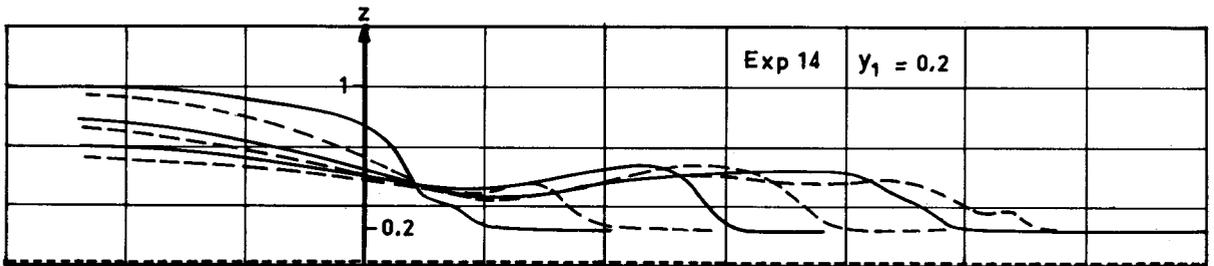
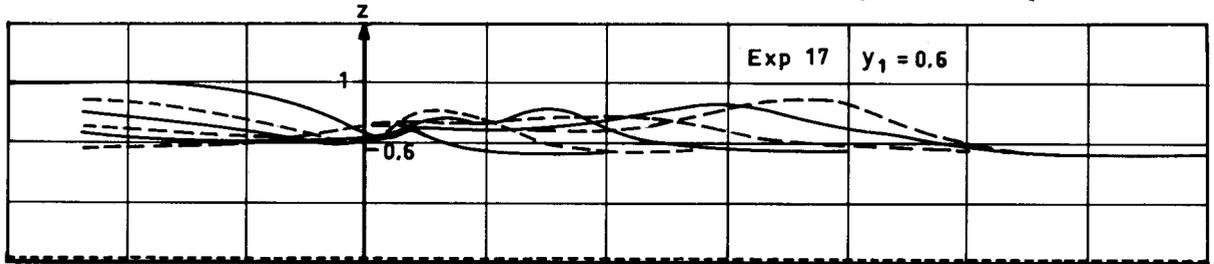


Figure 5.1-c - Influence de y_1 sur le profil de la surface libre - Canal B - $\bar{z}_0 = 0,30$ m



5.2. - EXPÉRIENCES DE LÉVIN

Pour résoudre graphiquement le problème de la suppression du barrage de Medjouvrcy en Yougoslavie, Lévin [20] a été conduit à effectuer à Belgrade des expériences sur modèle réduit pour déterminer les éléments de départ nécessaires à l'application de sa méthode.

Les principaux paramètres étudiés ont été :

- le rapport y_1 des profondeurs initiales à l'aval et à l'amont ;
- la forme de la section du canal (section triangulaire, trapézoïdale, et rectangulaire) ;
- la rugosité (la hauteur des aspérités a varié de 5×10^{-3} à 1,5 mm).

Si le profil de la surface libre semble conforme au schéma de Stoker pour $0,05 < y_1 < 0,10$, Lévin a observé au contraire, pour des valeurs de y_1 supérieures à 0,10, la formation d'une discontinuité à l'amont du front de l'onde de crue. Les hauteurs maximales de la zone inondable ont été obtenues dans le cas des sections rectangulaires. Quant à la rugosité, elle ne semble pas intervenir immédiatement après la rupture, mais elle déforme dans le temps le profil de l'onde. Aucune explication du phénomène n'est proposée.

Signalons que tous les résultats quantitatifs ne sont donnés que pour $t = 3,2$ (pour x_f seulement, $t = 1,6$), valeur qui semble arbitraire et qui ne correspondra pas, dans nos expériences, à la date où la surélévation est maximale.

5.3. - ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

5.31 - Essais effectués

Nos expériences sont faites dans les deux canaux A et B : le fond est horizontal, la section rectangulaire et la hauteur d'eau initiale à l'amont vaut $\bar{z}_0 = 0,30$ m.

Canal A

Au cours d'expériences réalisées dans ce canal et relatives à l'étude de la vitesse du front aval en fonction de y_1 , nous avons pu nous-même observer l'existence de cette surélévation. Nos mesures sont faites à l'aide de la lyre multiple (§ 2.5) que nous pouvons déplacer longitudinalement suivant l'axe du canal. Cette lyre multiple nous permet d'enregistrer l'évolution de la surélévation (figure 5.1-b) ; en fait, nous ne pouvons l'étudier que jusqu'à 3,66 m du barrage, distance à laquelle se trouve un rétrécissement brusque de section. Nous remarquons cependant que cette surélévation passe par un maximum - son amplitude et son abscisse dépendant de y_1 - et qu'elle disparaît au passage de la singularité de section. Nos hauteurs de zone inondable sont cependant plus grandes que celles indiquées par Lévin ; aussi avons nous été conduit à faire une étude plus précise du phénomène dans le canal B où des procédés de mesure plus appropriés sont possibles.

Canal B

Trois séries d'essais sont effectuées dans ce canal. Nous étudions d'abord l'influence éventuelle du mode de rupture sur la formation de la surélévation. Nous reprenons pour cela le procédé déjà utilisé pour réaliser la suppression du barrage, à savoir le bris d'une paroi en verre (chap. III). Seul le rapport y_1 des hauteurs d'eau initiales à l'aval et à l'amont a varié.

Nous obtenons ensuite la répartition des vitesses dans la surélévation par la généralisation de nos essais de visualisation du chapitre IV au cas de la suppression d'un barrage avec eau à l'aval. Une seule valeur de y_1 est considérée ($y_1 = 0,3$) et le barrage est schématisé par la vanne à levée verticale.

Ce mode de rupture est conservé dans notre dernière série d'essais où la retenue amont est colorée par une solution d'iode, alors que l'eau à l'aval, colorée par de la fluorescéine, contient une suspension d'amidon. Nous mettons ainsi en évidence la zone de mélange des deux eaux qui prend une teinte violacée. Ces essais sont effectués avec deux rugosités différentes et pour plusieurs valeurs de y_1 .

Les tableaux 5.3.a, 5.3.b et 5.3.c résument la numérotation et les conditions des essais dans le canal B.

Tableau 5.3.a

Vanne à effacement vertical - Fond lisse

y_1	0,02	0,05	0,2	0,2	0,25	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
n° expérience	4	5	6	6'	20	7	15	1	2	3	3'	8	9	10	11

Tableau 5.3.b

Vanne à effacement vertical - Fond rugueux

y_1	0,02	0,05	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8
n° expérience	12	13	14	15	16	17	18	19

Tableau 5.3.c

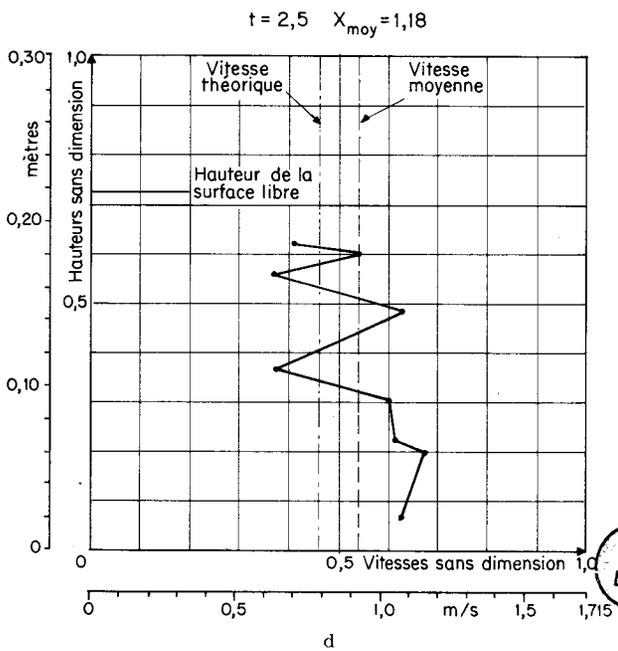
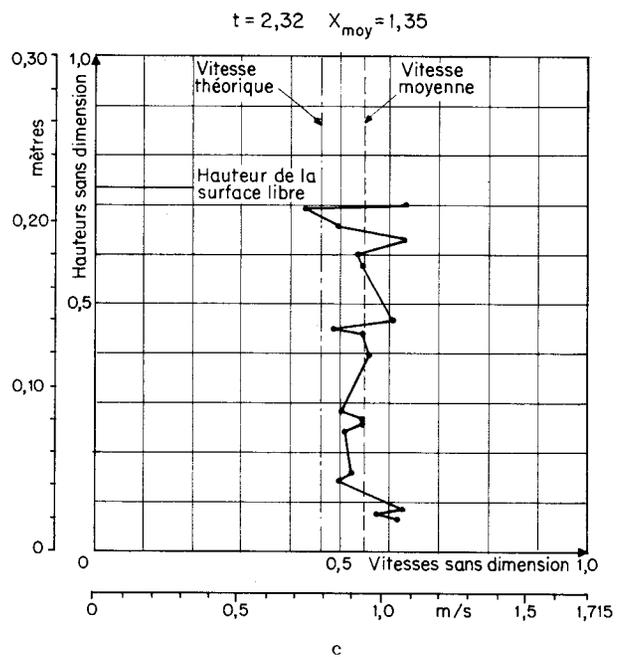
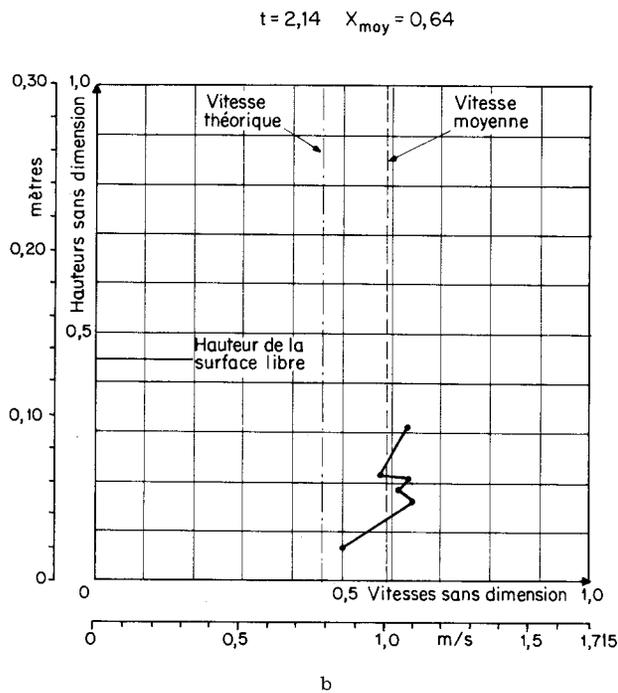
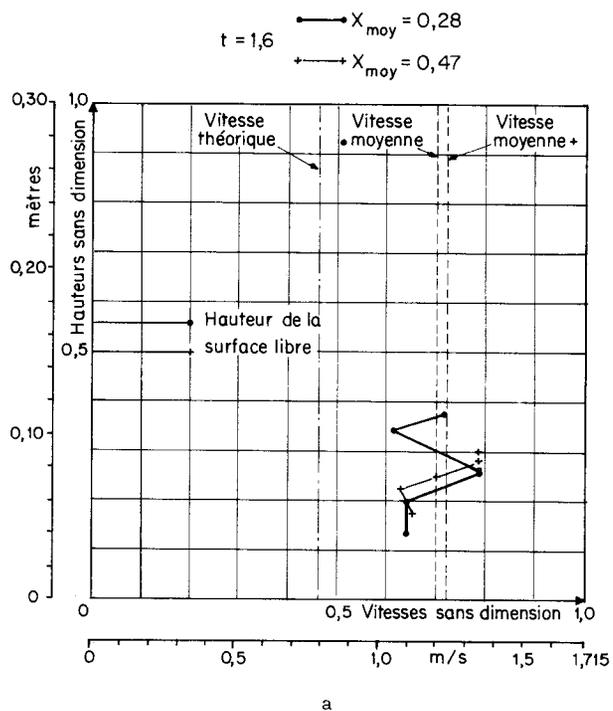
Paroi en verre trempé - Fond lisse

y_1	0,02	0,02	0,044	0,06	0,2	0,3	0,3	0,4	0,6
n° expérience	22	24	24'	29	26	27	27'	25	28

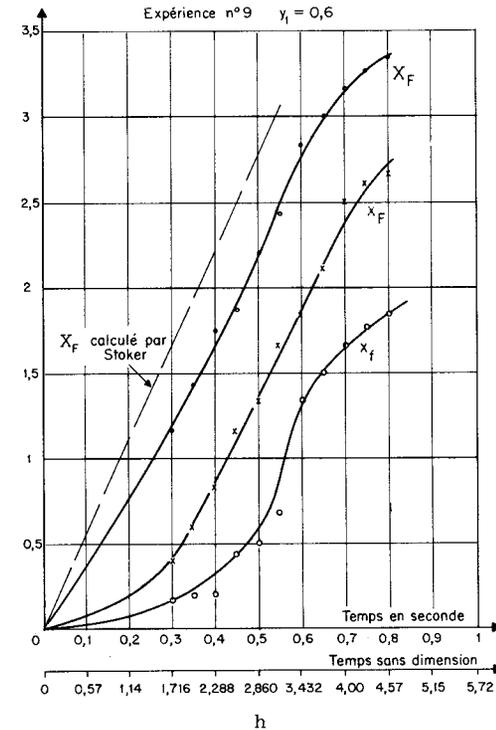
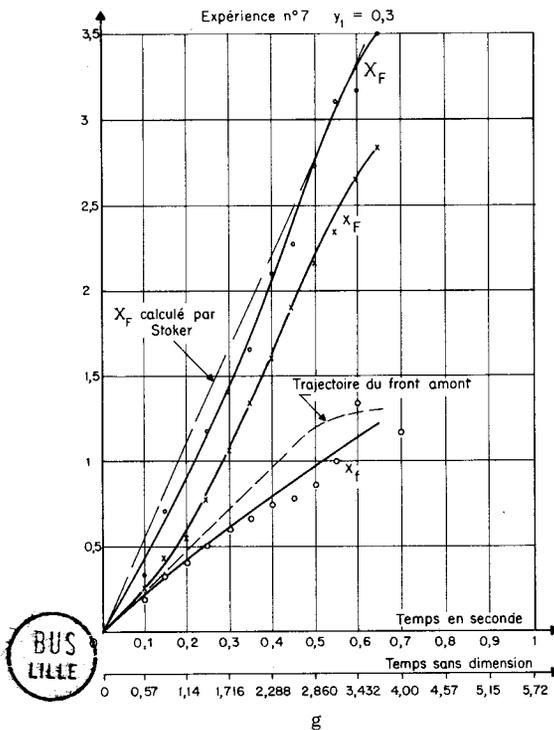
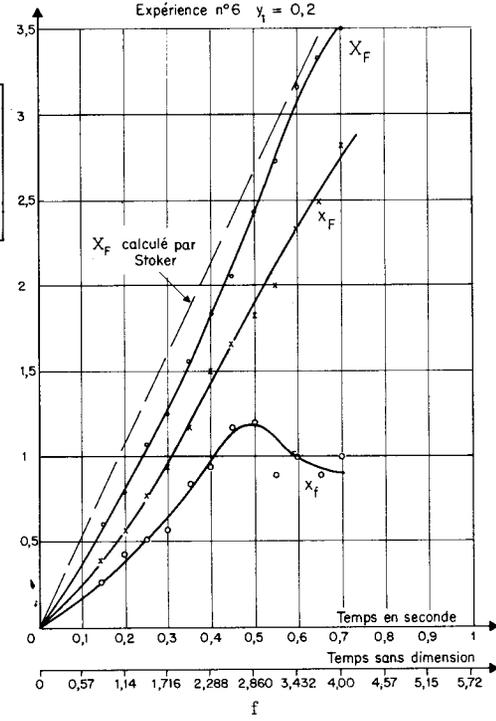
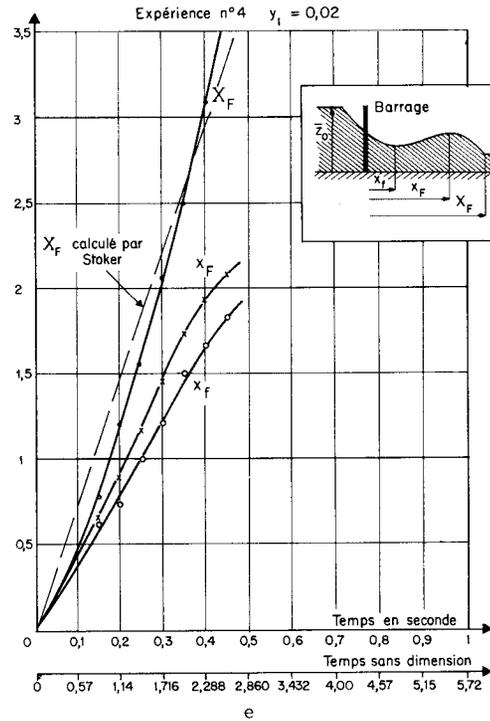
5.32 - Résultats expérimentaux

Sur les planches 13 et 14 sont reportées, pour une particule d'abscisse x_p à la cote z_p , les valeurs du module V_p de la vitesse et de la composante horizontale u_p pour la valeur $y_1 = 0,3$. De ces résultats, groupés par date, nous déduisons la valeur de la vitesse moyenne u_{moy} de la tranche d'abscisse x_{moy} (figures 5.3-a à 5.3-d). Cette vitesse moyenne décroît en fonction du temps : elle est d'abord supérieure à la vitesse constante calculée par Stoker ($u_2 = 0,46$), puis devient du même ordre de grandeur pour nos dernières mesures ($t = 2,5$). La figure 4.3-a donne un exemple de l'allure des trajectoires à $t = 0,90$: elles sont concaves vers le haut : l'écoulement n'est pas par tranches. Pour les autres expériences, où l'eau aval et l'eau amont sont différentes par leur coloration, nous avons relevé en fonction du temps, à y_1 donné, les grandeurs x_p , X_p , L , z_p , z_f , et z_r .

Les planches 15 et 16 et les figures 5.3-e à 5.3-h sont relatives à X_p , x_p et x_f , dont les variations sont croissantes avec le temps. Elles confirment la stabilité du front

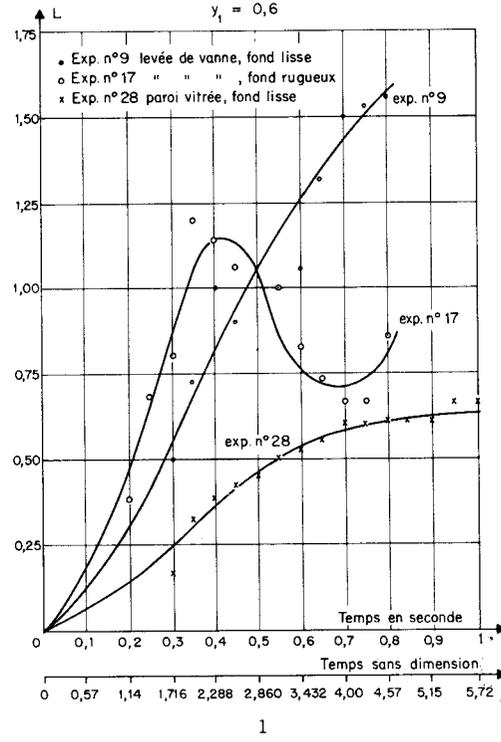
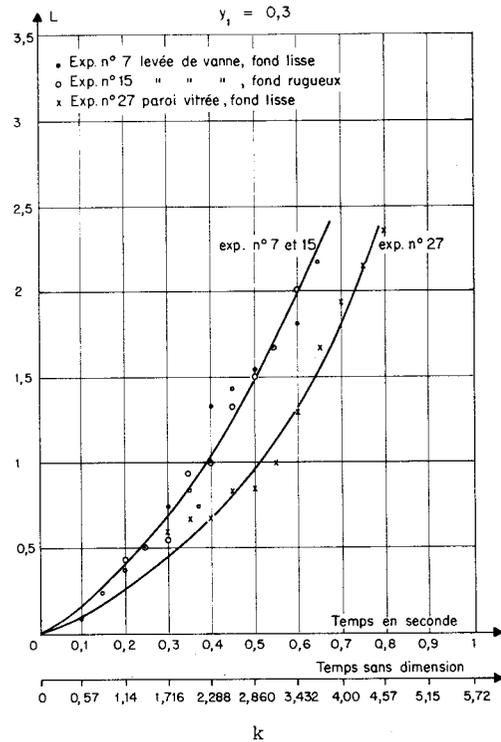
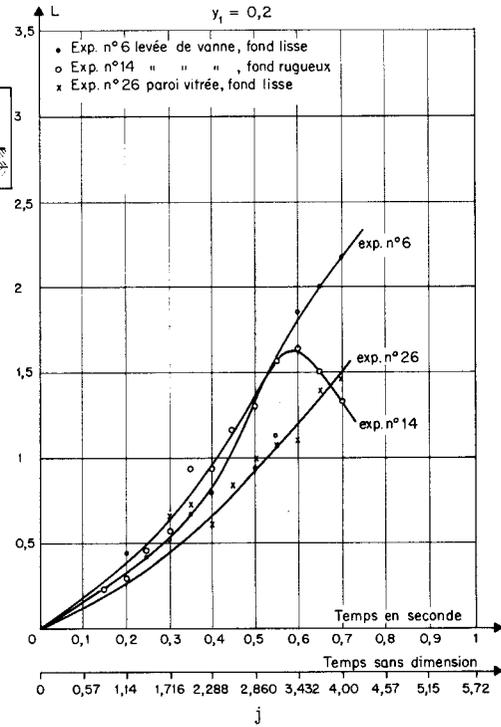
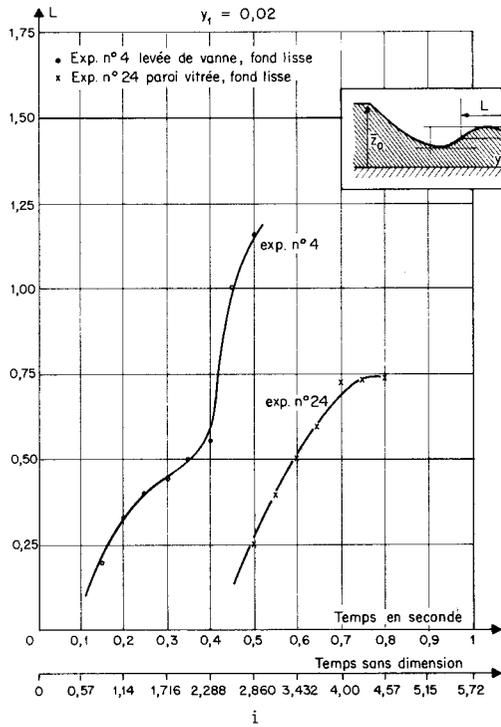


Figures 5.3-a-b-c-d - Surélévation frontale. - Répartition des vitesses horizontales. Canal $B - \bar{z}_0 = 0,30$ m - $\bar{z}_1 = 0,09$ m.

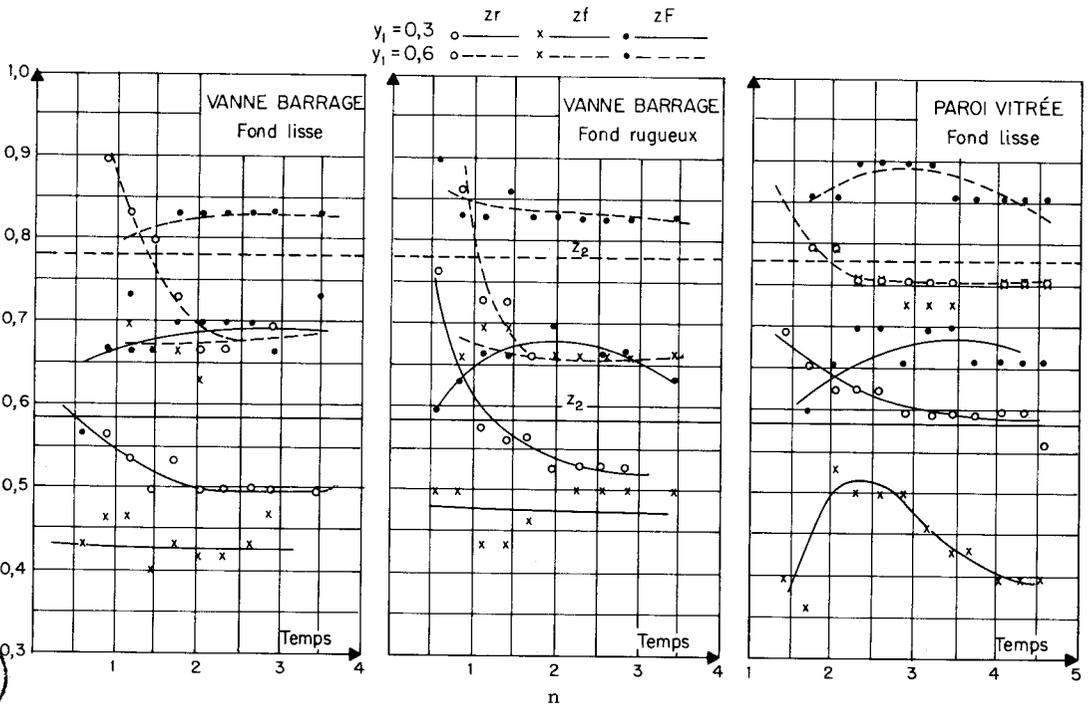
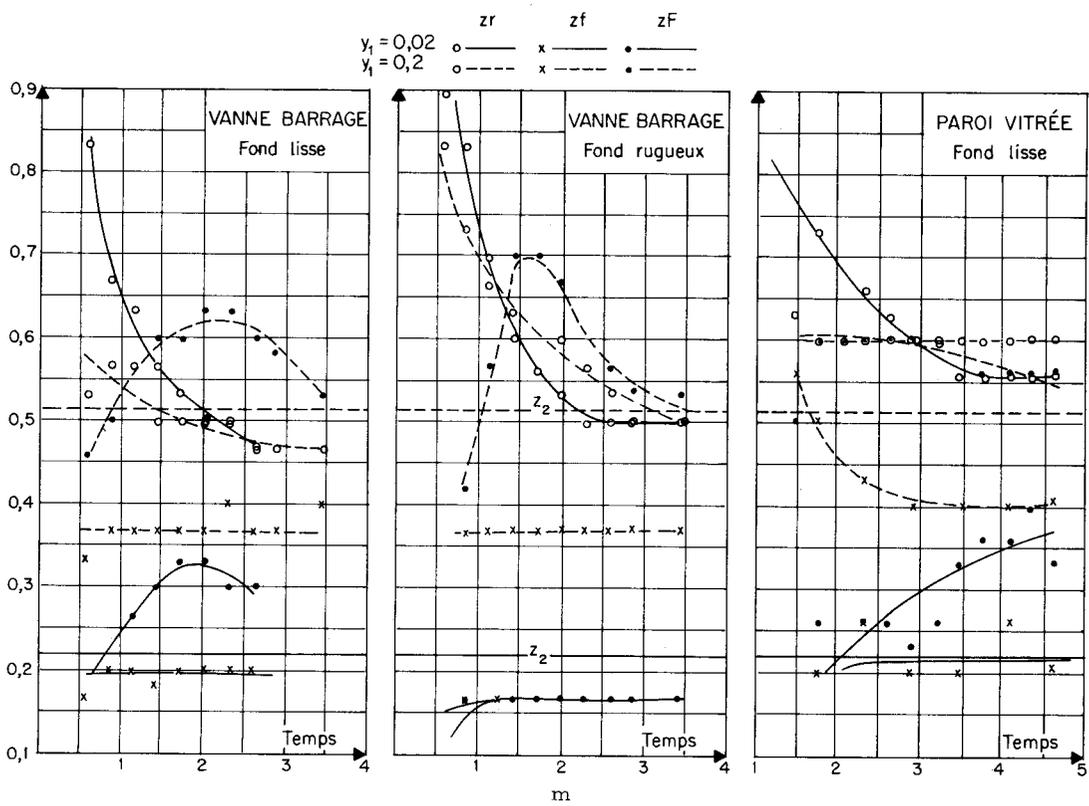


Figures 5.3-e-f-g-h - Évolution de la surélévation frontale. Variation de X_F , X_p , x_p et x_f en fonction du temps.





Figures 5. 3-i-j-k-l - Evolution de la surélévation frontale. Variation de L en fonction du temps.



Figures 5.3-m-n - Évolution de la surélévation frontale.

aval de la surélévation (courbes X_p et x_p voisines), alors que le front amont devient de plus en plus oblique.

Sur les planches 17 à 20 et sur les figures 5.3-i à 5.3-l, nous avons étudié l'influence de la rugosité et du mode de rupture sur la longueur L de la surélévation. La rugosité semble avoir une influence très faible ; mais la rupture par bris de verre donne une longueur plus petite que celle obtenue par nos essais avec levée verticale de vanne.

L'influence des deux mêmes paramètres sur les hauteurs d'eau est faite sur les planches 21 à 24 et sur les figures 5.3-m et 5.3-n. La rugosité semble être ici également un facteur négligeable, alors que la rupture par bris de verre donnerait des résultats un peu plus grands que ceux obtenus par levée verticale. On constate, de façon générale, que la hauteur z_2 calculée par Stoker est comprise entre z_f et z_p et que la hauteur z_r au droit du barrage reste plus grande que z_f ; elle tend vers z_f pour des valeurs élevées de y_1 ($y_1 \geq 0,6$). L'allure de la variation de z_p semble être peu influencée par la valeur de y_1 : z_p , d'abord inférieur à z_2 , atteint cette valeur à une date voisine de la durée de rupture ($t \cong 1$), passe par un maximum à $t \cong 2$, puis tend vers z_2 pour $t > 5$.

Le paramètre y_1 joue au contraire un rôle essentiel dans la formation et l'évolution de la surélévation (voir annexe II).

Pour les petites valeurs de y_1 ($y_1 < 0,2$), la surélévation est un phénomène peu important (figure 5.3-o) : l'eau amont jaillit par-dessus l'eau aval, provoquant le déferlement immédiat de l'onde.

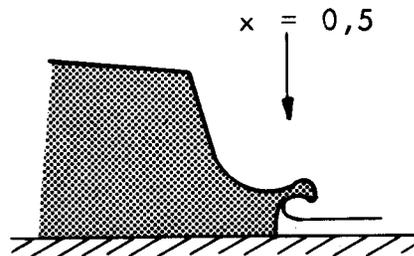


Figure 5.3-o - Profil expérimental à $t = 0,57$ (exp. 5 - $y_1 = 0,05$)

Pour les valeurs y_1 voisines de 0,3, l'amplitude de la surélévation est maximale (figure 5.3-p). Immédiatement après la rupture, à la surface de séparation des masses

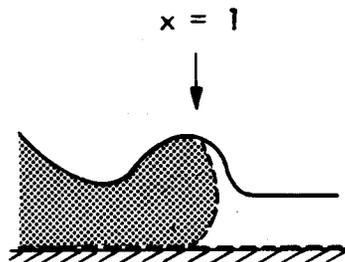


Figure 5.3-p - Profil expérimental à $t = 1,60$ (exp. 15 - $y_1 = 0,3$)

d'eau amont et aval, les particules sont poussées vers le haut. La hauteur se stabilise à une valeur importante : la surface de séparation reste verticale et la surélévation s'étend de plus en plus de part et d'autre. Le déferlement ne se produit plus immédiatement et tend à disparaître quand y_1 croît.

Pour les grandes valeurs de y_1 ($y_1 \geq 0,6$), au contraire, l'onde est essentiellement constituée par l'eau aval (figure 5.3-q).

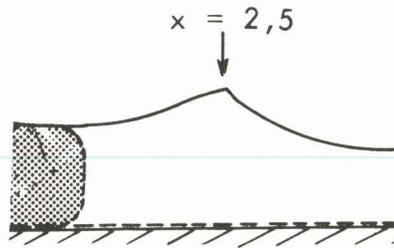
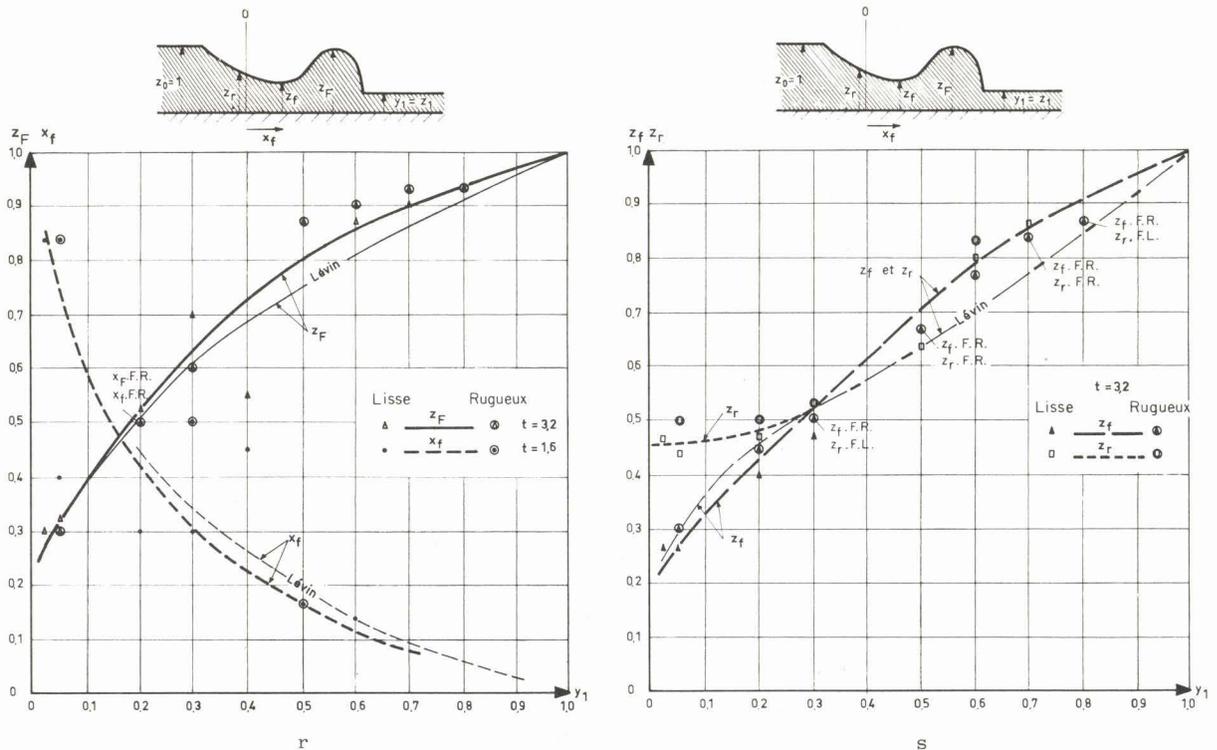


Figure 5.3-q - Profil expérimental à $t = 3,37$ (exp. - 17 - $y_1 = 0,6$)

La surélévation frontale apparaît donc comme un phénomène local dans le temps et dans l'espace : elle disparaît pratiquement au bout du temps $t = 9$ correspondant approximativement à une distance de $9 \bar{z}_0$, en aval du barrage.

5.33 - Comparaison avec les résultats de Lévin

Pour comparer nos résultats avec ceux de Lévin, nous avons pris comme lui, pour le paramètre t , les valeurs $t = 3,2$ pour z_p , z_f et z_r et $t = 1,6$ pour x_f , bien que ces valeurs semblent arbitraires et ne correspondent pas à la date où la surélévation est maximale dans nos expériences. Nous enregistrons cependant (pl. 25 et figures 5.3-r et 5.3-s) des hauteurs d'eau z_p plus grandes que celles trouvées par Lévin.



Figures 5.3-r et s - Vanne à effacement vertical. Comparaison avec Lévin

Nous avons aussi reporté sur les figures 5.3-t à 5.3-v les variations de la hauteur maximale $z_{F_{\max i}}$, de la surélévation et celles correspondantes de z_f et z_r (pl. 26). Comme il est dit plus haut, nous constatons l'existence d'un maximum pour la dénivellation amont ($z_{F_{\max i}} - z_f$), au voisinage de $y_1 = 0,3$ (figure 5.3-t).

5.34 - Comparaison avec les calculs de Stoker

Nous savons que, dans ces calculs, la suppression brusque d'un barrage avec eau à l'aval est représentée par un mascaret qui se propage vers l'aval à la vitesse V_{21} , et qui est suivi d'un domaine D_2 , de hauteur z_2 et vitesse u_2 uniformes, se raccordant, à l'amont, à l'écoulement graduellement varié calculé par Ritter. Les seules données \bar{z}_0 et y_1 déterminent entièrement ce schéma (§ 1.4.2). En fait, ces calculs sont en désaccord avec nos expériences pour des temps réduits inférieurs à neuf.

Comme nous venons de le voir en effet, nos expériences montrent qu'au lieu du domaine D_2 de hauteur constante z_2 , il existe un domaine de hauteur variable comprise entre z_f et z_r tels que :

$$z_f \leq z_2 \leq z_r.$$

En fait, z_2 , voisin de z_f pour y_1 petit ($y_1 \cong 0,02$), se rapproche de z_r à mesure que y_1 augmente (figures 5.3-m et 5.3-n).

Par ailleurs, la valeur mesurée V_f de la vitesse du front aval pour les quatre valeurs de y_1 considérées est différente de V_{21} (figures 5.3-e à 5.3-h) : initialement plus petite, V_f atteint V_{21} à une date fonction essentiellement de y_1 , continue à croître avec le temps, puis diminue pour $t > 3,4$, date à laquelle commence à se faire sentir le volume fini de la retenue amont. La vitesse de Stoker est cependant très voisine des vitesses mesurées, et constitue une bonne approximation de la vitesse du front aval.

Pour les essais effectués avec un rapport $y_1 = 0,3$, ces résultats sont complétés par ceux obtenus en visualisant l'écoulement (pl. 13 et 14) : les vitesses moyennes sont plus grandes que la valeur constante calculée par Stoker (pl. 27).

Essayons alors de préciser l'évolution de la surélévation en comparant les valeurs calculées par Stoker et celles mesurées par nous.

5.4. - ÉTUDE DE LA SURÉLÉVATION EN TANT QUE MASCARET

Des courbes $X_f(t)$, nous déduisons la vitesse expérimentale V_f du front aval par la pente de la tangente ($V_f = \frac{dX_f}{dt}$) avec une incertitude de 0,15 m/s (figures 5.3-e à 5.3-h) et nous comparons cette valeur V_f à la vitesse V calculée comme étant celle d'un mascaret qui se propagerait sur la retenue initiale aval ($z = z_1$, $u = u_1 = 0$), et dont la hauteur serait z_f ou z_r (pl. 28 et 29 et figures 5.4-a et 5.4-b). Nous constatons (figure 5.4-b) que nous devons attribuer la hauteur z_f à ce mascaret.

Nous avons essayé de faire un raisonnement semblable pour le front amont de la surélévation que nous avons pris, par convention, comme étant le point de la surface libre amont situé à l'altitude $(z_f + z_r)/2$. Nous n'avons pas enregistré directement sa trajectoire, mais nous en obtenons une bonne approximation en supposant qu'il se trouve à la distance L en amont du front aval d'abscisse X_f .

Nous avons fait ce raisonnement dans le cas où nous avons une idée de la répartition des vitesses, c'est-à-dire pour $y_1 = 0,3$. Dans ce cas, on peut déduire de nos expériences que la vitesse absolue du front amont est constante et voisine de 0,44 (figure 5.3-g). Comme la vitesse du fluide est comprise entre 0,60 et 0,70 (pl. 27), on arriverait à un mascaret de vitesse relative rapportée à $\sqrt{gz_0}$ voisine de 0,2. Il faudrait donc

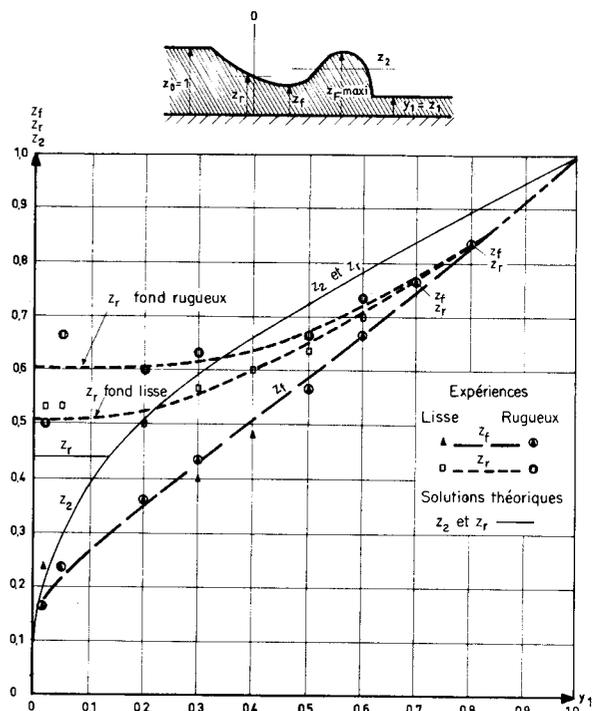
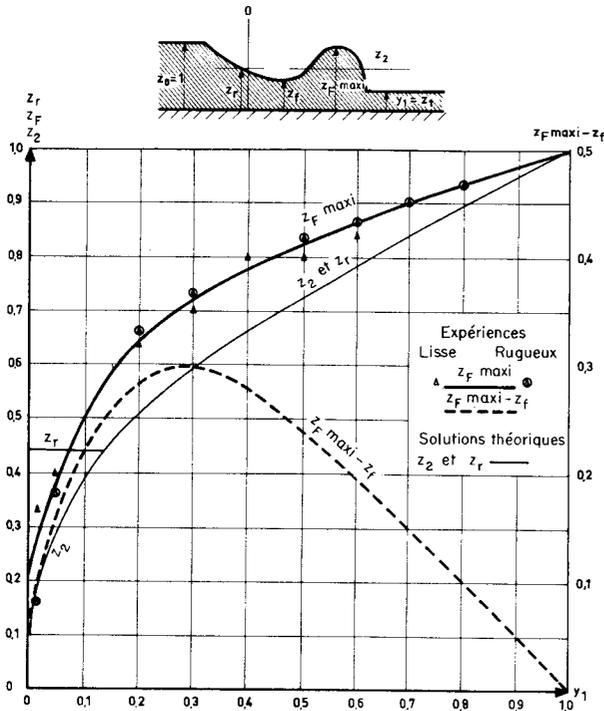
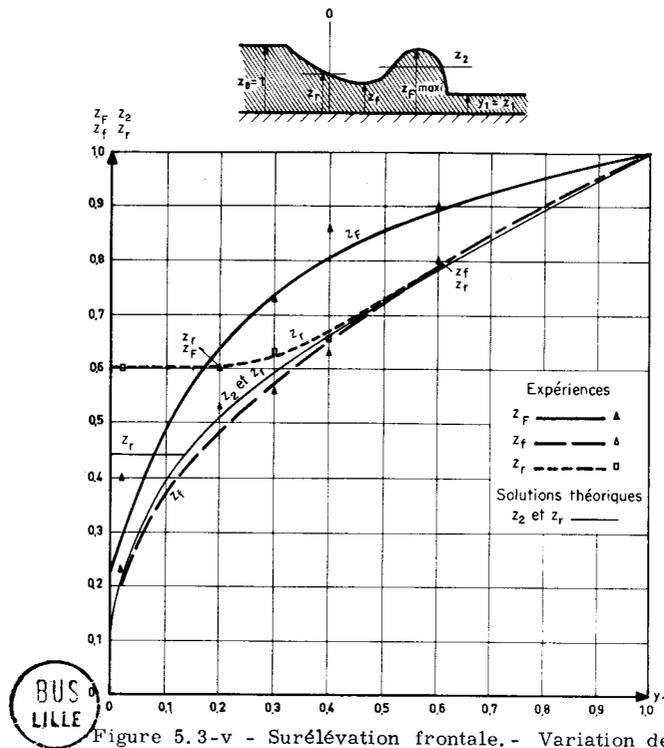
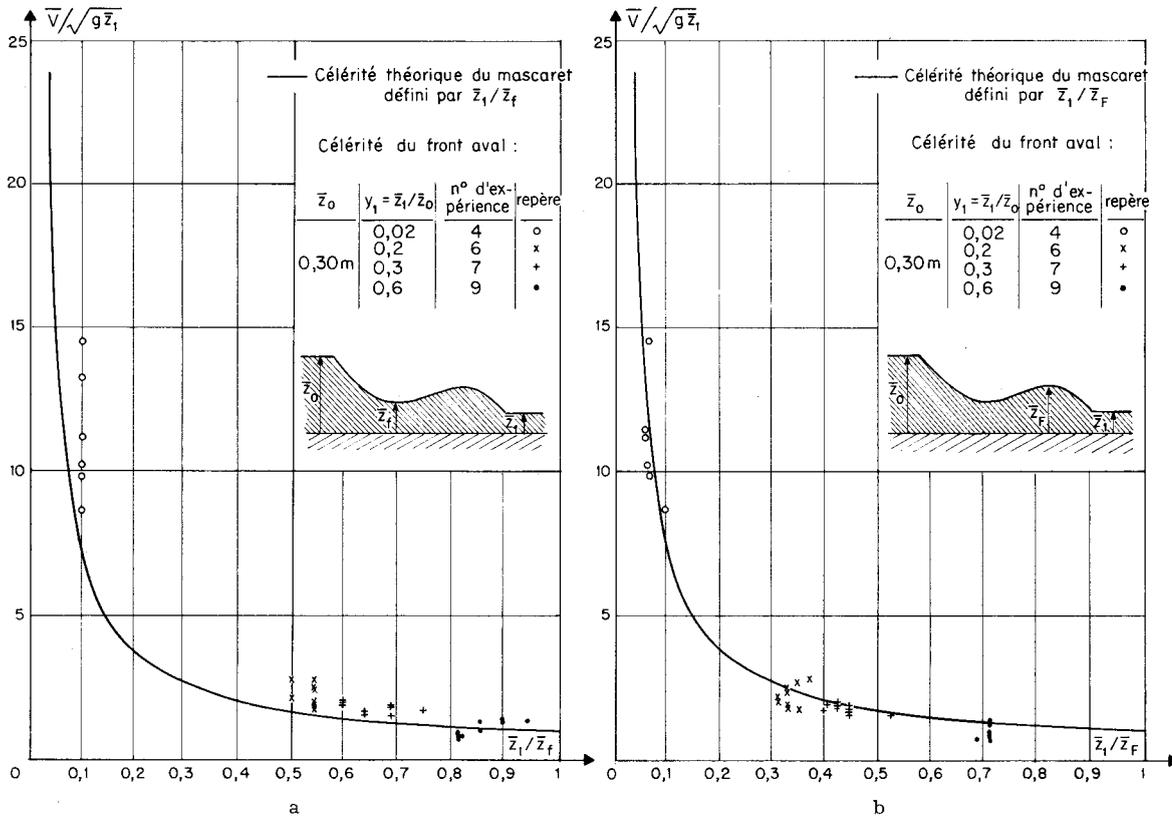


Figure 5.3-t - Surélévation frontale.- Variation de $z_F \text{ max}_i$ et $z_F \text{ max}_i - z_f$ - Canal B. Vanne à effacement vertical

Figure 5.3-u - Surélévation frontale.- Variation de z_r et z_f correspondant à $z_F \text{ max}_i$ - Canal B. Vanne à effacement vertical





Figures 5.4-a et b - Surélévation frontale. Etude de la célérité du front aval

avoir pour satisfaire à $\bar{V} > \sqrt{g\bar{z}_f}$ une hauteur z_f telle que $z_f < 0,04$, condition qui n'est pas réalisée, étant donné que nous avons enregistré des hauteurs z_f supérieures à 0,40 (pl. 23).

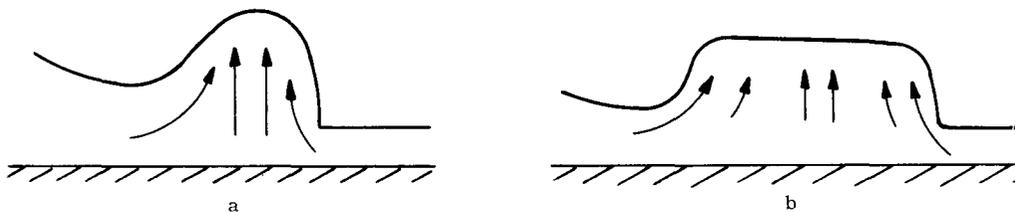
Seul, le front aval de la surélévation peut donc être considéré comme un mascaret dont la célérité est imposée par la hauteur maximale z_f .

5.5. - FORMATION ET ÉVOLUTION DE LA SURÉLÉVATION

La surélévation étant un phénomène local qui disparaît pratiquement au bout d'un temps voisin de 9, nous avons recherché son origine dans le choc qui se produit entre les deux masses d'eau amont et aval à l'instant de la suppression du barrage. Ce choc a lieu sur toute la hauteur de la surface de séparation des deux eaux : nous avons en effet remarqué, lors de nos expériences de visualisation, que toutes les particules d'une tranche de la retenue amont sont mises en vitesse. Les particules fluides sont soulevées dans la zone frontale et une partie de leur énergie cinétique se retrouve sous forme d'énergie potentielle.

Quand y_1 est petit ($y_1 < 0,10$), l'eau amont passe par-dessus l'eau aval, puis déferle : z_f est plus grand que z_2 et V_f est plus petit que V_{21} . Le débit réel $V_f(z_f - z_1)$ est du même ordre de grandeur que celui calculé $V_{21}(z_2 - z_1)$: l'onde aval est de forme rectangulaire et le schéma de Stoker donne des résultats satisfaisants.

Pour des valeurs moyennes de y_1 , la hauteur le long de laquelle se produit le choc est plus grande, mais la différence des charges z_0 et z_1 diminue à mesure que y_1 croît : le choc passe par un maximum que nous trouvons expérimentalement pour $y_1 = 0,3$ (figure 5.3-t). Le soulèvement des particules amont et aval se fait de manière égale et la surface de séparation reste verticale, comme le montrent nos expériences : en effet, dans un trièdre lié à l'onde, le champ des vitesses a d'abord l'allure indiquée par la figure 5.5-a - existence de vitesses verticales - puis celle de la figure 5.5-b. La surélévation augmente d'abord d'amplitude, puis se stabilise rapidement ; la hauteur z_F devient constante. La vitesse du front aval, qui varie dans le même sens que le rapport z_F/z_1 , est donc en bon accord avec nos expériences.



Figures 5.5-a et b - Allure du champ des trajectoires pour y_1 moyen

Comme nous avons $z_F > z_2$ et $V_F > V_{21}$, le débit réel $V_F(z_F - z_1)$ est ici supérieur au débit de Stoker $V_{21}(z_2 - z_1)$: il en résulte qu'à l'amont de la surélévation il se produit un abaissement de niveau $z_F < z_2$. La vitesse moyenne de l'écoulement est supérieure à la vitesse calculée.

Pour les grandes valeurs de y_1 , le choc est relativement faible et la surface de séparation des deux eaux est grande. Pratiquement, les vitesses sont les plus importantes pour les particules les plus basses : l'eau amont pénètre dans l'eau aval et en soulève une partie. La hauteur z_F est toujours supérieure à z_2 , et l'onde ainsi formée se propage à la vitesse V_F plus grande que V_{21} , puis s'étale rapidement.

Cette interprétation est conforme à nos résultats expérimentaux, tant du point de vue des hauteurs que de celui des vitesses et des célérités. En annexe II, nous donnons quelques photographies tirées de notre film : elles montrent l'évolution de la surélévation en fonction de la valeur y_1 . Quant à l'explication de ce phénomène local, nous n'avons pu en trouver de satisfaisante. Nous pouvons dire cependant que la surélévation frontale n'est pas une ondulation secondaire de Favre, En effet :

- ces ondulations n'apparaissent qu'au bout d'un temps relativement long, alors que la surélévation est un phénomène passager d'une durée inférieure à 9 et immédiatement consécutif à la suppression du barrage ;

- le ressaut ondulé n'existe que pour un nombre de Froude de l'écoulement aval inférieur à 1,72 ; il correspond, dans la solution de Stoker, à des valeurs de y_1 supérieures à 0,3, alors que, dans nos expériences, la surélévation existe déjà pour des valeurs inférieures : elle passe même, au contraire, par un maximum pour $y_1 = 0,3$ (figure 5.3-t) ;

- les amplitudes de la surélévation maximale de l'ondulation qui se produit dans un mascaret déterminé par le rapport z_2/z_1 (expériences de Favre [8], calculs de Lemoine [15]) sont toujours supérieures aux amplitudes $z_F - z_2$ enregistrées par nous ;

- les ondulations de Favre déferlent pour des valeurs de z_2/z_1 plus grandes que 1,28 et correspondant à $y_1 < 0,63$, alors que nos expériences montrent un déferlement pour y_1 voisin de 0,4.

Un raisonnement analogue à celui de Lemoine nous conduit cependant à un calcul approché de la hauteur z_F de la surélévation.

5.6. - CALCUL APPROCHÉ DE LA ZONE INONDABLE

On suppose que l'énergie perdue dans le choc et correspondant à la perte de charge

$$\Delta H = \frac{(z_2 - z_1)^3}{4z_1 z_2} \quad (5.6.a)$$

se retrouve sous forme d'énergie potentielle. On peut ainsi donner une valeur approchée de la hauteur de la surélévation à partir des calculs de Stoker, qui suppose que l'onde se comporte comme un mascaret de hauteur z_2 se propageant sur la hauteur d'eau initiale z_1 (pl. 30 et figure 5.6-a). On a dans ces conditions :

$$z_F = z_2 + \Delta H$$

En fait, la hauteur z_F de la surélévation est variable avec le temps (figures 5.3-m et 5.3-n). Nous avons reporté, sur la figure 5.6-a, la valeur moyenne de z_F . L'écart de 25 % que nous pouvons avoir entre les hauteurs z_F mesurée et z_2 calculée par Stoker, se trouve ainsi ramené à 10 %.

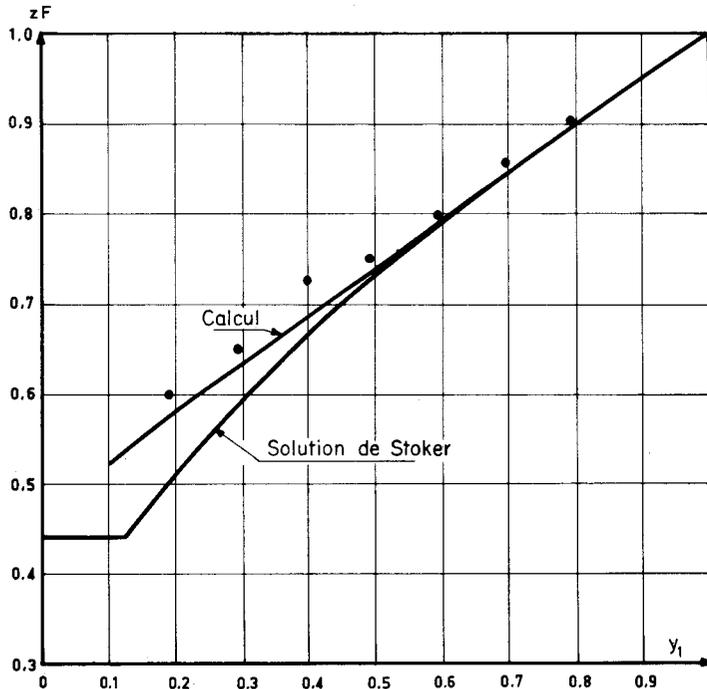


Figure 5.6-a - Hauteur de la zone inondable - Canal B - Vanne à effacement vertical

5.7. - CONCLUSION

Dans ce dernier chapitre, nous avons fait une étude expérimentale de la surélévation frontale constatée aux tout premiers instants de la rupture, pour des valeurs moyennes du rapport des hauteurs d'eau initiales à l'amont et à l'aval. Nous avons vu que ce phénomène local était d'une grande importance pratique pour les sections se trouvant à une distance du barrage inférieure à neuf fois la hauteur initiale de la retenue amont, car il donne une zone inondable de 25 % plus haute que celle calculée par Stoker.

Nous n'avons pu trouver aucune explication satisfaisante. Nous avons montré cependant que ce phénomène n'était pas lié directement aux ondulations secondaires de Favre, et nous avons donné une valeur approchée à 10 % par défaut de la hauteur de la zone inondable.

Conclusion générale

Dans le problème de la suppression d'un barrage, on sait qu'aux premiers instants de l'écoulement, des désaccords ont apparu entre l'expérience et les calculs classiques. Nous nous sommes proposé ici d'expliquer quelques-uns de ces désaccords.

Nos expériences sont faites dans deux canaux horizontaux et de section rectangulaire constante. Dans le petit canal, l'évolution du phénomène est enregistrée par caméra, avec différentes vitesses de prises de vues. Dans le grand canal, la variation de l'altitude de la surface libre en une section déterminée est donnée par des capteurs à impédance. Chaque capteur est composé d'un archet isolant qui supporte deux fils fins de platine de 600 mm de long environ ; ces fils sont tendus à leur extrémité supérieure par un élastique dont la tension est réglable.

Nous avons d'abord cherché à expliquer, lors de ruptures avec aval à sec, le désaccord constaté sur la vitesse initiale du front aval, et sur le sens de la concavité de la surface libre. Le calcul de Ritter qui suppose la rupture instantanée et l'écoulement par tranches, conduit en effet à une vitesse réduite du front aval de 2 et à un profil de la surface libre parabolique et concave vers le haut. Or, les expériences de Dressler et de Cavallé donnent une vitesse plus petite et un profil concave vers le bas, à l'amont.

Nous avons étudié l'influence d'une durée de rupture : un calcul effectué dans le cadre des écoulements par tranches et basé sur la méthode des caractéristiques nous a donné des résultats en meilleur accord avec l'expérience que ceux obtenus par Ritter.

Mais la rupture sur fond aval à sec n'étant manifestement pas un écoulement par tranches, surtout pour les faibles valeurs du temps, nous avons analysé les calculs de Pohle qui supposent la rupture instantanée et l'écoulement plan. Les valeurs numériques que nous avons déduites par calcul sur machine nous ont donné des profils de la surface libre en bon accord avec ceux des expériences précédentes. Cependant, la loi de variation du débit, dans la section du barrage, nous a montré que cette solution n'était déjà plus valable pour des temps réduits supérieurs à 0,7, date limite due vraisemblablement au fait que les développements de Pohle sont arrêtés aux termes en t^2 .

L'hypothèse de l'écoulement par tranches avec durée de rupture et celle de l'écoulement plan avec suppression instantanée conduisent donc toutes les deux à une concavité de la surface libre en bon accord avec l'expérience. Mais il est probable qu'en réalité, ces deux facteurs interviennent simultanément.

Nous avons voulu de plus vérifier la répartition des deux composantes de la vitesse en effectuant des essais de visualisation avec des particules liquides éclairées en lumière ultra-violette. Nous avons obtenu des composantes verticales qui sont plus petites que celles calculées dès que le temps dépasse 0,5, mais l'allure de la variation en fonction de la cote reste la même.

La solution de Pohle est donc, pour de faibles valeurs du temps, en bon accord avec l'expérience sur plusieurs points, dont principalement le sens de la courbure de la surface libre, la répartition des vitesses et la loi de débit dans la section du barrage.

Nous nous sommes également intéressé au profil de la surface libre au voisinage du front aval, lors de la suppression d'un barrage avec eau à l'aval. On connaît en effet la solution de Stoker qui suppose la surface libre constituée par un arc de parabole se raccordant à un profil horizontal limité à l'aval par une onde de choc. Aux premiers instants de l'écoulement, il existe cependant, par rapport à ces calculs, une surélévation de niveau ne disparaissant qu'au-delà d'une distance supérieure à neuf fois la hauteur initiale de la retenue amont.

Nous avons continué ici nos essais de visualisation et nous avons fait de nombreuses expériences pour étudier l'influence, sur la forme de cette surélévation, de certains paramètres, comme le mode de la rupture, la rugosité, et le rapport y_1 des profondeurs d'eau initiales à l'amont et à l'aval. Nous montrons que la vitesse de propagation du front aval est celle d'un mascaret de hauteur égale à la hauteur maximale de la surélévation, et nous proposons un calcul qui permet d'obtenir la hauteur moyenne de la surélévation. Sans qu'il y ait justification par le calcul, nous donnons des courbes expérimentales montrant le maximum de surélévation en fonction de y_1 ; ce maximum a sa plus grande valeur pour y_1 voisin de 0,3.

Au sujet de ce qui se passe peu après la suppression d'un barrage, nous avons donc essayé dans l'ensemble de tirer le maximum des théories où l'on néglige le frottement, et nous avons obtenu ainsi quelques résultats.

Il est évidemment certain que le frottement n'est pas négligeable et qu'on peut obtenir une description plus exacte en en tenant compte. Mais il est à penser aussi qu'on serait éclairé dans ce travail si l'on poursuivait des essais de visualisation, comme nous les avons ébauchés, pour mieux connaître la distribution des composantes de la vitesse.

Références bibliographiques

- [1] BAZIN (H.), DARCY (H.) - Recherches hydrauliques - *Dunod*, Paris, 1865
- [2] BARRÉ DE SAINT-VENANT (A.J.C.) - Théorie du mouvement non permanent des eaux avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leurs lits - *C.R. de l'Académie des Sciences*, 1871, t. 73 p. 147 à 154 et 237 à 240
- [3] BOUSSINESQ (J.) - Essais sur la théorie des eaux courantes. *Mémoires de l'Académie des Sciences*, 1877, t. 23 et 24, 680 pages
- [4] RITTER (A.) - Die Forpflanzung der Wasserwellen - *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, 1892, vol. 46., 9 p. 14 fig.
- [5] SCHOKLITSCH (A.) - Über Damnbruchwellen - *Sitzungsberichte der K. Akademie der Wissenschaften*, 1917, vol. 126 p. 1489 à 1514 - 14 fig.
- [6] DEYMIÉ (Ph.) - Propagation d'une intumescence allongée. *Revue générale de l'Hydraulique*, mai-juin 1935, 7 p. 2 fig.
- [7] EGUIASAROFF (I.B.) - Regulation of the water level in the reaches of canalized rivers - *16ème Congrès International de Navigation*, Bruxelles, 1935
- [8] FAVRE (H.) - Etude théorique et expérimentale des ondes de translation dans les canaux découverts - *Dunod*, Paris, 1935
- [9] MASSÉ (P.) - L'amortissement des intumescences - *Revue Générale de l'Hydraulique*, novembre-décembre 1935, 8 p.
- [10] BERGERON (L.) - Méthode graphique générale du calcul des propagations d'ondes planes. *Mémoire de la Société des Ingénieurs Civils de France*, juillet-août 1937, 93 p. 43 fig.
- [11] EGUIASAROFF (I.B.) - Mouvement des ondes non permanentes dans les grandes nappes d'eau - *Transactions of the Scientific Research*, Institute of Hydrotechnics, Leningrad 1937, Vol. 21, 128 p.
- [12] HENRY (M.) - Note sur la propagation des intumescences dans un canal - *Société Hydrotechnique de France*, 5 novembre 1937.
- [13] CRAYA (A.) - Calcul des régimes variables dans les canaux - *La Houille Blanche*, novembre 1945, n° 1
- [14] RÉ (R.) - Etude du lâcher instantané d'une retenue d'eau dans un canal par la méthode graphique, *La Houille Blanche*, mai 1946, n° 3, p. 181 à 187
- [15] LEMOINE (R.) - Sur les ondes positives de translation dans les canaux et sur le ressaut ondulé de faible amplitude, *La Houille blanche*, 1948, n° 2

- [16] STOKER (J. J.) - The formation of breakers and bores : the theory of non linear wave propagation in shallow water and open channels - *Communications on Pure and Applied Mathematics*, janvier 1948, p. 1 à 87
- [17] POHLE (F. V.) - Thesis - Mathematic Department, New York University, 1950
- [18] POHLE (F. V.) - Abstract of above. Symposium of Gravity Waves. *Nat. Bur. of Stand.*, Circular 521, 1952 - p. 17 à 53
- [19] DRESSLER (R. F.) - Hydraulic resistance effect upon the dam-break functions - *Journal of Research*, National Bureau of Standards, septembre 1952, vol. 49, n° 3
- [20] LÉVIN (L.) - Mouvement non permanent sur les cours d'eau à la suite de rupture de barrage - *Revue Générale de l'Hydraulique*, novembre-décembre 1952, n° 72, p. 297 à 315
- [21] DRESSLER (R. F.) - Comparison of theories and experiments for the hydraulic dam-break wave - *International Association of Scientific Hydrology*, vol. 3, 1954, n° 38, p. 319 à 328
- [22] WHITHAM (G. B.) - The effects of hydraulic resistance in the dam-break problem - *Proceeding of the Royal Society*, A, 20 janvier 1955.
- [23] DRESSLER (R. F.) - Unsteady non linear waves in sloping channels. *Proceedings of the Royal Society* 16 septembre 1958, Série A, n° 1249, vol. 247, p. 186 - 198 - 11 fig.
- [24] BRUN (A.), MARTINOT LAGARDE (A.), MATHIEU (J.) - *Mécanique des Fluides*, Dunod, Paris, 1960
- [25] FAURE (J.), NAHAS (N.) - Etude numérique et expérimentale d'intumescences à forte courbure du front - *Société Hydrotechnique de France* - juin 1961, supplément au Vol. 1, p. 16 à 27, 10 fig.
- [26] CAVAILLÉ (Y.) - Contribution à l'étude de l'écoulement variable accompagnant la vidange brusque d'une retenue - *Publ. Sc. et Tech. du Ministère de l'Air*, n° 410, Paris, 1965
- [27] ESCANDE (L.), NOUGARO (J.), CASTEX (L.), BARTHET (H.) - Influence de quelques paramètres sur une onde de crue subite à l'aval d'un barrage - *A.I.R.H., IXème Assemblée Générale, Dubrovnik*, 1961
- [28] ESCANDE (L.), NOUGARO (J.), CASTEX (L.), BACQUIÉ (S.) - Propagation d'une onde de crue subite à la suite de l'effacement d'un barrage - *A.I.R.H., IXème Congrès International, Leningrad*, 1965
- [29] GRAS (R.) - Contribution à l'étude de la suppression d'un barrage. Influence des singularités de section sur l'écoulement - Thèse Lille 1966

Annexes

Annexe I - Résumé du film réalisé pour illustrer les résultats.

Annexe II - Planches.

Annexe III - Répartition expérimentale des vitesses.

Annexe I

Résumé du film réalisé pour illustrer les résultats

Un film 16 mm couleur, d'une durée de quinze minutes environ, a été réalisé à partir des bandes originales prises au cours des essais. Il illustre en le résumant le travail que nous venons de présenter.

Nous suivons le même plan, en insistant plus particulièrement sur l'installation expérimentale et l'appareillage de mesure. Nous assistons à la réalisation d'expériences de rupture dans chacun des deux canaux, et, dans le canal B, à la mise au point du mode de rupture par bris de verre.

Nous montrons l'influence de la durée de la rupture par la projection des deux séquences prises à 1000 images par seconde. Pour la partie relative à la répartition des vitesses, nous avons dû procéder à une réduction du format des films originaux faits en 35 mm. Quant à la partie relative à la surélévation frontale, nous avons fait une sélection des nombreux enregistrements obtenus ; des photographies ont d'ailleurs été tirées de quelques unes des images de ces séquences.

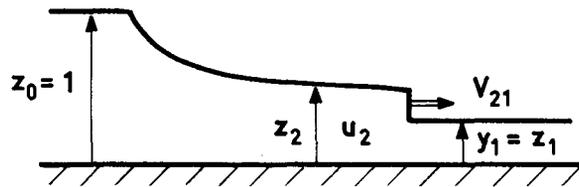
A la fin de chacune de ces trois dernières parties, des schémas résument les principaux résultats.

Un commentaire de ce film a été enregistré sur bande magnétique.

Annexe II

Planches

SOLUTION DE STOKER



$y_1 = \bar{z}_1 / \bar{z}_0$	z_2	u_2	V_{21}
1	1	0	1
0,95	0,975	0,025	0,994
0,90	0,949	0,051	0,988
0,85	0,923	0,078	0,981
0,80	0,897	0,106	0,975
0,75	0,870	0,134	0,970
0,70	0,843	0,164	0,964
0,65	0,815	0,194	0,959
0,60	0,787	0,226	0,953
0,55	0,757	0,260	0,949
0,50	0,727	0,295	0,944
0,45	0,695	0,332	0,941
0,40	0,663	0,372	0,938
0,35	0,628	0,415	0,937
0,30	0,591	0,462	0,937
0,25	0,552	0,515	0,940
0,20	0,508	0,575	0,948
0,15	0,457	0,647	0,962
0,10	0,396	0,741	0,991
0,05	0,310	0,886	1,056

BUS
LILLE

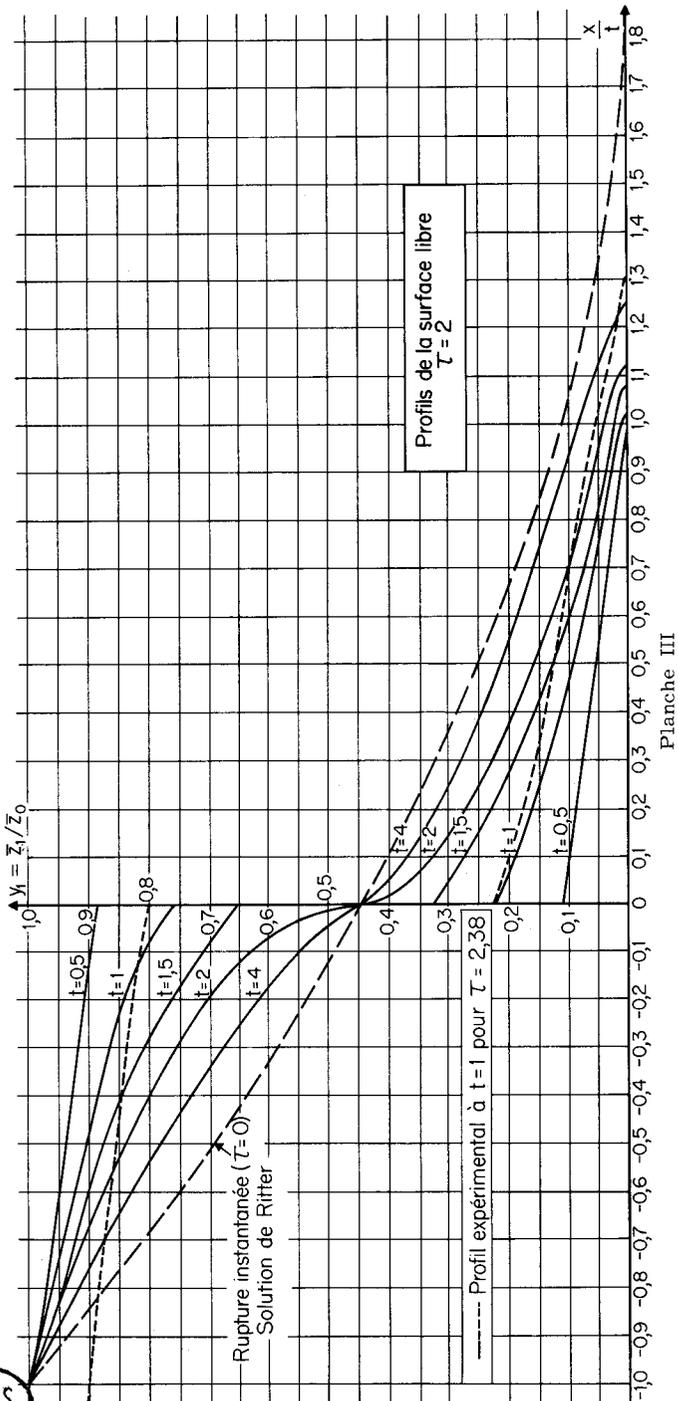


Planche III

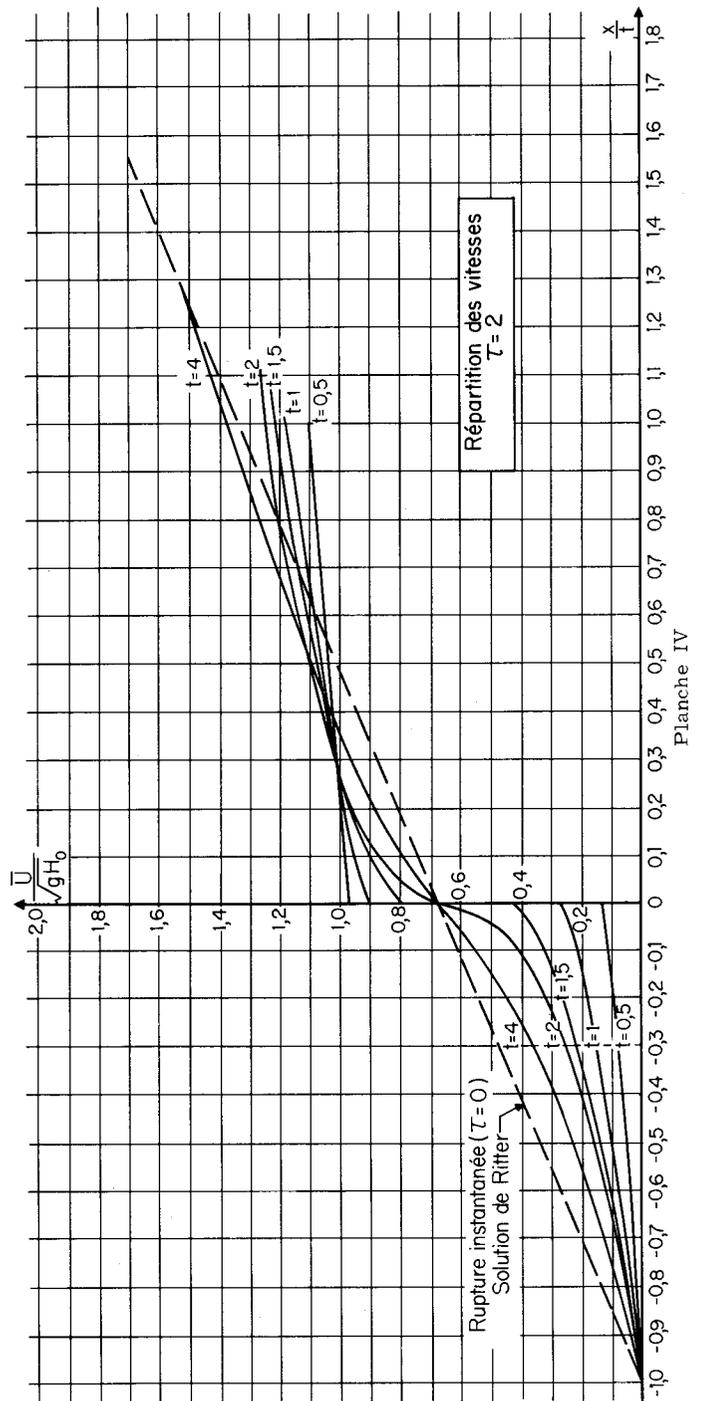


Planche IV

BUS LILLE

INFLUENCE DE LA DUREE DE RUPTURE
PROFILS DE LA SURFACE LIBRE

Canal B - $\bar{z}_0 = 0,20$ m - $\bar{z}_1 = 0 - \tau = 2,38$

Planche V - $t = 0,5$ ($\bar{t} = 0,071$ s)

x/t	Mont																
	-1,4	-1,3	-1,2	-1,1	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0		
$\tau = 2,38$ Exp.	0,975	0,965	0,960	0,955	0,950	0,945	0,940	0,935	0,930	0,925	0,920	0,915	0,91	0,905	0,9		
$\tau = 2$ Théoriques	1	1	1	1	1	0,98	0,97	0,955	0,945	0,935	0,93	0,92	0,91	0,9	0,89		
$\tau = 0$ Théoriques	1	1	1	1	1	0,934	0,87	0,81	0,75	0,694	0,640	0,586	0,536	0,49	0,444		

x/t	Aval																
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4		
$\tau = 2,38$ Exp.	0,150	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,045	0,04	0,025	0,01	0		
$\tau = 2$ Théoriques	0,11	0,10	0,07	0,065	0,06	0,055	0,045	0,04	0,025	0,01	0	0	0	0	0		
$\tau = 0$ Théoriques	0,444	0,40	0,36	0,32	0,283	0,25	0,217	0,187	0,16	0,134	0,111	0,09	0,071	0,054	0,04		

Planche VI - $t = 1$ ($\bar{t} = 0,143$ s)

x/t	Mont																
	-1,4	-1,3	-1,2	-1,1	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0		
$\tau = 2,38$ Exp.	0,96	0,945	0,93	0,915	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,8		
$\tau = 2$ Théoriques	1	1	1	1	1	0,97	0,96	0,94	0,92	0,90	0,875	0,86	0,84	0,81	0,76		
$\tau = 0$ Théoriques	1	1	1	1	1	0,934	0,87	0,81	0,75	0,694	0,640	0,586	0,536	0,49	0,444		

x/t	Aval																
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4		
$\tau = 2,38$ Exp.	0,225	0,2	0,175	0,16	0,15	0,135	0,12	0,10	0,085	0,07	0,065	0,04	0,025	0,01	0		
$\tau = 2$ Théoriques	0,22	0,19	0,16	0,14	0,12	0,09	0,07	0,055	0,045	0,04	0,02	0	0	0	0		
$\tau = 0$ Théoriques	0,444	0,40	0,36	0,32	0,283	0,25	0,217	0,187	0,16	0,134	0,111	0,09	0,071	0,054	0,04		



INFLUENCE DE LA DURÉE DE RUPTURE
PROFILS DE LA SURFACE LIBRE

Canal B - $\bar{z}_0 = 0,20$ m - $\bar{z}_1 = 0$ - $\tau = 2,38$

Planche VII - $t = 1,5$ ($\bar{t} = 0,214$ s)



x/t	Aval														Amont
	-1,4	-1,3	-1,2	-1,1	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	
$\tau = 2,38$ Exp.	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,84	0,815	0,795	0,765	0,73	0,68
\bar{z}/\bar{z}_0 $\tau = 2$ Théoriques	1	1	1	1	1	0,96	0,94	0,92	0,9	0,87	0,84	0,81	0,76	0,71	0,66
$\tau = 0$ Théoriques	1	1	1	1	1	0,934	0,87	0,81	0,75	0,694	0,640	0,586	0,536	0,49	0,444

x/t	Aval														
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
$\tau = 2,38$ Exp.	0,325	0,25	0,21	0,190	0,175	0,160	0,145	0,13	0,115	0,10	0,08	0,06	0,035	0,01	0
\bar{z}/\bar{z}_0 $\tau = 2$ Théoriques	0,33	0,26	0,22	0,19	0,16	0,13	0,10	0,07	0,05	0,03	0,02	0	0	0	0
$\tau = 0$ Théoriques	0,444	0,40	0,36	0,32	0,283	0,25	0,217	0,187	0,16	0,134	0,111	0,09	0,071	0,054	0,04

Planche VIII - $t = 2$ ($\bar{t} = 0,286$ s)

x/t	Aval														Amont
	-1,4	-1,3	-1,2	-1,1	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	
$\tau = 2,38$ Exp.	0,92	0,915	0,91	0,9	0,89	0,875	0,86	0,84	0,82	0,805	0,765	0,73	0,68	0,625	0,55
\bar{z}/\bar{z}_0 $\tau = 2$ Théoriques	1	1	1	1	1	0,97	0,93	0,91	0,87	0,83	0,80	0,75	0,70	0,63	0,445
$\tau = 0$ Théoriques	1	1	1	1	1	0,934	0,87	0,81	0,75	0,694	0,640	0,586	0,536	0,49	0,444

x/t	Aval														
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
$\tau = 2,38$ Exp.	0,425	0,3	0,25	0,225	0,21	0,195	0,18	0,16	0,14	0,12	0,1	0	0	0	0
\bar{z}/\bar{z}_0 $\tau = 2$ Théoriques	0,445	0,33	0,27	0,23	0,19	0,16	0,13	0,10	0,07	0,05	0,04	0,02	0,01	0	0
$\tau = 0$ Théoriques	0,444	0,40	0,36	0,32	0,283	0,25	0,217	0,187	0,16	0,134	0,111	0,09	0,071	0,054	0,04

INFLUENCE DE LA DURÉE DE RUPTURE
PROFILS DE LA SURFACE LIBRE

Canal B - $\bar{z}_0 = 0,20$ m - $\bar{z}_1 = 0$ - $\tau = 2,38$

Planche IX - t = 4 ($\bar{t} = 0,572$ s)

x/t	Amont														
	-1,4	-1,3	-1,2	-1,1	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0
Exp.							0,82	0,795	0,77	0,735	0,7	0,65	0,575	0,45	
\bar{z}/\bar{z}_0	1	1	1	1	1	0,95	0,92	0,87	0,83	0,78	0,73	0,67	0,62	0,55	0,445
Théoriques	1	1	1	1	1	0,934	0,87	0,81	0,75	0,694	0,640	0,586	0,536	0,49	0,444

x/t	Aval														
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
Exp.	0,45	0,31	0,265	0,24	0,22	0,20	0,18	0,165	0,15	0	0	0	0	0	0
\bar{z}/\bar{z}_0	0,445	0,37	0,32	0,28	0,24	0,21	0,18	0,15	0,13	0,11	0,09	0,07	0,04	0	0
Théoriques	0,444	0,40	0,36	0,32	0,283	0,25	0,217	0,187	0,16	0,134	0,111	0,09	0,071	0,054	0,04



COMPARAISON DES THÉORIES DE RITTER ET DE POHLE
VITESSE MOYENNE ET DÉBIT

Date	Abscisse	Hauteur surface libre		Vitesse moyenne		Débit	
		Pohle	Ritter	Pohle	Ritter	Pohle	Ritter
0,18	0	0,984	0,444	0,123	0,667	0,121	0,296
	-0,17	0,987	0,955	0,101	0,046	0,100	0,044
	-0,33	0,989	1	0,081	0	0,080	0
	-0,50	0,991	1	0,063	0	0,062	0
0,36	0	0,936	0,444	0,218	0,677	0,204	0,296
	-0,17	0,947	0,676	0,188	0,355	0,177	0,240
	-0,33	0,957	0,956	0,152	0,044	0,145	0,042
	-0,50	0,965	1	0,121	0	0,117	0
0,54	0	0,856	0,444	0,288	0,667	0,246	0,296
	-0,17	0,880	0,593	0,252	0,459	0,222	0,273
	-0,33	0,902	0,764	0,210	0,252	0,189	0,193
	-0,50	0,922	0,956	0,170	0,045	0,157	0,043
0,71	0	0,745	0,444	0,337	0,667	0,251	0,296
	-0,17	0,787	0,554	0,301	0,511	0,237	0,283
	-0,33	0,826	0,676	0,256	0,356	0,211	0,241
	-0,50	0,861	0,809	0,211	0,200	0,181	0,162
0,89	0	0,601	0,444	0,373	0,667	0,224	0,296
	-0,17	0,667	0,531	0,340	0,542	0,227	0,288
	-0,33	0,728	0,626	0,293	0,418	0,213	0,262
	-0,50	0,783	0,728	0,244	0,294	0,191	0,214
1,07	0	0,425	0,444	0,410	0,667	0,174	0,296
	-0,17	0,520	0,517	0,352	0,563	0,183	0,291
	-0,33	0,609	0,593	0,339	0,459	0,207	0,273
	-0,50	0,687	0,676	0,282	0,356	0,194	0,240



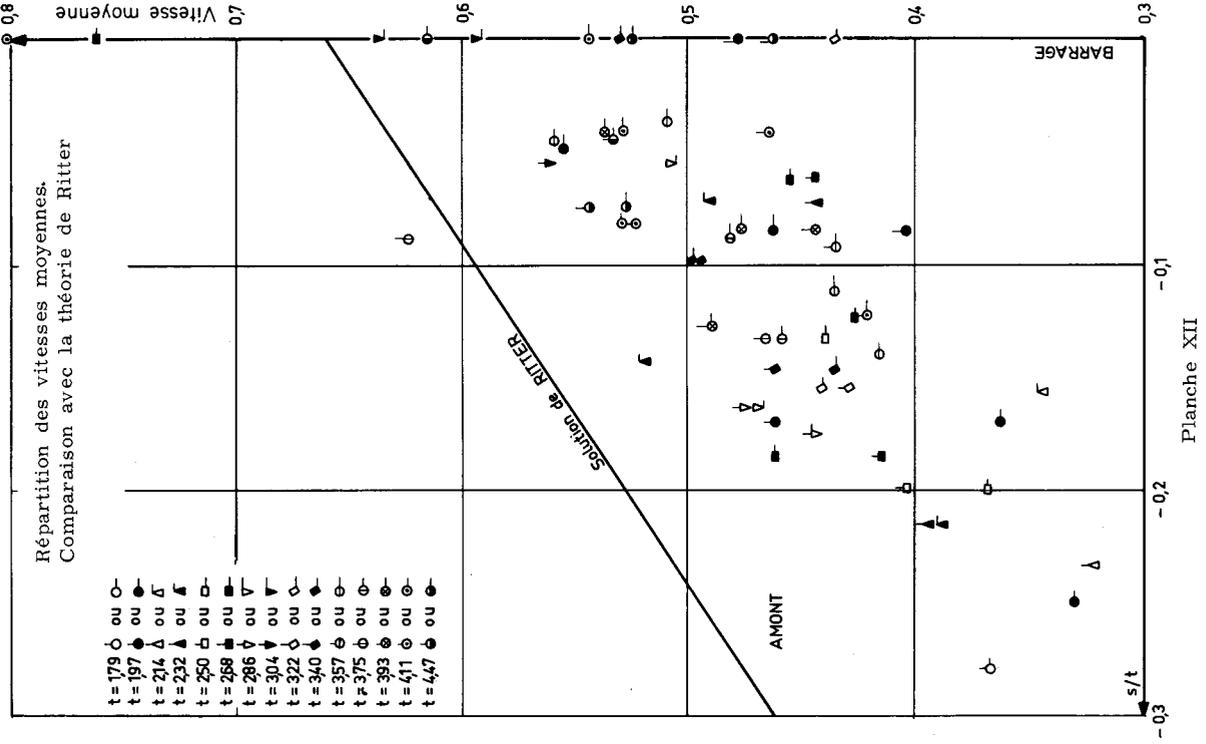


Planche XII

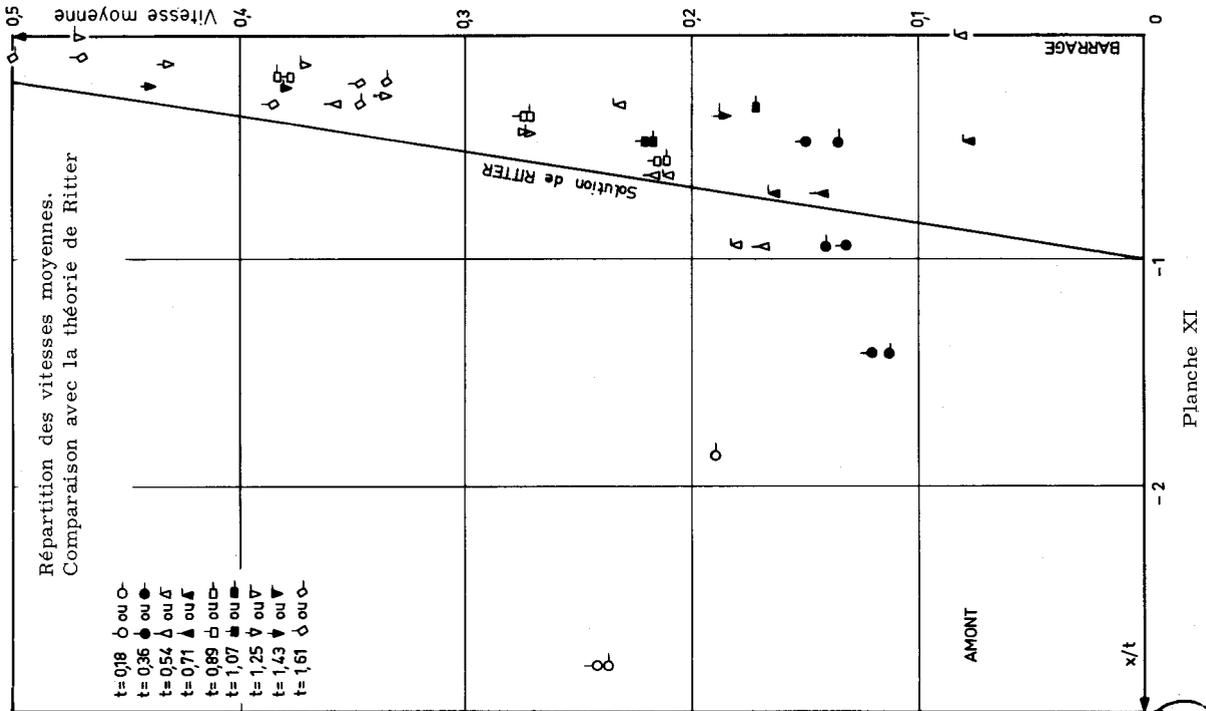


Planche XI



SURÉLEVATION FRONTALE
RÉPARTITION DES VITESSES

Canal B - $\bar{z}_0 = 0,30$ m - $\bar{z}_1 = 0,09$ m

$t = 2,32$



$t = 1,6$

Valeurs relatives à la particule p					Valeurs moyennes		Hauteur de surface libre	
x_p	z_p	V_p	u_p	$u_{\text{moy.}}$	$x_{\text{moy.}}$	z_s		
0,29	0,38	0,75	0,74					
0,30	0,34	0,61	0,60					
0,31	0,26	0,80	0,79					
0,28	0,25	0,80	0,79	0,70	0,28	0,56		
0,22	0,20	0,65	0,64					
0,31	0,13	0,65	0,64					
0,49	0,30	0,79	0,79					
0,48	0,28	0,79	0,79					
0,47	0,24	0,71	0,71	0,72	0,47	0,50		
0,49	0,22	0,63	0,63					
0,43	0,19	0,68	0,67					

Valeurs relatives à la particule p					Valeurs moyennes		Hauteur de surface libre	
x_p	z_p	V_p	u_p	$u_{\text{moy.}}$	$x_{\text{moy.}}$	z_s		
1,37	0,70	0,63	0,63					
1,30	0,69	0,43	0,43					
1,31	0,66	0,50	0,50					
1,39	0,63	0,63	0,63					
1,35	0,60	0,54	0,53					
1,39	0,58	0,55	0,55					
1,38	0,47	0,61	0,61					
1,35	0,45	0,49	0,49					
1,39	0,44	0,55	0,55					
1,32	0,40	0,57	0,56	0,55	1,35	0,74		
1,30	0,29	0,50	0,50					
1,30	0,27	0,55	0,54					
1,38	0,26	0,55	0,54					
1,38	0,24	0,52	0,52					
1,32	0,16	0,54	0,53					
1,30	0,14	0,50	0,50					
1,35	0,09	0,63	0,63					
1,37	0,08	0,57	0,57					
1,36	0,04	0,61	0,61					

$t = 2,14$

x_p	z_p	V_p	u_p	$u_{\text{moy.}}$	$x_{\text{moy.}}$	z_s
0,67	0,24	0,63	0,63			
0,67	0,22	0,55	0,55			
0,67	0,21	0,63	0,63			
0,64	0,19	0,61	0,61	0,59	0,64	0,45
0,61	0,16	0,64	0,64			
0,58	0,06	0,50	0,50			

Planche XIII

$t = 2,5$

x_p	z_p	V_p	u_p	$u_{\text{moy.}}$	$x_{\text{moy.}}$	z_s
1,19	0,62	0,41	0,41			
1,16	0,60	0,55	0,53			
1,13	0,56	0,39	0,36			
1,21	0,49	0,63	0,63			
1,22	0,37	0,39	0,38	0,54	1,17	0,72
1,16	0,31	0,61	0,60			
1,15	0,22	0,63	0,61			
1,19	0,20	0,68	0,68			
1,15	0,07	0,63	0,63			

Planche XIV

ÉVOLUTION DE LA SURÉLÉVATION FRONTALE

ABSCISSES RÉDUITES X_p , x_p et x_f
EN FONCTION DU TEMPS

Canal B - $\bar{z}_0 = 0,30$ m

Expérience n° 4. ($y_1 = 0,02$)

Temps	X_p	x_p	x_f
0,86	0,77	0,66	0,60
1,14	1,20	0,90	0,73
1,43	1,53	1,17	1,00
1,72	2,06	1,46	1,20
2,00	2,50	1,73	1,50
2,29	3,10	1,93	1,66
2,57	3,67	2,07	1,83

Expérience n° 6. ($y_1 = 0,2$)

Temps	X_p	x_p	x_f
0,86	0,60	0,40	0,26
1,14	0,80	0,56	0,43
1,43	1,07	0,77	0,50
1,72	1,26	0,93	0,56
2,00	1,57	1,17	0,83
2,29	1,83	1,50	0,93
2,57	2,06	1,66	1,16
2,86	2,43	1,83	1,20
3,15	2,73	2,00	0,90
3,43	3,16	2,33	1,00
3,72	3,33	2,50	0,90
4,00	3,50	2,83	1,00

Expérience n° 7. ($y_1 = 0,3$)

Temps	X_p	x_p	x_f
0,57	0,33	0,26	0,20
0,86	0,70	0,43	0,33
1,14	0,90	0,56	0,40
1,43	1,17	0,77	0,50
1,72	1,40	1,06	0,60
2,00	1,66	1,33	0,66
2,29	2,10	1,60	0,73
2,57	2,27	1,90	0,77
2,86	2,73	2,16	0,86
3,15	3,10	2,33	1,00
3,43	3,16	2,66	1,33
3,72	3,50	2,83	1,17

Expérience n° 9. ($y_1 = 0,6$)

Temps	X_p	x_p	x_f
1,72	1,16	0,40	0,16
2,00	1,43	0,60	0,20
2,29	1,76	0,83	0,20
2,57	1,87	1,17	0,43
2,86	2,20	1,33	0,50
3,15	2,43	1,66	0,66
3,43	2,83	1,83	1,33
3,72	3,00	2,10	1,50
4,00	3,16	2,50	1,66
4,29	3,27	2,60	1,70
4,58	3,33	2,66	1,83



Planche XV

Planche XVI

ÉVOLUTION DE LA SURÉLÉVATION FRONTALE
LONGUEUR RÉDUITE L EN FONCTION DU TEMPS

Canal B - $\bar{z}_0 = 0,30 \text{ m} - y_1 = 0,02$

Temps	Valeur expérimentale de L		
	Vanne barrage		Paroi vitrée Fond lisse exp. 24
	Fond lisse exp. 4	Fond rugueux	
0,86	0,20		
1,14	0,33		
1,43	0,40		
1,72	0,43		
2,00	0,50		
2,29	0,56		
2,57	1,00		
2,86	1,16		0,26
3,15			0,40
3,43			0,50
3,72			0,60
4,00			0,73
4,29			0,73
4,58			0,73

Planche XVII

Canal B - $\bar{z}_0 = 0,30 \text{ m} - y_1 = 0,2$

Temps	Valeur expérimentale de L		
	Vanne barrage		Paroi vitrée Fond lisse exp. 26
	Fond lisse exp. 6	Fond rugueux exp. 14	
0,86	0,23	0,23	
1,14	0,43	0,30	
1,43	0,43	0,46	
0,53	0,53	0,56	0,66
2,00	0,67	0,93	0,73
2,29	0,80	0,93	0,60
2,57	0,83	1,16	0,83
2,86	0,93	1,30	1,00
3,15	1,13	1,56	1,07
3,43	1,86	1,63	1,10
3,72	2,00	1,50	1,40
4,00	2,16	1,33	1,46
4,29	2,16		

Planche XVIII

Canal B - $\bar{z}_0 = 0,30 \text{ m} - y_1 = 0,3$

Temps	Valeur expérimentale de L		
	Vanne barrage		Paroi vitrée Fond lisse exp. 27
	Fond lisse exp. 7	Fond rugueux exp. 15	
0,57	0,10		
0,86	0,23		
1,14	0,36	0,43	
1,43	0,50	0,50	
1,72	0,73	0,53	0,60
2,00	0,83	0,93	0,66
2,29	1,33	1,00	0,66
2,57	1,43	1,33	0,83
2,86	1,53	1,50	0,83
3,15	1,66	1,66	1,00
3,43	1,80	2,00	1,30
3,72	2,16		1,66
4,00			1,93
4,29			2,16
4,58			2,36

Planche XIX

Canal B - $\bar{z}_0 = 0,30 \text{ m} - y_1 = 0,6$

Temps	Valeur expérimentale de L		
	Vanne barrage		Paroi vitrée Fond lisse exp. 28
	Fond lisse exp. 9	Fond rugueux exp. 17	
1,14		0,40	
1,43		0,67	
1,72	0,50	0,80	0,26
2,00	0,73	1,20	0,33
2,29	1,00	1,13	0,40
2,57	0,90	1,07	0,43
2,86	0,83	0,83	0,46
3,15	1,00	1,00	0,50
3,43	1,06	0,83	0,53
3,72	1,33	0,73	0,56
4,00	1,50	0,67	0,60
4,29	1,53	0,67	0,60
4,58	1,56	0,87	0,60
4,86			0,60
5,15			0,60
5,43			0,66
5,72			0,66

Planche XX



ÉVOLUTION DE LA SURÉLEVATION FRONTALE

PROFONDEUR D'EAU z_p , z_f et z_r EN FONCTION DU TEMPS

Canal B - $\bar{z}_0 = 0,30$ m - $y_1 = 0,2$

Temps	Valeur expérimentale de z_p , z_f et z_r									
	Fond lisse exp. 6			Vanne barrage Fond rugueux exp. 14			Paroi vitrée Fond lisse exp. 26			
	z_p	z_f	z_r	z_p	z_f	z_r	z_p	z_f	z_r	
0,57	0,467	0,333	0,532	0,333	0,367	0,416	0,366	0,733	0,833	
0,85	0,50	0,366	0,367	0,416	0,366	0,566	0,366	0,666		
1,14	0,566	0,366	0,566	0,566	0,366	0,700	0,367	0,6	0,50	0,56
1,43	0,60	0,366	0,50	0,7	0,367	0,6	0,60	0,50	0,60	0,63
1,71	0,60	0,366	0,50	0,7	0,367	0,6	0,60	0,46	0,60	0,60
2,00	0,633	0,366	0,50	0,667	0,367	0,6	0,60	0,43	0,60	0,60
2,28	0,633	0,40	0,50	0,566	0,367	0,566	0,60	0,40	0,60	0,60
2,57	0,60	0,366	0,467	0,566	0,367	0,533	0,60	0,40	0,60	0,60
2,86	0,584	0,366	0,467	0,533	0,367	0,5	0,60	0,40	0,60	0,60
3,14	0,567	0,366	0,467	0,533	0,367	0,5	0,60	0,40	0,60	0,60
3,43	0,532	0,400	0,466	0,533	0,365	0,5	0,56	0,40	0,60	0,60
4,00							0,56	0,40	0,60	0,60
4,29							0,56	0,40	0,60	0,60
4,57							0,56	0,40	0,60	0,60
5,14							0,56	0,40	0,60	0,60
5,72							0,53	0,36	0,56	0,56
6,29							0,53	0,33	0,53	0,53
6,86							0,50	0,30	0,53	0,53
7,43							0,50	0,26	0,46	0,46
8,00							0,46	0,23	0,43	0,43

Planche XXII

Canal B - $\bar{z}_0 = 0,30$ m - $y_1 = 0,6$

Temps	Valeur expérimentale de z_p , z_f et z_r									
	Fond lisse exp. 9			Vanne barrage Fond rugueux exp. 17			Paroi vitrée Fond lisse exp. 28			
	z_p	z_f	z_r	z_p	z_f	z_r	z_p	z_f	z_r	
0,57	0,67	0,67	0,9	0,90	0,833	0,667	0,867			
0,85	0,733	0,70	0,834	0,833	0,70	0,733				
1,14	0,80	0,67	0,80	0,866	0,70	0,733				
1,43	0,834	0,67	0,733	0,833	0,667	0,667	0,86	0,80	0,80	
2,00	0,834	0,633	0,67	0,833			0,86	0,80	0,80	
2,28	0,67	0,67	0,7	0,833			0,90	0,76	0,76	
2,57	0,7	0,7	0,7	0,833			0,90	0,76	0,76	
2,86	0,7	0,7	0,7	0,833			0,90	0,73	0,76	
3,14							0,86	0,73	0,76	
3,43							0,86	0,73	0,76	
4,00							0,86	0,76	0,76	
4,29							0,86	0,76	0,76	
4,57							0,86	0,76	0,76	
5,14							0,86	0,76	0,76	
5,72							0,86	0,76	0,76	
6,29							0,86	0,76	0,76	
6,86							0,86	0,76	0,76	
7,43							0,86	0,76	0,76	
8,00							0,86	0,76	0,76	

Planche XXIV

Canal B - $\bar{z}_0 = 0,30$ m - $y_1 = 0,02$

Temps	Valeur expérimentale de z_p , z_f et z_r									
	Fond lisse exp. 4			Vanne barrage Fond rugueux exp. 12			Paroi vitrée Fond lisse exp. 24			
	z_p	z_f	z_r	z_p	z_f	z_r	z_p	z_f	z_r	
0,57	0,167	0,167	0,834	0,067	0,067	0,9				
0,85	0,20	0,20	0,67	0,167	0,167	0,834				
1,14	0,267	0,20	0,633	0,167	0,167	0,70				
1,43	0,30	0,183	0,567			0,634				
1,71	0,33	0,20	0,532			0,566	0,26	0,20	0,73	
2,00	0,33	0,20	0,50			0,533				
2,28	0,30	0,20	0,50			0,5				
2,57	0,30	0,20	0,467				0,26	0,26	0,66	
2,86							0,26	0,23	0,63	
3,14							0,23	0,20	0,60	
3,43							0,26	0,20	0,60	
3,71							0,33	0,20	0,56	
4,00							0,36	0,23	0,56	
4,29							0,36	0,26	0,56	
4,57							0,40	0,33	0,56	
5,14							0,33	0,20	0,56	
5,72							0,33	0,23	0,60	
6,29							0,36	0,23	0,56	
6,86										
7,43										
8,00										

Planche XXI

Canal B - $\bar{z}_0 = 0,30$ m - $y_1 = 0,3$

Temps	Valeur expérimentale de z_p , z_f et z_0									
	Fond lisse exp. 7			Vanne barrage Fond rugueux exp. 15			Paroi vitrée Fond lisse exp. 27			
	z_p	z_f	z_r	z_p	z_f	z_r	z_p	z_f	z_r	
0,57	0,567	0,434	0,567	0,600	0,50	0,768				
0,85	0,666	0,466	0,567	0,634	0,50	0,666				
1,14	0,666	0,466	0,534	0,666	0,434	0,584				
1,43	0,666	0,400	0,500	0,666	0,434	0,567	0,43	0,40	0,70	
1,71	0,700	0,434	0,534	0,734	0,466	0,567	0,60	0,36	0,66	
2,00	0,700	0,416	0,50	0,700	0,500	0,534	0,66	0,53	0,63	
2,28	0,700	0,416	0,50	0,666	0,500	0,534	0,70	0,50	0,63	
2,57	0,70	0,434	0,500	0,666	0,500	0,534	0,70	0,50	0,63	
2,86	0,666	0,466	0,500	0,666	0,500	0,534	0,66	0,50	0,60	
3,14							0,70	0,46	0,60	
3,43	0,734	0,500	0,500	0,634	0,500	0,500	0,70	0,43	0,60	
3,71							0,66	0,43	0,60	
4,00							0,66	0,40	0,60	
4,29							0,66	0,40	0,60	
4,57							0,66	0,40	0,56	
5,14							0,60	0,36	0,56	
5,72							0,56	0,33	0,53	
6,29							0,56	0,40	0,50	
6,86							0,60	0,36	0,50	
7,43							0,56	0,33	0,46	
8,00										

Planche XXIII



SURÉLEVATION FRONTALE

Comparaison avec les résultats de Lévin
Canal B - Vanne à effacement vertical

$y_1 = \bar{z}_1/\bar{z}_0$	Nature du fond	N° d'expérience	t = 3,2		t = 1,6	
			z_F	z_f	x_f	x_f
0,02	lisse	4	0,30	0,27	0,47	0,83
	rugueux					
0,05	lisse	5	0,33	0,27	0,44	0,40
	rugueux					
0,2	lisse	6	0,53	0,40	0,47	0,30
	rugueux					
0,3	lisse	7	0,70	0,47	0,50	0,30
	rugueux					
0,4	lisse	20	0,55	0,50	0,50	0,45
	rugueux					
0,5	lisse	8	0,87	0,66	0,63	0,17
	rugueux					
0,6	lisse	9	0,87	0,77	0,80	0,13
	rugueux					
0,7	lisse	10	0,90	0,83	0,87	0
	rugueux					
0,8	lisse	11	0,93	0,87	0,87	0
	rugueux					

Planche XXV

Variation de z_f maxi et de z_f et z_f correspondants
Canal B. $\bar{z}_0 = 0,30$ m.

$y_1 = \bar{z}_1/\bar{z}_0$	Mode de rupture	Nature du fond	N° d'expérience	z_f maxi	z_f	z_f
0,02	levée verticale	lisse	4	0,33	0,23	0,53
	paroi vitrée	rugueux				
0,05	levée verticale	lisse	5	0,40	0,23	0,53
	paroi vitrée	rugueux				
0,2	levée verticale	lisse	6	0,63	0,37	0,50
	paroi vitrée	rugueux				
0,3	levée verticale	lisse	7	0,70	0,40	0,57
	paroi vitrée	rugueux				
0,4	levée verticale	lisse	25	0,86	0,63	0,66
	paroi vitrée	rugueux				
0,5	levée verticale	lisse	8	0,80	0,57	0,63
	paroi vitrée	rugueux				
0,6	levée verticale	lisse	9	0,83	0,67	0,70
	paroi vitrée	rugueux				
0,7	levée verticale	lisse	10	0,90	0,77	0,77
	paroi vitrée	rugueux				
0,8	levée verticale	lisse	11	0,93	0,83	0,83
	paroi vitrée	rugueux				

Planche XXVI

SURÉLEVATION FRONTALE

Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux
Canal B - $\bar{z}_0 = 0,30$ m - $y_1 = 0,3$

Temps	Résultats expérimentaux		Résultats théoriques		
	Vitesse moyenne en la section		Célérité du front	Vitesse	Célérité du front
	x_f	x_p	V_f	u_2	V_{21}
0,57			0,84		
1,43			0,96		
1,60	0,72				
1,72			1,02		
2			1,03		
2,14	0,59				
2,29			1,02	0,46	0,94
2,32					
2,31		0,55			
2,57		0,54			
2,86			1,02		
3,44			1,07		
			1,08		

Planche XXVII

ETUDE DE LA CÉLÉRITÉ DU FRONT AVANT
Expérience n° 4. ($y_1 = 0,02$)

Temps	\bar{z}_1/\bar{z}_p	\bar{z}_1/\bar{z}_f	$\bar{u}_p/\sqrt{gz_1}$
0,86	0,1	0,1	8,65
1,14	0,075	0,1	9,89
1,43	0,066	0,1	10,26
1,72	0,060	0,1	11,18
2,00	0,060	0,1	13,23
2,29	0,066	0,1	14,26

Expérience n° 6. ($y_1 = 0,2$)

Temps	\bar{z}_1/\bar{z}_p	\bar{z}_1/\bar{z}_f	$\bar{u}_p/\sqrt{gz_1}$
0,86	0,400	0,545	1,72
1,14	0,352	0,545	1,79
1,43	0,334	0,545	1,87
1,72	0,334	0,545	1,95
2,00	0,315	0,545	2,07
2,29	0,315	0,500	2,18
2,57	0,334	0,545	2,42
2,86	0,334	0,545	2,50
3,15	0,352	0,545	2,69
3,43	0,375	0,500	2,77

Planche XXVIII

HAUTEUR DE LA ZONE INONDABLE
Canal B - Vanne à effacement vertical

y_1	Résultats théoriques		Résultats expérimentaux z_p moyen
	Stoker	z_p calculé	
0,1	0,444	0,560	
0,2	0,508	0,579	0,58
0,3	0,591	0,628	0,65
0,4	0,663	0,680	0,74
0,5	0,727	0,735	0,75
0,6	0,787	0,790	0,80
0,7	0,843	0,844	0,86
0,8	0,897	0,897	0,90
0,9	0,949	0,949	
1	1	1	

Planche XXX

Expérience n° 7. ($y_1 = 0,3$)

Temps	\bar{z}_1/\bar{z}_p	\bar{z}_1/\bar{z}_f	$\bar{u}_p/\sqrt{gz_1}$
0,57	0,529	0,692	1,53
0,86	0,450	0,642	1,59
1,14	0,450	0,642	1,69
1,43	0,450	0,750	1,75
1,12	0,428	0,692	1,81
2,00	0,428	0,692	1,88
2,29	0,428	0,692	1,85
2,57	0,428	0,692	1,85
2,86	0,409	0,600	1,94
3,15	0,428	0,600	2,01
3,43	0,450	0,600	1,97

Expérience n° 9. ($y_1 = 0,6$)

Temps	\bar{z}_1/\bar{z}_p	\bar{z}_1/\bar{z}_f	$\bar{u}_p/\sqrt{gz_1}$
1,72	0,720	0,900	1,33
2,00	0,720	0,947	1,35
2,29	0,720	0,900	1,35
2,57	0,720	0,857	1,28
2,86	0,720	0,857	1,06
3,15	0,720	0,818	0,94
3,43	0,720	0,818	0,90
3,72	0,720	0,818	0,79
4,00	0,692	0,818	0,74

Planche XXIX



CANAL A
 Levée de vanne verticale
 $\bar{z}_0 = 0,40 \text{ m. } y_1 = 0$



Hauteur de la vanne : 120 mm

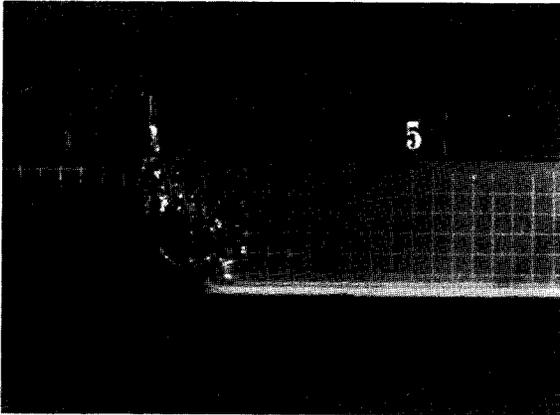


Hauteur de la vanne : 270 mm

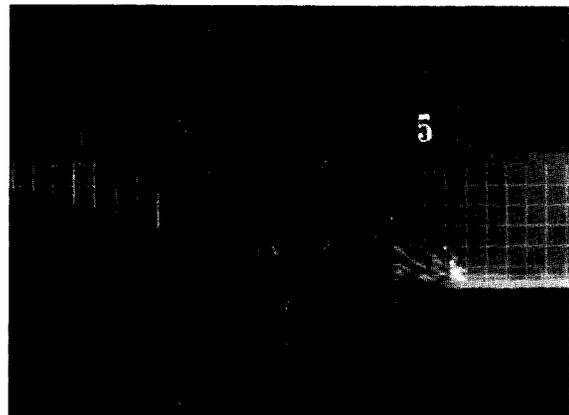


Hauteur de la vanne : 400 mm

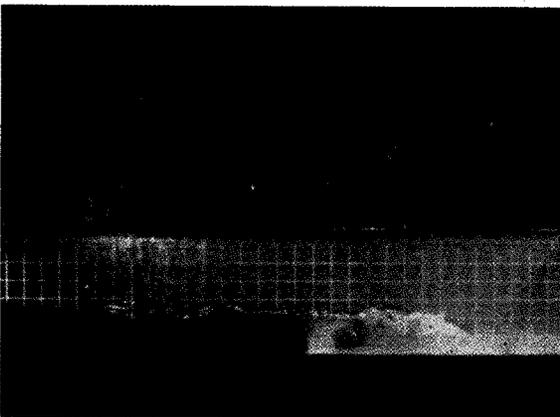
CANAL B
Surélévation frontale



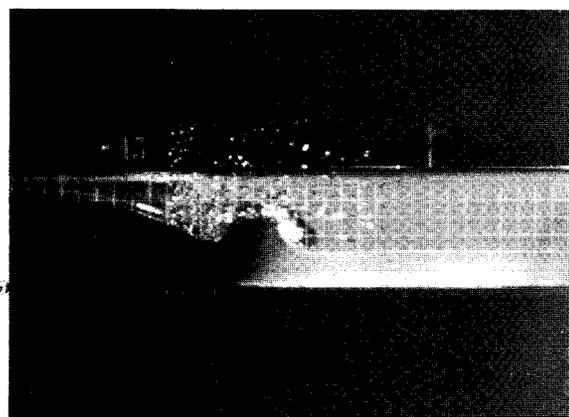
Fond lisse $y_1 = 0,05 - t = 0,6 (0,10 \text{ s})$



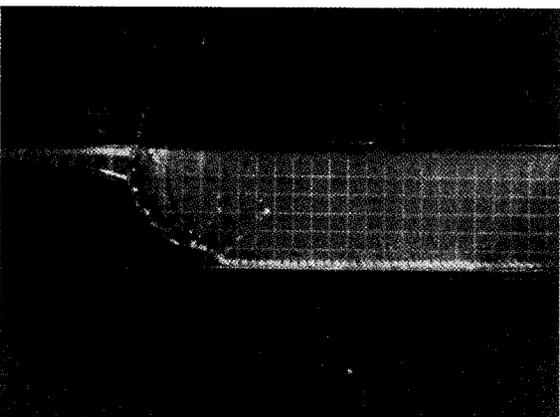
Fond lisse $y_1 = 0,05 - t = 2 (0,35 \text{ s})$



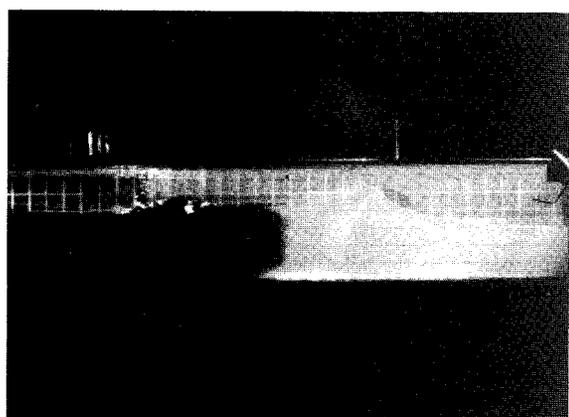
Fond lisse $y_1 = 0,25 - t = 4,4 (0,63 \text{ s})$



Fond rugueux $y_1 = 0,3 - t = 1,6 (0,28 \text{ s})$

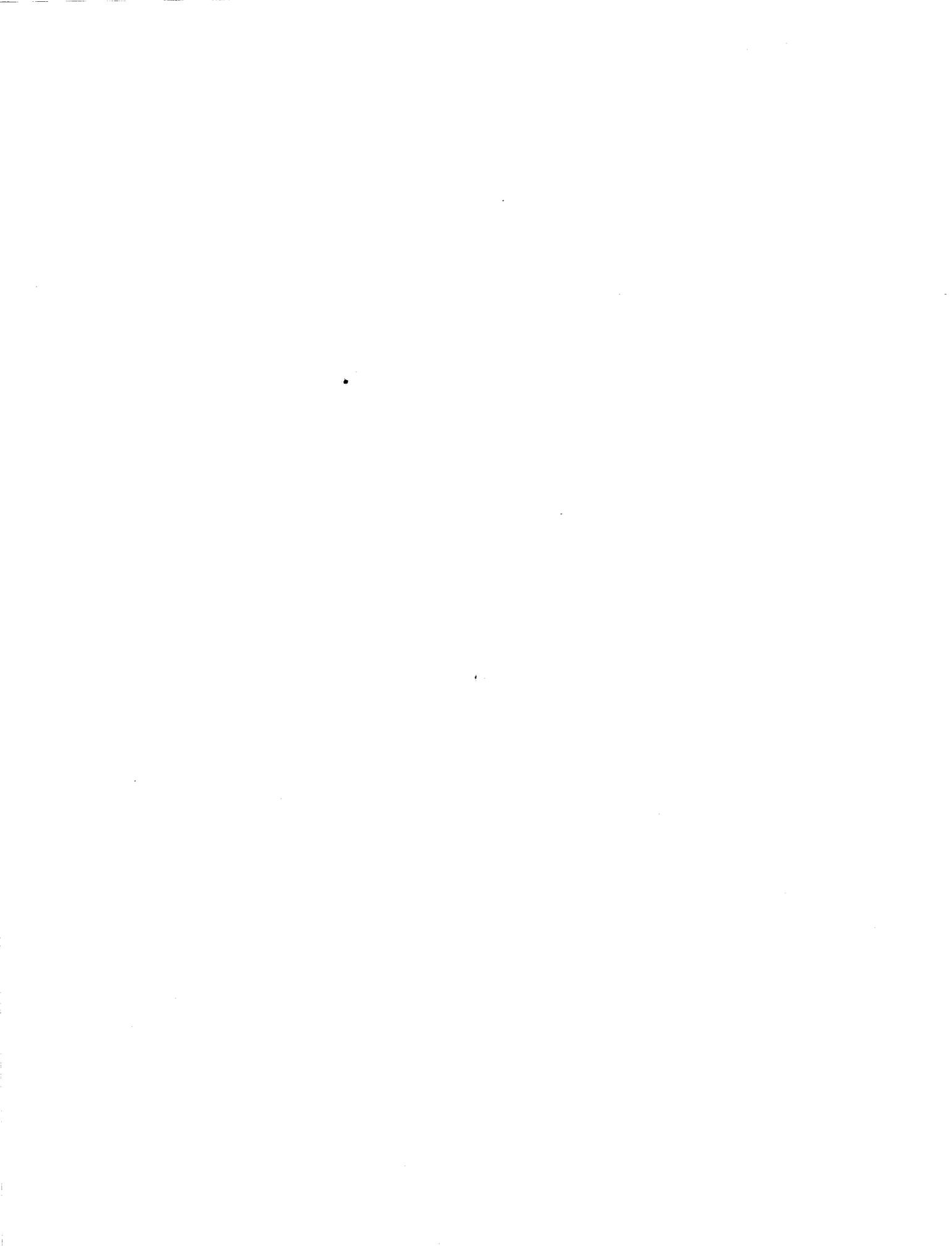


Fond rugueux $y_1 = 0,02 - t = 2 (0,35 \text{ s})$



Fond rugueux $y_1 = 0,5 - t = 3,37 (0,59 \text{ s})$





Annexe III

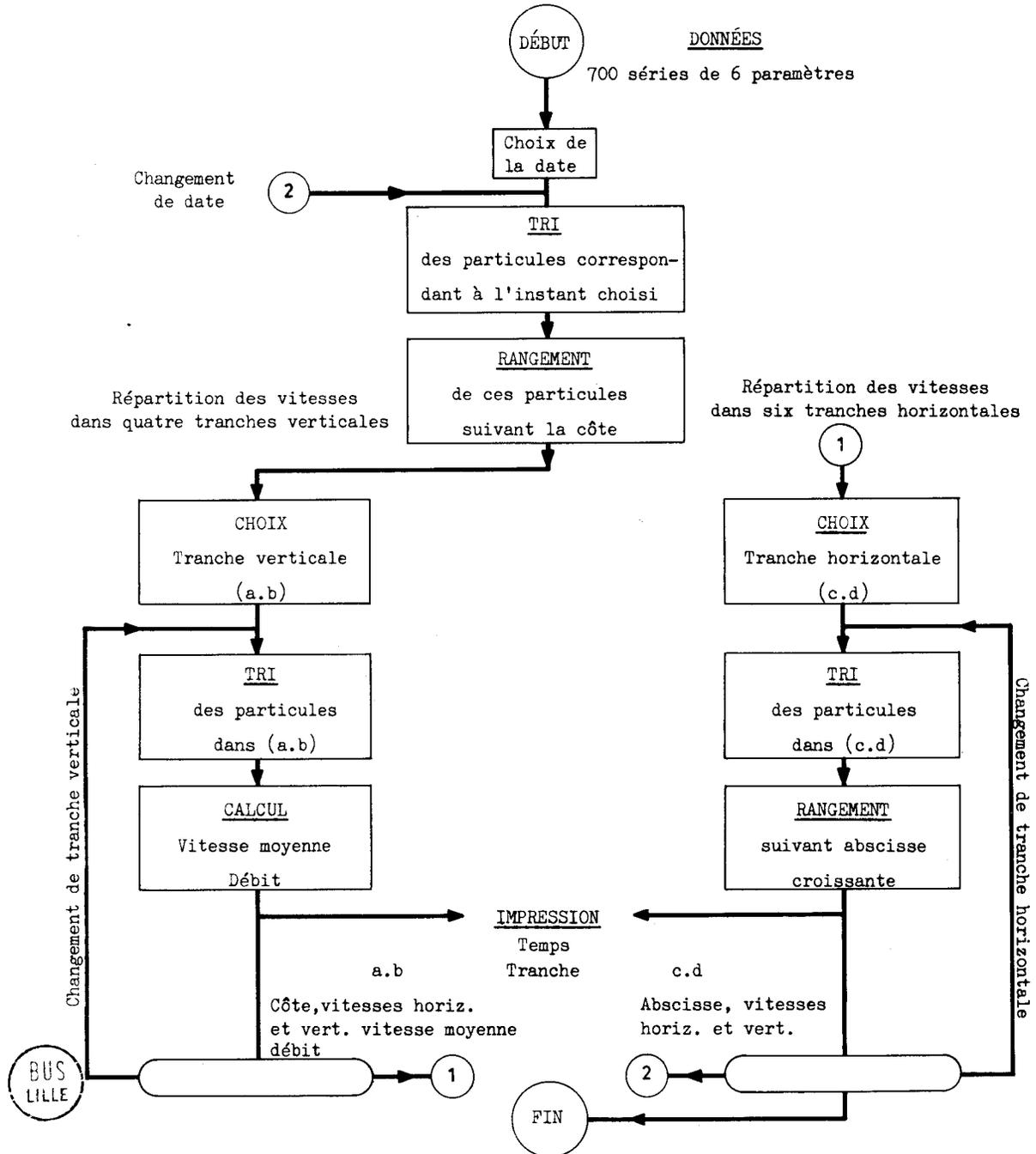
Répartition expérimentale des vitesses

pour $t = 0,18 - 0,36 - 0,54 - 0,71 - 0,89 - 1,07 - 1,25 - 1,43 - 1,61 - 1,79 - 1,97 -$
 $- 2,14 - 2,32 - 2,50 - 2,68 - 2,86 - 3,04 - 3,22 - 3,40 - 3,57 - 3,75 - 3,93 - 4,11 - 4,47$

NB : Le symbole * signifie que la particule considérée se trouve dans la tranche de largeur totale
 $L(L = 0,066)$.

PROGRAMME DE TRI DES DONNÉES

ORGANIGRAMME GÉNÉRAL



DATE = 0.18

TRANCHES VERTICALES

ABSCISSE = -0.33 DEBIT = 0.197 V MOYENNE = 0.189

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.101	0.217	0.046
0.144	0.185	0.079

ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.252 V MOYENNE = 0.239

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.065	0.151	0.
0.086	0.141	0.
0.115	0.249	0.081

TRANCHES HORIZONTALES

COTE = 0.17

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-0.468	0.249	0.081
-0.392	0.217	0.046
-0.28P	0.185	0.079

DATE = 0.36

TRANCHES VERTICALES

ABSCISSE = -0.17 DEBIT = 0.137 V MOYENNE = 0.136

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.317	0.274	-0.206
0.432	0.151	-0.285
0.508	0.103	-0.284
0.558	0.052	-0.152
0.695	0.029	-0.148
0.846	0.032	-0.199
0.929	0.009	-0.181

ABSCISSE = -0.33 DEBIT = 0.142 V MOYENNE = 0.141

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.205	0.244	-0.141
0.291	0.205	-0.128
0.324	0.170	-0.142
0.504	0.174	-0.222
0.828	0.016	-0.181
0.839	0.016	-0.181
0.983	0.038	-0.177

ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.114 V MOYENNE = 0.113

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.245	0.183	-0.085
0.274	0.235	-0.090
0.486	0.112	-0.101
0.666	0.064	-0.137
0.684	0.094	-0.141
0.922	0.013	-0.151
0.947	0.018	-0.150

TRANCHES HORIZONTALES

COTE = 0.33

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-0.835	0.117	-0.029
-0.486	0.235	-0.090
-0.407	0.162	-0.151
-0.371	0.170	-0.142
-0.306	0.205	-0.128
-0.184	0.274	-0.206

COTE = 0.50

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-0.983	0.077	-0.065
-0.839	0.069	-0.074
-0.767	0.081	-0.090
-0.706	0.138	-0.083
-0.630	0.152	-0.132
-0.551	0.112	-0.101
-0.306	0.174	-0.222
-0.216	0.103	-0.284
-0.216	0.052	-0.152

COTE = 0.67

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-0.943	0.058	-0.083
-0.871	0.085	-0.085
-0.713	0.071	-0.098
-0.529	0.064	-0.137
-0.439	0.054	-0.141
-0.223	0.029	-0.148

COTE = 0.83

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-0.990	0.031	-0.096
-0.882	0.034	-0.073
-0.734	0.044	-0.134
-0.684	0.031	-0.096
-0.634	0.035	-0.116
-0.414	0.037	-0.147
-0.349	0.016	-0.181
-0.288	0.016	-0.181
-0.158	0.032	-0.199

COTE = 1.00

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-0.875	0.021	-0.099
-0.547	0.018	-0.150
-0.378	0.038	-0.177

TRANCHES HORIZONTALES

COTE = 0.17

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-0.842	0.149	-0.024
-0.810	0.119	-0.021
-0.774	0.121	-0.006
-0.648	0.279	-0.044
-0.605	0.158	-0.031
-0.583	0.192	-0.062
-0.392	0.244	-0.141
-0.288	0.185	0.079

DATE = 0.54

TRANCHES VERTICALES			TRANCHES HORIZONTALES		
ABSCISSE = 0.	DEBIT = 0.082	V MOYENNE = 0.091	COTE = 0.17		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.742	0.091	-0.393	-0.832	0.275	-0.063
			-0.680	0.195	-0.049
			-0.655	0.158	-0.031
			-0.576	0.236	-0.054
			-0.576	0.232	-0.067
			-0.522	0.298	-0.047
			-0.504	0.259	-0.036
			-0.421	0.277	-0.054
			-0.317	0.317	-0.056
			-0.241	0.355	-0.075
			-0.198	0.358	-0.057
			-0.083	0.654	-0.264
			0.079	0.415	-0.081
			0.090	0.377	-0.066
ABSCISSE = -0.17	DEBIT = 0.215	V MOYENNE = 0.232	COTE = 0.33		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.115	0.358	-0.057	-0.684	0.135	-0.088
0.562	0.219	-0.338	-0.590	0.197	-0.101
0.774	0.083	-0.290	-0.540	0.229	-0.079
			-0.504	0.241	-0.102
ABSCISSE = -0.33	DEBIT = 0.198	V MOYENNE = 0.210	-0.464	0.198	-0.139
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	-0.432	0.235	-0.115
0.090	0.301	-0.021	-0.414	0.269	-0.137
0.114	0.317	-0.056	-0.403	0.201	-0.168
0.256	0.379	-0.138	-0.306	0.237	-0.111
0.259	0.326	-0.106	0.198	0.431	-0.220
0.306	0.237	-0.111			
0.414	0.219	-0.177	COTE = 0.50		
0.446	0.286	-0.223	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.464	0.302	-0.236	-0.585	0.149	-0.104
0.486	0.199	-0.199	-0.547	0.250	-0.234
0.500	0.275	-0.266	-0.432	0.316	-0.225
0.522	0.228	-0.282	-0.385	0.228	-0.282
0.619	0.187	-0.287	-0.382	0.286	-0.223
0.648	0.160	-0.256	-0.342	0.302	-0.236
0.677	0.106	-0.217	-0.342	0.275	-0.266
0.774	0.087	-0.226	-0.274	0.199	-0.199
0.774	0.093	-0.287	-0.101	0.219	-0.338
0.846	0.046	-0.237	-0.086	0.316	-0.339
ABSCISSE = -0.50	DEBIT = 0.176	V MOYENNE = 0.181	COTE = 0.67		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.119	0.259	-0.036	-0.630	0.116	-0.165
0.162	0.298	-0.047	-0.583	0.091	-0.179
0.248	0.204	-0.087	-0.554	0.137	-0.147
0.270	0.229	-0.079	-0.554	0.139	-0.198
0.281	0.241	-0.102	-0.511	0.142	-0.196
0.396	0.198	-0.139	-0.500	0.139	-0.198
0.403	0.241	-0.182	-0.482	0.104	-0.149
0.468	0.250	-0.234	-0.432	0.159	-0.182
0.612	0.137	-0.147	-0.389	0.187	-0.287
0.623	0.104	-0.149	-0.371	0.160	-0.256
0.630	0.142	-0.196	-0.324	0.106	-0.217
			-0.266	0.149	-0.239
0.684	0.139	-0.198	COTE = 0.83		
0.684	0.139	-0.198	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.756	0.085	-0.183	-0.788	0.065	-0.169
0.781	0.069	-0.189	-0.583	0.069	-0.189
0.817	0.082	-0.270	-0.562	0.069	-0.189
0.846	0.071	-0.231	-0.515	0.082	-0.270
			-0.475	0.071	-0.231
			-0.425	0.085	-0.248
			-0.392	0.046	-0.237
			-0.389	0.087	-0.226
			-0.295	0.093	-0.287
			-0.263	0.059	-0.255
			-0.223	0.083	-0.290
			COTE = 1.00		
			ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
			-0.972	0.010	-0.080
			-0.378	0.038	-0.177

DATE = 0.71

TRANCHES VERTICALES

ABSCISSE	DEBIT	V MOYENNE
-0.33	0.073	0.078
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.774	0.078	-0.271
ABSCISSE	DEBIT	V MOYENNE
-0.50	0.156	0.164
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.230 0.598	0.193 0.142	-0.059 -0.196

TRANCHES HORIZONTALES

COTE = 0.17		
ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-0.792	0.198	-0.038
-0.626	0.236	-0.050
-0.612	0.234	-0.063
-0.562	0.193	-0.059
COTE = 0.33		
ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-0.792	0.189	-0.069
-0.709	0.190	-0.114
-0.576	0.196	-0.142
COTE = 0.50		
ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-0.979	0.103	-0.064
-0.670	0.135	-0.121
-0.630	0.167	-0.145
COTE = 0.67		
ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-0.972	0.078	-0.093
-0.918	0.082	-0.088
-0.875	0.078	-0.093
-0.792	0.092	-0.132
-0.702	0.127	-0.157
-0.648	0.091	-0.157
COTE = 0.83		
ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-1.015	0.055	-0.108
-0.936	0.051	-0.110
-0.878	0.073	-0.144
-0.803	0.052	-0.152
-0.666	0.068	-0.146
-0.583	0.072	-0.188
-0.378	0.078	-0.271
COTE = 1.00		
ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-1.051	0.012	-0.100
-0.972	0.010	-0.080

DATE = 0.89

TRANCHES VERTICALES			TRANCHES HORIZONTALES		
ABSCISSE = -0.17 DEBIT = 0.302 V MOYENNE = 0.383			COTE = 0.17		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
. 0.151	0.475	-0.092	. -0.576	0.238	0.042
. 0.252	0.360	-0.131	. -0.511	0.274	0.068
. 0.292	0.402	-0.187	. -0.486	0.279	0.039
. 0.432	0.340	-0.285	. -0.450	0.239	-0.034
ABSCISSE = -0.33 DEBIT = 0.231 V MOYENNE = 0.271			COTE = 0.33		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
. 0.144	0.379	-0.053	. -0.623	0.405	-0.124
. 0.270	0.438	-0.151	. -0.526	0.246	-0.090
. 0.392	0.262	-0.151	. -0.418	0.360	-0.131
. 0.401	0.247	-0.207	. -0.342	0.262	-0.151
. 0.443	0.244	-0.178	. -0.320	0.438	-0.151
. 0.554	0.216	-0.240	. -0.205	0.402	-0.187
. 0.756	0.113	-0.213	COTE = 0.50		
ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.187 V MOYENNE = 0.211			ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	. -0.500	0.244	-0.178
. 0.112	0.279	0.039	. -0.450	0.167	-0.145
. 0.151	0.239	-0.034	. -0.310	0.244	-0.178
. 0.162	0.274	0.068	. -0.306	0.216	-0.240
. 0.288	0.246	-0.090	. -0.245	0.286	-0.223
. 0.432	0.281	-0.196	COTE = 0.67		
. 0.468	0.244	-0.178	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
. 0.490	0.167	-0.145	. -0.500	0.216	-0.240
. 0.605	0.216	-0.240	. -0.446	0.150	-0.215
. 0.677	0.150	-0.215	. -0.256	0.151	-0.262
. 0.760	0.135	-0.224	COTE = 0.83		
. 0.792	0.079	-0.163	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
			. -0.954	0.062	-0.104
			. -0.864	0.060	-0.128
			. -0.810	0.051	-0.131
			. -0.576	0.072	-0.210
			COTE = 1.00		
			ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
			. -0.522	0.079	-0.163
			. -1.051	0.012	-0.100

DATE = 1.07

TRANCHES HORIZONTALES

COTE = 0.17

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
. -0.684	0.239	0.038
. -0.659	0.249	-0.081
. -0.641	0.259	0.036
. -0.576	0.232	-0.067
. -0.562	0.239	0.038
. -0.526	0.278	0.049
. -0.454	0.307	-0.100
. -0.410	0.393	0.091

COTE = 0.33

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
. -0.817	0.272	-0.073
. -0.684	0.187	-0.075
. -0.497	0.249	-0.132

COTE = 0.50

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
. -1.001	0.120	-0.075
. -0.684	0.167	-0.113
. -0.562	0.171	-0.107
. -0.511	0.222	-0.174

COTE = 0.67

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
. -0.994	0.104	-0.123
. -0.770	0.142	-0.142
. -0.659	0.129	-0.154
. -0.504	0.150	-0.215
. -0.400	0.171	-0.297

COTE = 0.83

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
. -1.044	0.075	-0.120
. -0.994	0.099	-0.127
. -0.810	0.051	-0.131
. -0.810	0.088	-0.159
. -0.695	0.095	-0.178
. -0.601	0.111	-0.237

TRANCHES VERTICALES

ABSCISSE = -0.33 DEBIT = 0.140 V MOYENNE = 0.171

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.634	0.171	-0.297

ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.185 V MOYENNE = 0.217

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
. 0.101	0.278	0.049
. 0.166	0.239	0.038
. 0.230	0.307	-0.100
. 0.338	0.249	-0.132
. 0.446	0.171	-0.107
. 0.479	0.222	-0.174
. 0.680	0.150	-0.215

DATE =1,25

TRANCHES VERTICALES			TRANCHES HORIZONTALES		
ABSCISSE = 0, DEBIT = 0.271 V MOYENNE = 0.471			COTE = 0.17		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.378	0.471	-0.272	-1.040	0.161	-0.011
			-0.965	0.180	-0.025
			-0.958	0.201	-0.007
			-0.634	0.232	-0.067
			-0.626	0.259	-0.041
			-0.500	0.256	-0.054
			-0.482	0.282	-0.015
			-0.396	0.317	-0.056
			-0.371	0.502	-0.044
			-0.191	0.436	-0.077
			-0.162	0.430	-0.107
ABSCISSE = -0.17 DEBIT = 0.256 V MOYENNE = 0.371			COTE = 0.33		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.148	0.436	-0.077	-1.037	0.157	-0.036
0.227	0.430	-0.107	-0.864	0.267	-0.092
0.641	0.266	-0.275	-0.612	0.284	-0.103
			-0.468	0.303	-0.110
			-0.457	0.284	-0.103
			-0.266	0.398	-0.145
			-0.083	0.616	-0.249
			0.061	0.471	-0.272
ABSCISSE = -0.33 DEBIT = 0.258 V MOYENNE = 0.334			COTE = 0.50		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.137	0.317	-0.056	-0.965	0.142	-0.076
0.151	0.502	-0.044	-0.810	0.207	-0.125
0.583	0.247	-0.207	-0.594	0.259	-0.156
0.601	0.247	-0.207	-0.497	0.264	-0.147
			-0.450	0.242	-0.145
			-0.414	0.264	-0.147
			-0.259	0.325	-0.203
			-0.086	0.391	-0.208
ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.222 V MOYENNE = 0.273			COTE = 0.67		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.072	0.361	-0.038	-0.490	0.216	-0.181
0.108	0.282	-0.015	-0.374	0.247	-0.207
0.144	0.256	-0.054	-0.202	0.266	-0.275
0.270	0.284	-0.103			
0.320	0.303	-0.110			
0.421	0.380	-0.228			
0.450	0.242	-0.145			
0.486	0.264	-0.147			
0.576	0.192	-0.179			
0.594	0.270	-0.211			
0.648	0.216	-0.181			
ABSCISSE = -0.75 DEBIT = 0.222 V MOYENNE = 0.273			COTE = 0.83		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.072	0.361	-0.038	-0.979	0.101	-0.150
0.108	0.282	-0.015	-0.871	0.149	-0.190
0.144	0.256	-0.054	-0.774	0.110	-0.169
0.270	0.284	-0.103	-0.745	0.109	-0.145
0.320	0.303	-0.110			
0.421	0.380	-0.228			
0.450	0.242	-0.145			
0.486	0.264	-0.147			
0.576	0.192	-0.179			
0.594	0.270	-0.211			
0.648	0.216	-0.181			

DATE = 1.43

TRANCHES VERTICALES

ABSCISSE = -0.33	DEBIT = 0.280	V MOYENNE = 0.380
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.324	0.322	-0.117
0.432	0.440	-0.244

ABSCISSE = -0.50	DEBIT = 0.145	V MOYENNE = 0.185
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.684	0.185	-0.185

TRANCHES HORIZONTALES

COTE = 0.17		
ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-0.630	0.301	-0.032
-0.583	0.341	-0.036

COTE = 0.33		
ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-0.655	0.235	-0.058
-0.400	0.322	-0.117

COTE = 0.50		
ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-0.857	0.144	-0.073
-0.806	0.219	-0.102

COTE = 0.67		
ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-0.968	0.127	-0.099
-0.752	0.175	-0.136
-0.486	0.185	-0.185
-0.425	0.180	-0.162

COTE = 0.83		
ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-1.058	0.119	-0.137
-1.015	0.114	-0.141
-0.871	0.149	-0.190
-0.810	0.148	-0.165

DATE = 1.61

TRANCHES VERTICALES

ABSCISSE = -0.17 DEBIT = 0.325 V MOYENNE = 0.510

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• 0.331	0.523	-0.150
• 0.396	0.473	-0.172
• 0.407	0.398	-0.194
• 0.407	0.498	-0.162

ABSCISSE = -0.33 DEBIT = 0.236 V MOYENNE = 0.335

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• 0.101	0.341	-0.036
• 0.103	0.262	-0.009
• 0.313	0.379	-0.138
• 0.385	0.292	-0.136
• 0.418	0.374	-0.151
• 0.630	0.328	-0.197

ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.266 V MOYENNE = 0.346

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• 0.126	0.301	-0.032
• 0.151	0.240	-0.025
• 0.196	0.275	-0.063
• 0.295	0.458	-0.072
• 0.374	0.263	-0.101
• 0.396	0.349	-0.100
• 0.472	0.453	-0.221
• 0.626	0.397	-0.239
• 0.684	0.274	-0.206

TRANCHES HORIZONTALES

COTE = 0.17

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• -0.972	0.219	-0.031
• -0.547	0.240	-0.025
• -0.522	0.275	-0.063
• -0.497	0.301	-0.032
• -0.360	0.341	-0.036
• -0.342	0.262	-0.009
• -0.263	0.418	-0.066
• -0.083	0.463	0.
• 0.094	0.377	-0.066
• 0.367	0.598	-0.084

COTE = 0.33

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• -0.997	0.153	-0.050
• -0.958	0.253	-0.068
• -0.670	0.254	-0.063
• -0.619	0.286	-0.098
• -0.562	0.263	-0.101
• -0.540	0.349	-0.100
• -0.493	0.458	-0.072
• -0.349	0.379	-0.138
• -0.346	0.292	-0.136
• -0.220	0.473	-0.172
• -0.148	0.523	-0.150

COTE = 0.50

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• -0.997	0.198	-0.139
• -0.997	0.194	-0.107
• -0.853	0.314	-0.181
• -0.482	0.453	-0.221
• -0.090	0.405	-0.225
• 0.115	0.639	-0.298

COTE = 0.67

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• -0.936	0.190	-0.149
• -0.864	0.170	-0.142
• -0.544	0.274	-0.206
• -0.490	0.397	-0.239
• -0.277	0.328	-0.197

COTE = 0.83

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• -1.058	0.119	-0.137
• -1.033	0.137	-0.147
• -1.026	0.106	-0.122
• -1.001	0.135	-0.150
• -0.936	0.167	-0.145
• -0.929	0.140	-0.145

COTE = 1.00

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• -0.828	0.140	-0.145

DATE = 179

TRANCHES VERTICALES

ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.263 V MOYENNE = 0.366

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• 0.126	0.361	-0.038
• 0.252	0.493	-0.105
• 0.414	0.379	-0.138
• 0.518	0.285	-0.151
• 0.605	0.294	-0.176

TRANCHES HORIZONTALES

COTE = 0.17

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• -0.936	0.276	-0.123
• -0.468	0.361	-0.038

COTE = 0.33

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• -0.637	0.332	-0.083

TRANCHES HORIZONTALES

COTE = 0.50

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• -0.504	0.285	-0.151
• -0.428	0.314	-0.181

COTE = 0.67

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• -0.943	0.188	-0.152
• -0.835	0.269	-0.243
• -0.792	0.215	-0.150
• -0.490	0.294	-0.176

COTE = 0.83

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• -1.159	0.126	-0.130
• -1.055	0.130	-0.126
• -1.008	0.171	-0.171

COTE = 1.00

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• -0.828	0.140	-0.145

DATE = 197

TRANCHES VERTICALES

ABSCISSE = 0. DEBIT = 0.319 V MOYENNE = 0.595

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• 0.281	0.655	-0.115
• 0.432	0.476	-0.164

ABSCISSE = -0.17 DEBIT = 0.280 V MOYENNE = 0.462

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• 0.083	0.403	-0.007
• 0.270	0.497	-0.079
• 0.461	0.536	-0.174
• 0.562	0.389	-0.165

ABSCISSE = -0.33 DEBIT = 0.235 V MOYENNE = 0.362

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• 0.252	0.296	-0.063
• 0.256	0.460	-0.056
• 0.504	0.386	-0.172
• 0.562	0.371	-0.157

ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.231 V MOYENNE = 0.329

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• 0.238	0.316	-0.062
• 0.436	0.374	-0.151
• 0.446	0.310	-0.089
• 0.587	0.345	-0.112
• 0.612	0.329	-0.153

TRANCHES HORIZONTALES

COTE = 0.17

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• -0.997	0.238	-0.042
• -0.889	0.241	-0.021
• 0.094	0.723	-0.051
• 0.281	0.840	-0.103

TRANCHES HORIZONTALES

COTE = 0.33

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• -1.048	0.218	-0.042
• -1.008	0.292	-0.078
• -0.792	0.471	-0.109
• -0.720	0.277	-0.054
• -0.205	0.497	-0.079
• 0.058	0.655	-0.115
• 0.299	0.655	-0.115

COTE = 0.50

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• -1.022	0.179	-0.091
• -0.925	0.233	-0.119
• -0.792	0.350	-0.156
• -0.544	0.310	-0.089
• -0.457	0.374	-0.151
• -0.432	0.324	-0.111
• -0.281	0.371	-0.157
• -0.277	0.386	-0.172
• -0.266	0.473	-0.172
• -0.205	0.389	-0.165
• -0.133	0.536	-0.174

COTE = 0.67

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• -1.008	0.177	-0.133
• -0.929	0.185	-0.185
• -0.846	0.209	-0.158
• -0.842	0.212	-0.154
• -0.436	0.329	-0.153

COTE = 0.83

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
• -1.055	0.130	-0.126

DATE = 2.14

TRANCHES VERTICALES			TRANCHES HORIZONTALES		
ABSCISSE = -0.33 DEBIT = 0.221 V MOYENNE = 0.342			COTE = 0.17		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.079	0.342	-0.024	-0.482	0.301	-0.021
			-0.072	0.439	-0.062
ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.216 V MOYENNE = 0.319			COTE = 0.33		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.137	0.301	-0.021	-1.026	0.232	-0.067
0.468	0.334	-0.142			
ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.216 V MOYENNE = 0.319			COTE = 0.50		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.137	0.301	-0.021	-0.846	0.326	-0.106
0.468	0.334	-0.142	-0.695	0.253	-0.124
			-0.515	0.334	-0.142
			-0.414	0.365	-0.170
ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.216 V MOYENNE = 0.319			COTE = 0.67		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.137	0.301	-0.021	-1.008	0.177	-0.133
0.468	0.334	-0.142	-0.947	0.190	-0.114
			-0.900	0.242	-0.145
			-0.774	0.251	-0.169
			-0.684	0.290	-0.181
			-0.623	0.294	-0.176

DATE = 2.32

TRANCHES VERTICALES			TRANCHES HORIZONTALES		
ABSCISSE = -0.17 DEBIT = 0.279 V MOYENNE = 0.489			COTE = 0.17		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.234	0.442	-0.031	-1.051	0.281	-0.025
0.432	0.469	-0.117	-0.904	0.260	-0.032
0.490	0.655	-0.200	-0.774	0.301	-0.026
			-0.468	0.397	-0.070
			-0.256	0.342	-0.024
			0.288	1.166	-0.082
			0.691	1.005	-0.070
ABSCISSE = -0.33 DEBIT = 0.320 V MOYENNE = 0.518			COTE = 0.33		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.288	0.554	-0.108	-1.015	0.350	-0.094
0.396	0.530	-0.122	-0.792	0.335	-0.071
0.468	0.448	-0.120	-0.479	0.393	-0.091
			-0.414	0.409	-0.109
			-0.371	0.530	-0.122
			-0.284	0.554	-0.108
			0.097	0.640	-0.079
			0.205	0.738	-0.104
ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.257 V MOYENNE = 0.389			COTE = 0.50		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.223	0.397	-0.070	-0.835	0.318	-0.128
0.389	0.393	-0.091	-0.684	0.320	-0.123
0.421	0.414	-0.159	-0.608	0.435	-0.158
0.454	0.405	-0.124	-0.547	0.349	-0.100
0.522	0.349	-0.100	-0.508	0.371	-0.157
0.565	0.371	-0.157	-0.475	0.405	-0.124
			-0.295	0.448	-0.120
			-0.223	0.655	-0.200
ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.257 V MOYENNE = 0.389			COTE = 0.67		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.223	0.397	-0.070	-0.623	0.294	-0.176
0.389	0.393	-0.091			
0.421	0.414	-0.159			
0.454	0.405	-0.124			
0.522	0.349	-0.100			
0.565	0.371	-0.157			

DATE = 2.50

TRANCHES VERTICALES

ABSCISSE = -0.33 DEBIT = 0.268 V MOYENNE = 0.438
 COTE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 0.414 0.438 -0.151

ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.237 V MOYENNE = 0.366
 COTE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 0.259 0.355 -0.075
 0.486 0.416 -0.152
 0.587 0.347 -0.162
 0.601 0.313 -0.139

TRANCHES HORIZONTALES

COTE = 0.17
 ABSCISSE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 -0.594 0.361 -0.032

TRANCHES HORIZONTALES

COTE = 0.33
 ABSCISSE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 -1.037 0.255 -0.059
 -0.922 0.294 -0.068

COTE = 0.50
 ABSCISSE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 -1.015 0.223 -0.094
 -0.857 0.276 -0.123
 -0.576 0.339 -0.130
 -0.508 0.371 -0.157
 -0.493 0.416 -0.152

COTE = 0.67
 ABSCISSE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 -1.033 0.206 -0.161
 -1.026 0.233 -0.119
 -1.015 0.267 -0.142
 -0.796 0.267 -0.142
 -0.691 0.305 -0.155
 -0.666 0.297 -0.171
 -0.493 0.313 -0.139

DATE = 2.68

TRANCHES VERTICALES

ABSCISSE = 0. DEBIT = 0.309 V MOYENNE = 0.763
 COTE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 0.169 0.745 -0.
 0.209 0.644 -0.022
 0.432 0.864 -0.199

ABSCISSE = -0.17 DEBIT = 0.277 V MOYENNE = 0.474
 COTE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 0.086 0.443 -0.015
 0.486 0.503 -0.144

ABSCISSE = -0.33 DEBIT = 0.278 V MOYENNE = 0.425
 COTE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 0.090 0.504 -0.009
 0.166 0.443 -0.023
 0.252 0.334 -0.077
 0.288 0.396 -0.077
 0.504 0.424 -0.130
 0.572 0.405 -0.225

ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.299 V MOYENNE = 0.460
 COTE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 0.144 0.419 -0.059
 0.306 0.583 -0.041
 0.468 0.432 -0.100
 0.562 0.407 -0.117

TRANCHES HORIZONTALES

COTE = 0.17
 ABSCISSE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 -1.127 0.242 -0.008
 -0.997 0.257 -0.050
 -0.889 0.241 -0.017
 -0.529 0.419 -0.059
 -0.288 0.443 -0.023
 -0.266 0.503 -0.018
 0.050 0.745 -0.
 0.050 0.644 -0.022
 0.151 0.841 -0.088
 1.019 1.068 -0.

COTE = 0.33
 ABSCISSE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 -1.048 0.236 -0.050
 -0.799 0.471 -0.109
 -0.720 0.297 -0.058
 -0.698 0.456 -0.080
 -0.454 0.583 -0.041
 -0.385 0.396 -0.077

COTE = 0.50
 ABSCISSE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 -1.026 0.211 -0.117
 -0.925 0.231 -0.123
 -0.788 0.310 -0.145
 -0.601 0.310 -0.145
 -0.497 0.407 -0.117
 -0.461 0.432 -0.100
 -0.371 0.424 -0.130
 -0.263 0.514 -0.177
 -0.216 0.503 -0.144

COTE = 0.67
 ABSCISSE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 -1.094 0.209 -0.121
 -1.033 0.206 -0.161
 -1.008 0.190 -0.149
 -0.882 0.251 -0.169
 -0.846 0.190 -0.149
 -0.608 0.270 -0.176

DATE = 2.86

TRANCHES VERTICALES			TRANCHES HORIZONTALES		
ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.271 V MOYENNE = 0.443			COTE = 0.17		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.421	0.443	-0.135	-0.598	0.339	-0.048
ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.271 V MOYENNE = 0.443			COTE = 0.33		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.421	0.443	-0.135	-0.619	0.410	-0.102
ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.271 V MOYENNE = 0.443			COTE = 0.50		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.421	0.443	-0.135	-1.026	0.272	-0.073
			-0.828	0.345	-0.112
			-0.641	0.362	-0.125
ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.271 V MOYENNE = 0.443			COTE = 0.67		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.421	0.443	-0.135	-1.008	0.190	-0.149
			-0.738	0.292	-0.136

DATE = 3.04

TRANCHES VERTICALES			TRANCHES HORIZONTALES		
ABSCISSE = 0. DEBIT = 0.321 V MOYENNE = 0.637			COTE = 0.17		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.432	0.637	-0.101	-1.080	0.260	-0.027
			-0.828	0.382	-0.027
			-0.630	0.422	-0.030
			-0.497	0.422	-0.022
			-0.068	0.564	-0.010
			0.194	0.544	-0.019
			0.317	0.744	-0.039
			0.540	0.942	-0.099
			0.666	0.764	-0.040
			0.702	1.148	-0.040
			1.109	0.865	-0.045
			1.332	0.926	-0.032
ABSCISSE = 0. DEBIT = 0.321 V MOYENNE = 0.637			COTE = 0.33		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.432	0.637	-0.101	-0.990	0.334	-0.077
			-0.767	0.355	-0.075
			-0.526	0.436	-0.077
			-0.511	0.473	-0.101
			-0.421	0.478	-0.076
			-0.259	0.523	-0.027
			-0.230	0.473	-0.101
			0.169	0.955	-0.151
ABSCISSE = -0.17 DEBIT = 0.296 V MOYENNE = 0.507			COTE = 0.50		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.335	0.473	-0.101	-1.015	0.286	-0.098
0.407	0.569	-0.131	-0.864	0.328	-0.100
0.450	0.530	-0.122	-0.702	0.364	-0.118
0.522	0.583	-0.031	-0.641	0.400	-0.138
			-0.475	0.539	-0.165
			-0.410	0.473	-0.101
			-0.220	0.583	-0.031
			-0.194	0.530	-0.122
ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.280 V MOYENNE = 0.469			COTE = 0.67		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.108	0.422	-0.022	-1.069	0.227	-0.131
0.335	0.473	-0.101	-0.994	0.280	-0.113
0.378	0.436	-0.077	-0.738	0.292	-0.136
0.421	0.456	-0.080			
0.446	0.539	-0.165			

DATE = 3.22

TRANCHES VERTICALES			TRANCHES HORIZONTALES		
ABSCISSE = 0.	DEBIT = 0.218	V MOYENNE = 0.434	COTE = 0.17		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.450	0.434	-0.092	-0.799	0.442	-0.039
			-0.439	0.461	-0.048
			-0.263	0.322	-0.022
ABSCISSE = -0.50	DEBIT = 0.256	V MOYENNE = 0.440	COTE = 0.33		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.202	0.461	-0.048	-0.565	0.420	-0.052
0.270	0.420	-0.052	0.090	0.539	-0.076
0.461	0.428	-0.115	0.367	0.458	-0.072
			COTE = 0.50		
			ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
			-0.986	0.282	-0.108
			-0.482	0.428	-0.115
			-0.058	0.434	-0.092
			COTE = 0.67		
			ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
			-1.069	0.227	-0.131

DATE = 3.40

TRANCHES VERTICALES			TRANCHES HORIZONTALES		
ABSCISSE = 0.	DEBIT = 0.260	V MOYENNE = 0.530	COTE = 0.17		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.313	0.520	-0.064	-1.037	0.302	-0.011
0.407	0.557	-0.088	-1.001	0.362	-0.013
			-0.731	0.361	-0.038
			-0.468	0.461	-0.048
			-0.367	0.463	-0.008
			0.140	0.462	-0.040
			0.191	0.543	-0.038
ABSCISSE = -0.17	DEBIT = 0.294	V MOYENNE = 0.556	COTE = 0.33		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.166	0.463	-0.008	-0.954	0.334	-0.077
0.299	0.458	-0.072	-0.558	0.397	-0.070
0.335	0.541	-0.057	-0.360	0.458	-0.072
0.468	0.554	-0.108	-0.346	0.541	-0.057
			-0.252	0.561	-0.059
			0.007	0.520	-0.064
			0.086	0.581	-0.061
			0.360	0.698	-0.098
ABSCISSE = -0.33	DEBIT = 0.271	V MOYENNE = 0.498	COTE = 0.50		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.155	0.461	-0.048	-0.986	0.282	-0.108
0.342	0.397	-0.070	-0.835	0.362	-0.125
0.461	0.428	-0.115	-0.554	0.428	-0.115
			-0.313	0.554	-0.108
ABSCISSE = -0.50	DEBIT = 0.248	V MOYENNE = 0.434			

DATE = 3.57

TRANCHES VERTICALES			TRANCHES HORIZONTALES		
ABSCISSE = -0.17	DEBIT = 0.297	V MOYENNE = 0.577	COTE = 0.17		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.306	0.577	-0.091	-1.044	0.261	-0.018
			-0.655	0.523	-0.037
ABSCISSE = -0.33	DEBIT = 0.229	V MOYENNE = 0.434	COTE = 0.33		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.425	0.434	-0.092	-1.044	0.279	-0.044
			-0.792	0.356	-0.069
			-0.781	0.315	-0.067
			-0.677	0.374	-0.080
			-0.230	0.577	-0.091
			0.396	0.680	-0.083
ABSCISSE = -0.50	DEBIT = 0.228	V MOYENNE = 0.415	COTE = 0.50		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.076	0.402	-0.021	-0.878	0.335	-0.071
0.504	0.428	-0.115	-0.835	0.362	-0.125
			-0.641	0.389	-0.104
			-0.446	0.428	-0.115

DATE = 3.75

TRANCHES VERTICALES			TRANCHES HORIZONTALES		
ABSCISSE = 0.	DEBIT = 0.293	V MOYENNE = 0.614	COTE = 0.17		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.112	0.664	-0.023	-0.929	0.363	-0.006
0.385	0.560	-0.069	-0.878	0.422	-0.022
0.425	0.560	-0.069	-0.770	0.603	-0.042
			-0.576	0.441	-0.046
			-0.508	0.463	-0.016
			-0.392	0.563	-0.039
			-0.342	0.401	-0.042
			-0.320	0.740	-0.091
			-0.187	0.523	-0.018
			0.032	0.664	-0.023
			0.083	0.584	0.020
			0.432	0.744	-0.052
ABSCISSE = -0.17	DEBIT = 0.270	V MOYENNE = 0.534	COTE = 0.33		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.151	0.523	-0.018	-0.900	0.435	-0.085
0.317	0.543	-0.038	-0.796	0.473	-0.101
			-0.720	0.336	-0.065
			-0.608	0.479	-0.067
			-0.587	0.458	-0.072
			-0.468	0.456	-0.080
			-0.407	0.358	-0.057
			-0.385	0.441	-0.046
			-0.378	0.500	-0.061
			-0.155	0.543	-0.038
			-0.014	0.560	-0.069
			0.230	0.623	-0.044
			0.558	0.703	-0.049
ABSCISSE = -0.33	DEBIT = 0.250	V MOYENNE = 0.480	COTE = 0.50		
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE	ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.151	0.401	-0.042	-0.929	0.335	-0.071
0.198	0.563	-0.039	-0.907	0.345	-0.112
0.205	0.740	-0.091	-0.727	0.389	-0.104
0.270	0.441	-0.046	-0.493	0.478	-0.076
0.317	0.500	-0.061	-0.446	0.428	-0.115
ABSCISSE = -0.50	DEBIT = 0.247	V MOYENNE = 0.457			
COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE			
0.112	0.463	-0.016			
0.378	0.456	-0.080			
0.410	0.394	-0.084			
0.486	0.478	-0.076			

DATE = 3.93

TRANCHES VERTICALES

ABSCISSE = -0.17 DEBIT = 0.260 V MOYENNE = 0.536
 COTE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 0.378 0.536 -0.094

ABSCISSE = -0.33 DEBIT = 0.243 V MOYENNE = 0.477
 COTE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 • 0.072 0.443 -0.
 0.317 0.497 -0.079

ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.255 V MOYENNE = 0.489
 COTE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 • 0.450 0.489 -0.122

TRANCHES HORIZONTALES

COTE = 0.17
 ABSCISSE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 -1.044 0.282 -0.015

COTE = 0.33
 ABSCISSE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 • -0.374 0.497 -0.079
 -0.115 0.536 -0.094

COTE = 0.50
 ABSCISSE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 • -0.914 0.453 -0.096
 -0.907 0.345 -0.112
 -0.781 0.371 -0.093
 -0.472 0.489 -0.122

DATE = 4.11

TRANCHES VERTICALES

ABSCISSE = 0. DEBIT = 0.253 V MOYENNE = 0.542
 COTE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 0.266 0.503 -0.026
 • 0.295 0.543 -0.038
 0.378 0.803 -0.070
 0.403 0.501 -0.053

ABSCISSE = -0.17 DEBIT = 0.254 V MOYENNE = 0.529
 COTE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 • 0.109 0.463 -0.008
 0.162 0.765 -0.027
 0.245 0.503 -0.026

ABSCISSE = -0.33 DEBIT = 0.264 V MOYENNE = 0.529
 COTE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 • 0.227 0.520 -0.064
 0.378 0.557 -0.088
 • 0.400 0.534 -0.104

ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.215 V MOYENNE = 0.420
 COTE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 • 0.234 0.381 -0.033
 0.252 0.401 -0.042
 0.324 0.399 -0.056
 0.331 0.537 -0.085
 • 0.432 0.459 -0.064

TRANCHES HORIZONTALES

COTE = 0.17
 ABSCISSE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 • -0.648 0.503 -0.018
 -0.425 0.422 -0.022
 -0.310 0.520 -0.064
 • -0.180 0.463 -0.008
 -0.130 0.765 -0.027
 • 0.587 0.905 -0.047

COTE = 0.33
 ABSCISSE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 -1.087 0.377 -0.066
 -0.799 0.377 -0.066
 • -0.457 0.537 -0.085
 • -0.446 0.399 -0.056
 -0.349 0.534 -0.104
 -0.281 0.557 -0.088
 -0.025 0.803 -0.070
 • 0.047 0.543 -0.038
 • 0.461 0.662 -0.058
 0.547 0.441 -0.046

COTE = 0.50
 ABSCISSE PARTICULE V HORIZONTALE V VERTICALE
 • -0.774 0.391 -0.097
 • -0.677 0.451 -0.104
 -0.472 0.489 -0.122

DATE = 4.47

TRANCHES VERTICALES

ABSCISSE = 0. DEBIT = 0.236 V MOYENNE = 0.525

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.108	0.462	0.040
0.238	0.564	-0.020

ABSCISSE = -0.17 DEBIT = 0.238 V MOYENNE = 0.509

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.252	0.523	-0.027
0.378	0.479	-0.067

ABSCISSE = -0.33 DEBIT = 0.251 V MOYENNE = 0.528

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.162	0.443	-0.008
0.216	0.462	-0.032
0.230	0.482	-0.042
0.288	0.621	-0.065

ABSCISSE = -0.50 DEBIT = 0.211 V MOYENNE = 0.435

COTE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
0.108	0.504	0.009
0.281	0.361	-0.032
0.403	0.442	-0.031
0.410	0.419	-0.059
0.414	0.397	-0.070

TRANCHES HORIZONTALES

COTE = 0.17

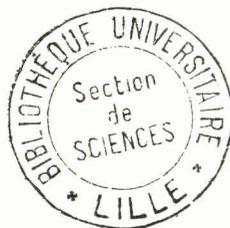
ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-0.569	0.302	0.011
-0.536	0.504	0.009
-0.382	0.462	-0.032
-0.371	0.443	-0.008
-0.324	0.482	-0.042
0.011	0.462	0.040
0.220	0.503	-0.018
0.230	0.584	-0.010

COTE = 0.33

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-0.558	0.361	-0.032
-0.353	0.621	-0.065
-0.209	0.479	-0.067
-0.086	0.622	-0.054
0.122	0.920	-0.113
0.259	0.644	-0.034
0.486	0.663	-0.046
0.698	0.805	-0.042

COTE = 0.50

ABSCISSE PARTICULE	V HORIZONTALE	V VERTICALE
-0.677	0.451	-0.104



DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

VISUALISATION PAR CORPS ENTRAÎNÉS

Vu et approuvé :

Lille, le 22 février 1966

Le Doyen de la Faculté des Sciences de Lille,

Pour le Doyen empêché

L'Assesseur,

J. HEUBEL.

Vu

et Permis d'imprimer :

Lille, le 28 février 1966

Le Recteur de l'Académie
de Lille,

Pour le Recteur empêché

Le Vice-Président du
Conseil de l'Université,

J. TILLIEU