



HAL
open science

Le franchissement des seuils en enrochements par les poissons migrateurs : étude expérimentale

M. Larinier, Jacques Chorda, O. Ferlin

► **To cite this version:**

M. Larinier, Jacques Chorda, O. Ferlin. Le franchissement des seuils en enrochements par les poissons migrateurs : étude expérimentale. RAPPORT GHAAPPE 95/05 - HYDRE 161, irstea. 1995, pp.80. hal-02575575

HAL Id: hal-02575575

<https://hal.inrae.fr/hal-02575575v1>

Submitted on 23 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INSTITUT DE MÉCANIQUE DES FLUIDES DE TOULOUSE

Unité de Recherche Associée au CNRS - N° D 0005



**Groupe d'Hydraulique Appliquée aux Aménagements Piscicoles
et à la Protection de l'Environnement**

Institution Interdépartementale pour l'Aménagement hydraulique du bassin de l'Adour

LE FRANCHISSEMENT DES SEUILS EN ENROCHEMENTS

PAR LES POISSONS MIGRATEURS

ETUDE EXPERIMENTALE

**M. LARINIER
J. CHORDA
O. FERLIN**

RAPPORT GHAAPPE 95/05 - HYDRE 161

NOVEMBRE 1995

LE FRANCHISSEMENT DES SEUILS EN ENROCHEMENTS

PAR LES POISSONS MIGRATEURS

ETUDE EXPERIMENTALE

M. LARINIER - J. CHORDA - O. FERLIN

RAPPORT GHAAPPE 95/05 - HYDRE 161

RESUME

A partir des performances de nage des différentes espèces de poissons migrateurs, la faisabilité de seuils en enrochements franchissables par conception a été étudiée. Les conditions hydrauliques sur une rampe en enrochements de pente variable ont été précisées en fonction du débit. Les essais ont mis en évidence une forte variabilité spatiale des vitesses et tirants d'eau. Ils ont permis de déterminer pour plusieurs groupes d'espèces des pentes et des chutes admissibles ainsi qu'une plage de franchissabilité en terme de débit unitaire. Pour les grands salmonidés migrateurs, principal groupe d'espèces-cible, il est préférable de limiter la pente du coursier à 10 % et la chute à 1.50 m, le domaine de franchissabilité étant de l'ordre de 500 - 1500 l/s/m. Les essais ont permis de préciser la géométrie des seuils (contre-pente amont, jointoiement des enrochements, pente transversale de la crête) ainsi que les conditions de stabilité de ces ouvrages. Pour les espèces à faibles capacité de nage, la franchissabilité de tels seuils est aléatoire et il convient de recourir à les ouvrages à pentes plus réduites telles les rivières de contournement ou à des passes à bassins classiques.

AVANT PROPOS

Cette étude a été réalisée au Laboratoire de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (Unité de Recherche Associée au C.N.R.S. - N° D 005) par le Groupe d'Hydraulique Appliquée aux Aménagements Piscicoles et à la Protection de l'Environnement.

Elle a fait l'objet d'un cofinancement par l'Institution Interdépartementale pour l'Aménagement hydraulique du bassin de l'Adour dans le cadre d'un Contrat de Collaboration de Recherche.

Ont participé à cette étude :

- Responsables scientifiques

M. LARINIER : ingénieur CSP-CEMAGREF,

J. CHORDA : ingénieur CNRS.

- Réalisation technique et essais :

O. FERLIN : ingénieur CNRS.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	1
2. CAPACITES DE NAGE DES ESPECES MIGRATRICES.....	3
3. CONCLUSIONS DE L'EXPERTISE DE PREMIERE PHASE	5
3.1 Le franchissement des rampes en enrochements par les migrateurs.....	5
3.2 Proposition de seuils franchissables par conception.....	6
4. CARACTERISTIQUES DE L'ECOULEMENT SUR UNE RAMPE EN ENROCHEMENTS DE PENTE VARIABLE	8
4.1 Protocole de mesure.....	8
4.2 Résultats expérimentaux.....	9
4.2.1 Premier niveau de jointoiment (J1)	9
4.2.2 Second niveau de jointoiment (J2)	9
4.3 Représentativité des vitesses et des tirants d'eau mesurés	10
4.4 Lois d'écoulement sur une rampe en enrochements.....	10
4.5 Premières conclusions.....	12
5. ECOULEMENT AU DESSUS D'UN SEUIL, PENTE DU COURSIER A 10 %.....	13
5.1 Le modèle	13
5.2 Relation cote amont - débit sur le seuil.....	13
5.2.1 Crête du seuil en enrochements libres, sans aucun jointoiment.....	13
5.2.2 . Crête et la partie amont à contre-pente du seuil jointoyées	14
5.3 Caractéristiques de l'écoulement dans le secteur à régime uniforme.....	15
5.4 Evolution longitudinale des tirants d'eau et des vitesses sur le coursier	15
5.5 Conditions d'écoulement dans une section en travers à régime établi	16
6. STABILITE DU SEUIL.....	17
6.1 Enrochements 1500 - 3250 Kg.....	17
6.2 Enrochements 500 - 1300 Kg.....	17
6.3 Enrochements 270 - 800 Kg	18
7. SYNTHESE DES RESULTATS ET CONCLUSIONS	19
7.1 Critères sur les capacités de nage.....	19
7.2 Caractéristiques des écoulements sur les coursiers en enrochements.....	19
7.3 Adéquation des écoulements aux différentes espèces.....	20
7.4 Dispositions constructives	21

LE FRANCHISSEMENT DES SEUILS EN ENROCHEMENTS PAR LES POISSONS MIGRATEURS

1. INTRODUCTION

Les besoins croissants en matériaux de construction et de viabilité ont entraîné dans les années 1965-1980 un développement important des exploitations de granulats dans les lits mineurs des cours d'eau, en particulier de l'Adour et du Gave de Pau ; ces exploitations ont induit de profondes nuisances et de graves déséquilibres dans la dynamique fluviale : abaissement des lignes d'eau, déstabilisation des lits, érosion des berges, ruine de certains ouvrages de protection, déchaussement des ouvrages d'art, abaissement des nappes... De très nombreux seuils en enrochements ont été installés pour tenter de redonner un profil d'équilibre aux cours d'eau, voire dans certains cas pour pouvoir poursuivre les extractions en minimisant les dégâts prévisibles. La hauteur de ces seuils peut varier de plus de 8 m sur les premiers seuils (Bours-Bazet sur l'Adour) à moins de 1.50 m sur les seuils les plus récents.

Ces seuils constituent un grave obstacle à la circulation des poissons migrateurs : l'écoulement s'effectue de manière uniforme sur toute la largeur du seuil, la crête étant le plus souvent horizontale. En eaux moyennes et hautes et lorsque les conditions thermiques sont défavorables, les vitesses peuvent devenir trop importantes pour permettre le passage du poisson, même des espèces les plus "sportives" comme le saumon. La chute ne diminue généralement que très progressivement lorsque le débit augmente, dans la mesure où les seuils "pincent" l'écoulement de façon à concentrer localement, dans une large gamme de débit, une dissipation d'énergie destinée à compenser l'abaissement de la ligne d'eau. En étiage, l'eau percole à travers les enrochements, l'épaisseur insuffisante de la lame d'eau et sa vitesse rendant alors difficile sinon impossible le passage des migrateurs, en particulier celui des individus et espèces de grande taille.

Différentes solutions ont été envisagées pour rendre ces obstacles franchissables. Sur le Gave de Pau et l'Adour, certains ouvrages ont été équipés de passes à ralentisseurs ou de passes à bassins successifs. Plusieurs seuils ont été contournés par des rivières artificielles. Certains de ces dispositifs ne sont cependant adaptés ni aux espèces présentes, ni aux conditions hydrauliques (variations des niveaux amont et aval, vitesses...) caractérisant ces ouvrages. D'autres dispositifs, bien qu'hydrauliquement efficaces, demeurent cependant très peu attractifs, de par leur implantation ou la faiblesse de leur débit, les migrateurs ayant très peu de chances d'en trouver l'entrée. Certains ouvrages posent enfin des problèmes d'entretien (embâcles, engrèvement) tels que leur efficacité s'en trouve considérablement réduite.

L'effet cumulatif sur la circulation des poissons migrateurs de ces seuils et des autres obstacles comme les micro centrales risquant de réduire à néant les importants efforts financiers entrepris par l'Etat et la Région pour restaurer ces espèces dans le bassin de l'Adour, il est apparu indispensable d'étudier la faisabilité d'un type de seuil franchissable par les poissons *par conception* sans qu'il soit nécessaire d'y installer un dispositif particulier.

Cette étude a été menée en deux phases.

Dans une première phase, une expertise des différents dispositifs équipant les seuils situés sur le Gave de Pau et l'Adour a été effectuée. Quelques solutions intéressantes de seuils ou d'aménagements rustiques prenant en compte l'aspect franchissement du poisson, solutions tirées de l'expérience française ou étrangère ont été présentées. Enfin, ont été définis, à partir des capacités de nage des espèces migratrices concernées, des critères de dimensionnement des seuils franchissables par conception. Les propositions reposent sur l'analyse des régimes d'écoulements uniformes sur des rampes en enrochements à partir de lois de rugosités globales (rapport GHAPPE 93/05).

Etant donné la complexité de ce type d'écoulement à fortes pente et rugosité, caractérisé par un faible rapport tirant d'eau/dimension des rugosités, il était indispensable de confronter les résultats de l'analyse à des essais sur modèle physique.

Les essais sur modèle réduit font l'objet de la deuxième phase de l'étude. Ils devaient permettre de mettre en évidence l'influence de la pente du coursier sur les vitesses et les tirants d'eau (définition de lois de rugosité pour de faibles rapports tirant d'eau sur dimension des rugosités) et d'affiner la géométrie des seuils.

Après un rappel des capacités de nage des espèces migratrices, on reprendra dans la seconde partie de ce rapport les principales conclusions de la première phase de l'étude ayant contribué à la définition des essais sur modèle (rapport GHAPPE 93/05).

Dans les trois parties suivantes seront présentés les principaux résultats des essais sur modèle.

On définira ensuite les critères de dimensionnement (pente du coursier, hauteur de chute, débits unitaires) des seuils franchissables par conception, ainsi que la limite de tels seuils en fonction des espèces considérées.

2. CAPACITES DE NAGE DES ESPECES MIGRATRICES

La notion de seuil franchissable *par conception* est étroitement liée au comportement migratoire et à la capacité de nage des espèces migratrices.

La capacité de nage des migrateurs peut s'exprimer en terme de vitesse de nage et d'endurance, temps pendant lequel le poisson peut soutenir cette vitesse de nage.

On distingue chez le poisson plusieurs niveaux d'activité de nage :

- l'activité de sprint ou de pointe, résultant d'un effort intense et ne pouvant être maintenu au delà d'un certain temps, de quelques secondes à quelques dizaines de secondes suivant l'espèce et la taille de l'individu,

- l'activité soutenue, activité de nage pouvant être maintenue pendant plusieurs minutes, mais entraînant à terme la fatigue du poisson,

- l'activité de croisière, susceptible d'être maintenue pendant des heures sans engendrer de modifications physiologiques profondes de l'organisme du poisson.

Les capacités de nage sont fonction de nombreux facteurs, en particulier de l'espèce considérée, de la taille de l'individu, de son état physiologique ainsi que de la température de l'eau (Beach, 1984 ; Larinier, 1993).

Les vitesses maximales de nage sont de 6 m/s à plus de 8 m/s pour le saumon, de 3 m/s à 4 m/s pour la truite, de 4 m/s à plus de 5 m/s pour l'aloise dans les conditions thermiques favorables. Ces vitesses maximales de nage peuvent varier considérablement (dans un rapport de 1 à 2) suivant la température de l'eau.

Les vitesses de croisière de la majorité des espèces se situeraient entre 2 et 3 L/seconde, L étant la longueur du poisson. Pour les salmonidés, elle atteindrait 3 à 4 L/seconde. On peut admettre, pour le saumon, des vitesses de croisière de l'ordre de 2 m/s à 3 m/s ; pour la truite, elles se situeraient entre 0.50 m/s et 1 m/s, suivant la taille de l'individu.

Les capacités de nage des poissons sont généralement présentées sous la forme de courbes plus ou moins empiriques donnant la distance maximale pouvant être parcourue par un poisson dans un écoulement de vitesse moyenne donnée (Ziemer, 1961 ; Evans, 1980 ; Larinier, 1993); ou, ce qui est équivalent, la vitesse de l'écoulement à ne pas dépasser compte tenu de la distance à franchir par le poisson.

On a vu plus haut que les capacités de nage étaient fonction de l'espèce considérée, de la taille de l'individu, de son état physiologique ainsi que de la température de l'eau. On distinguera dans la suite, plusieurs groupes d'espèces sur la base de leur capacité de nage et de leur comportement migratoire :

- 1 - grands salmonidés migrateurs (saumon, truite de mer)
- 2 - aloise
- 3 - lamproie
- 4 - truite, ombre et cyprinidés d'eau vive (réophiles)

5 - toutes les autres espèces holobiotiques limnophiles (dont le brochet, le sandre...), espèces de petite taille.

6 - anguille (civelles et anguillettes)

Il est possible de donner des ordres de grandeur de la vitesse de l'écoulement à ne pas dépasser compte tenu de la distance à franchir pour *la grande majorité* des individus d'une classe d'espèces donnée dans des conditions thermiques acceptables, mais non optimales. Cette vitesse maximale est évidemment fonction de la distance à franchir.

1. Pour le saumon et la truite de mer, on peut adopter comme vitesse maximale 4 m/s sur quelques mètres, 3.5 m/s sur 5 à 6 mètres, 3 m/s sur une dizaine de mètres et 2 m/s sur une vingtaine de mètres, cela avec un tirant d'eau *minimum* de 0.15 m à 0.20 m. Cela correspond aux capacités de nage d'un individu de 0.35-0.40 m de longueur dans des conditions thermiques acceptables (mais non optimales). Il est évident que les poissons de *taille plus importante* en bon état physiologique ou dans *des conditions thermiques optimales* posséderont des capacités de nage bien supérieures : on peut alors majorer les valeurs des vitesses précédentes de 1 m/s environ. Les grands salmonidés migrateurs peuvent d'autre part franchir un obstacle en sautant, à condition de pouvoir disposer au pied de l'obstacle des conditions lui permettant de prendre son appel (fosse d'une profondeur suffisante).

2. Pour l'alose, on peut prendre comme vitesse maximale 3.25 m/s sur quelques mètres, 3 m/s sur 5 mètres et 2.5 m/s sur une dizaine de mètres, 1.50-1.80 m/s sur une vingtaine de mètres, cela avec un tirant d'eau minimum de 0.20-0.25 m. Dans des conditions thermiques optimales et pour les individus les plus sportifs, ces chiffres peuvent être majorés de 1 m/s environ (soit respectivement 4.25 m/s, 4 m/s, 3.5 m/s, 2.5 m/s). Cette espèce ne peut franchir un obstacle en sautant comme les salmonidés.

3. La lamproie possède des caractéristiques de nage particulières : compte tenu de sa forme, elle a la possibilité de progresser à proximité du fond en profitant des zones à plus faibles vitesses, voire des zones d'eau morte. Elle peut se "ventouser" sur le substrat, ce qui lui permet de négocier des passages difficiles. On peut adopter les mêmes critères de vitesse que pour les grands salmonidés migrateurs, mais avec des tirants d'eau plus faibles (minimum 10 cm).

4. Pour la truite, l'ombre et les grands cyprinidés d'eau vive rhéophiles, on peut adopter une vitesse d'écoulement maximale de 2.5 m/s sur quelques mètres, 1.8-2 m/s sur 5-6 mètres et de 1.20 m/s sur une dizaine de mètres avec un tirant d'eau minimal de 0.10 m à 0.15 m suivant la taille de l'individu considéré. Ces capacités de nage correspondent à un individu d'une longueur voisine de 25 cm.

5. Pour les autres espèces holobiotiques (individus de petites tailles, espèces limnophiles), il est difficile de définir des critères bien précis. On peut adopter à titre conservatoire le même critère que pour les espèces de petite taille, soit une vitesse maximale de 1 à 1.5 m/s sur quelques mètres, avec un tirant d'eau minimal fonction de la taille du poisson (de 0.10 m à 0.30 m).

6. L'anguille (au stade juvénile de civelle et d'anguillette) possède des capacités de nage en terme de vitesse et d'endurance très limitées. Elle possède cependant des capacités de reptation sur des supports humides qui lui permettent de tirer parti de faibles débits sur des substrats rugueux ou revêtus de végétation pour franchir un obstacle. On peut adopter les mêmes critères que pour le groupe précédent, mais avec des tirants d'eau plus faibles.

3. CONCLUSIONS DE L'EXPERTISE DE PREMIERE PHASE

3.1 Le franchissement des rampes en enrochements par les migrateurs

Les possibilités de franchissement d'un seuil par un poisson migrateur sont fonction des vitesses de l'écoulement associées au tirant d'eau, ainsi que de la distance à franchir.

La vitesse de l'écoulement le long du coursier d'un seuil augmente de la crête vers l'aval jusqu'à ce que l'écoulement devienne uniforme, le tirant d'eau restant alors à peu près constant tout au long du coursier. Plus le coursier est rugueux et le débit unitaire (débit par mètre de largeur) faible, plus courte est la longueur d'établissement du régime uniforme.

Les vitesses de l'écoulement le long du coursier ont été estimées par la formule de Strickler, le coefficient de Strickler ayant été approché par l'expression classique

$$K = \frac{a}{D^{1/6}} \quad (\text{avec } a = 21).$$

En rapprochant les conditions hydrauliques (vitesses moyennes, tirants d'eau en fonction des débits unitaires et de la pente) sur le coursier et les capacités de nage des différentes espèces ou groupes d'espèces migratrices considérées, il devient possible d'établir un certain nombre de critères de dimensionnement pour un seuil franchissable par conception.

Le seul moyen de rendre franchissables les seuils en enrochement tels qu'ils sont conçus actuellement (enrochements jointoyés au béton, pente du coursier de l'ordre de 1/4 à 1/5) est de réduire significativement leur hauteur : les vitesses dépassent très rapidement 3.50 m/s, la plage de débit unitaire pour laquelle les vitesses et tirants d'eau restent acceptables étant très réduites (de l'ordre de 400-600 l/s/m). La distance à franchir ne doit pas excéder 5-6 mètres. La hauteur des seuils sera limitée à 1.00 à 1.20 m pour les grands salmonidés migrateurs. La plage des débits unitaires acceptables pour les truites sera encore plus réduite, pratiquement inexistante.

Pour rendre parfaitement franchissable un seuil par les truites, avec une plage suffisante sur les débits unitaires, il conviendrait :

- soit de réduire la hauteur des seuils,
- soit de réduire la pente du coursier ($\leq 10\%$). Il devient alors possible d'obtenir des conditions acceptables de passage pour des débits unitaires de l'ordre de 150 à 300 l/s/m.

Pour ces débits, le rapport tirant d'eau/dimension des rugosités étant très faible, l'écoulement se comportera comme un écoulement dans une mini-passe à bassins. Il conviendrait, pour que la rugosité joue son rôle, de ne pas trop noyer les enrochements dans le béton et de laisser la surface la plus rugueuse possible.

Si l'on considère les espèces de petite taille, leurs capacités de nage sont telles qu'elles ne pourront franchir un obstacle d'une hauteur voisine de 1.00 à 1.20 m que dans une épaisseur de lame d'eau très faible, limitant les vitesses, et à condition qu'existent des aires de repos régulièrement réparties tout au long de leur trajet. Cela ne peut se concevoir que dans une partie de seuil très faiblement alimentée (50 à 100 l/s/mètre), à pente limitée, très rugueux, les rugosités étant partiellement émergentes.

Quelle que soit l'espèce considérée, les conditions de passage acceptables ne se rencontrent que sur une plage limitée de débits unitaires. La plage est d'autre part différente suivant les capacités de nage et les tailles des espèces. Elle est d'autant plus faible que la pente du coursier est importante et que la rugosité est faible.

Il est donc fondamental de générer sur la crête du seuil, dans la gamme des débits du cours d'eau en période de migration, des débits unitaires convenant à toutes les espèces cibles : cela implique que le profil transversal de la crête d'un seuil "franchissable" par conception ne peut être horizontal.

3.2 Proposition de seuils franchissables par conception.

Les seuils doivent être franchissables :

- par les espèces cibles,
- pour les conditions hydrologiques en période de migration (ou de façon très schématique entre l'étiage et un débit correspondant à 2 fois le module interannuel environ),

Le profil transversal de la crête doit être triangulaire (et non horizontal), la pente transversale du V étant telle que le poisson dispose (dans la gamme des niveaux d'eau amont en période de migration) d'une zone dans laquelle le débit unitaire est acceptable pour permettre son franchissement. On veillera cependant à ne pas donner des valeurs trop importantes à cette pente, de façon à limiter en crue les charges et les débits unitaires sur la partie la plus basse de l'ouvrage et parallèlement à minimiser la convergence des écoulements.

On supprimera la partie horizontale de la crête en amont du coursier susceptible de mettre en vitesse l'écoulement. Le coursier sera de préférence précédé d'une partie en contre-pente (1/10 environ).

On évitera les échancrures ou les décrochements dans la crête du seuil pour éviter des discontinuités dans les conditions hydrauliques (sur les débits unitaires, donc sur les vitesses et tirants d'eau).

Une partie du débit d'étiage sera concentrée dans une partie du seuil dont la crête pourra être horizontale et d'une largeur telle que la charge soit suffisante pour permettre le passage des espèces-cibles demandant le plus fort débit unitaire.

- Seuils franchissables par les grands salmonidés migrants

Deux solutions :

a) chute 1 à 1.20 m avec une pente de coursier de 1/5, débit unitaire de 400 à 600 l/s par mètre de largeur sur la partie horizontale du seuil.

b) chute de 1.20 à 1.50 m avec une pente de coursier 1/10, débit unitaire de 300 à 700 l/s par mètre de largeur sur la partie horizontale du seuil.

- Seuils franchissables par l'alose

La solution b) précédente peut convenir à l'alose, avec des débits unitaires de 400 à 600 l/s.

- Seuils franchissables par la truite et les cyprinidés d'eau vive

- Seuils à coursier à pente continue

Chute 1 à 1.20 m, pente coursier : 1/10 et moins (de préférence 1/12), débit unitaire de 100 à 300 l/s/mètre sur la partie horizontale du seuil.

Les propositions précédentes sont basées sur les notions de tirants d'eau et de vitesses moyennes obtenues à partir de la formule de Manning-Strickler : on peut se poser la question de la signification réelle de ces notions pour l'écoulement à forte pente au dessus de macro-rugosités. C'est l'objectif essentiel de l'étude sur modèle réduit.

4. CARACTERISTIQUES DE L'ÉCOULEMENT SUR UNE RAMPE EN ENROCHEMENTS DE PENTE VARIABLE

4.1 Protocole de mesure

Dans un premier modèle, on s'est intéressé aux caractéristiques hydrauliques rencontrées sur une rampe en enrochements.

La maquette représente, à l'échelle 1/16.5, des enrochements de 400-3000 Kg correspondant à la gamme moyenne en masse utilisée sur les seuils du Gave de Pau, le rapport moyen des sphères équivalentes $\frac{D_{\max}}{D_{\min}}$ étant voisin de 2.

Les cailloux sélectionnés sur modèle ont des masses variant de 90 g à 700 g, les diamètres équivalents étant respectivement 4 cm et 8 cm, ce qui correspond sur prototype à 0.66 m et 1.32 m.

On a porté sur la figure 1 les caractéristiques granulométriques des enrochements testés sur modèle.

Les cailloux ont été disposés sur le fond d'un canal à pente variable de 0.30 m de largeur et de 5 m de longueur.

Les cailloux ont été jointoyés dans un premier temps avec de la laitance sur une hauteur de 2 cm environ, constituant le premier niveau de jointoiement (J1). Des essais similaires ont été repris avec un niveau de jointoiement plus important (J2), sur une hauteur voisine de 3 cm, ce qui correspond au noyage au 3/4 environ des blocs les plus petits.

Plusieurs pentes ont été testées : 2 %, 5 %, 10 %, 15 %. Les débits ont été mesurés à l'aide d'un déversoir triangulaire à 60°.

Les vitesses ont été mesurées avec un micro-moulinet (hélice d'un diamètre voisin de 1 cm). Les tirants d'eau ont été mesurés à l'aide d'une pointe limnimétrique.

Le rapport tirant d'eau/dimension des rugosités étant faible, il est difficile de mesurer et de définir simplement un tirant d'eau moyen ainsi qu'une vitesse débitante.

Seule une description statistique de l'écoulement peut rendre compte de la diversité du champ des vitesses et des profondeurs.

Pour chaque configuration d'écoulement (débit et pente donnée), on a effectué les mesures de vitesse et tirant d'eau sur 90 points régulièrement répartis sur une grille : sur trois profils en long distants de 10 cm, les points de mesure étaient espacés de 10 cm. Le pas de 10 cm a été choisi pour éviter de prendre plusieurs mesures au dessus d'une même aspérité ou de son environnement immédiat. La vitesse a été prise à environ 0.4 fois la profondeur à partir du fond sur la verticale de mesure.

Dans la suite, tous les résultats expérimentaux seront exprimés en valeurs ouvrage.

4.2 Résultats expérimentaux

4.2.1 Premier niveau de jointoiment (J1)

On a porté dans le tableau 1 les données statistiques caractérisant les distributions des vitesses et des tirants d'eau mesurés au sein de l'écoulement : moyenne, médiane, mode, premier et troisième quartile, écart-type, valeurs maximales et minimales mesurées.

Les distributions des vitesses, des tirants d'eau et des nombres de Froude (V/\sqrt{gH}) ont été représentées sous forme de diagramme de boîtes de dispersion¹ (figures 2 à 4).

On a porté dans l'annexe A les histogrammes de fréquence de ces mêmes distributions.

Les résultats montrent une grande dispersion des distributions, que ce soit des vitesses ou des tirants d'eau, dispersion ayant tendance à augmenter avec la pente.

Comme cela était prévisible, les vitesses augmentent rapidement avec la pente. Les nombres de Froude calculés avec les valeurs des vitesses et des tirants d'eau mesurés ponctuellement restent inférieurs à 1 pour la pente de 2%. La plage de débit pour laquelle l'écoulement reste en régime fluvial diminue ensuite rapidement avec la pente : pour la pente de 10%, l'écoulement reste en régime fluvial jusqu'à un débit unitaire de l'ordre de 1 m³/s/m.

Les rampes en enrochements, pour les faibles tirants d'eau, semblent beaucoup plus rugueuses que ne l'indiquent les formules utilisées dans l'étude préliminaire, c'est-à-dire qu'à débit unitaire égal, les tirants d'eau moyens sont plus élevés et les vitesses mesurées plus faibles que ce qui avait été prévu. On a porté sur les figures 5 et 6 les tirants d'eau et les vitesses mesurées (moyenne, médiane, premier et dernier quartile) comparées aux vitesses et tirants d'eau calculés à l'aide de la formule de Strickler en utilisant pour le coefficient de rugosité l'expression $K = \frac{a}{D_{65}^{1/6}}$. On a porté les courbes afférentes à $a = 21$, utilisées lors de l'étude préliminaire, ainsi que celles relatives à $a = 15.5$. Whittaker et Jäggi (1986) ont en effet montré que les valeurs de a dans l'expression $K = \frac{a}{D_{65}^{1/6}}$ pouvaient varier environ de 21 pour une rampe d'enrochements déversés en vrac ("loose ramp") à 15.5 pour une rampe où l'arrangement des enrochements, mis en place un par un, est beaucoup plus compact ("standing ramp"). Toutes les valeurs des vitesses et des tirants d'eau, que ce soit les valeurs moyennes ou médianes, sont assez éloignées de la courbe relative à $a = 21$ et se rapprochent davantage de la courbe relative à $a = 15.5$.

4.2.2 Second niveau de jointoiment (J2)

On a porté, de la même façon que pour le premier niveau de jointoiment, dans le tableau 2 les données statistiques caractérisant les distributions des vitesses et des tirants d'eau mesurés au sein de l'écoulement : moyenne, médiane, mode, premier et troisième quartile, écart-type, valeurs maximales et minimales mesurées.

¹ Les deux quartiles constituent des extrémités de la boîte, alors que la médiane est indiquée par le trait horizontal proche en général de son milieu. Les traits verticaux relient le premier quartile à la plus petite valeur mesurée située dans 1.5 fois l'espace interquartile à partir du premier quartile et le troisième quartile à la plus grande valeur mesurée située dans 1.5 fois l'espace interquartile à partir du troisième quartile.

Débit unitaire		Vitesses (m/s)																
		0.4 m ³ /s/m			1.1 m ³ /s/m			1.8 m ³ /s/m			5.5 m ³ /s/m							
		2%	5%	10%	15%	2%	5%	10%	15%	2%	5%	10%	15%	2%	5%	10%	15%	
<i>Pente</i>		0.99	1.05	1.24	1.43	1.58	1.73	2.02	2.35	1.91	2.22	2.70	3.17	3.60	4.18	4.75	-	
moyenne		0.99	0.92	1.26	1.37	1.63	1.72	2.06	2.42	1.98	2.28	2.83	3.31	3.55	4.27	4.96	-	
médiane		0.92	0.66	1.07	0.98	1.20	1.69	1.74	2.63	2.03	2.57	2.81	3.29	4.30	4.00	4.96	-	
mode		0.73	0.67	0.82	0.88	1.24	1.38	1.68	1.90	1.69	1.95	2.19	2.58	3.41	3.91	4.36	-	
1er quartile		1.31	1.37	1.65	1.89	1.90	2.03	2.42	2.82	2.21	2.63	3.29	3.87	3.91	4.58	5.34	-	
3è quartile		0.35	0.47	0.51	0.66	0.45	0.50	0.60	0.73	0.40	0.60	0.75	0.90	0.55	0.59	0.76	-	
écart-type		1.76	2.15	2.35	3.06	2.41	2.88	3.21	3.85	2.68	3.49	3.80	5.00	4.55	5.05	5.60	-	
valeur maxi		0.34	0.29	0.35	0.34	0.50	0.45	0.58	0.50	0.49	0.50	0.42	0.55	1.77	1.95	2.28	-	
valeur mini																		
Tirants d'eau (m)																		
Débit unitaire		Tirants d'eau (m)																
		0.4 m ³ /s/m			1.1 m ³ /s/m			1.8 m ³ /s/m			5.5 m ³ /s/m							
		2%	5%	10%	15%	2%	5%	10%	15%	2%	5%	10%	15%	2%	5%	10%	15%	
<i>Pente</i>		0.53	0.46	0.36	0.31	0.87	0.69	0.54	0.49	1.03	0.83	0.67	0.61	1.61	1.41	1.18	-	
moyenne		0.56	0.47	0.35	0.28	0.87	0.73	0.53	0.45	1.03	0.81	0.68	0.58	1.60	1.39	1.16	-	
médiane		0.46	0.52	0.44	0.31	0.87	0.82	0.63	0.38	0.94	0.76	0.74	0.48	1.73	1.40	1.14	-	
mode		0.38	0.28	0.20	0.14	0.73	0.51	0.35	0.33	0.87	0.63	0.50	0.43	1.45	1.25	1.02	-	
1er quartile		0.69	0.64	0.49	0.44	1.04	0.86	0.71	0.66	1.22	1.02	0.84	0.78	1.73	1.55	1.39	-	
3è quartile		0.23	0.23	0.20	0.20	0.24	0.24	0.23	0.22	0.25	0.27	0.24	0.23	0.26	0.25	0.25	-	
écart-type		1.10	1.00	0.93	0.90	1.47	1.24	1.19	1.00	1.5/	1.40	1.17	1.22	2.19	1.95	1.73	-	
valeur maxi		0.02	0.02	0.03	0.03	0.25	0.11	0.13	0.11	0.44	0.35	0.26	0.18	0.99	0.84	0.72	-	
valeur mini																		

Tableau 1 : Caractéristiques des vitesses et tirants d'eau mesurés (J1)

Débit unitaire		Vitesses (m/s)																																												
		0.4 m ³ /s/m					1.1 m ³ /s/m					1.8 m ³ /s/m					5.5 m ³ /s/m																													
		2%	5%	10%	15%	2%	5%	10%	15%	2%	5%	10%	15%	2%	5%	10%	15%	2%	5%	10%	15%																									
<i>Pente</i>		1.00	1.15	1.36	1.54	1.73	2.30	2.83	2.85	2.08	2.83	3.35	3.81	3.90	4.66	5.31	5.63	3.90	4.66	5.31	5.63																									
moyenne		1.02	1.11	1.32	1.51	1.83	2.23	2.71	2.81	2.05	2.80	3.42	4.02	3.97	4.74	5.43	5.87	3.97	4.74	5.43	5.87																									
médiane		1.18	1.06	1.17	1.77	2.12	2.15	2.64	2.93	2.05	2.71	3.29	5.09	4.16	5.03	5.43	5.81	4.16	5.03	5.43	5.81																									
1er quartile		0.74	0.69	0.86	0.93	1.44	1.84	2.09	2.18	1.77	2.37	2.97	3.16	3.69	4.51	4.99	4.84	3.69	4.51	4.99	4.84																									
3è quartile		1.34	1.51	2.00	2.14	2.08	2.81	3.54	3.46	2.32	3.32	3.69	4.53	4.14	4.94	5.69	6.28	4.14	4.94	5.69	6.28																									
écart-type		0.36	0.47	0.59	0.77	0.45	0.65	0.86	0.94	0.43	0.68	0.71	1.04	0.32	0.43	0.57	0.90	0.32	0.43	0.57	0.90																									
valeur maxi		1.67	2.18	2.36	3.39	2.51	3.47	4.47	4.78	2.96	4.08	4.67	5.63	4.45	5.30	6.16	7.04	4.45	5.30	6.16	7.04																									
valeur mini		0.39	0.25	0.43	0.39	0.69	0.81	1.36	1.19	0.92	1.34	1.74	1.58	3.21	3.42	4.11	3.27	3.21	3.42	4.11	3.27																									
Tirants d'eau (m)																																														
Débit unitaire		1.1 m ³ /s/m															1.8 m ³ /s/m															5.5 m ³ /s/m														
		2%	5%	10%	15%	2%	5%	10%	15%	2%	5%	10%	15%	2%	5%	10%	15%	2%	5%	10%	15%	2%	5%	10%	15%																					
<i>Pente</i>		0.51	0.41	0.32	0.24	0.85	0.67	0.53	0.49	1.03	0.82	0.68	0.66	1.77	1.41	1.23	1.14	1.77	1.41	1.23	1.14																									
moyenne		0.56	0.45	0.34	0.23	0.91	0.71	0.54	0.46	1.10	0.80	0.68	0.67	1.82	1.45	1.25	1.18	1.82	1.45	1.25	1.18																									
médiane		0.64	0.53	0.36	0.14	0.89	0.97	0.51	0.34	0.93	0.70	0.63	0.69	1.91	1.50	1.40	1.35	1.91	1.50	1.40	1.35																									
1er quartile		0.38	0.27	0.18	0.14	0.71	0.50	0.36	0.34	0.91	0.65	0.51	0.51	1.60	1.30	1.12	1.00	1.60	1.30	1.12	1.00																									
3è quartile		0.64	0.56	0.44	0.31	1.01	0.85	0.66	0.60	1.18	1.00	0.80	0.73	1.95	1.56	1.40	1.31	1.95	1.56	1.40	1.31																									
écart-type		0.19	0.18	0.17	0.15	0.21	0.22	0.19	0.18	0.22	0.25	0.20	0.20	0.22	0.20	0.21	0.20	0.22	0.20	0.21	0.20																									
valeur maxi		0.75	0.69	0.66	0.74	1.11	0.98	0.95	0.92	1.32	1.27	1.13	1.23	2.06	1.77	1.61	1.47	2.06	1.77	1.61	1.47																									
valeur mini		0.05	0.03	0.03	0.01	0.26	0.19	0.11	0.16	0.43	0.29	0.36	0.35	1.30	0.89	0.81	0.71	1.30	0.89	0.81	0.71																									

Tableau 2 : Caractéristiques des vitesses et-tirants d'eau mesurés (J2)

Les distributions des vitesses, des tirants d'eau et des nombres de Froude ($\frac{V}{\sqrt{gH}}$) ont été portées sous forme de diagramme de boîtes de dispersion (figures 7 à 9).

On a porté dans l'annexe A les histogrammes de fréquence de ces mêmes distributions.

On a porté sur les figures 10 et 11 les tirants d'eau et les vitesses mesurées (moyenne, médiane, premier et dernier quartile) comparées aux vitesses et tirants d'eau prédites à l'aide de la formule de Strickler en utilisant pour le coefficient de rugosité l'expression $K = \frac{a}{D_{65}^{1/6}}$. On a porté les courbes afférentes à $a = 21$, utilisées lors de l'étude préliminaire, ainsi que celles relatives à $a = 15.5$.

Les caractéristiques de la tendance centrale des distributions des tirants d'eau mesurés ne sont pas significativement différentes suivant le niveau de jointoiment. La dispersion semble toutefois diminuer pour le niveau de jointoiment plus important. Par contre, les vitesses mesurées augmentent significativement pour le niveau de jointoiment le plus important.

4.3 Représentativité des vitesses et des tirants d'eau mesurés

Si la moyenne des tirants d'eau mesurés peut représenter un tirant d'eau moyen caractérisant l'écoulement, on peut se poser la question de la signification de la moyenne des vitesses mesurées dans l'écoulement. On rappelle que les vitesses ponctuelles ont été mesurées à une distance du fond approximativement égale à 0.4 fois la profondeur totale aux points considérés.

Lorsqu'on fait le produit de VM par HM, c'est-à-dire le produit des moyennes des distributions des tirants d'eau et des vitesses mesurées, on trouve des valeurs relativement proches des débits unitaires.

D'autre part, lorsqu'on fait l'étude de la distribution des produits ($V \times H$), les moyennes et médianes de ces distributions sont voisines des débits unitaires (figure 12).

Il peut donc paraître justifié de prendre comme valeurs des tirants d'eau caractérisant l'écoulement, la moyenne des valeurs mesurées, la vitesse débitante se trouvant alors très proche de la moyenne des valeurs mesurées.

4.4 Lois d'écoulement sur une rampe en enrochements

Bien que cela ne soit pas l'objet proprement dit de l'étude, il a semblé intéressant de voir quelle loi empirique rendait compte le mieux de l'écoulement (vitesses et tirants d'eau moyens) sur une rampe en enrochements.

Plusieurs auteurs ont proposé des relations liant le coefficient de Strickler K, le coefficient de Chézy C (ou le rapport adimensionnel $\frac{V}{\sqrt{ghI}}$) à un rapport tirant d'eau moyen sur dimensions caractéristiques des rugosités $\left(\frac{h}{ks}\right)$

$$\text{(on rappelle que } \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{U}{\sqrt{ghI}} = \frac{Kh^{1/6}}{\sqrt{g}} \text{)}$$

Parmi elles :

- Manning-Strickler (Whittaker et Jäggi, 1986)

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 6.7 \left(\frac{h}{ks} \right)^{1/6} \quad (ks = D_{65})$$

- Whittaker et Jäggi (1986)

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 4.95 \left(\frac{h}{ks} \right)^{1/6} \quad (\text{avec } ks = D_{65})$$

- Limerinos (Jarrett, 1984)

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 3.28 + 5.62 \log_{10} \frac{h}{ks} \quad (\text{avec } ks = D_{84})$$

- Thompson et Campbell (1979)

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 5.7 \left(1 - \frac{ks}{h} \right) \log_{10} \frac{12h}{ks} \quad (\text{avec } ks = \alpha D_{50})$$

Les courbes afférentes aux différentes expressions précédentes ont été portées sur le même graphique (figure 13) que les points expérimentaux, le coefficient de Chézy adimensionnel $\frac{C}{\sqrt{g}}$ ayant été calculé à partir des valeurs moyennes des tirants d'eau mesurés.

Les courbes de Thompson et Campbell ont été portées pour des valeurs de ks égales à $4.5D_{50}$ et $2D_{50}$.

Les graphiques mettent en évidence que les formules de type Manning-Strickler ($K = a/ks^{1/6}$) ne rendent pas bien l'augmentation de la rugosité pour les faibles rapports tirant d'eau/dimension des rugosités et cela quel que soit le niveau de jointoiment (J1 ou J2).

Les expressions rendant le mieux compte de l'évolution de la rugosité sont celles de Limerinos et surtout celle de Thompson et Campbell, en prenant $ks = 2D_{50}$ (au lieu de $4.5D_{50}$ comme le préconise Bathurst, 1982).

Par contre, les essais montrent que pour des débits unitaires plus importants, on peut considérer les formules de type Manning-Strickler comme acceptables.

On peut en effet exprimer la relation entre le débit, la pente et le tirant d'eau (compté arbitrairement à partir du niveau de jointoiment (figure 14) par :

$$q = 16.6 (h - 0.526)^{5/3} I^{1/2} \quad (J1)$$

$$q = 17.7 (h - 0.323)^{5/3} I^{1/2} \quad (J2)$$

Cette relation est très proche de celle proposée par Whittaker et Jäggi (1986) :

$$q = \frac{15.5}{D_{65}^{1/6}} h^{5/3} I^{1/2}$$

où h est le tirant d'eau compté à partir de la surface moyenne du coursier et $D_{65}^{1/6} \approx 1$.

4.5 Premières conclusions

Il est possible de dégager de cette première étude expérimentale en canal un certain nombre de conclusions :

- la dispersion des mesures des vitesses et des tirants d'eau est très importante. Il devient difficile de raisonner, pour le poisson, simplement en termes de *vitesse moyenne* et de *tirant d'eau moyen*, sachant que localement ces paramètres peuvent subir des variations telles que le poisson peut être bloqué (soit par une accélération locale de la vitesse, soit à cause d'un tirant d'eau insuffisant),

- d'un point de vue hydraulique, il semble justifié de caractériser l'écoulement par le couple tirant d'eau moyen HM et vitesse moyenne VM. Par contre, il semble préférable, d'un point de vue piscicole et par sécurité, de caractériser l'écoulement par le couple premier quartile de la distribution des tirants d'eau HQ1 (75 % des tirants d'eau restent supérieurs au premier quartile HQ1) et troisième quartile de la distribution des vitesses VQ3 (75 % des vitesses restent inférieures au dernier quartile VQ3).

Sur les essais effectués :

$(VQ3/VM)_{\text{moy}} = 1.20$, 50 % des valeurs étant comprises entre 1.15 et 1.22

$(HQ1/HM)_{\text{moy}} = 0.75$, 50 % des valeurs étant comprises entre 0.68 et 0.84.

Les résultats précédents déplacent vers le haut et élargissent la marge de franchissabilité en terme de débit unitaire défini lors de l'expertise préliminaire.

- *Grands salmonidés migrateurs* (critère : 3 m/s sur une dizaine de mètres, tirant d'eau minimum de 0.15 m à 0.20 m) :

pour un seuil de chute 1.5 m et un coursier de pente 10%, le débit unitaire passerait de 300-700 l/s par mètre de largeur à 400-1500 l/s par mètre de largeur.

- *Lamproie* : les conditions de franchissabilité sont identiques à celles pour les grands salmonidés migrateurs, avec une plage sur les débits plus large ($\approx 200 - 1500$ l/s par mètre de largeur).

- *Alose* (critère : 2.5 m/s sur une dizaine de mètres, tirant d'eau minimum de 0.20-0.30 m) :

pour un seuil de chute 1.0-1.25 m et un coursier de pente 10%, le débit unitaire passerait de 400-600 l/s à 600-1200 l/s par mètre de largeur.

- *Truites et cyprinidés d'eau vive* : (critère : 1.20 m/s sur une dizaine de mètres, tirant d'eau minimum de 0.10-0.15 m).

Le débit unitaire maximum, pour un seuil de chute 1-1.20 m et un coursier de pente 10%, serait de l'ordre de 150-200 l/s par mètre de largeur.

5. ECOULEMENT AU DESSUS D'UN SEUIL, PENTE DU COURSIER A 10 %

5.1 Le modèle

Le modèle représente une tranche de seuil tel qu'il est prévu d'installer à Labastide Cezeracq ou à Lescar sur le Gave de Pau (BCEOM, 1994).

L'échelle du modèle est de 1/32.

Les cailloux sélectionnés ont des masses variant de 45 g à 100 g, les diamètres équivalents étant respectivement 3.25 cm et 4.23 cm, ce qui correspond sur prototype à des enrochements de poids variant de 1500 Kg à 3250 Kg (diamètres équivalents 1.05 m à 1.35 m). On a porté sur la figure 15 les caractéristiques granulométriques des enrochements testés sur modèle.

Le filtre situé sous les enrochements a été représenté sur le modèle par des matériaux de granulométrie 0.5 cm à 1 cm (0.15 m à 0.30 m ouvrage).

L'objet du modèle était :

- d'examiner la relation cote amont-débit.
- de caractériser l'écoulement dans le secteur à régime uniforme,
- de mettre en évidence l'évolution longitudinale des tirants d'eau et des vitesses sur le seuil, ainsi que l'influence de la chute,
- de tester la stabilité du seuil.

5.2 Relation cote amont - débit sur le seuil

Le critère principal de franchissabilité d'un seuil par une espèce donnée est le débit unitaire qui conditionne les vitesses et le tirant d'eau sur le coursier.

Le calage correct d'un seuil, en particulier en étiage, nécessite une bonne connaissance de la relation cote amont - débit.

5.2.1 Crête du seuil en enrochements libres, sans aucun jointoiment.

Lorsque les enrochements de crête ne sont pas jointoyés, il est évident que pour les faibles débits unitaires, une fraction non négligeable du débit filtre à travers les enrochements et il est difficile de définir un "zéro" de la crête.

Sur le modèle, on peut définir visuellement plusieurs cotes² :

- la première couche d'enrochements est hors d'eau à 111.88
- 50% environ de la première couche d'enrochement est immergée à 112.20
- la majorité des blocs formant la crête est immergée à 112.52

²Les cotes sont des cotes prototype, correspondant à celles du projet de seuil à Labastide-Cézeracq (BCEOM, 1994).

- plus aucun bloc émergé à 112.84.

L'incertitude sur la cote "hydraulique" de la crête porte environ sur une trentaine de cm (entre les cotes 112.20 et 112.52).

On a fait varier le débit de façon à établir une relation charge amont-débit unitaire

On a porté sur la figure 16, l'évolution des coefficients de débit C_h et C_b calculés à partir des deux hypothèses extrêmes de cote de déversement 112.20 et 112.52. Dans le premier cas, le coefficient de débit C_h ne demeure pas constant, il part d'une valeur très faible voisine de 0.2 pour tendre vers 0.34 pour les fortes charges.

Par contre, dans le deuxième cas, le coefficient de débit C_b reste remarquablement constant ($C_b \cong 0.35$) à partir d'une charge voisine de 1 m. Pour les charges inférieures, la valeur du coefficient de débit augmente rapidement lorsque la charge diminue ($C_b \cong 0.6$ pour une charge voisine de 0.50 m), ce qui traduit l'écoulement interstitiel.

On a effectué la régression non linéaire :

$$q = \sqrt{2g} C_{opt}(HA - Z_d)^{1.5}$$

De façon à déterminer C_{opt} , coefficient de débit et Z_d , cote "hydraulique" du seuil.

Les valeurs trouvées sont respectivement 112.50 et 0.355.

Cette courbe (figure 16) rend bien compte des points expérimentaux, sauf pour les valeurs de charges inférieures à 1 m, pour lesquelles la courbe s'éloigne progressivement des points expérimentaux.

En conclusion, il est très difficile d'estimer avec précision la relation cote amont (ou charge amont) - débit dans le domaine des faibles charges pour un seuil en enrochements libres : le coefficient de débit peut varier de 0.2 à 0.6 suivant la cote de déversement adoptée. On rappelle que le franchissement des poissons s'effectue dans le domaine des faibles charges.

5.2.2 . Crête et la partie amont à contre-pente du seuil jointoyées

Dans un second essai, on a jointoyé la crête, la pointe de quelques enrochements demeurant émergée :

- aucun déversement jusqu'à la cote 112.36,
- niveau moyen de jointoiement à 112.60,
- plus aucun enrochement émergé à 112.84.

S'il fallait définir le niveau théorique de la crête, on adopterait une valeur voisine de 112.60 correspondant au niveau moyen de jointoiement.

On a effectué la régression non linéaire :

$$q = \sqrt{2g} C_{opt}(HA - Z_d)^{1.5}$$

Les valeurs de C_{opt} et Z_d sont respectivement de 0.366 et 112.60, cote correspondant à la cote moyenne du jointoiement.

La figure 17 met en évidence que même pour les faibles charges, la relation charge amont - débit est bien rendue par une formule de type déversoir.

On a vu précédemment que la marge de franchissabilité d'un seuil, en terme de débit unitaire, pouvait être relativement réduite pour certaines espèces migratrices. Il est important de pouvoir estimer avec suffisamment de précision quels seront les débits unitaires sur les différentes parties d'un seuil, en particulier en étiage. Une bonne connaissance des relations cote amont - débit est donc indispensable, ce qui passe par le jointoiment de la crête du seuil.

5.3 Caractéristiques de l'écoulement dans le secteur à régime uniforme

Sur le même modèle, mais en changeant arbitrairement l'échelle de similitude, on a étudié l'écoulement sur le seuil pour une chute de 1.50 m. On a mesuré la ligne d'eau sur trois profils en long.

La maquette représente à l'échelle 1/22 des enrochements de 400-1200 Kg (figure 18), de diamètres équivalents 0.70-0.95 m, la masse moyenne étant voisine de 750 Kg ($D_{50} \sim 0.85$ cm).

Les mesures de tirants d'eau ont été effectuées tous les 55 cm (2.5 cm modèle) de l'amont du seuil à 25 m environ de la crête en aval (1.15 m sur le modèle).

L'écoulement accélère au-dessus de la crête pour devenir à peu près uniforme entre 2 et 4 mètres de la crête suivant le débit.

Le ressaut -lorsque ressaut il y a- et la décélération de l'écoulement se situent à une douzaine de mètres en aval de la crête.

Les distributions des tirants d'eau ainsi que celles des rapports débit unitaire sur tirant d'eau (vitesses débitantes) ont été portées sous forme de diagrammes de boîtes de dispersion pour les débits unitaires de 1, 1.5, 2, 2.5 m³/s sur la figure 19.

Malgré une granulométrie plus réduite, les résultats restent relativement proches de ceux afférents à la figure 2 (essais sur un coursier à 10 %). Les valeurs médianes semblent toutefois légèrement plus faibles.

On a porté sur la figure 20 les tirants d'eau mesurés (moyenne, médiane, premier et dernier quartile), comparés aux vitesses et tirants d'eau calculés à l'aide de la formule de Manning-Strickler en utilisant pour le coefficient de rugosité l'expression $K = \frac{a}{D_{65}^{1/6}}$. On a porté les courbes afférentes à $a = 21$ et $a = 15.5$. (voir paragraphe 4.2). Les valeurs du premier quartile se rapprochent de ces deux courbes alors que les valeurs moyennes et médianes sont situées au-dessus de la courbe afférente à $a = 15.5$. On retrouve là aussi les résultats obtenus précédemment lors de l'étude sur le coursier à pente variable.

5.4 Evolution longitudinale des tirants d'eau et des vitesses sur le coursier

On a porté sur les figures 21 à 24 les profils en long de la ligne d'eau, des tirants d'eau et des vitesses mesurées juste au dessous de la surface libre (correspondant grosso-modo à la vitesse maximale sur la verticale) pour des débits unitaires de 1 à 2.5 m²/s et une chute de 1.50 m au droit du seuil. On a porté sur la figure 25 l'évolution des moyennes mobiles (5 points) des vitesses de surface et des tirants d'eau sur les trois profils longitudinaux et pour les quatre débits unitaires de 1, 1.5, 2, 2.5 m²/s. On a porté sur la figure 26 l'évolution des

moyennes des vitesses et du tirant d'eau sur les trois profils longitudinaux pour ces mêmes débits unitaires.

Les résultats mettent en évidence *la très grande variabilité des vitesses le long d'un profil et d'un profil à l'autre* ; cette variabilité a tendance à diminuer lorsque le débit augmente : les vitesses en surface varient de 1.5 à 3.5 m/s pour un débit unitaire de 1 m²/s, de 2.4 à 3.8 m/s pour 1.5 m²/s, de 3.5 à 4.5 m/s pour 2 m²/s, et de 4 à 5 m/s pour 2.5 m²/s.

Si l'on considère uniquement les vitesses, la valeur maximale du débit unitaire pour laquelle le seuil de 1.50 m resterait franchissable par les grands salmonidés migrateurs serait de l'ordre de 1.5 m³/s/m. Pour l'alose, la limite se situerait à un débit unitaire de l'ordre de 1 m³/s/m pour un seuil d'une chute voisine de 1 m.

5.5 Conditions d'écoulement dans une section en travers à régime établi

Pour analyser la dispersion transversale des paramètres (H, V), on a choisi arbitrairement une section située dans la zone à régime établi. On a relevé le profil du fond, la ligne d'eau ainsi que les profils de vitesses sur 5 verticales régulièrement espacées. Les résultats sont donnés sur les figures 27 à 30 pour les débits unitaires de 1, 1.5, 2, 2.5 m²/s.

La surface libre est loin d'être horizontale, en particulier pour les faibles débits unitaires pour lesquels il est possible d'observer des différences sur un même transect de niveau d'une trentaine de cm. Cette irrégularité tend à s'effacer pour les débits plus importants : elle devient inférieure à 10 cm pour le débit de 3.5 m³/s/m. Ces différences de niveau traduisent un "blocage" de l'écoulement au niveau d'enrochements plus protubérants que les autres. Ces blocages induisent des composantes transversales des vitesses, la répartition transversale des débits devenant relativement hétérogène, principalement pour les faibles débits.

Les vitesses maximales varient de 2 à 3.6 m/s pour le débit de 1 m³/s/m, de 3.3 à 4.4 m/s pour 1.5 m³/s/m, de 3.7 à 4.8 m/s pour 2 m³/s/m, et de 4.5 à 4.9 m/s pour 2.5 m³/s/m. On notera que seule la partie supérieure du profil de vitesses est accessible à la mesure, compte tenu de la faiblesse des tirants d'eau comparée au diamètre de l'hélice du moulinet. Les vitesses ont tendance à s'uniformiser d'un profil à l'autre à mesure que le débit augmente : le maximum mesuré ne varie que de 0.4 m/s d'un profil à l'autre pour le débit unitaire de 2.5 m³/s/m. Par contre, pour le débit unitaire le plus faible testé, les vitesses maximales peuvent varier de plus de 1.5 m/s d'un profil à l'autre.

Pour le débit de 1 m³/s/m, les conditions hydrauliques deviennent acceptables sur certains profils, mais à condition de réduire la distance à franchir à une dizaine de mètres, c'est-à-dire réduire la chute du seuil à 1 m.

6. STABILITE DU SEUIL

6.1 Enrochements 1500 - 3250 Kg.

Le débit unitaire sur le seuil a été augmenté de $2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ à $18 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ par paliers de $2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ environ, $18 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ étant le débit maximal admis dans le canal sans débordement. La chute au niveau du seuil a été maintenue voisine de 1.20-1.50 m.

Le seuil s'est révélé stable pour l'ensemble des débits testés, aucun bloc n'a été déplacé ni arraché.

En inclinant le canal, la pente du coursier a été portée à 15 % et les essais ont été repris. Les premiers enrochements ont commencé à bouger à partir d'un débit voisin de $12 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Pour un seuil dont le D_{65} correspond à 2600 Kg, les débits maximaux de stabilité donnés par Whittaker et Jäggi sont respectivement de $46 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, $21 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, $13 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ et $9 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ pour des pentes du coursier de 5 %, 10 %, 15 % et 20 %.

Le seuil est largement dimensionné au point de vue stabilité.

6.2 Enrochements 500 - 1300 Kg

Une seconde série d'essais a été effectuée pour un seuil constitué de blocs de masse variant entre 500 et 1300 Kg mis en place un par un. La longueur du coursier était adaptée pour absorber une chute de 1.50 m au maximum.

On a fait varier la chute de 0.60 m à 1.50 m pour mettre en évidence l'effet du noyage sur la stabilité du seuil.

Pour une dénivellation inférieure ou égale à 1.20 m, aucun bloc n'est emporté jusqu'à des débits de $11 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ environ. Tout au plus observe-t-on des mouvements sur place de quelques blocs plus exposés par leur forme ou leur positionnement en saillie : ces mouvements sont observés à partir de $6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ pour une chute de 1.20 m et de $10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ pour une chute de 0.90 m. Aucun bloc ne bouge pour une chute de 0.60 m.

Les mouvements des blocs se produisent dans la partie aval du coursier, dans la zone située en amont immédiat du ressaut.

Il faut atteindre une chute de 1.50 m et un débit de $11 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ pour voir trois blocs emportés sur le modèle ; sous l'effet des vides ainsi créés, il semble qu'il y ait déplacement d'ensemble des enrochements vers l'aval.

Pour un seuil dont le D_{65} correspond à 900 Kg environ, les débits maximaux de stabilité donnés par Wittaker et Jäggi sont respectivement de $27 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, $12 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, $7.5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ et $5.5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ pour des pentes de coursier de 5 %, 10 %, 15 % et 20 %.

6.3 Enrochements 270 - 800 Kg

On a modifié la blocométrie du seuil, réduite à 270 - 800 Kg.

Pour une chute de 1.50 m, à partir de 2.5 m³/s/m environ, les forces tractrices sollicitent les blocs les plus exposés et à 3 m³/s/m un premier bloc de 400 Kg environ est déplacé de 1 m environ.

En augmentant le débit, quelques blocs sont déplacés mais non emportés et le coursier se restabilise. Il faut atteindre 9 m³/s/m pour voir plusieurs blocs de 600 Kg environ, situés à 6 m environ de la crête, emportés.

Pour un seuil dont le D₆₅ correspond à 640 Kg, les débits maximaux de stabilité donnés par Wittaker et Jäggi sont respectivement de 22 m³/s/m, 10 m³/s/m, 6 m³/s/m et 4.5 m³/s/m pour des pentes de 5 %, 10 %, 15 % et 20 %.

6.4 Conclusion

En conclusion, le fait de réduire la pente du coursier augmente de façon très sensible la stabilité du seuil.

Pour des coursiers de pente 20 %, une blocométrie de 1500-3000 Kg se justifie pour des débits unitaires maximaux d'une dizaine de m³/s/m ; par contre les essais montrent que lorsque la pente du coursier est réduite à 10 %, une blocométrie de 750-1500 Kg se révèle suffisante jusqu'à ces mêmes débits de 10 m³/s/m.

Les limites de stabilité, proposées par Wittaker et Jäggi (1986) pour des enrochements mis en place testés sur le modèle, paraissent pertinentes :

$$\frac{q}{[g(s-1)D_{65}^3]^{0.5}} = 0.257 I^{-1.167}$$

avec :

- q : débit unitaire (m³/s/m)
- g : 9.81 m/s²
- s : densité des enrochements, de l'ordre de 2.6
- I : pente du coursier

ou, plus simplement, P étant la masse des enrochements :

$$\frac{q}{\sqrt{P}} = 0.0272 I^{-1.167}$$

En prenant une marge de sécurité de 15 %, comme le conseillent les auteurs :

$$\frac{q}{\sqrt{P}} = 0.0231 I^{-1.167}$$

7. SYNTHÈSE DES RESULTATS ET CONCLUSIONS

L'objet de l'étude était, à partir des performances de nage des différentes espèces migratrices, d'examiner la faisabilité de seuils franchissables par conception et d'en définir la géométrie ainsi que les conditions hydrauliques à respecter pour en assurer la franchissabilité. Pour ce faire, plusieurs séries d'essais ont été menées sur des modèles réduits de seuils à des échelles variant de 1/16.5 à 1/32.

7.1 Critères sur les capacités de nage

Les capacités de nage varient considérablement suivant les espèces, et, pour une espèce donnée, suivant les individus - leur taille en particulier - et suivant les conditions thermiques. Les capacités de nage des poissons ont été présentées sous la forme de vitesses limites de l'écoulement à ne pas dépasser compte tenu de la distance à franchir par le poisson.

Pour schématiser, on a distingué plusieurs espèces ou groupes d'espèces possédant des capacités de nage ou des comportements migratoires voisins :

- *grands salmonidés migrateurs et lamproie* : 3.5 m/s sur 5-6 m, 3 m/s sur 10 m, 2 m/s sur 20 m ; dans des conditions thermiques optimales, il est possible de rajouter 1 m/s à ces vitesses maximales. Tirant d'eau minimum : 0.15 - 0.20 m pour les grands salmonidés migrateurs, 0.10 m pour la lamproie.

- *aloses* : 3 m/s sur 5-6 m, 2.5 m/s sur 10 m, 1.50-1.80 m/s sur 20 m ; dans des conditions optimales il est possible de rajouter 1 m/s à ces vitesses maximales. Tirant d'eau minimum : 0.20 - 0.25 m.

- *truites, ombres et grands cyprinidés d'eau vive* : 2.5 m/s sur quelques mètres, 1.8-2 m/s sur 5-6 mètres, 1.20-1.50 sur une dizaine de mètres. Tirant d'eau minimum : 0.10 - 0.15 m

- *autres espèces holobiotiques* (individus de petites tailles, espèces limnophiles), il est difficile de définir des critères bien précis. On peut adopter à titre conservatif le même critère que pour les espèces de petites tailles, soit une vitesse maximale de 1 à 1.5 m/s sur quelques mètres, avec un tirant d'eau minimal fonction de la taille du poisson (de 0.10 m à 0.30 m).

7.2 Caractéristiques des écoulements sur les coursiers en enrochements

Les conditions hydrauliques sur un coursier en enrochements ont été étudiées en fonction du débit et de la pente (pentes de 2 % à 20 %).

Les essais ont mis en évidence une variabilité spatiale des vitesses (moyennes, maximales) et des tirants d'eau très importante : la prise en compte de la moyenne des vitesses a peu de signification lorsqu'on considère les problèmes de franchissabilité. C'est la raison pour laquelle on a adopté comme critère le 3ème quartile de la distribution spatiale des vitesses et le 1er quartile de la distribution spatiale des tirants d'eau.

La plage de pente 2 % à 5 % est évidemment la plus intéressante pour toutes les espèces migratrices : pour les débits unitaires inférieurs à 0.5 m³/s/m, les vitesses restent

limitées, les tirants d'eau suffisants ; il existe des aires de repos régulièrement espacées derrière les blocs les plus protubérants : le coursier est franchissable par toutes les espèces. Si l'on considère uniquement les salmonidés migrateurs, la plage de débit acceptable est évidemment plus importante. Ces pentes très faibles ne sont évidemment pas acceptables pour un seuil en rivière compte tenu de la longueur du coursier nécessaire pour obtenir une chute significative ; elles le sont cependant pour un dispositif de franchissement type rivière de contournement.

Au dessus de 15 %, l'écoulement devient tel que :

- pour les débits unitaires élevés ($> 2 \text{ m}^3/\text{s/m}$), les vitesses deviennent très fortes ($> 5\text{-}6 \text{ m/s}$), incompatibles avec le passage de la plupart des espèces.

- pour les débits unitaires faibles, les lames d'eau ne sont plus "cohérentes" : présence de ressauts, de "sauts de ski", la lame d'eau décollant du substrat. Les mesures de vitesses et l'appréciation de tirants d'eau deviennent d'ailleurs très difficiles sinon impossibles sur le modèle.

Entre ces deux extrêmes, il existe un domaine (pentes de l'ordre de 8-12%) à l'intérieur duquel il devient possible d'envisager la conception d'un coursier franchissable par le poisson, sous certaines conditions qu'il convient de préciser. Pour restreindre le domaine d'expérimentation, on s'est limité dans la suite à la pente de 10 %.

7.3 Adéquation des écoulements aux différentes espèces

Même en faisant l'hypothèse d'une connaissance très fine des capacités de nage des différentes espèces migratrices (relation vitesse d'écoulement-distance franchissable) , il n'est pas facile d'apprécier objectivement les possibilités de franchissement de tels écoulements par les poissons : l'examen des conditions d'écoulement sur un seuil à coursier à pente 10 % fait ressortir des gradients de vitesses très prononcés sur une verticale. Faut-il raisonner en termes de vitesse moyenne ou de vitesse maximale ? Il est évident que certaines espèces sauront utiliser mieux que d'autres les gradients de vitesses. La prise en compte uniquement de la vitesse maximale restreint considérablement la marge de franchissabilité du poisson.

C'est la raison pour laquelle plusieurs approches ont été effectuées :

- détermination des vitesses et tirants d'eau moyens sur les noeuds d'une grille de mesure fixée a priori,

- détermination des profils longitudinaux des vitesses maximales et des tirants d'eau sur le coursier d'un seuil,

- détermination des tirants d'eau, des profils de vitesses, des vitesses maximales et vitesses débitantes à partir d'une section en travers à régime établi.

De ces différentes approches ressortent les points suivants :

a. grands salmonidés migrateurs et lamproies.

Quels que soient les critères utilisés, les résultats sont relativement cohérents et donnent comme domaine de franchissabilité pour un seuil de 1.50 m maximum de chute des débits unitaires compris entre $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ et $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ par mètre de largeur. Ces débits sont des ordres de grandeur : compte-tenu de la variabilité des mesures, il est utopique de prétendre obtenir grande précision sur les valeurs de ces limites.

Dans les conditions thermiques optimales, on pourrait étendre le domaine de franchissabilité jusqu'à $2 \text{ m}^3/\text{s}$ par mètre de largeur.

Pour la lamproie, le domaine peut être étendu dans le domaine des faibles débits unitaires jusqu'à $0.2 - 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ par mètre de largeur, dans la mesure où cette espèce est capable de progresser dans des tirant d'eau plus faibles que les grands salmonidés migrateurs.

b. Aloses

Répondre aussi précisément pour l'alose que pour le saumon est délicat : ses capacités de nage sont inférieures et surtout cette espèce n'a pas la faculté de négocier les écoulements "tourmentés" aussi bien que les salmonidés.

Le domaine de franchissabilité devrait se situer entre $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ et $1 \text{ m}^3/\text{s}$ par mètre de largeur. Dans les conditions thermiques favorables, la limite maximale devrait être sensiblement supérieures ($1.5 \text{ m}^3/\text{s/m}$). La chute doit rester limitée à $1.00 - 1.20 \text{ m}$.

c. Truites, cyprinidés d'eau vive

Les débits tels que les vitesses restent inférieures à 1.20 m/s pour une pente de 10% sont inférieurs à $0.5 \text{ m}^3/\text{s/m}$, les champs de vitesses devenant alors inaccessibles à la mesure sur le modèle.

Pour de tels débits, compte tenu de la dimension des blocs, il est difficile de parler de "lame d'eau" sur le coursier du seuil : il s'agit plutôt d'un écoulement "en cascade" transcritique. Le poisson a la possibilité de progresser de bloc en bloc à **condition que la hauteur des blocs n'induisse pas localement des chutes infranchissables**. On aura donc tout intérêt à réduire la dimension moyenne des blocs autant que la stabilité de l'ouvrage le permet.

d. Petites espèces, espèces holobiotiques limnophiles

Pour les poissons du dernier groupe, le franchissement devient aléatoire, sinon impossible : pour les espèces limnophiles, dès que les débits génèrent des tirants d'eau permettant la nage du poisson, les valeurs des vitesses deviennent inacceptables. Et pour les petits individus, le cheminement entre des blocs de grosses tailles avec des chutes locales importantes est très aléatoire. Il est évident que, pour de telles espèces, le passage serait rendu beaucoup plus aisé en réduisant la pente à 2% - 5% . Pour ces espèces, la solution rivière de contournement semble la plus adaptée.

7.4 Dispositions constructives

a. Jointoiement du seuil

Les enrochements sur la crête du seuil doivent être jointoyés non seulement pour une raison de tenue contre les impacts des arbres en crue, mais aussi pour pouvoir estimer les débits unitaires sur les différentes parties du seuil et éviter qu'une trop grosse partie de l'écoulement filtre entre les enrochements.

Le coefficient de débit à adopter en prenant comme cote de déversement du seuil le niveau moyen de jointoiement est voisin de $0.36-0.37$.

b. Contre-pente de 10 % au niveau de la crête amont

La crête à contre-pente (10 %) s'est avérée efficace en ce sens qu'elle fixe la position de la section critique au voisinage de la rupture de pente et que les vitesses en amont de cette rupture restent acceptables pour les migrateurs.

c. Profil transversal

Le profil transversal de la crête du seuil doit être triangulaire (et non horizontal), la pente transversale étant telle que le poisson dispose dans la gamme des conditions de niveaux amont en période de migration, d'une zone dans laquelle le débit unitaire est acceptable pour permettre son franchissement. Cette pente sera limitée à quelques pour cent pour minimiser la convergence de l'écoulement.

d. Blocométrie du seuil et stabilité

La pente du coursier est un paramètre fondamental de la stabilité du seuil.

La blocométrie 1500-3000 Kg utilisée sur les seuils du Gave de Pau (BCEOM, 1994) paraît surdimensionnée lorsqu'on réduit la pente du coursier : lors des essais, il n'a pas été possible de déstabiliser le seuil. Une granulométrie de 750-1500 Kg paraît suffisante. On peut adopter, pour des enrochements mis en place un par un (et non déversés) la relation entre débit unitaire maximum (seuil non noyé), pente du coursier et masse des enrochements (correspondant au D_{65}) la relation suivante :

$$\frac{Q}{\sqrt{P}} = 0.023 I^{-1.167}$$

En conclusion, il paraît possible pour la plupart des grands migrateurs de concevoir des seuils franchissables par conception. Cela passe cependant par la réduction de la hauteur de ces seuils (chutes inférieures à 1 - 1.50 m suivant les espèces) et celle de la pente du coursier (pente de l'ordre de 10 %). Ces obstacles ne sont cependant franchissables que dans une certaine plage de débits unitaires, plus ou moins large suivant les espèces. Compte tenu de la variabilité des débits en période de migration et de la non concordance des plages des débits unitaires acceptables pour les diverses espèces, il est nécessaire de donner à la crête des seuils une pente transversale. Cette pente sera cependant limitée à quelques pour cent pour minimiser la convergence des écoulements qui pourrait se révéler néfaste à la stabilité du seuil.

Le jointoiement du seuil, tout au moins de la crête et de la partie amont du coursier, permettra de garantir une lame d'eau suffisante pour le poisson et évitera en particulier que la totalité du débit filtre entre les enrochements en période de basses eaux.

Pour les petites espèces ou espèces limnophiles à capacités de nage réduites, la solution d'une rivière de contournement (pente 2 % - 5 %) ou d'un ouvrage de franchissement plus classique est préférable.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des vitesses et tirants d'eau mesurés (J1)

Tableau 2 : Caractéristiques des vitesses et tirants d'eau mesurés (J2)

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Caractéristiques granulométriques de la rampe en enrochements (échelle 1/16.5).
- Figure 2 : Diagramme de boîtes de dispersion des distributions des vitesses mesurées. Pentas 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J1).
- Figure 3 : Diagramme de boîtes de dispersion des distributions des tirants d'eau mesurés. Pentas 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J1).
- Figure 4 : Diagramme de boîtes de dispersion des distributions des nombres de Froude locaux. Pentas 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J1).
- Figure 5 : Evolution des vitesses (moyenne, médiane, 1er et dernier quartile) en fonction des débits. Pentas 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J1).
- Figure 6 : Evolution des tirants d'eau (moyenne, médiane, 1er et dernier quartile) en fonction des débits. Pentas 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J1).
- Figure 7 : Diagramme de boîtes de dispersion des distributions des vitesses mesurées. Pentas 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J2).
- Figure 8 : Diagramme de boîtes de dispersion des distributions des tirants d'eau mesurés. Pentas 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J2).
- Figure 9 : Diagramme de boîtes de dispersion des distributions des nombres de Froude locaux. Pentas 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J2).
- Figure 10 : Evolution des vitesses (moyenne, médiane, 1er et dernier quartile) en fonction des débits. Pentas 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J2).
- Figure 11 : Evolution des tirants d'eau (moyenne, médiane, 1er et dernier quartile) en fonction des débits. Pentas 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J2).
- Figure 12 : Diagramme de boîtes de dispersion de la distribution des produits V.H. Pentas 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J1).
- Figure 13 : Evolution de C/\sqrt{g} en fonction de $HM/D65$ et comparaison avec les relations de Manning, Wittaker et Jäggi, Limerinos et Thompson et Campbell (J1 et J2).
- Figure 14 : Relation entre le débit unitaire, la pente et le tirant d'eau (J1 et J2).
- Figure 15 : Caractéristiques granulométriques du seuil à pente de coursier 10 % (échelle 1/32).
- Figure 16 : Relation charge amont - débit et évolution du coefficient de débit, crête en enrochements libres.

Figure 17 : Relation charge amont - débit et évolution du coefficient de débit, crête en enrochements jointoyés.

Figure 18 : Caractéristiques granulométriques du seuil à pente de coursier 10 % (échelle 1/22).

Figure 19 : Diagramme de boîtes de dispersion des tirants d'eau des rapports débit unitaire/tirant d'eau pour des débits de 1, 1.5, 2, 2.5 m³/s.

Figure 20 : Evolution des tirants d'eau (moyenne, médiane, premier et dernier quartile) en fonction du débit.

Figure 21 : Profil en long de la ligne d'eau, de la vitesse en surface et du tirant d'eau (q = 1 m³/s/m)

Figure 22 : Profil en long de la ligne d'eau, de la vitesse en surface et du tirant d'eau (q = 1.5 m³/s/m)

Figure 23 : Profil en long de la ligne d'eau, de la vitesse en surface et du tirant d'eau (q = 2 m³/s/m)

Figure 24 : Profil en long de la ligne d'eau, de la vitesse en surface et du tirant d'eau (q = 2.5 m³/s/m)

Figure 25 : Profil en long des vitesses et des tirants d'eau (moyennes mobiles) pour les débits de 1 à 2.5 m³/s/m

Figure 26 : Profil en long des moyennes des vitesses et des tirants d'eau pour les débits de 1 à 2.5 m³/s/m

Figure 27 : Profil en travers de la ligne d'eau et profils de vitesse (q = 1 m³/s/m)

Figure 28 : Profil en travers de la ligne d'eau et profils de vitesse (q = 1.5 m³/s/m)

Figure 29 : Profil en travers de la ligne d'eau et profils de vitesse (q = 2 m³/s/m)

Figure 30 : Profil en travers de la ligne d'eau et profils de vitesse (q = 2.5 m³/s/m)

OUVRAGES CONSULTÉS

BATHURST, J.C., 1982. - Flow resistance in boulder-bed streams. In: HEY, R.D., BATHURST, J.C. & THORNE C.R., eds., Gravel bed rivers, Wiley, J.J. & sons Ltd, 443-465.

BCEOM, 1994. - Réactualisation de l'avant-projet sommaire d'aménagement du secteur Ardix-Denguin sur le Gave de Pau dans le cadre du projet du seuil de Labastide-Cezeracq. Rapport d'étude, 80 p. + annexes.

BCEOM, 1994. Réactualisation de l'avant-projet sommaire d'aménagement du secteur Artiguelouve-Lescar sur le Gave de Pau dans le cadre du projet de seuil de Lescar. Rapport d'étude, 64 p. + annexes.

BEACH, 1984. - Fish pass design. Criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory fishes in rivers. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Lowestoft, Fish. Res. Tech. Rep. 78, 45 p.

EVANS W.A., JOHNSTON F.B., 1980. Fish migration and fish passage : a practical guide to solving fish passage problems. USDA Forest Serv., Region 5, 43 p.

JARRETT R.D., 1984. - Hydraulics of high-gradient streams. J.Hydraul.Eng., **110**, 1519-1539.

LARINIER M., CHORDA J., 1993. - Le franchissement des seuils en enrochements par les poissons migrateurs. Rapport GHAAPPE 93.05, 14 p.

THOMPSON M., CAMPBELL P.L., 1979 - Hydraulics of a large channel paved with boulders. J.Hydraul.Res., **17**, 341-354.

WITTAKER J.G., JAGGI M., 1986 - Mitteilungen der versuchsanstalt für wasserbau, hydrologie und glaziologie. D. Vischer, Zürich : 187.

ZIEMER G.L., 1962. - Fish transport in waterways. Alaska Dept. of Fish and Game, 10 p.

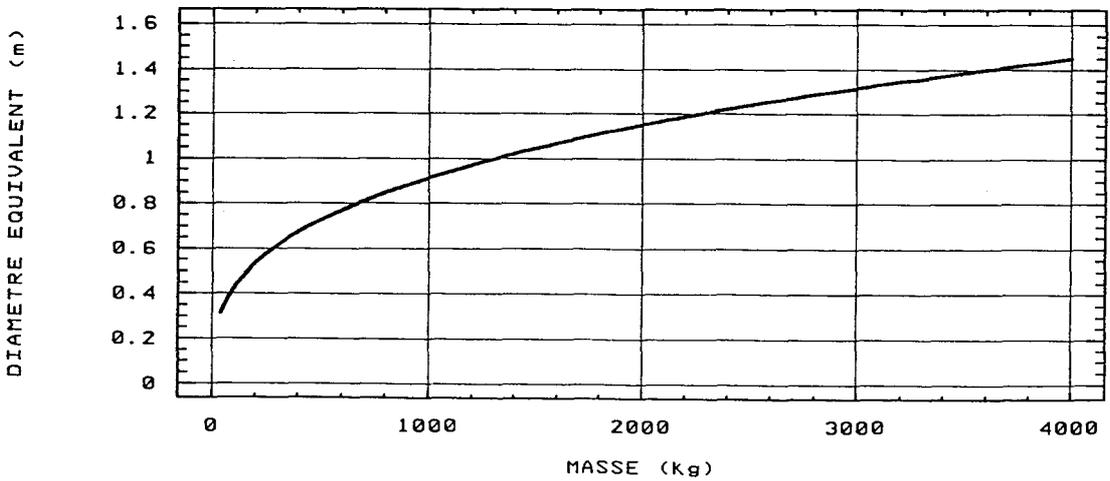
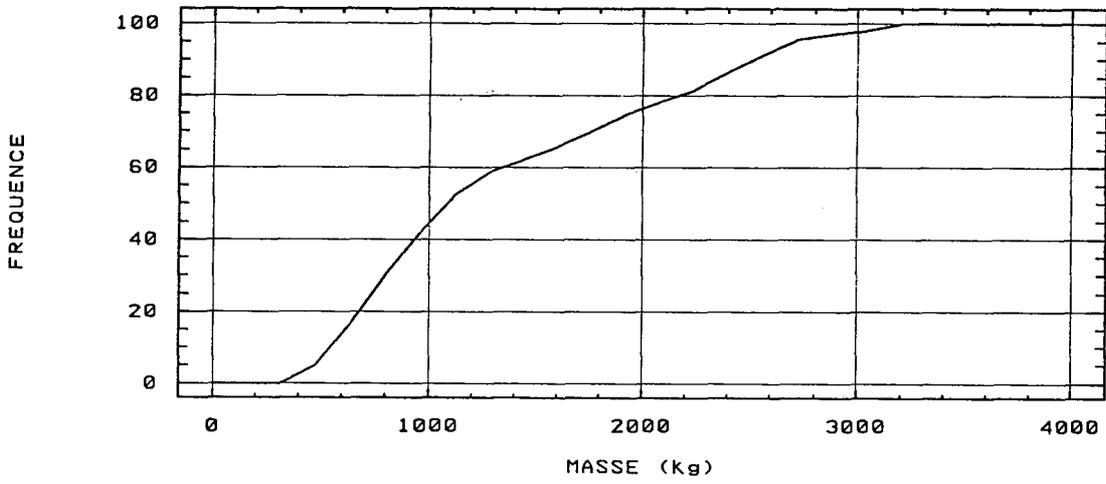
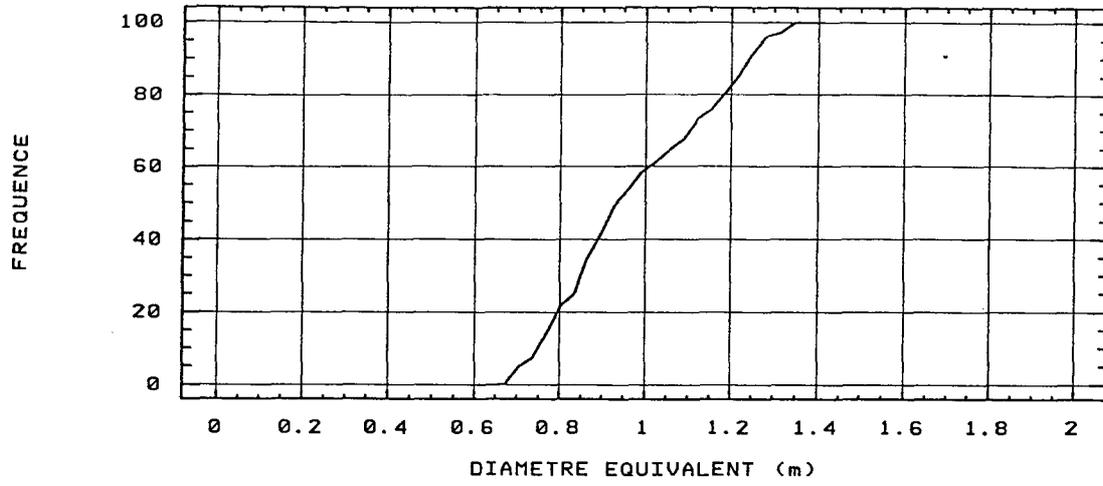


Figure 1 : Caractéristiques granulométriques de la rampe en enrochements (échelle 1/16.5).

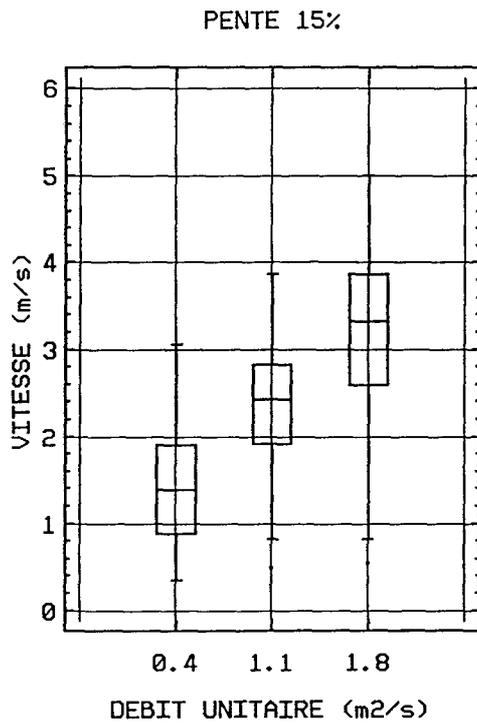
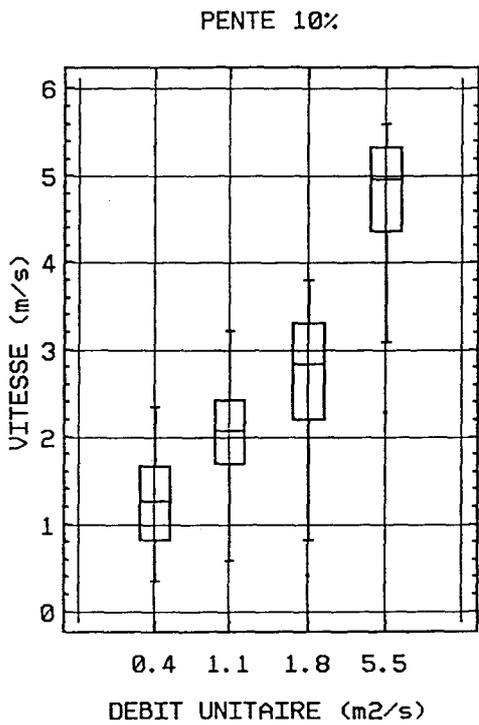
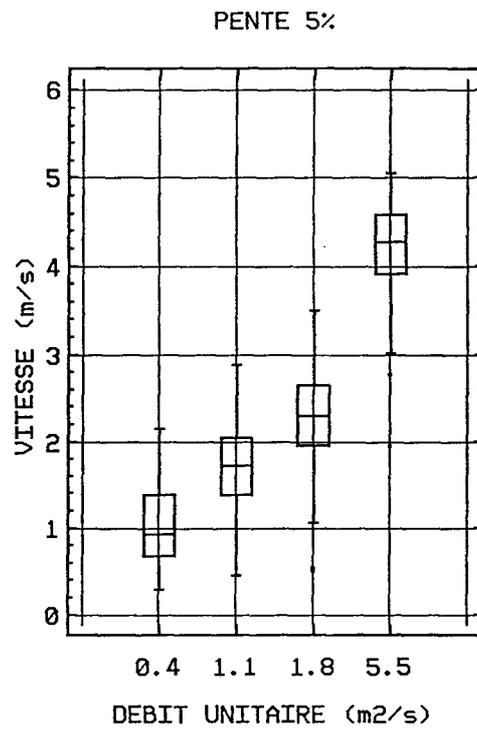
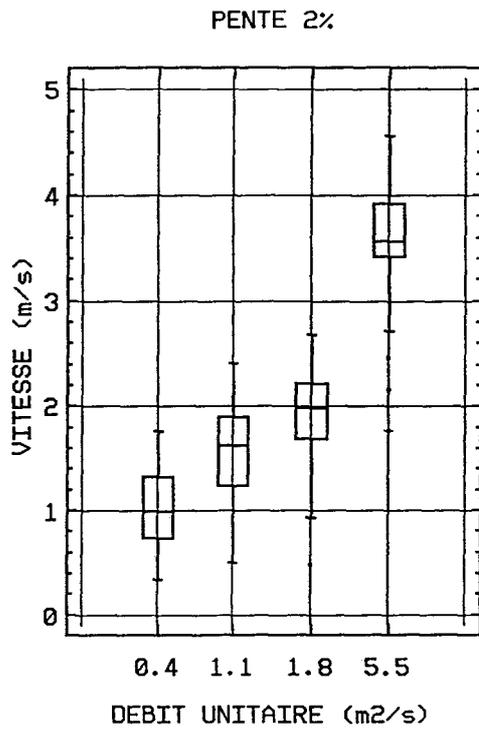


Figure 2 : Diagramme de boîtes de dispersion des distributions des vitesses mesurées.
Pentes 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J1).

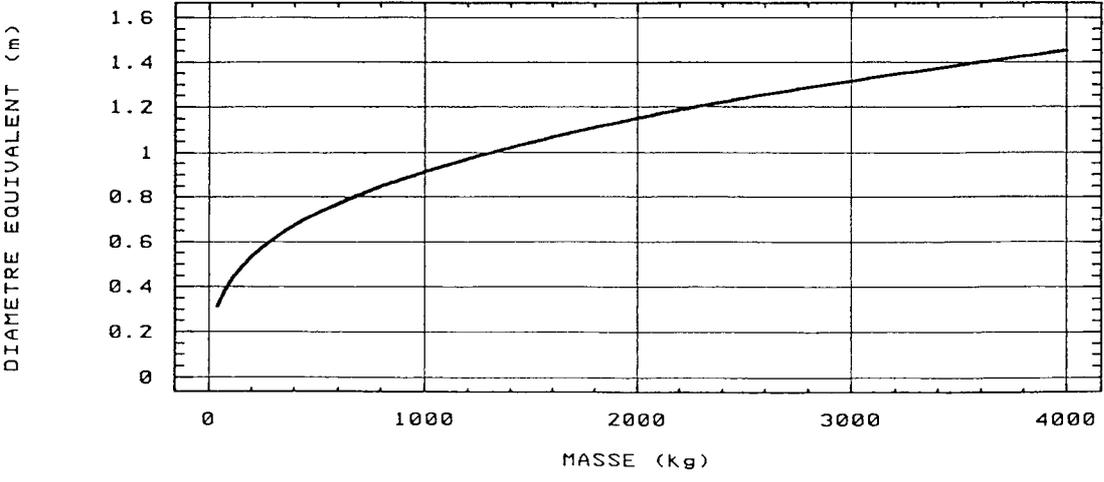
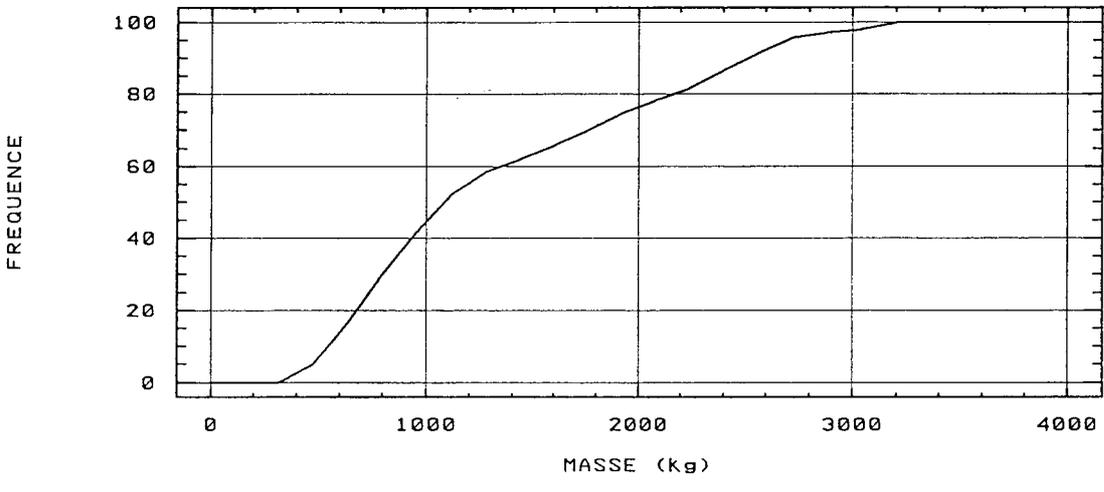
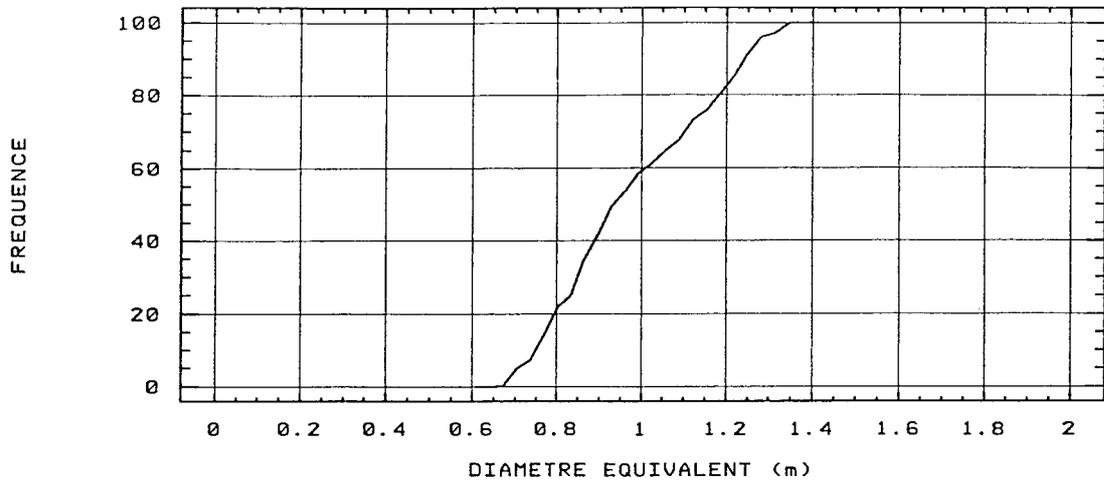


Figure 1 : Caractéristiques granulométriques de la rampe en enrochements (échelle 1/16.5).

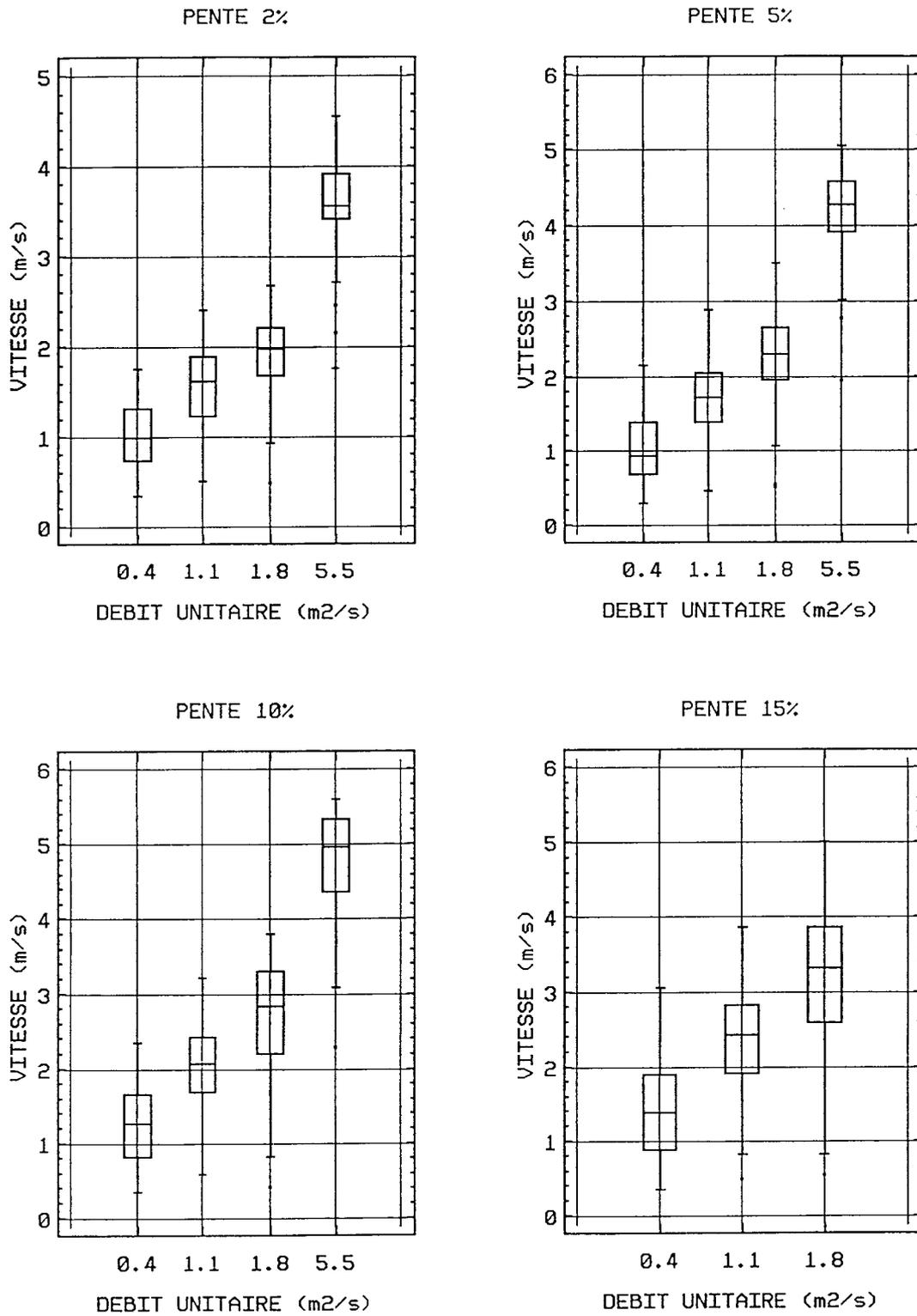


Figure 2 : Diagramme de boites de dispersion des distributions des vitesses mesurées.
Pentes 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J1).

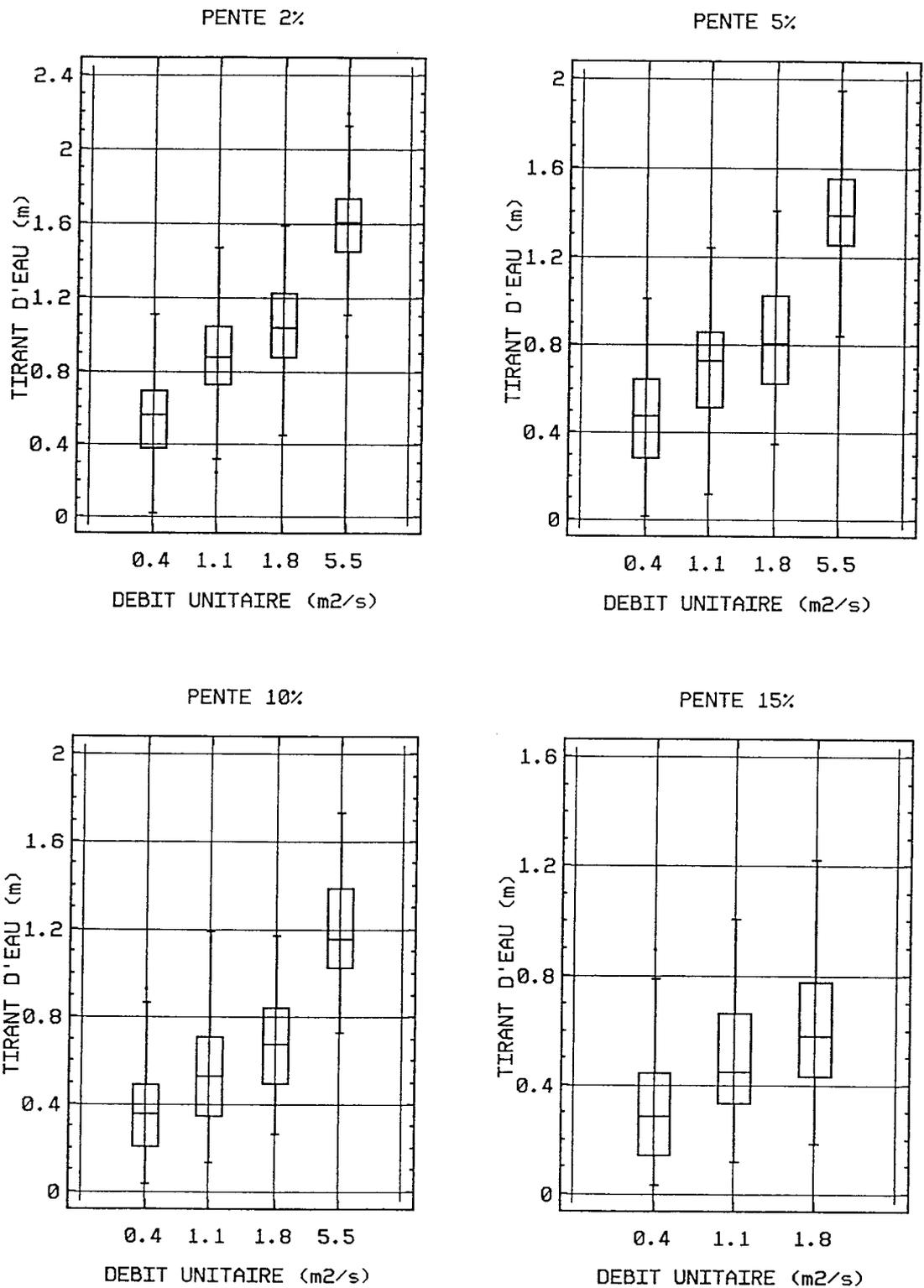


Figure 3 : Diagramme de boîtes de dispersion des distributions des tirants d'eau mesurés.
Pentes 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J1).

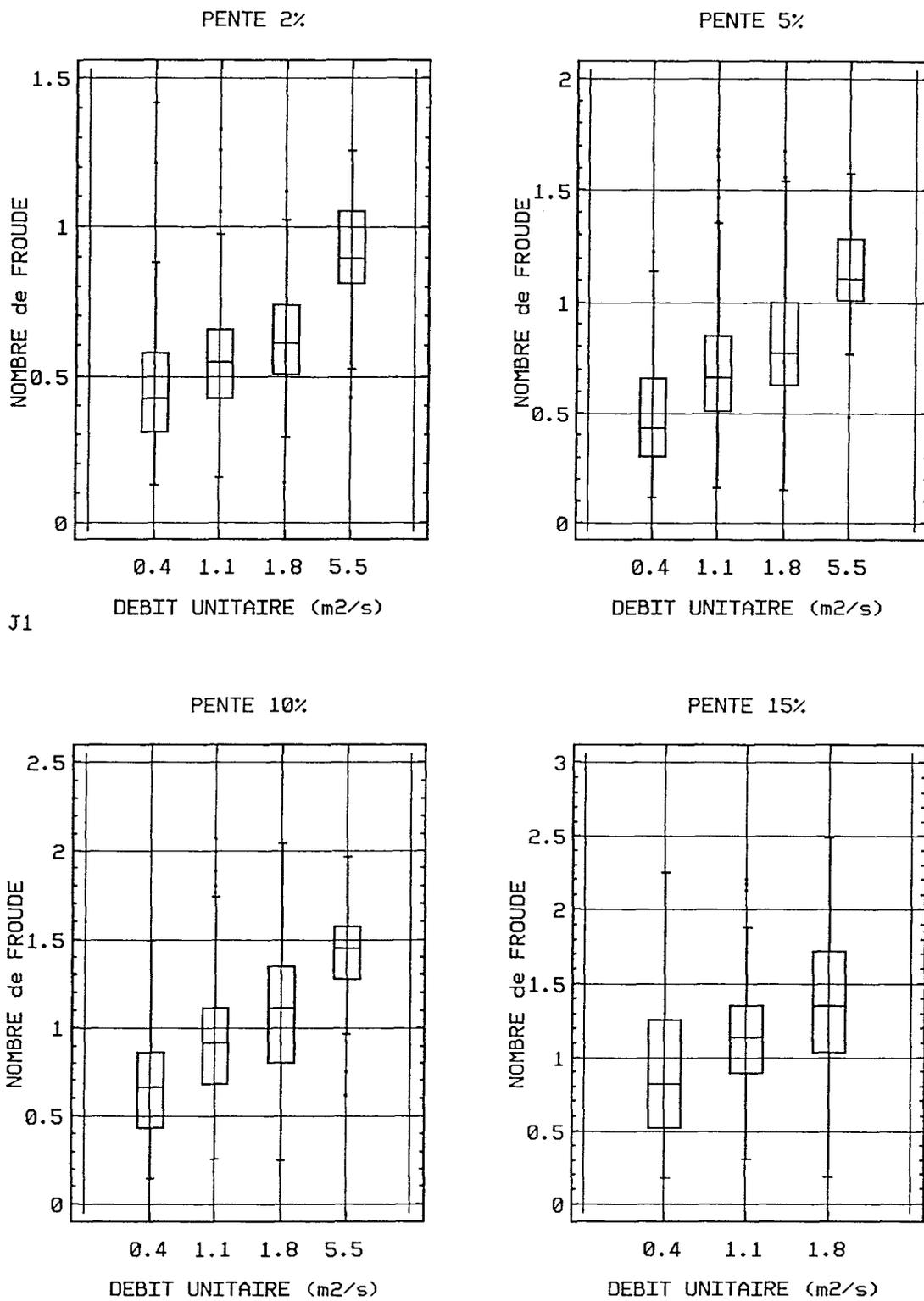


Figure 4 : Diagramme de boîtes de dispersion des distributions des nombres de Froude locaux. Pentes 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J1).

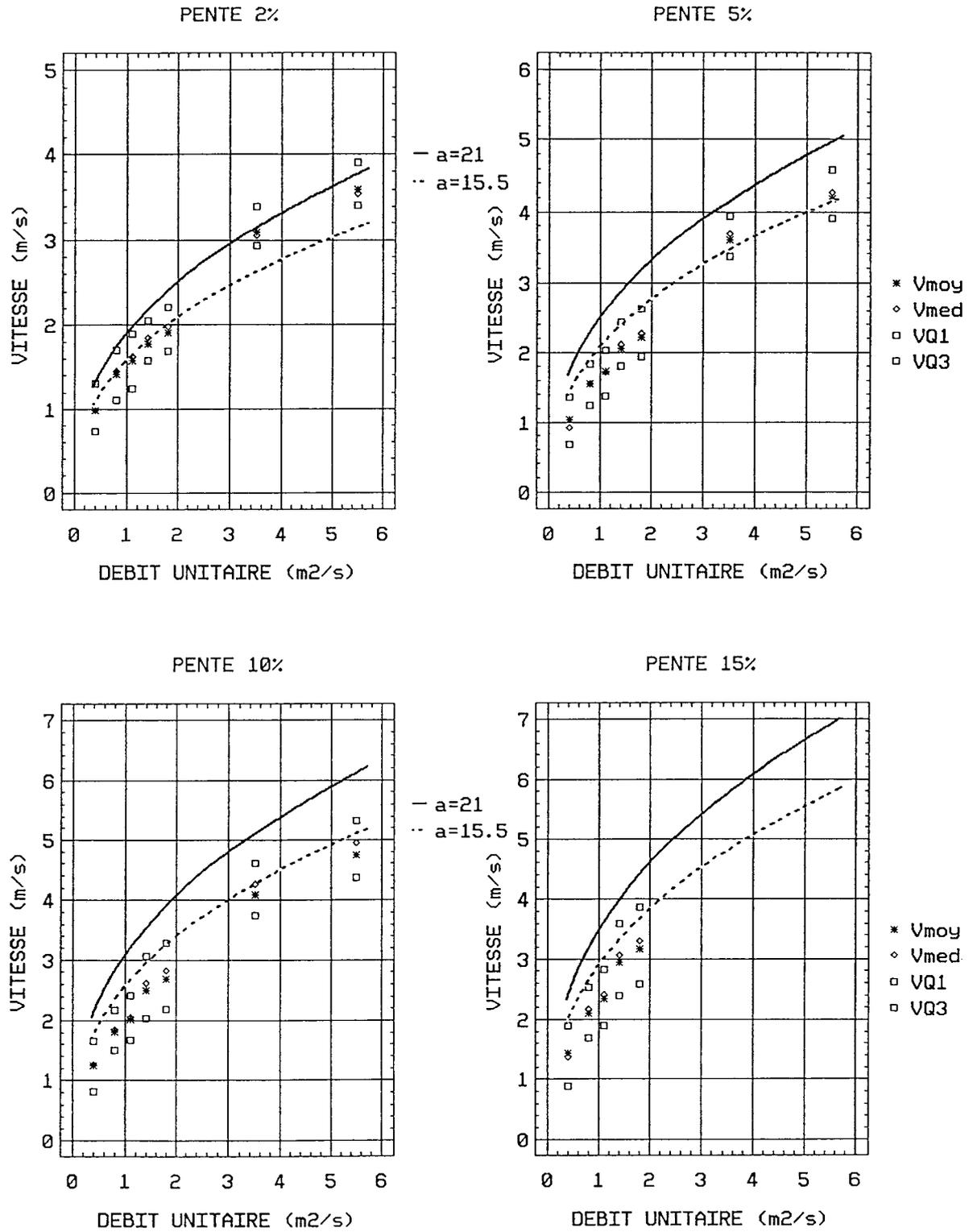


Figure 5 : Evolution des vitesses (moyenne, médiane, 1^{er} et dernier quartile) en fonction des débits.
Pentes 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J1).

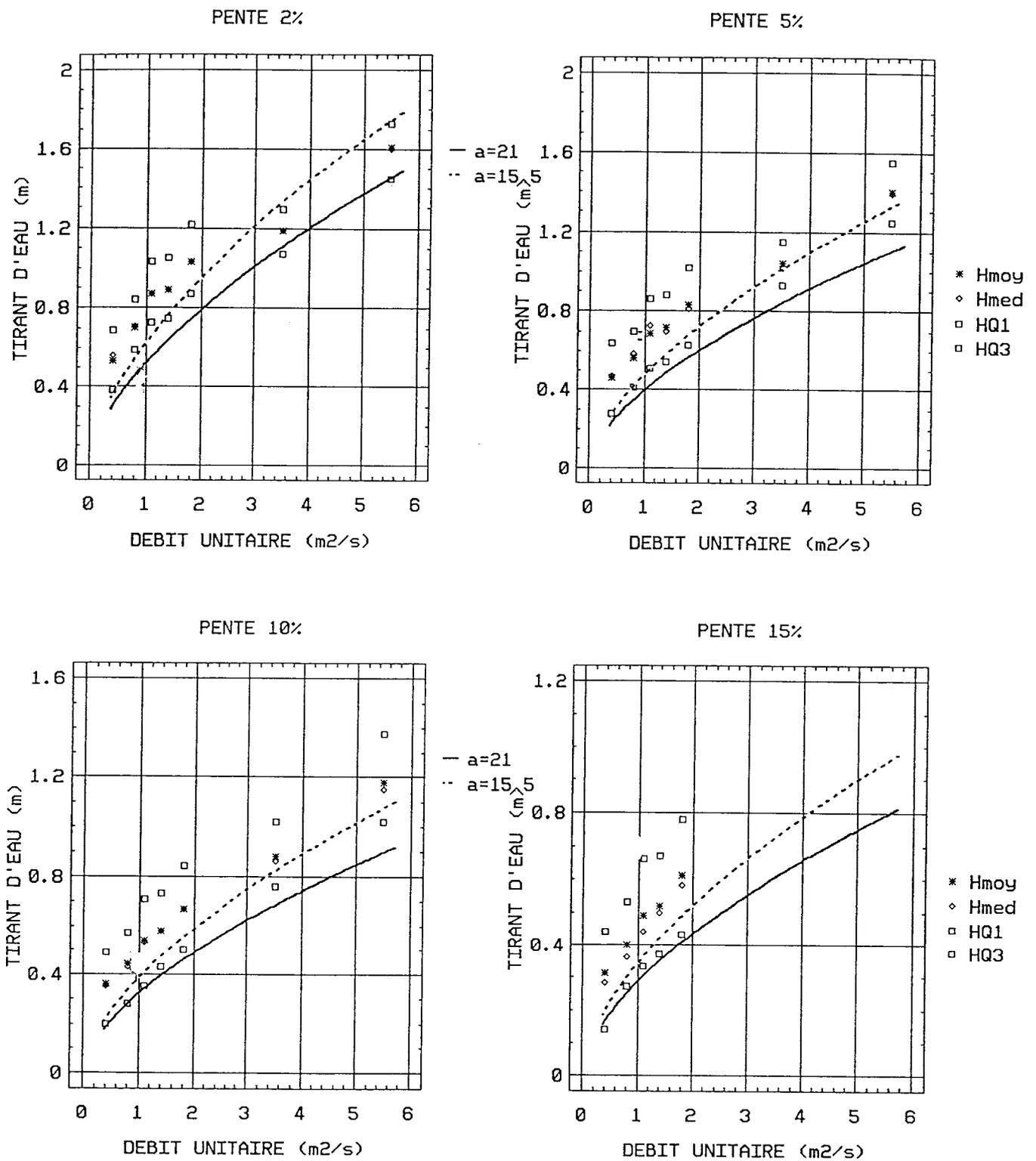


Figure 6 : Evolution des tirants d'eau (moyenne, médiane, 1^{er} et dernier quartile) en fonction des débits. Pentes 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J1).

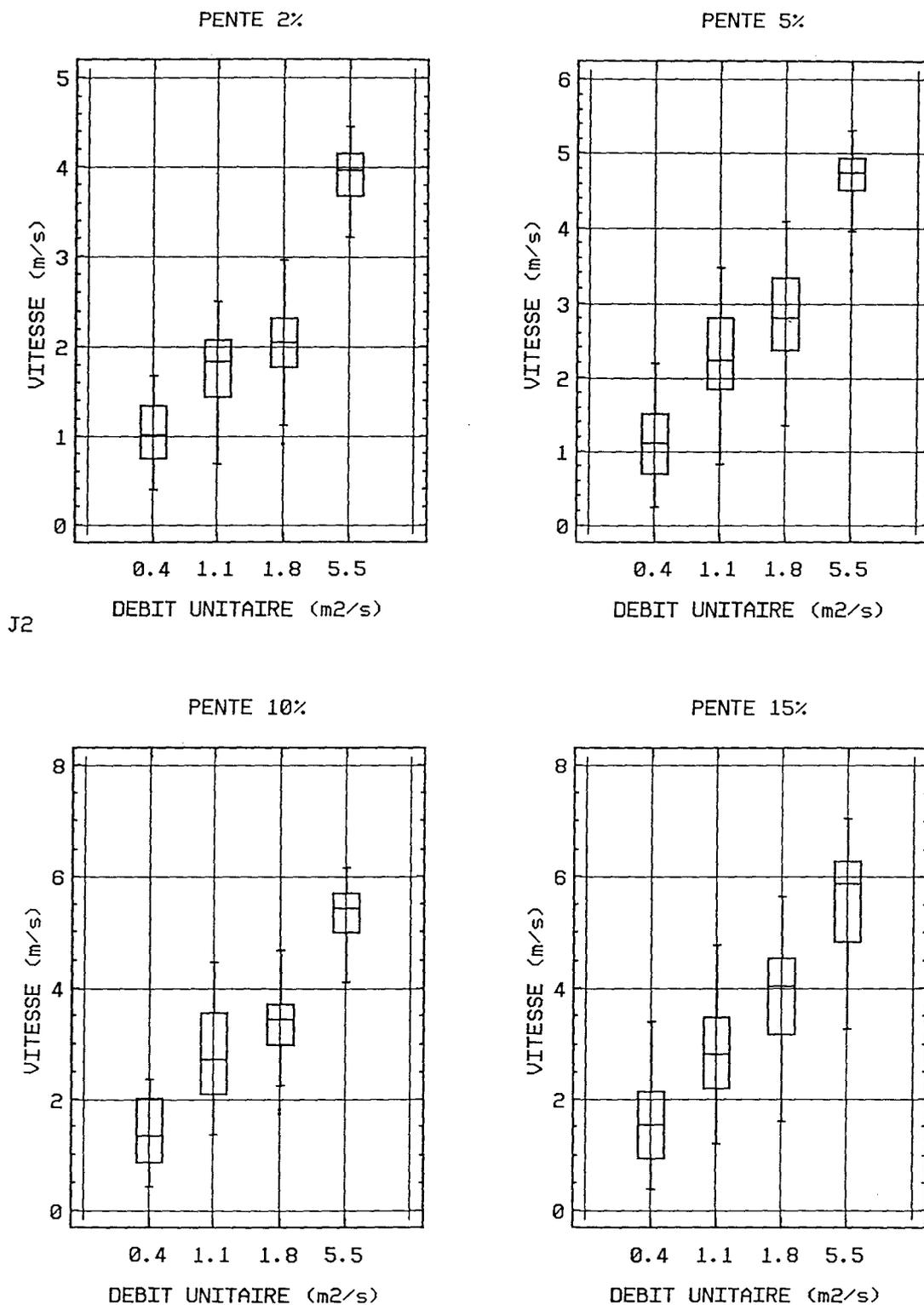


Figure 7 : Diagramme de boîtes de dispersion des distributions des vitesses mesurées.
Pentes 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J2).

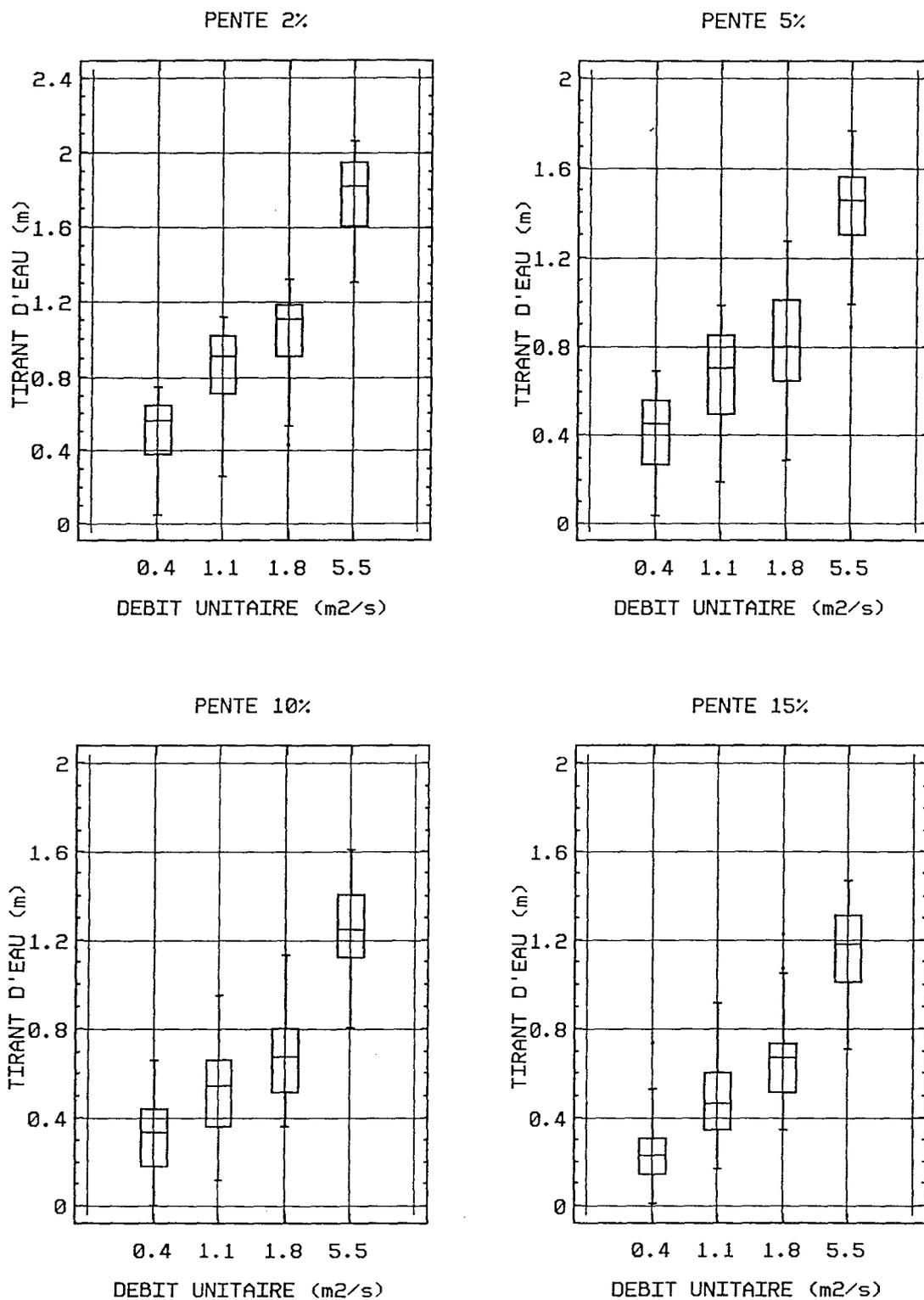


Figure 8 : Diagramme de boites de dispersion des distributions des tirants d'eau mesurés. Pentes 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J2).

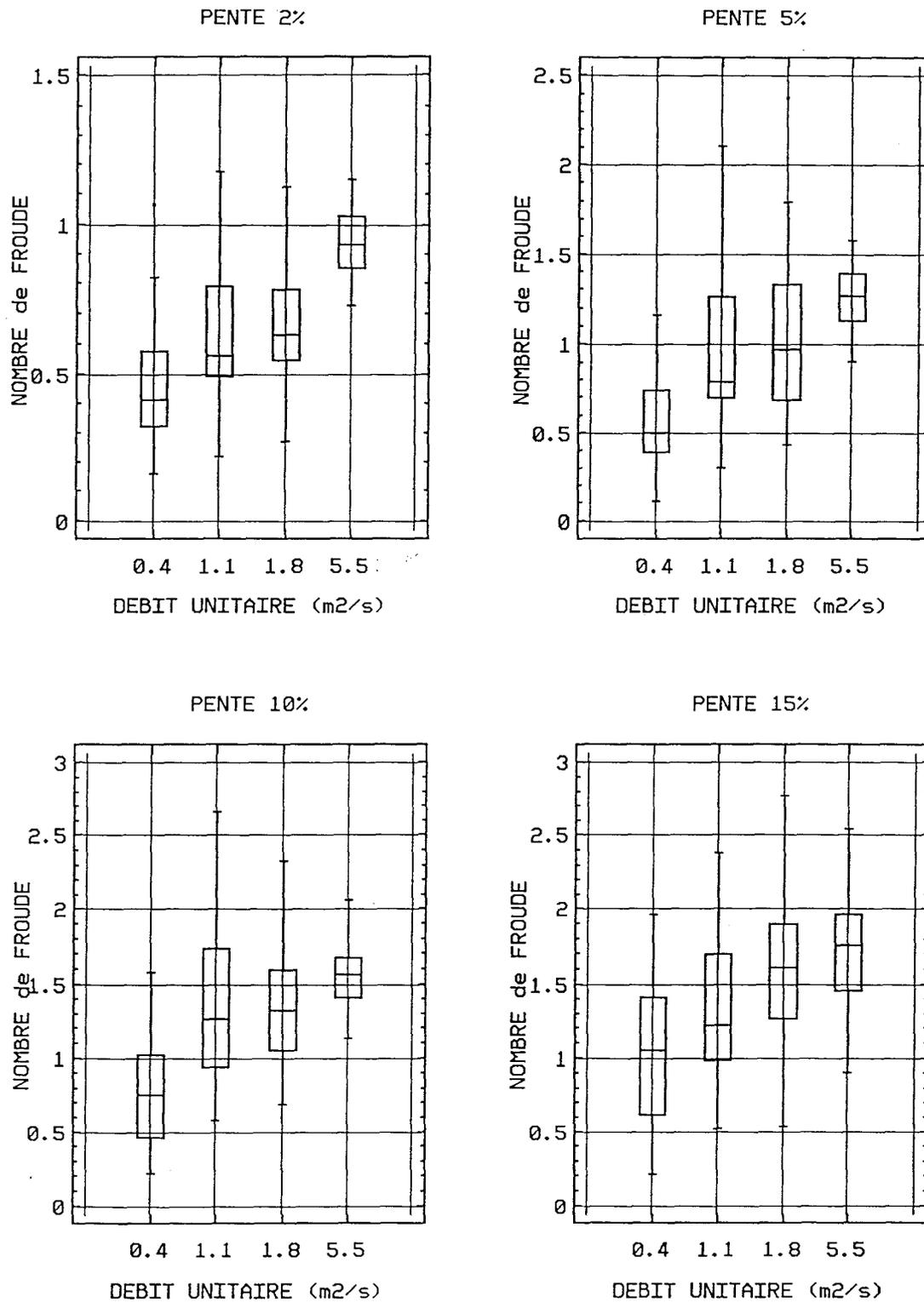


Figure 9 : Diagramme de boîtes de dispersion des distributions des nombres de Froude locaux.
Pentes 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J2).

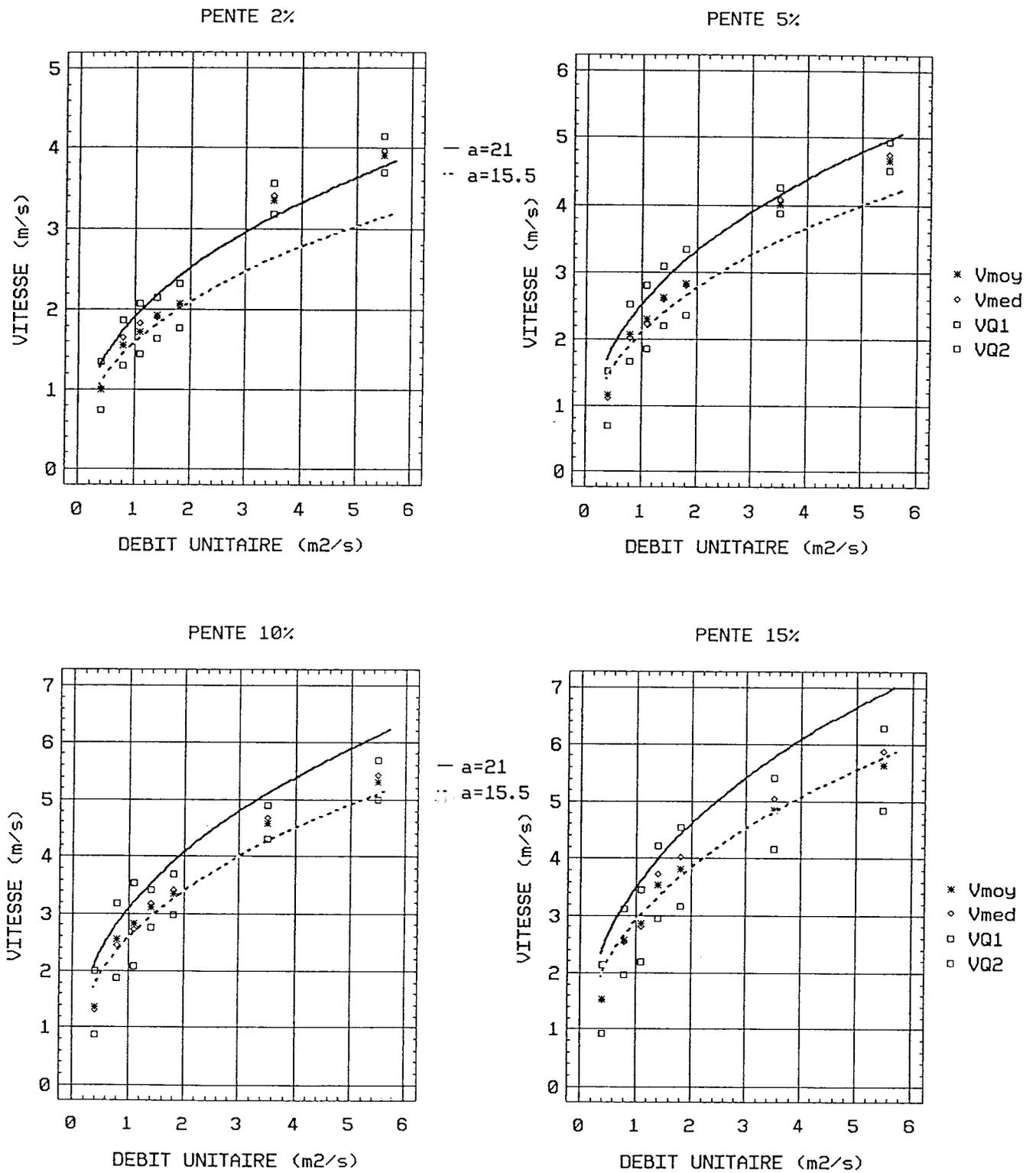


Figure 10 : Evolution des vitesses (moyenne, médiane, 1^{er} et dernier quartile) en fonction des débits.
Pentes 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J2).

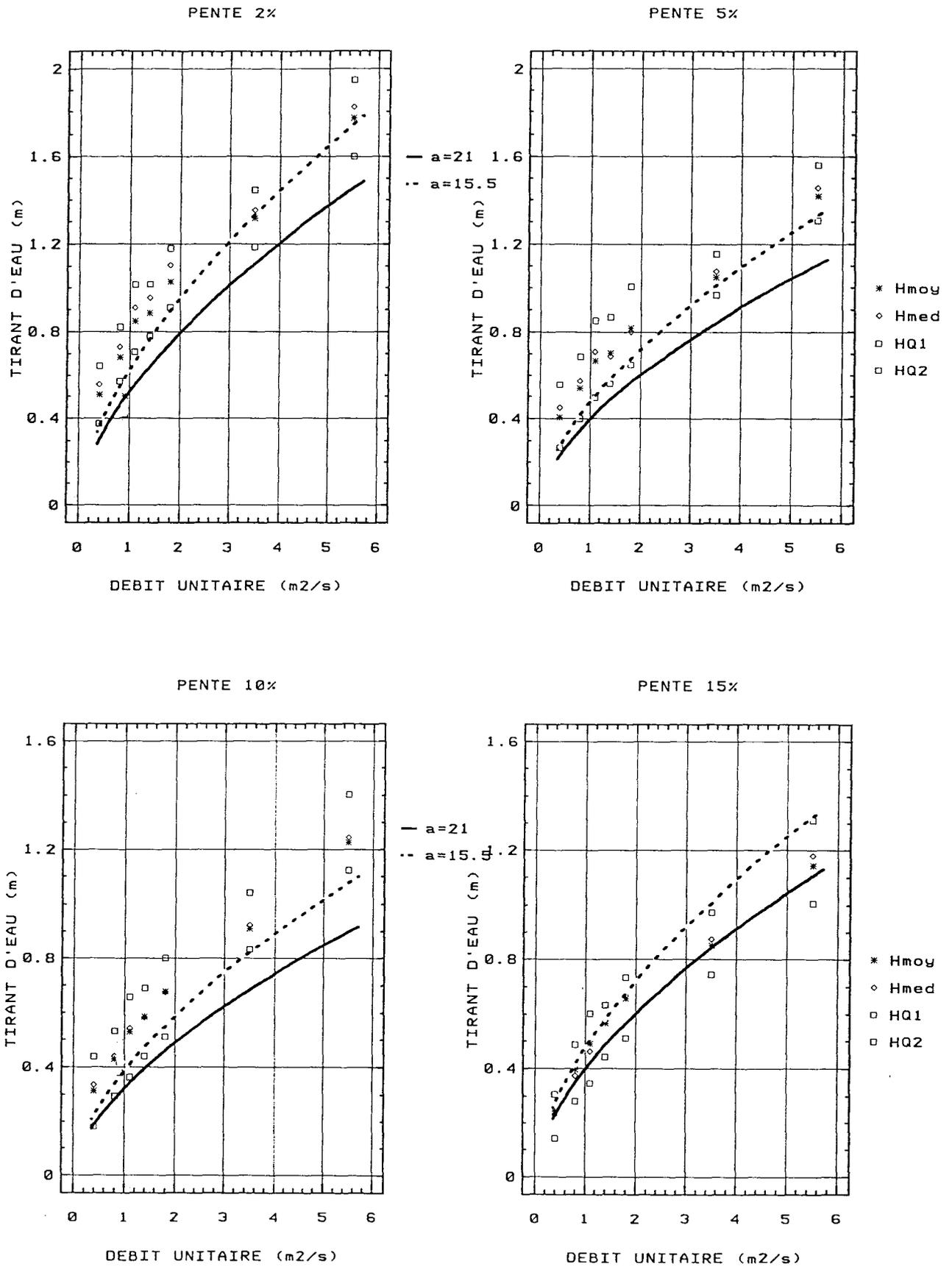


Figure 11 : Evolution des tirants d'eau (moyenne, médiane, 1^{er} et dernier quartile) en fonction des débits.
Pentes 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J2).

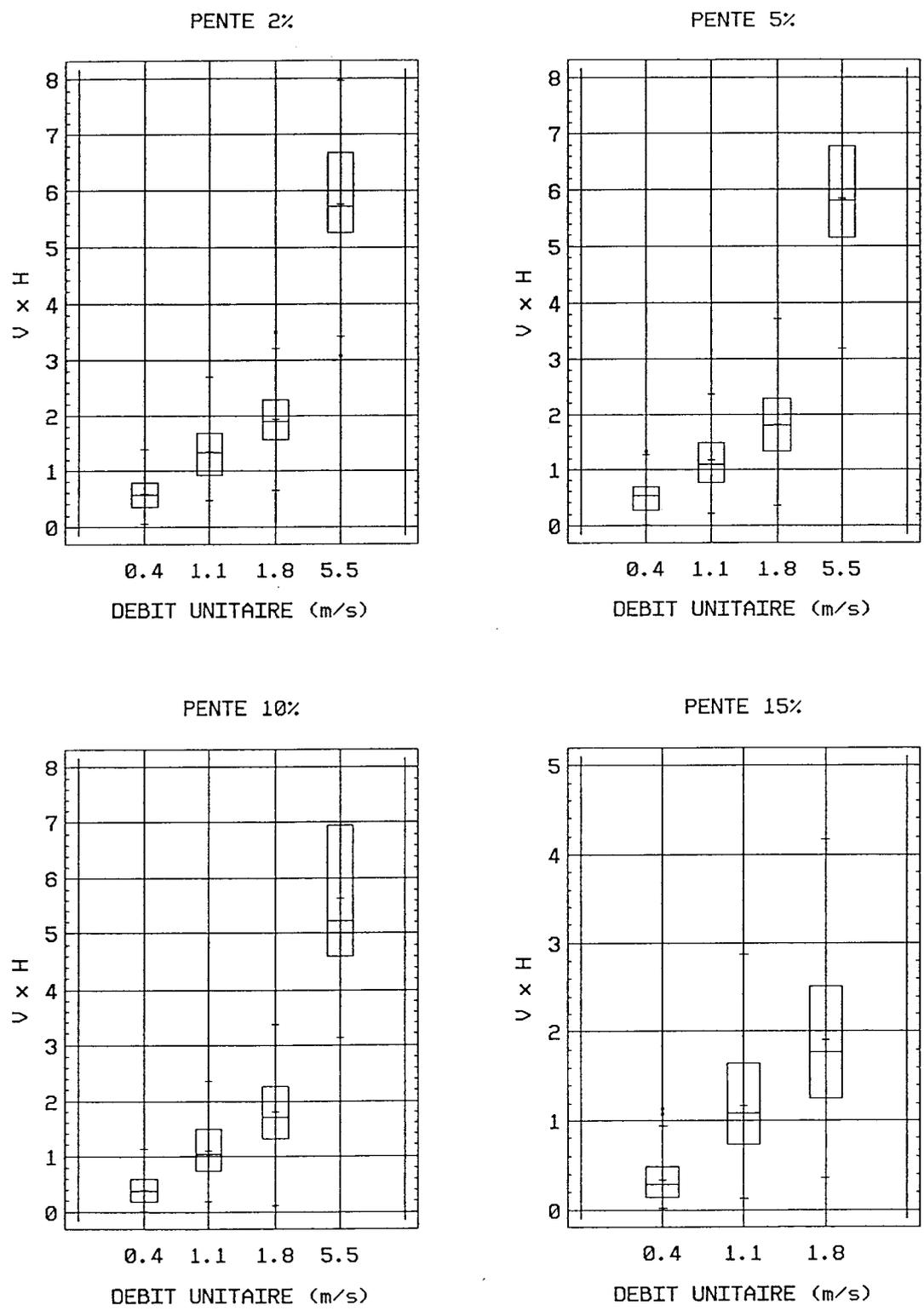


Figure 12 : Diagramme de boîtes de dispersion de la distribution des produits $V \times H$.
Pentes 2 %, 5 %, 10 %, 15 % (J1).

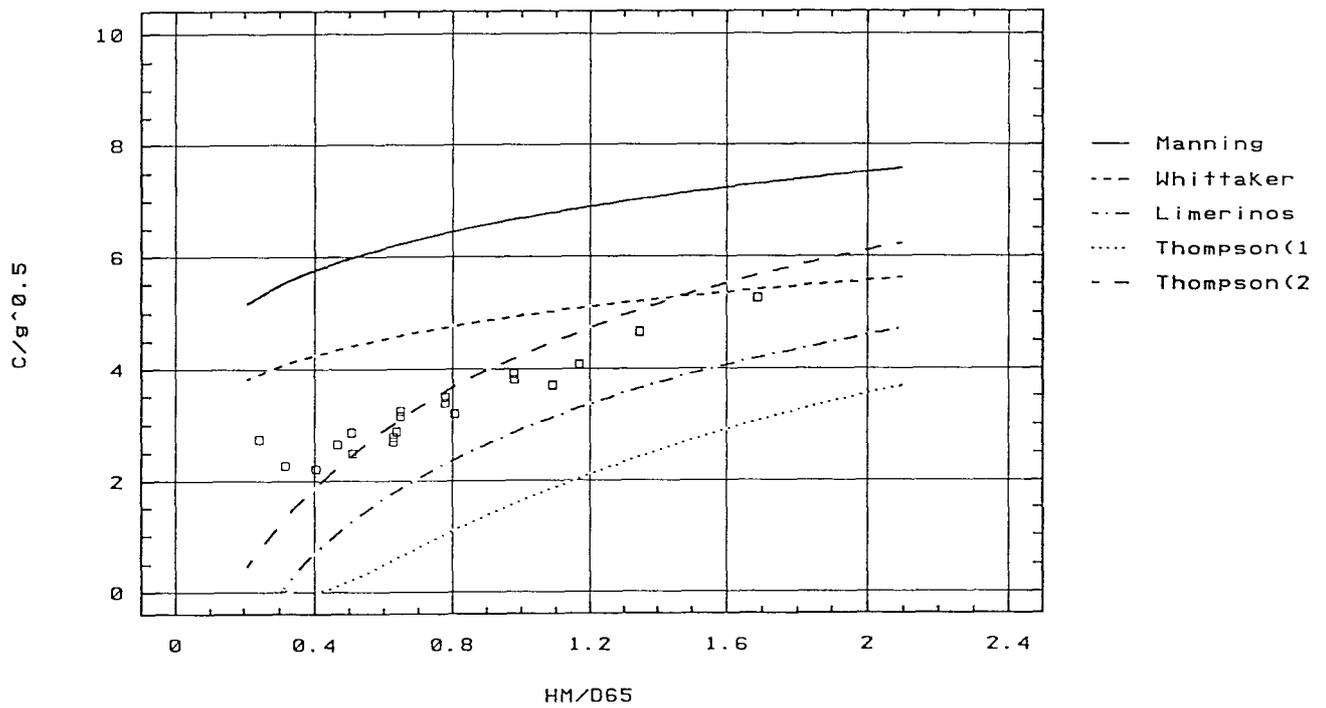
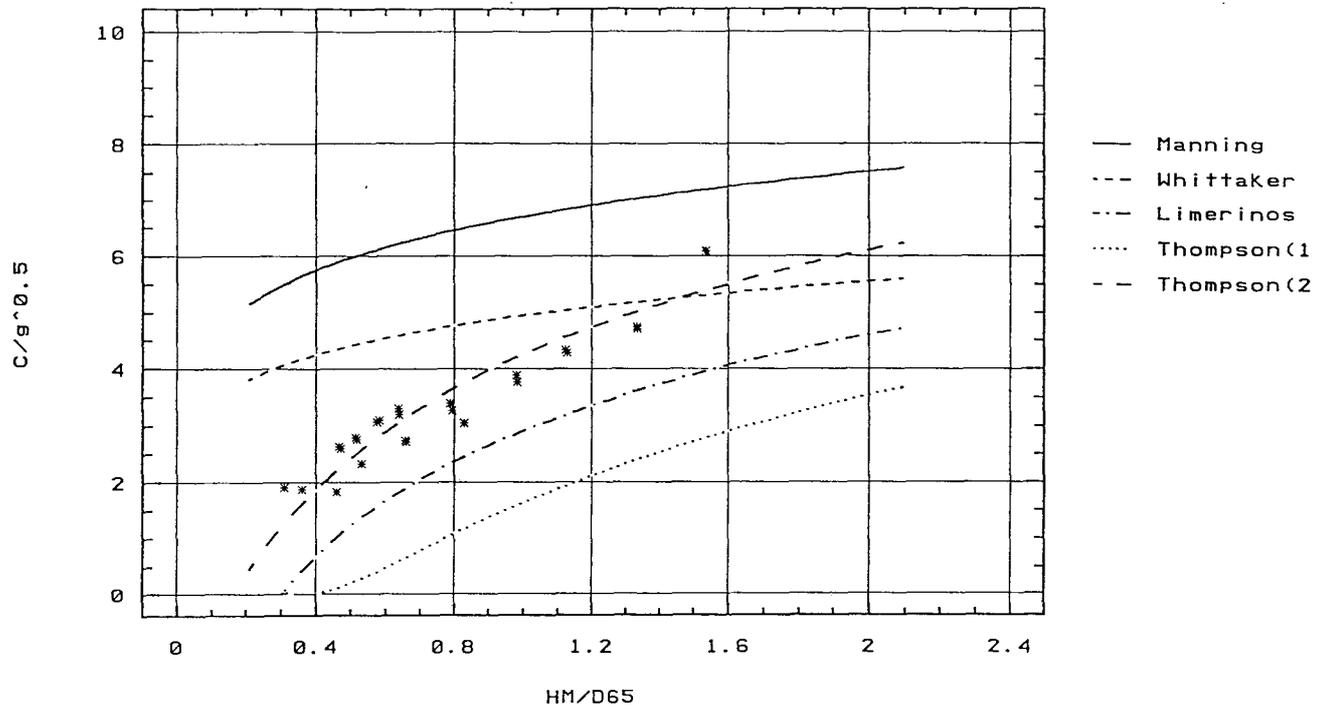


Figure 13 : Evolution de C/\sqrt{g} en fonction de $HM/D65$ et comparaison avec les relations de Manning, Wittaker et Jägi, Limerinos, Thomson et Campbell (J1 et J2).

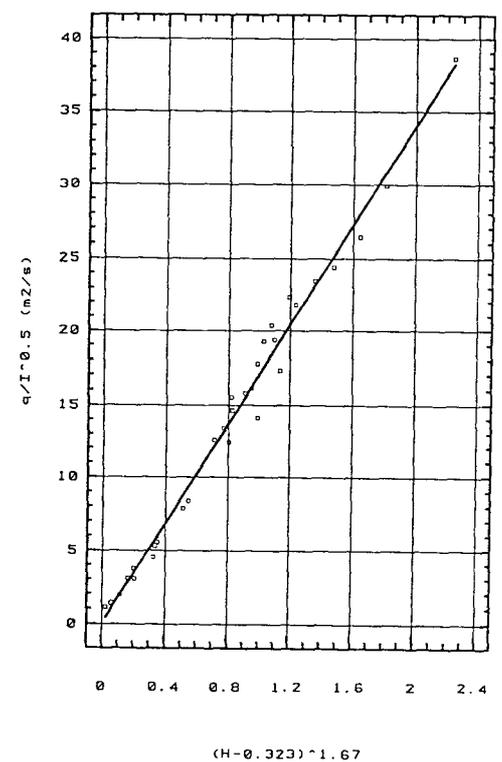
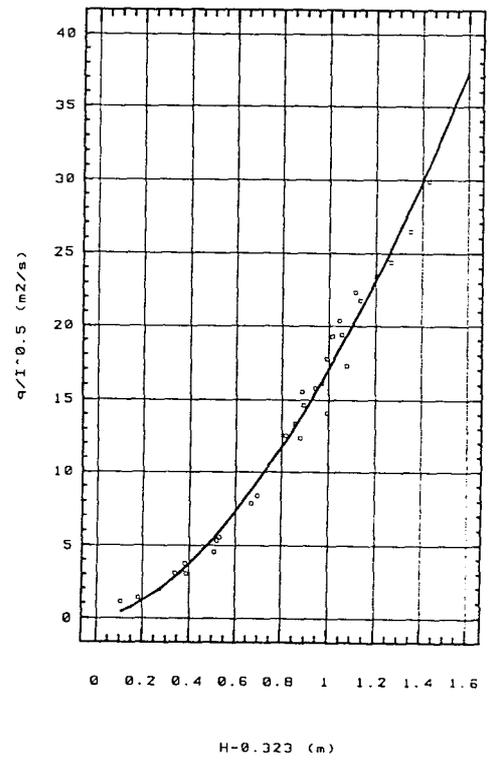
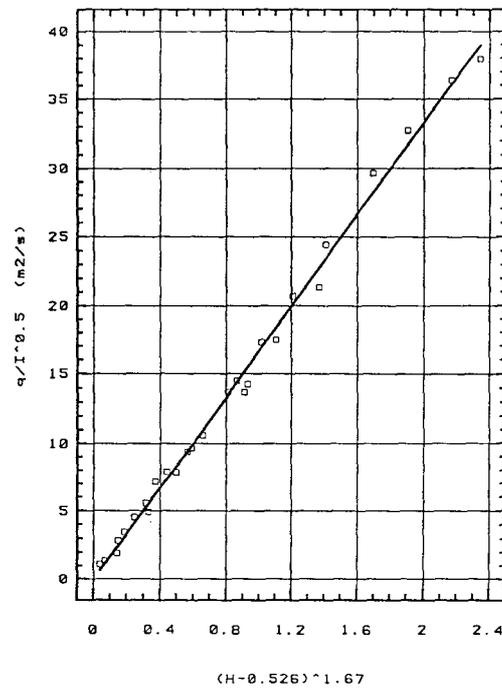
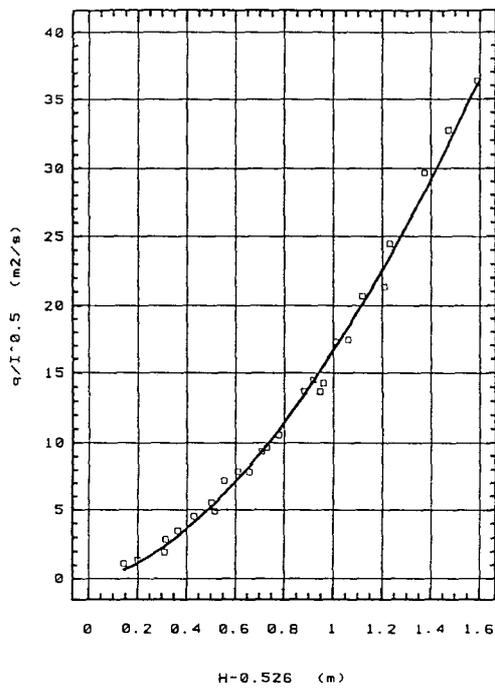


Figure 14 : Relation entre le débit unitaire, la pente et le tirant d'eau (J1 et J2).

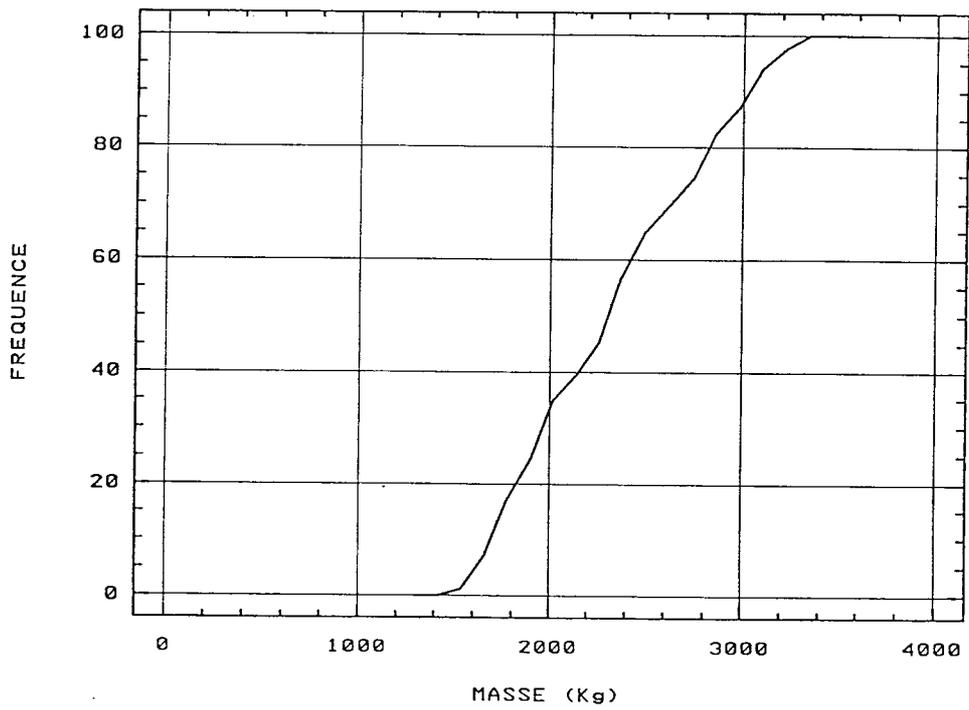
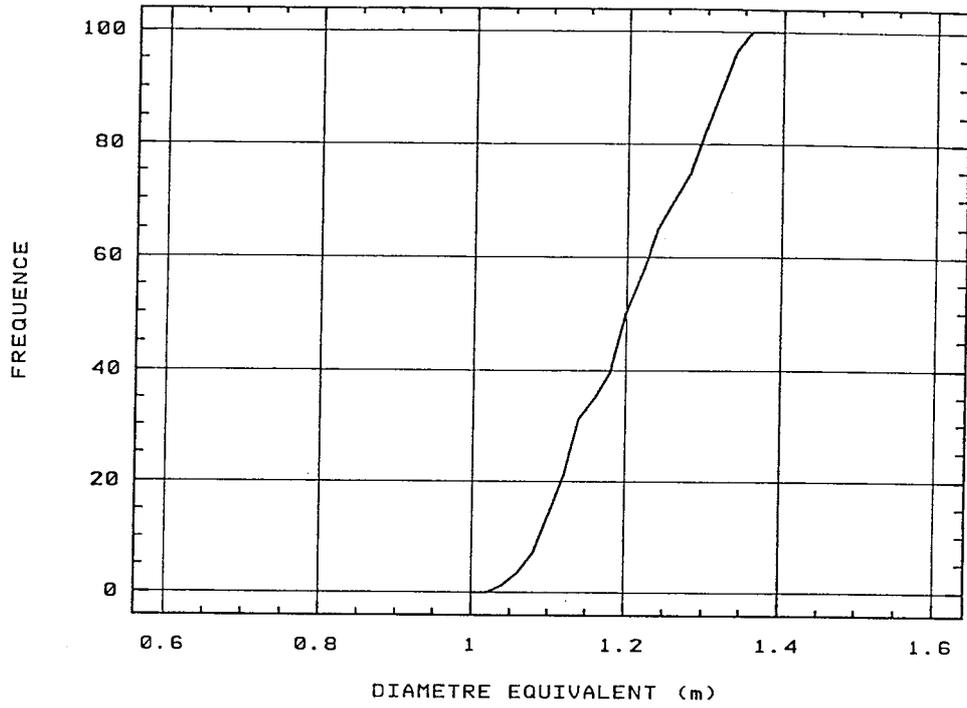


Figure 15 : Caractéristiques granulométriques du seuil à pente de coursier 10 % (échelle 1/32).

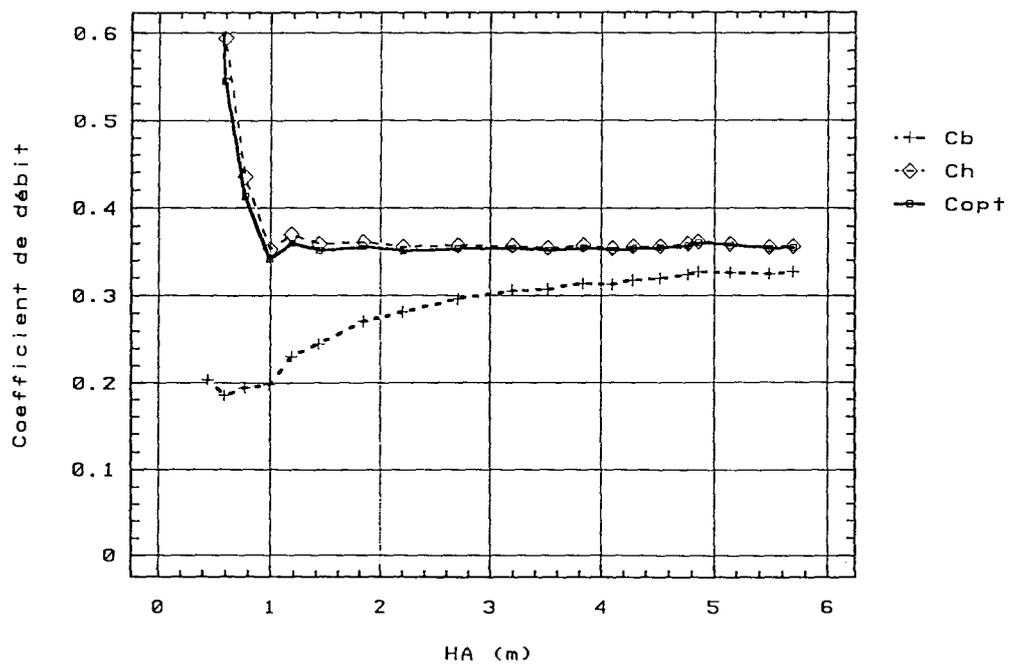
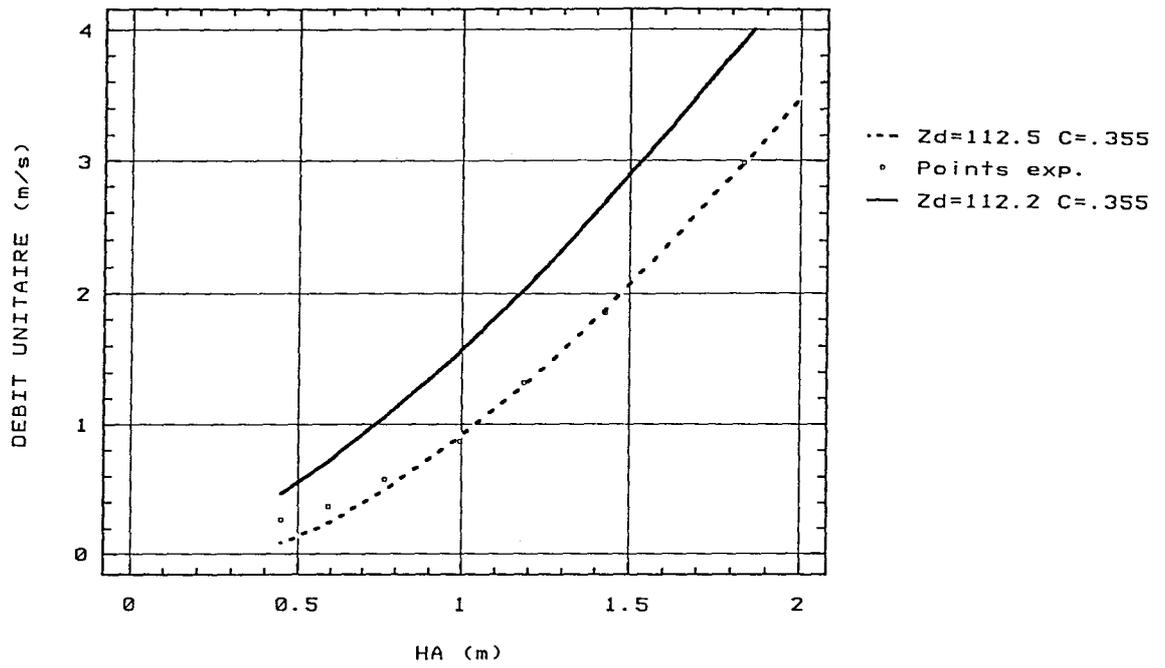


Figure 16 : Relation charge amont - débit et évolution du coefficient de débit, crête en enrochements libres.

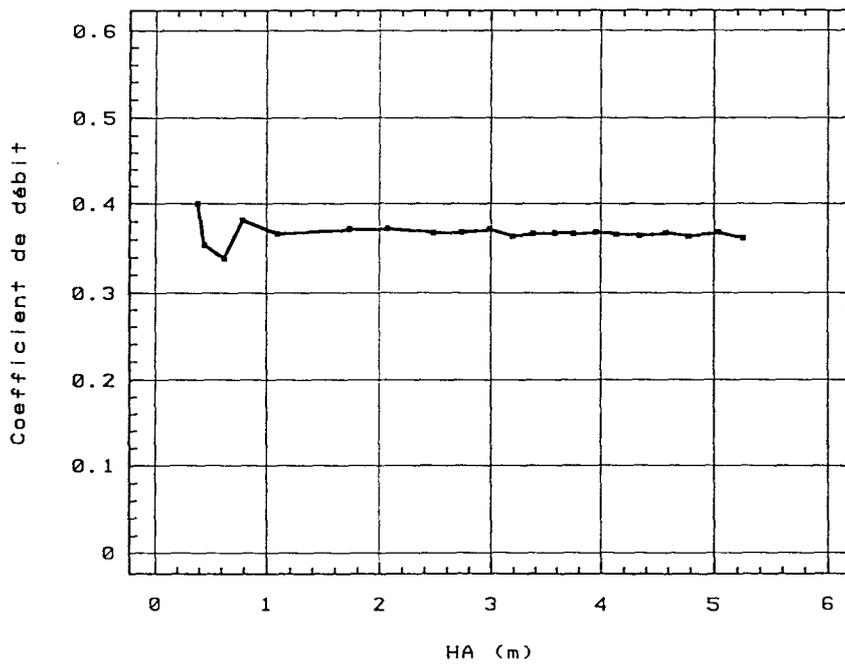
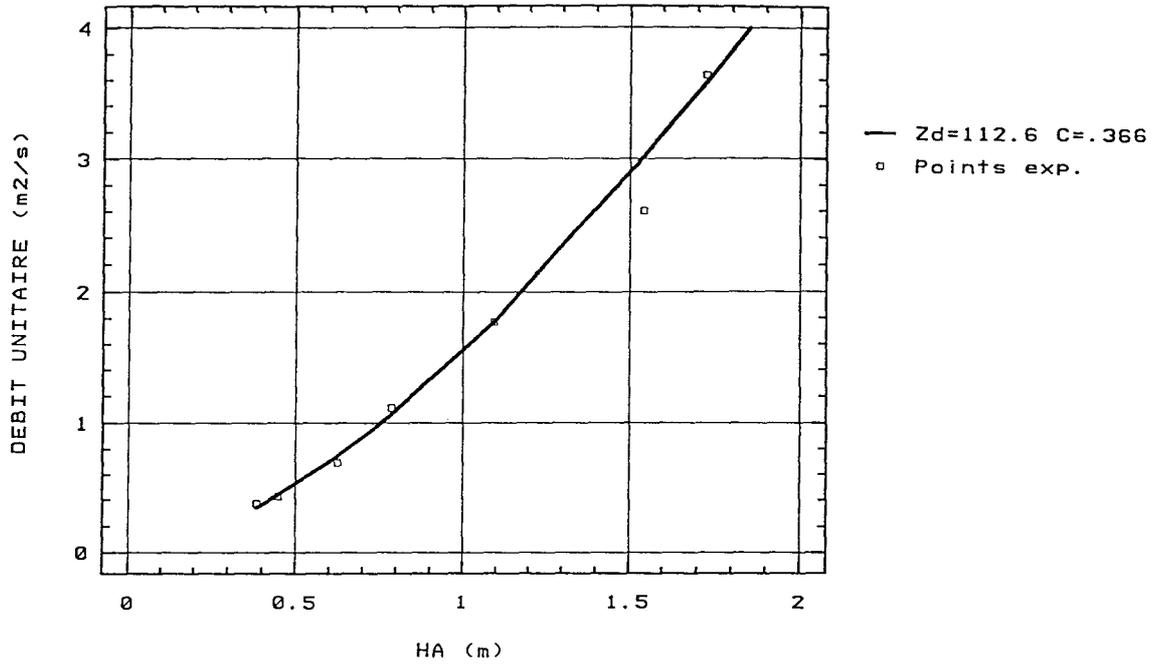


Figure 17 : Relation charge amont - débit et évolution du coefficient de débit, crête en enrochements jointoyés.

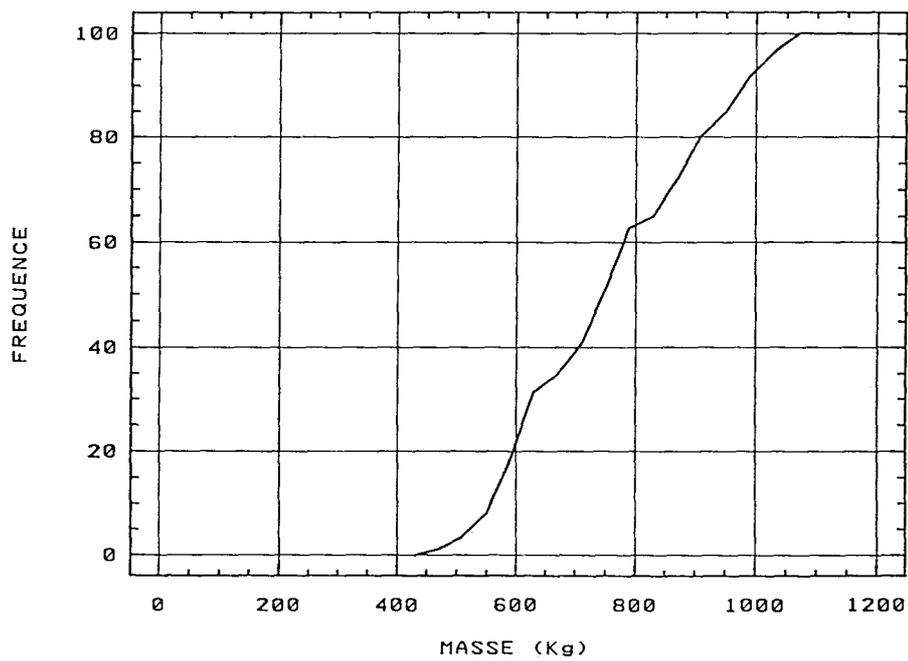
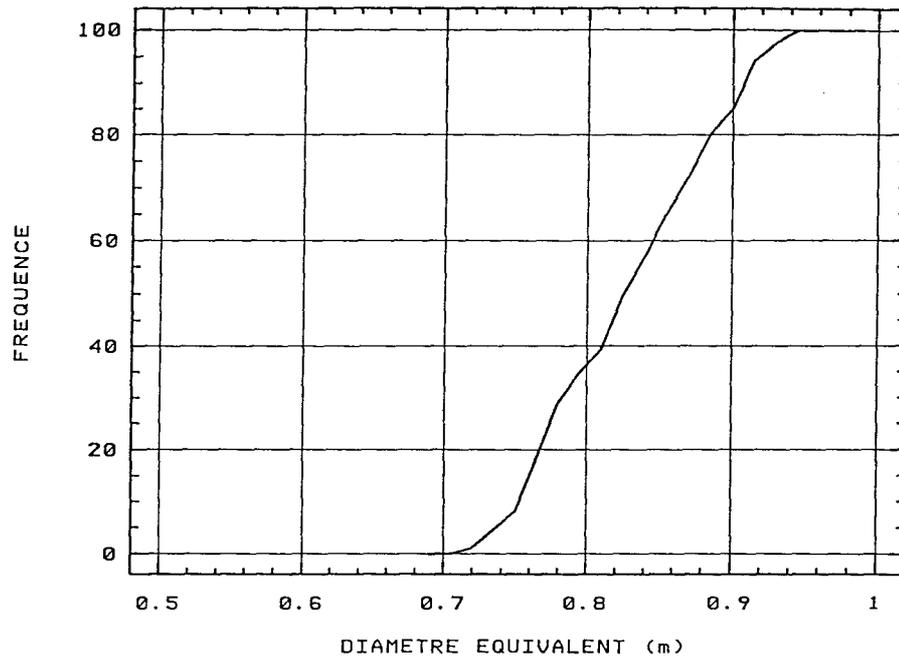


Figure 18 : Caractéristiques granulométriques du seuil à pente de coursier 10 % (échelle 1/22).

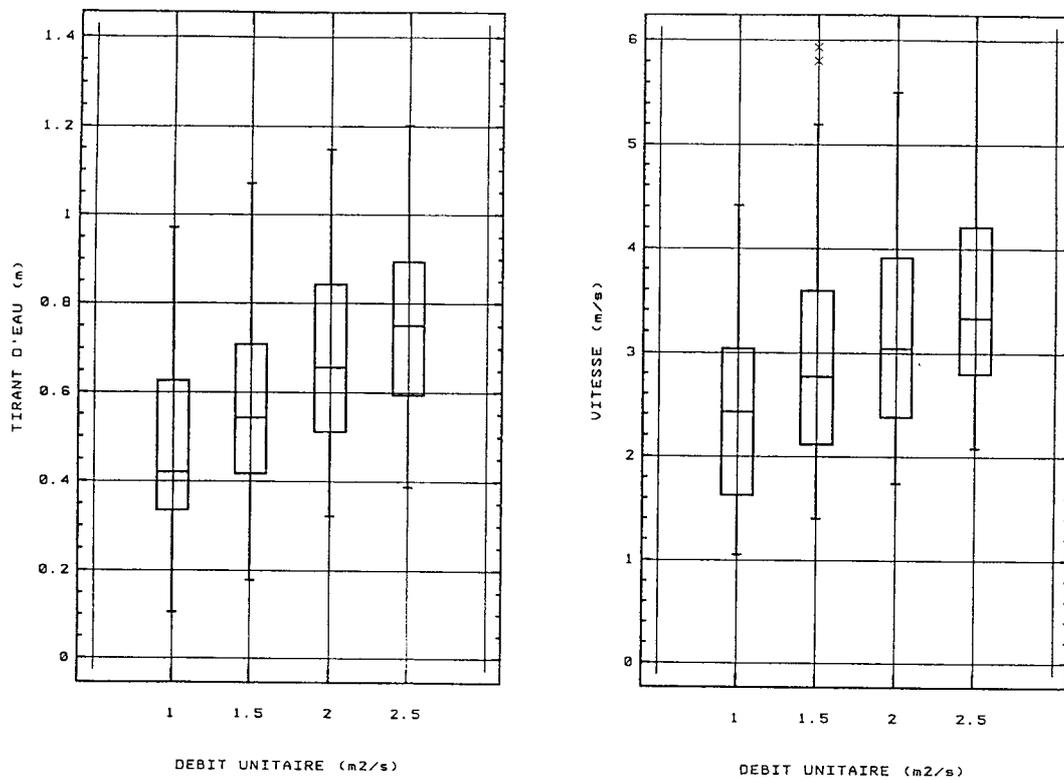


Figure 19 : Diagramme de boîtes de dispersion des tirants d'eau des rapports débit unitaire/tirant d'eau pour des débits de 1, 1.5, 2, 2.5 m³/s.

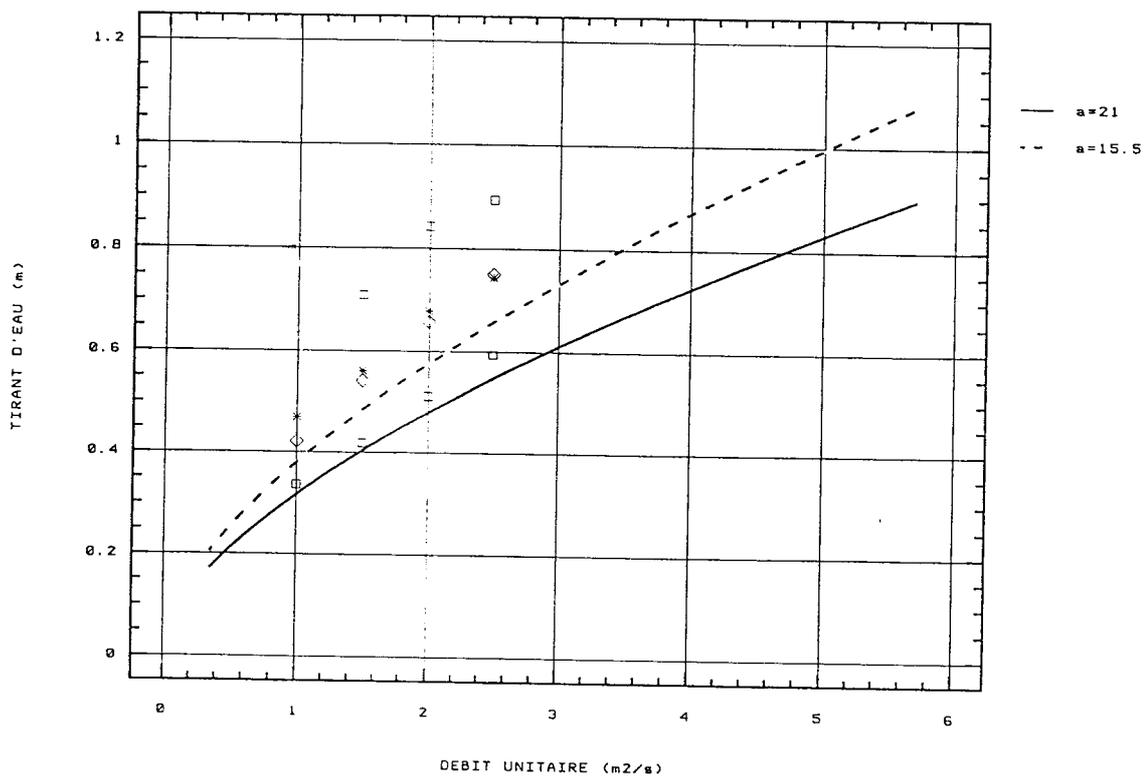
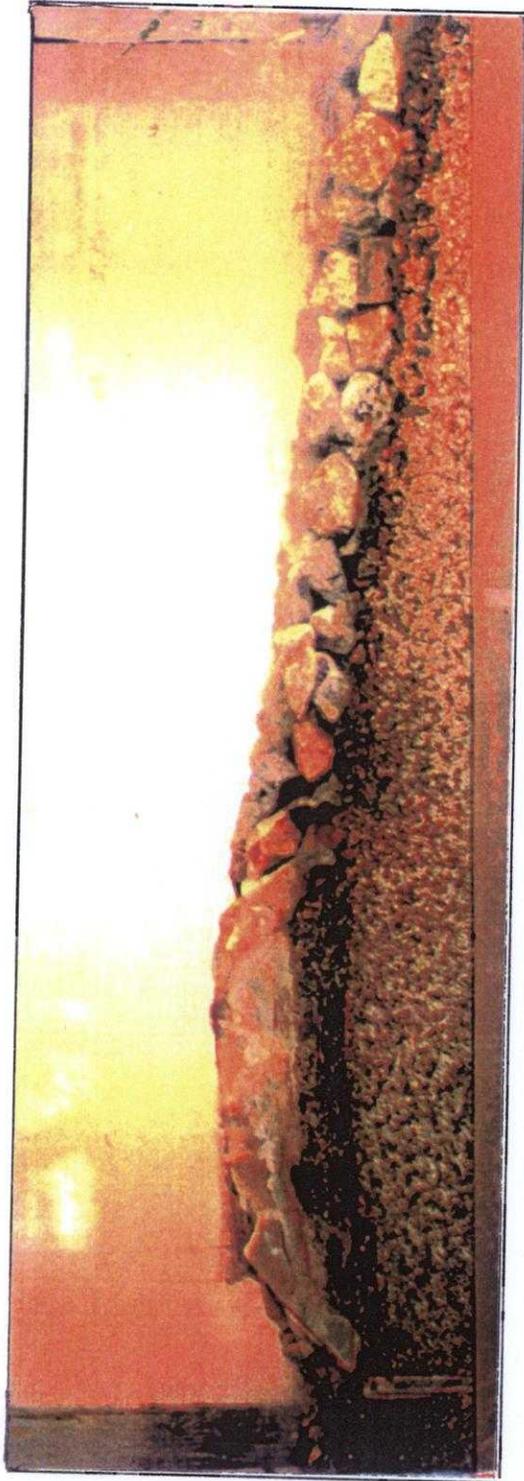


Figure 20 : Evolution des tirants d'eau (moyenne, médiane, premier et dernier quartile) en fonction du débit.



Le modèle réduit du seuil en canal vitré

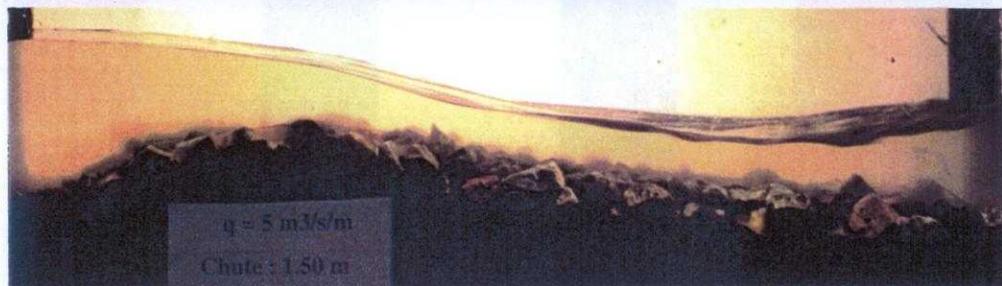
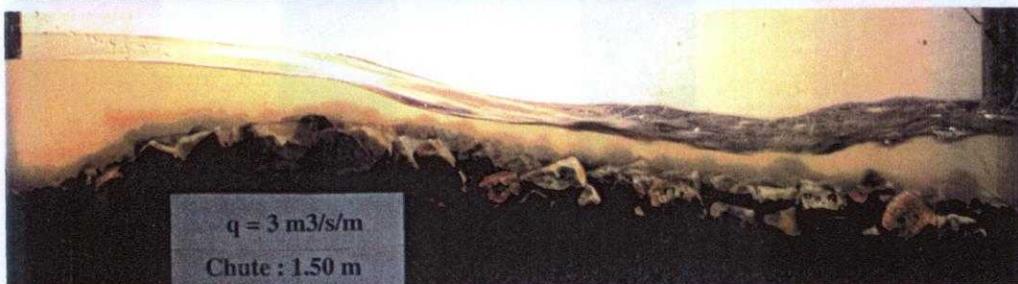
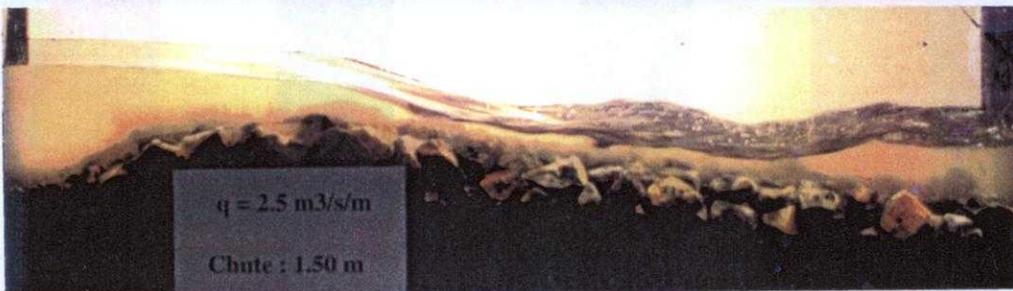


Planche 2 : Evolution de la ligne d'eau sur le seuil en fonction du débit unitaire (coursier à 10 %, chute 1.50 m)

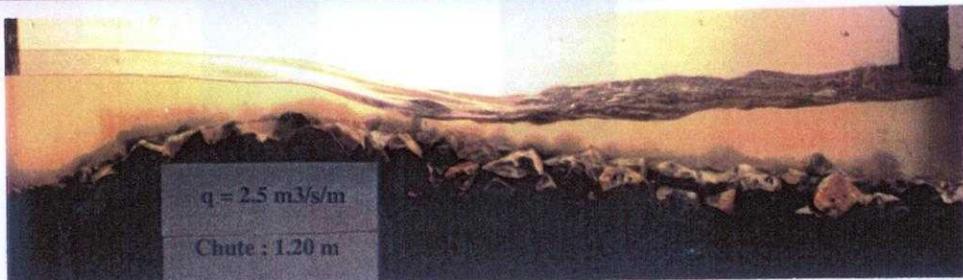
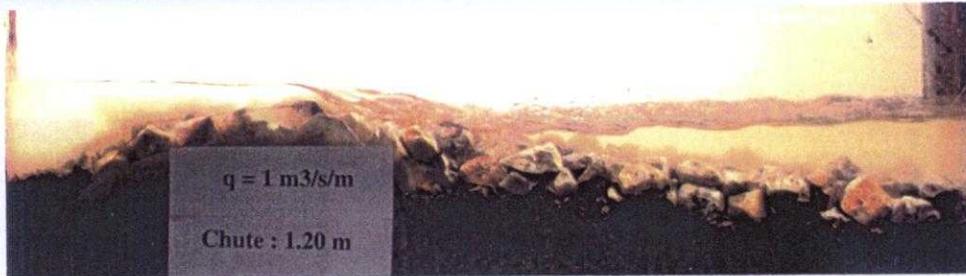


Planche 3 : Influence de la chute sur la ligne d'eau sur le seuil (coursier à 10 %, débits unitaires de 1, 1.5 et 2.5 m³/s/m, chutes 1.50 m et 1.20 m)

PROFILS EN LONG

$q = 1 \text{ m}^2/\text{s}$

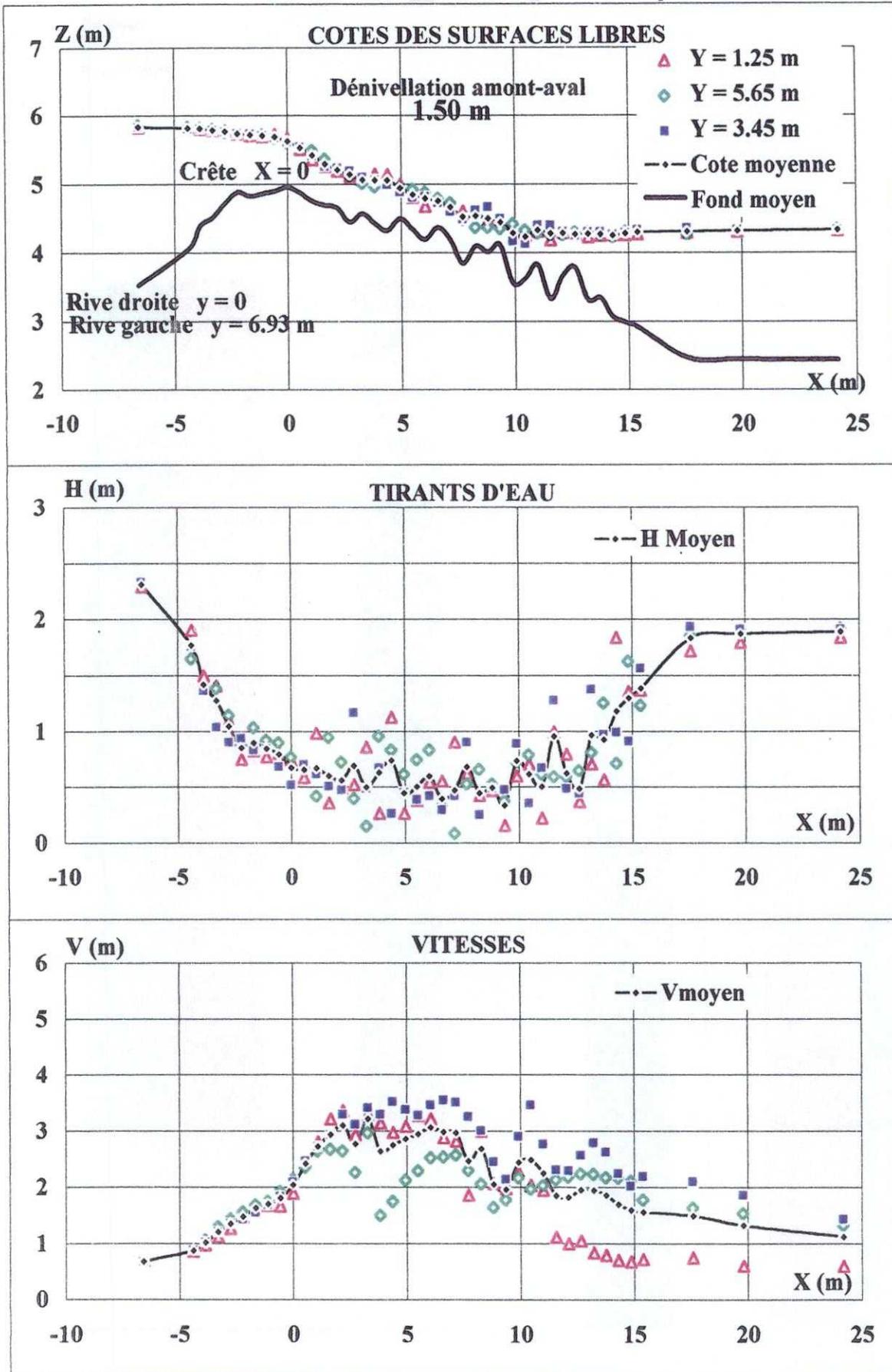


Figure 21 : Profil en long de la ligne d'eau, de la vitesse en surface et du tirant d'eau ($q = 1 \text{ m}^3/\text{s/m}$)

PROFILS EN LONG

$q = 1.5 \text{ m}^2/\text{s}$

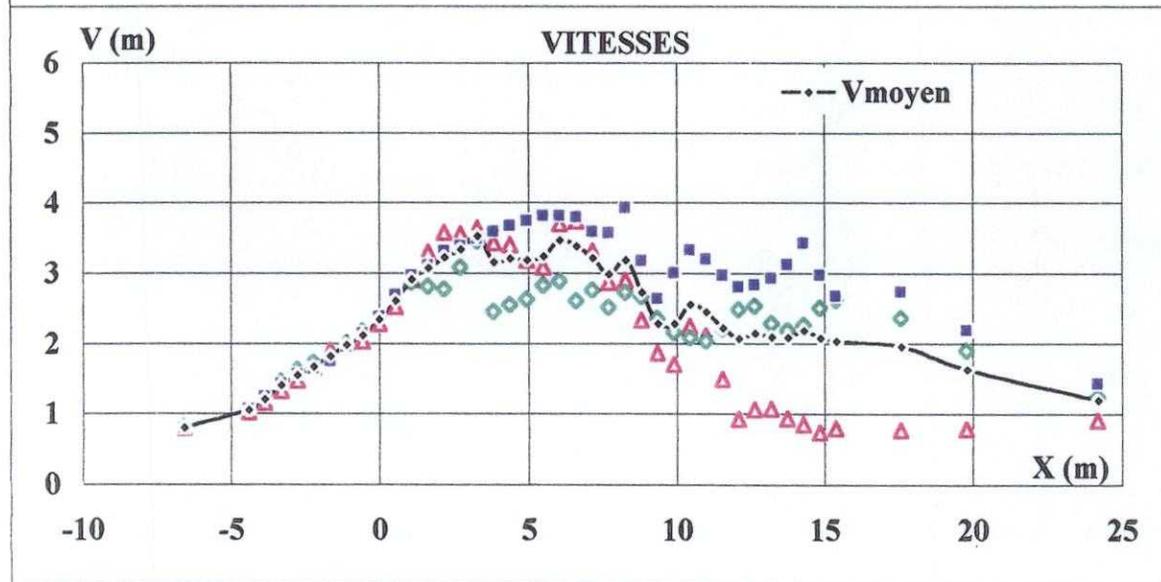
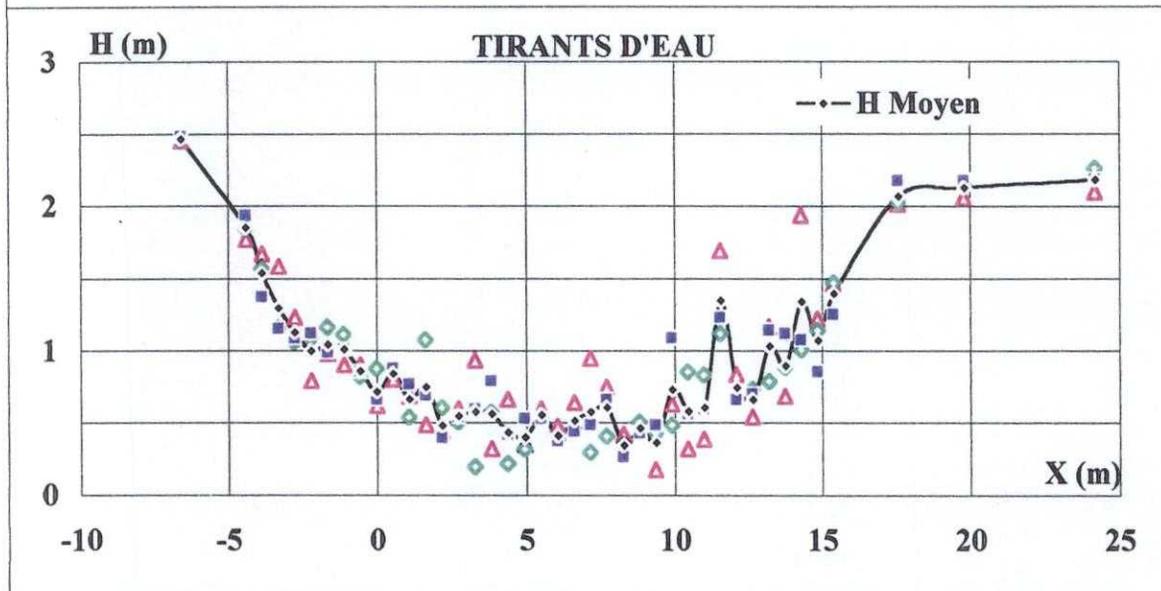
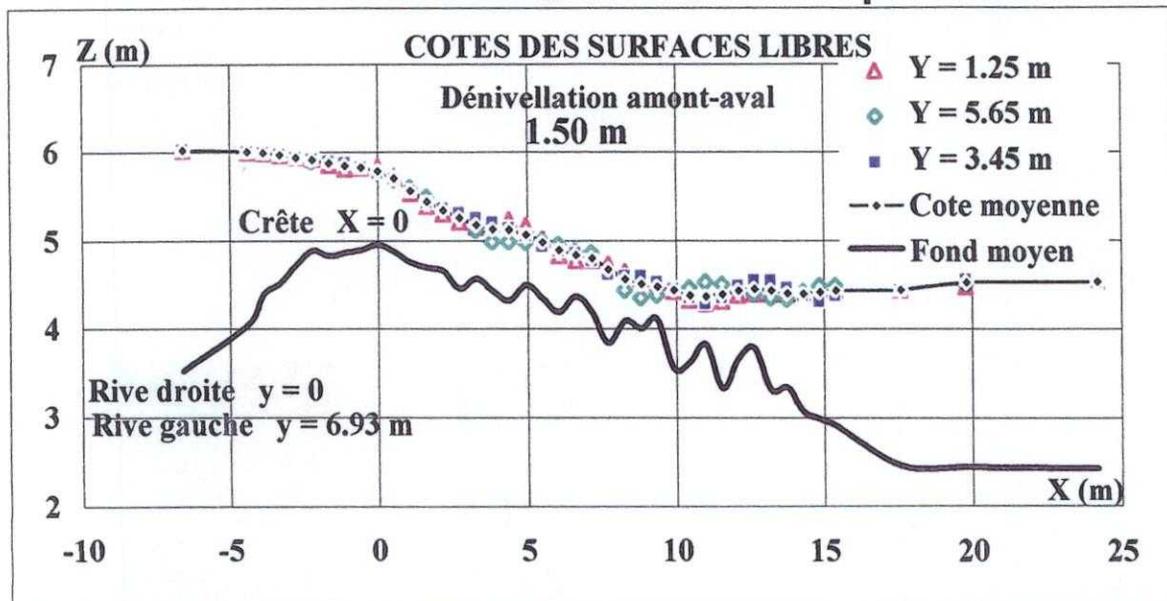


Figure 22 : Profil en long de la ligne d'eau, de la vitesse en surface et du tirant d'eau ($q = 1.5 \text{ m}^3/\text{s/m}$)

PROFILS EN LONG $q = 2 \text{ m}^2/\text{s}$

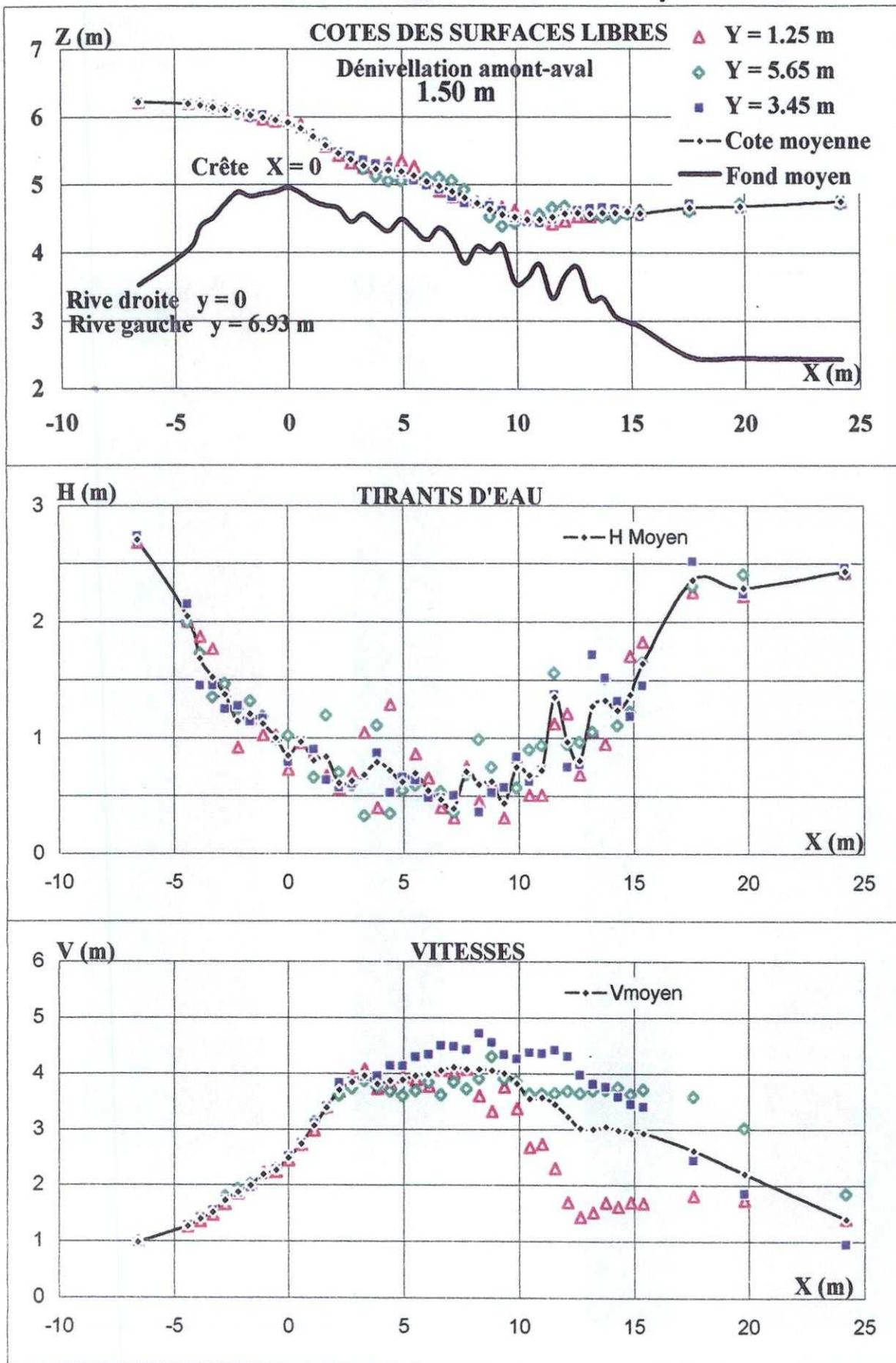


Figure 23 : Profil en long de la ligne d'eau, de la vitesse en surface et du tirant d'eau ($q = 2 \text{ m}^3/\text{s/m}$)

PROFILS EN LONG

$q = 2.5 \text{ m}^2/\text{s}$

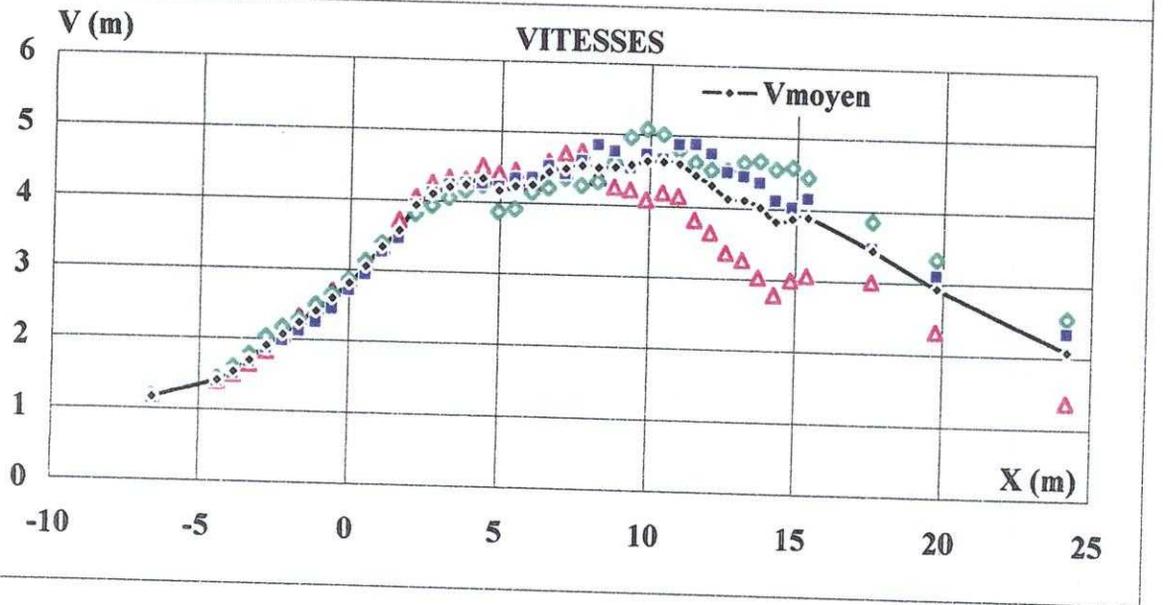
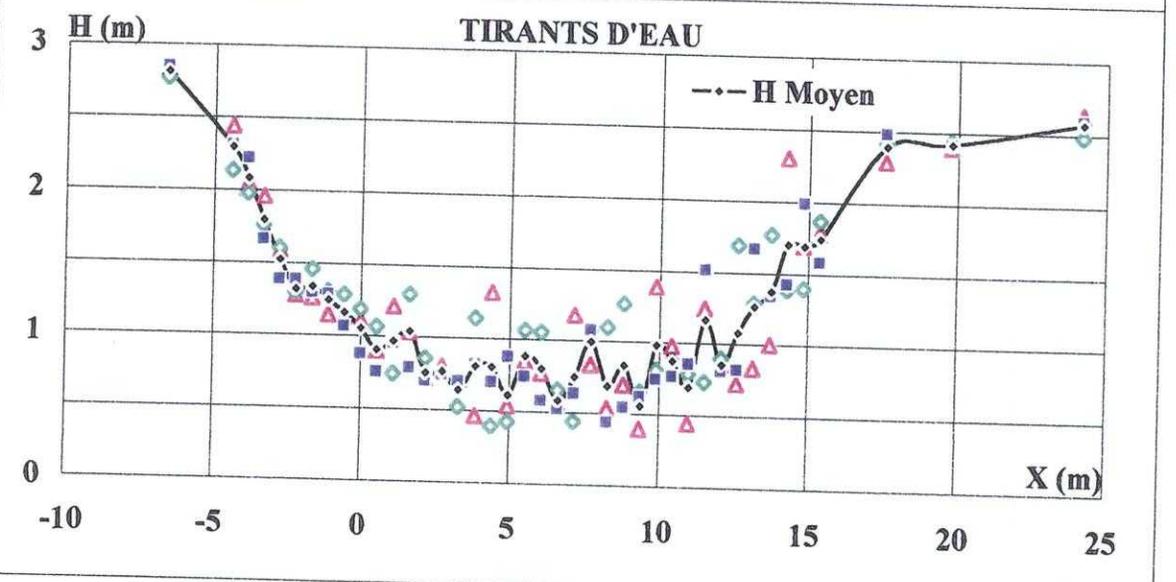
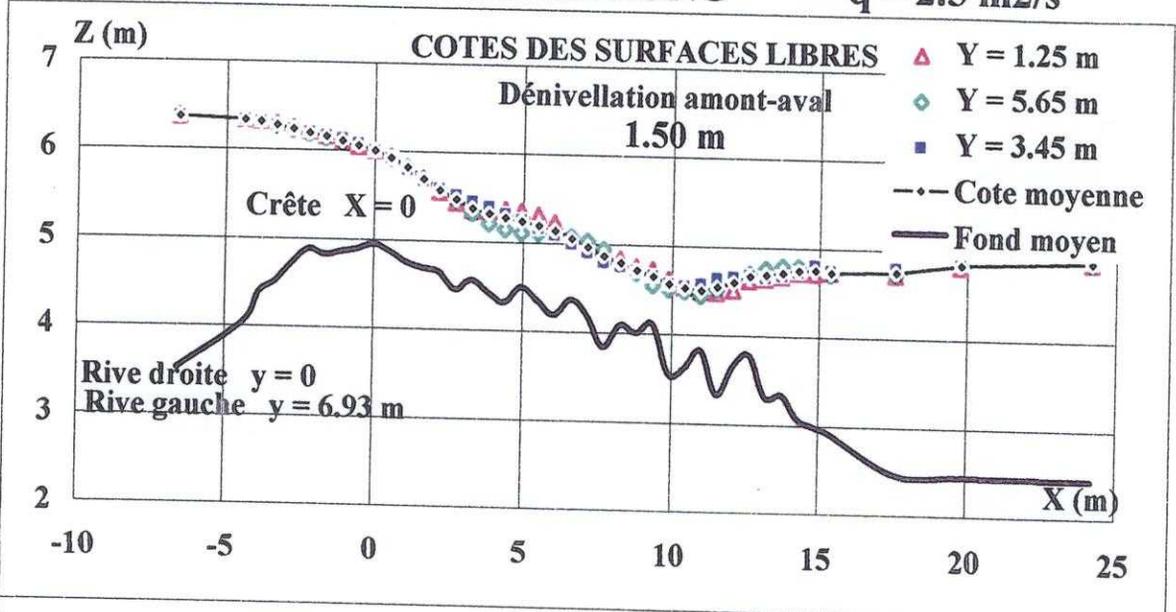


Figure 24 : Profil en long de la ligne d'eau, de la vitesse en surface et du tirant d'eau ($q = 2.5 \text{ m}^3/\text{s/m}$)

TIRANTS D'EAU H ET VITESSES V MESURES (D = 1.5 m)

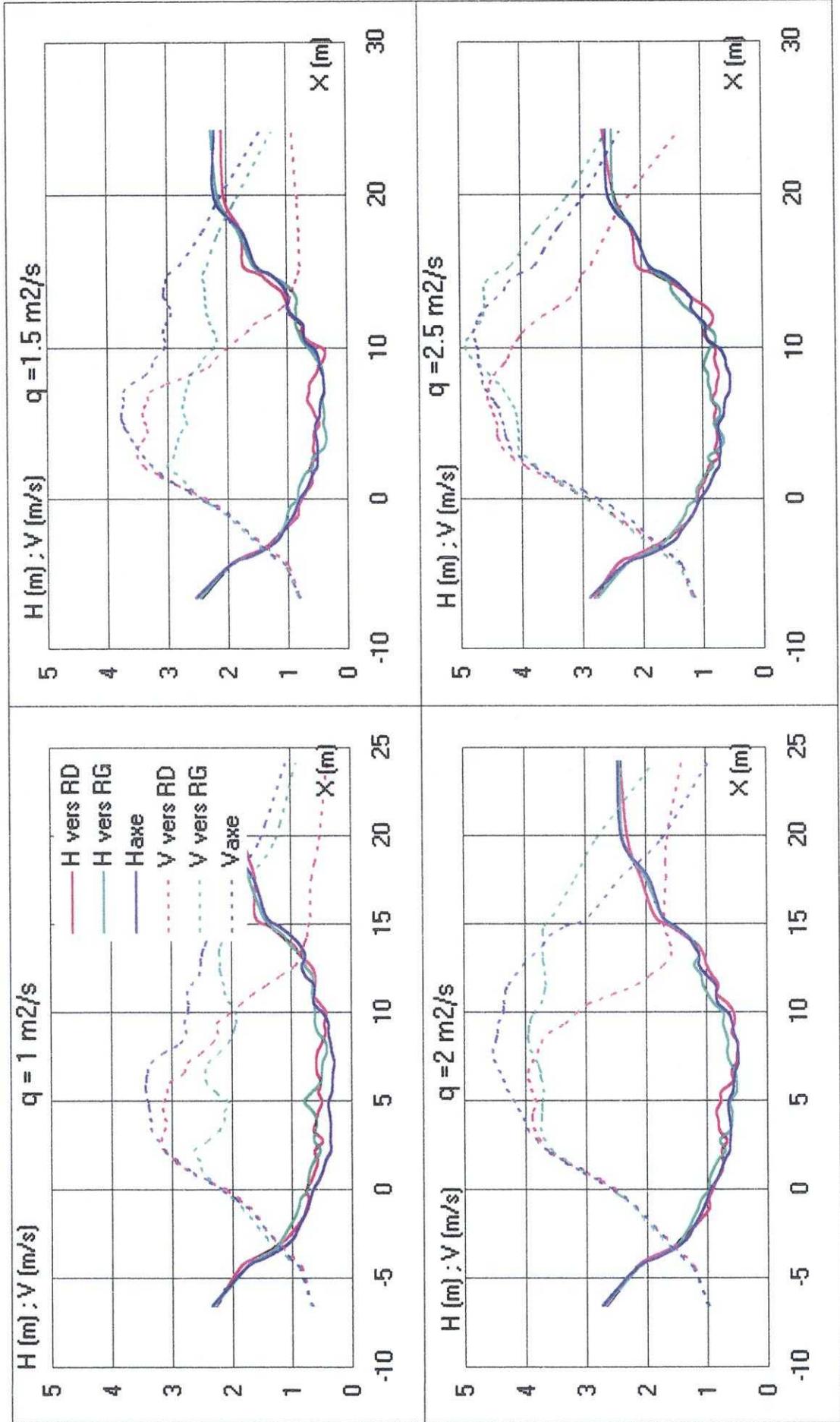


Figure 25 : Profil en long des vitesses et des tirants d'eau (moyennes mobiles) pour les débits de 1 à 2.5 m³/s/m

TIRANTS D'EAU H ET VITESSES V MOYENS

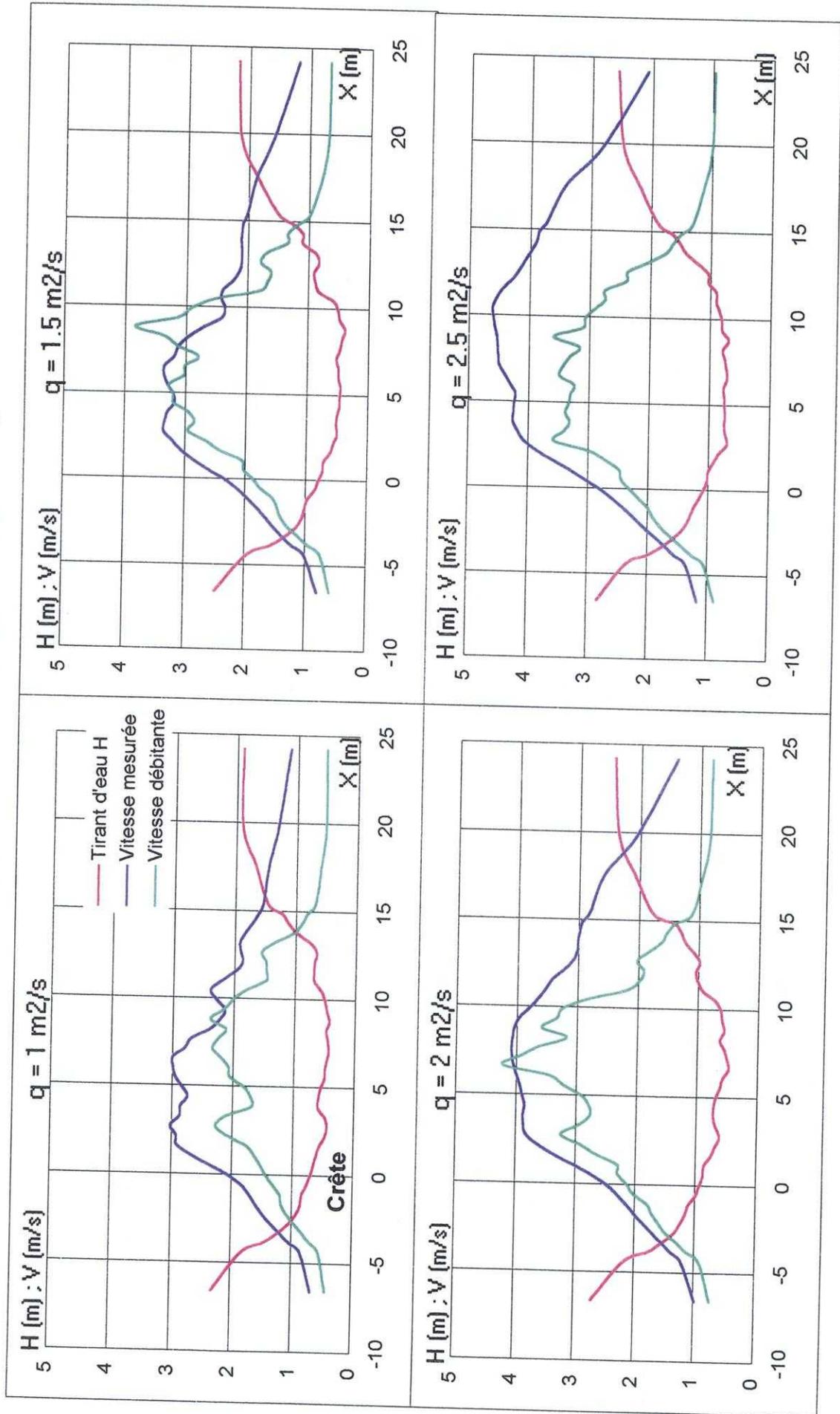


Figure 26 : Profil en long des moyennes des vitesses et des tirants d'eau pour les débits de 1 à 2.5 m³/s/m

PROFILS DE VITESSES DANS LA SECTION DROITE X = 6.6 m

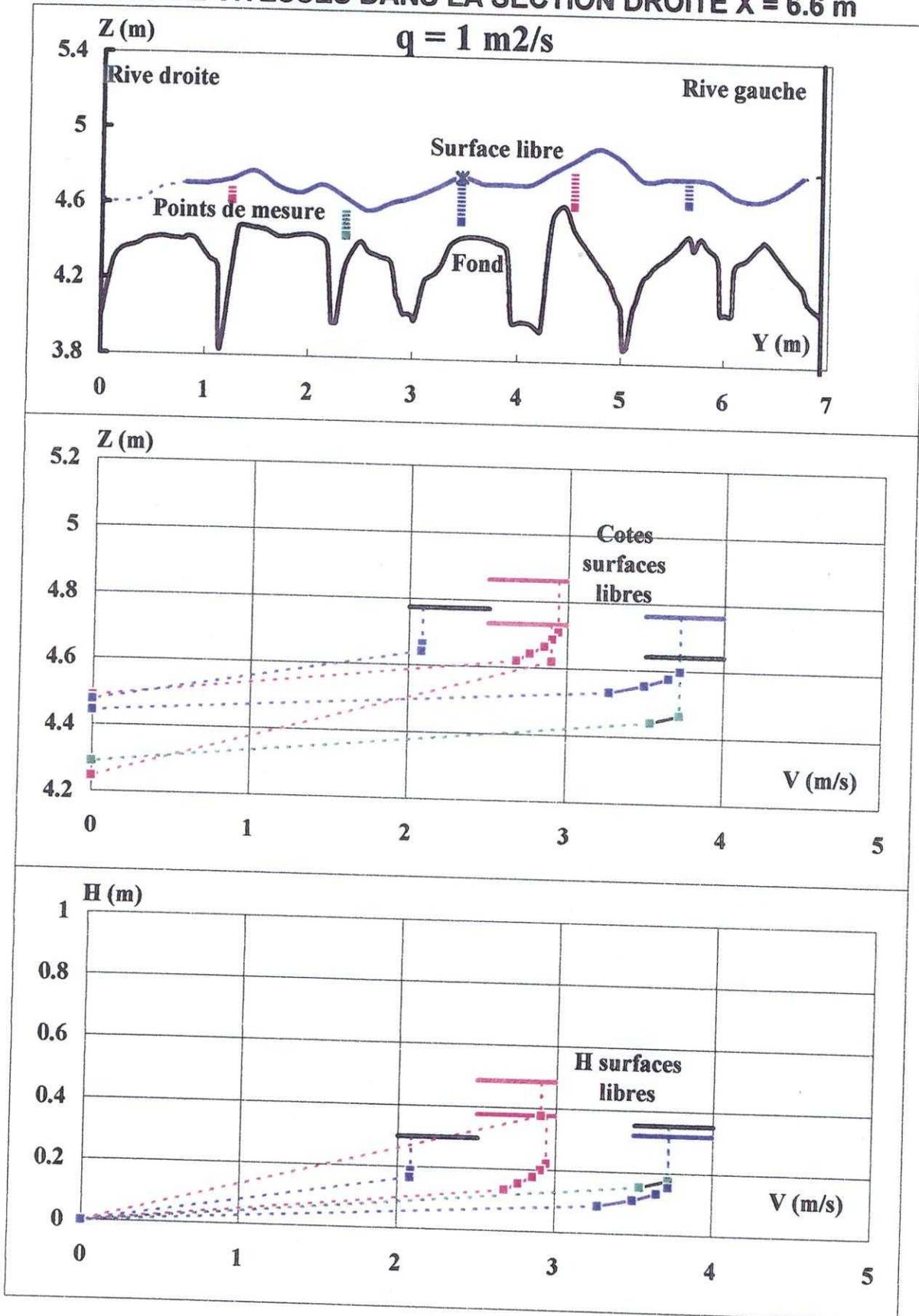


Figure 27 : Profil en travers de la ligne d'eau et profils de vitesse ($q = 1 \text{ m}^3/\text{s/m}$)

PROFILS DE VITESSES DANS LA SECTION DROITE X = 6.6 m

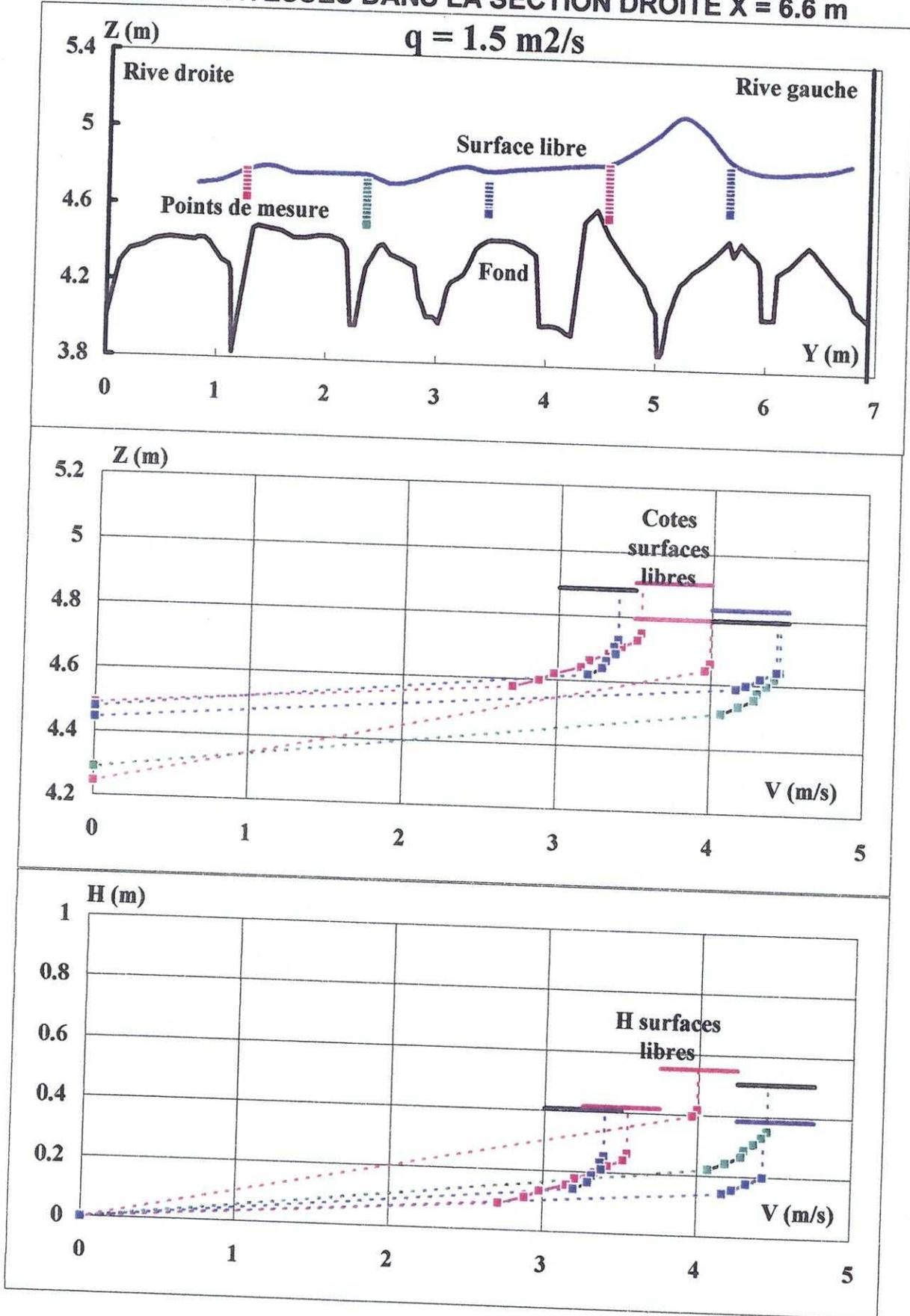


Figure 28 : Profil en travers de la ligne d'eau et profils de vitesse ($q = 1.5 \text{ m}^3/\text{s/m}$)

PROFILS DE VITESSES DANS LA SECTION DROITE X = 6.6 m

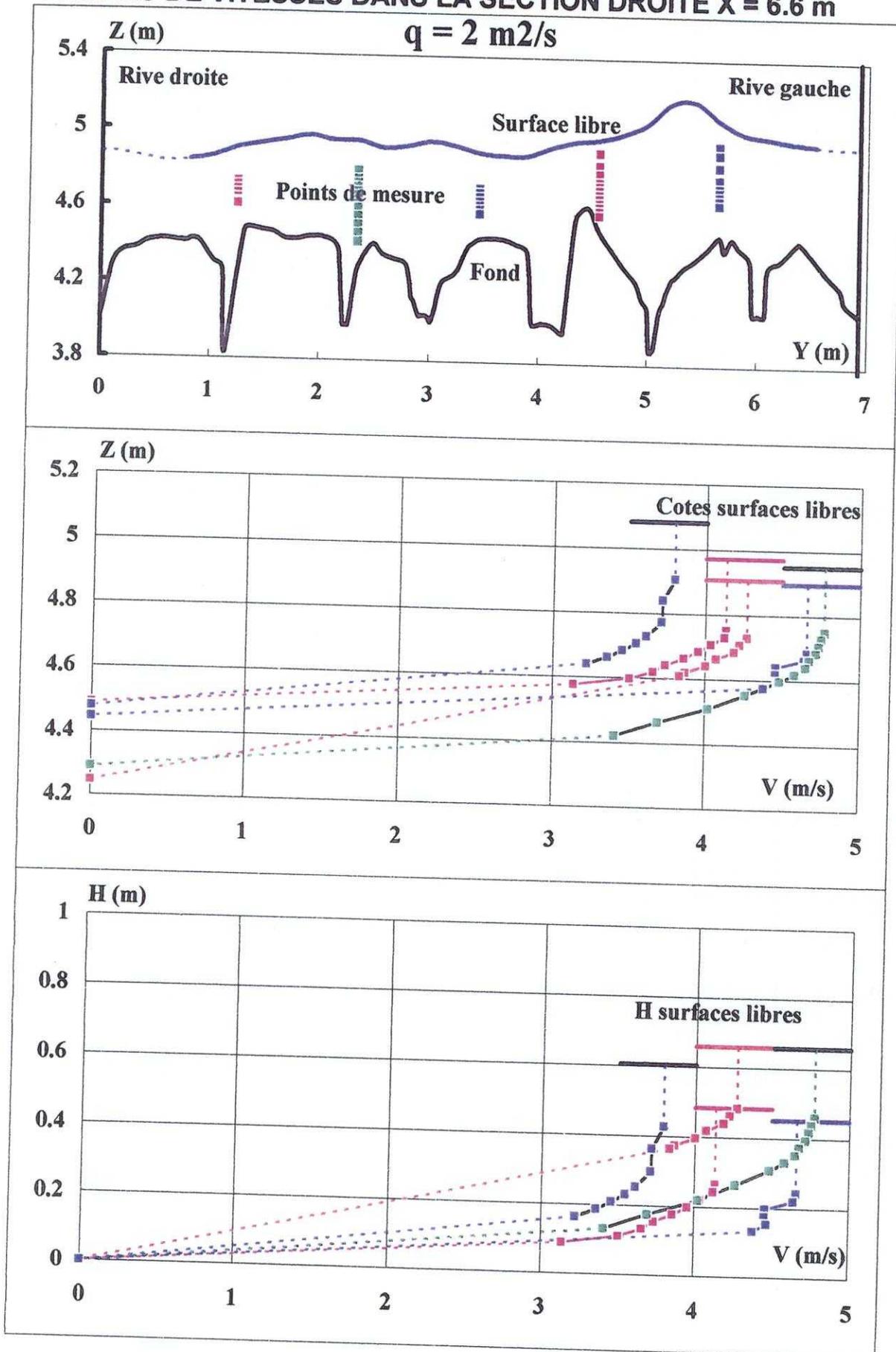


Figure 29 : Profil en travers de la ligne d'eau et profils de vitesse ($q = 2 \text{ m}^3/\text{s/m}$)

PROFILS DE VITESSES DANS LA SECTION DROITE X = 6.6 m

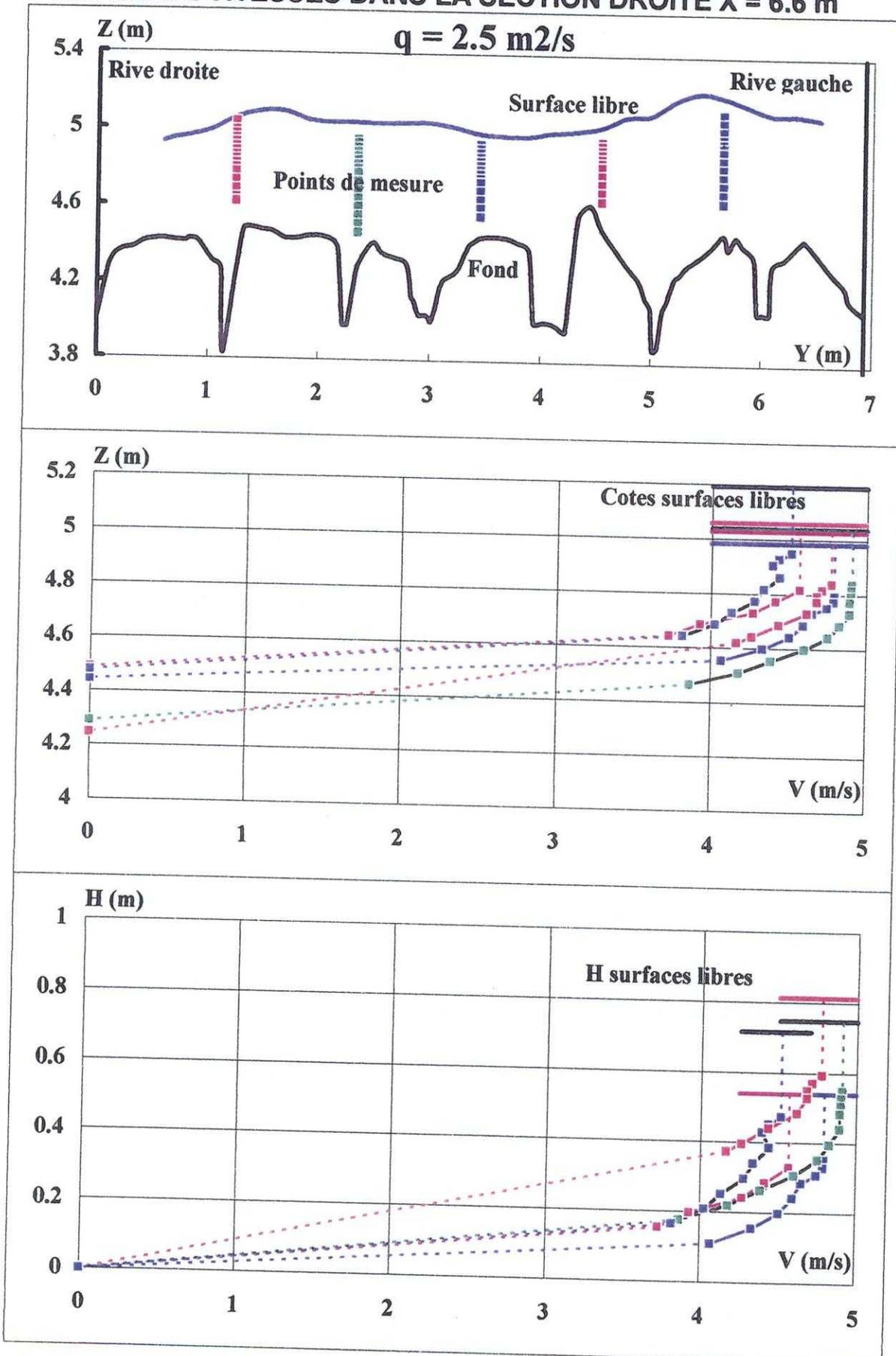
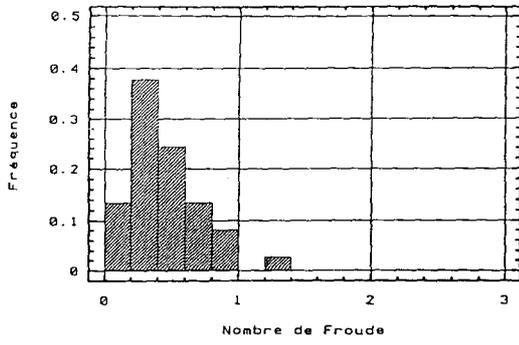


Figure 30 : Profil en travers de la ligne d'eau et profils de vitesse ($q = 2.5 \text{ m}^3/\text{s/m}$)

ANNEXE A

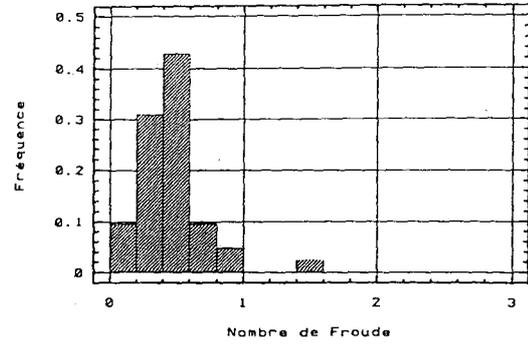
Histogrammes de fréquence des distributions des vitesses et des tirants d'eau sur la rampe en enrochements (pentes 15%, 10%, 5%, 2%)

Pente 5% $q = 0.43 \text{ m}^2/\text{s}$



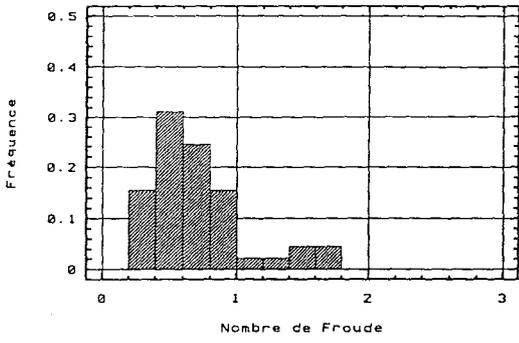
J1

Pente 2% $q = 0.43 \text{ m}^2/\text{s}$



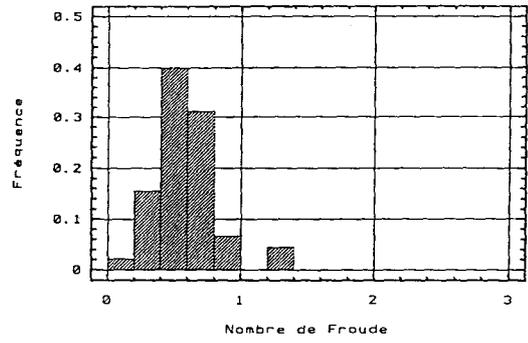
J1

Pente 5% $q = 1.18 \text{ m}^2/\text{s}$



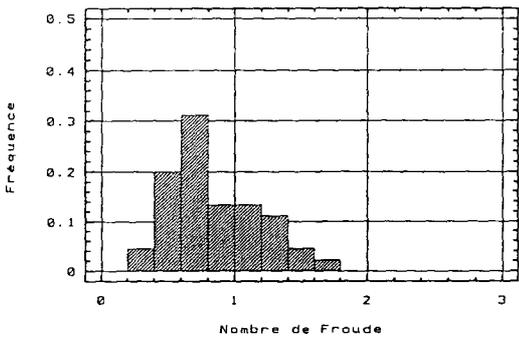
J1

Pente 2% $q = 1.18 \text{ m}^2/\text{s}$



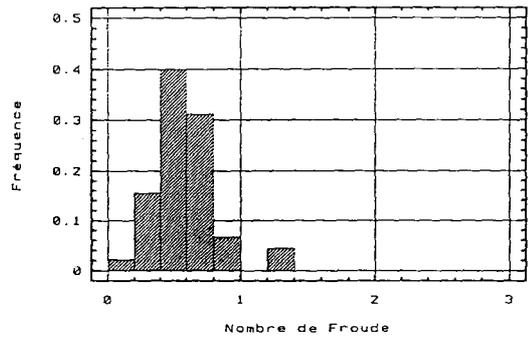
J1

Pente 5% $q = 1.75 \text{ m}^2/\text{s}$



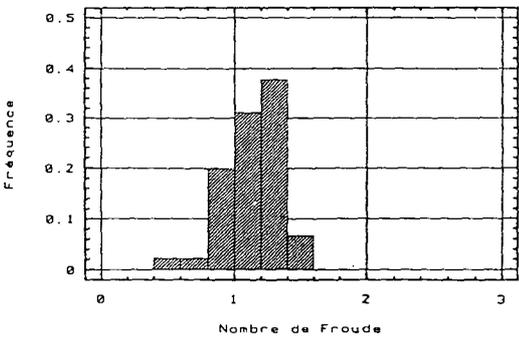
J1

Pente 2% $q = 1.75 \text{ m}^2/\text{s}$



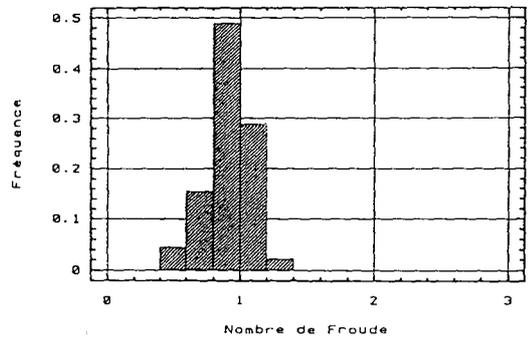
J1

Pente 5% $q = 5.46 \text{ m}^2/\text{s}$



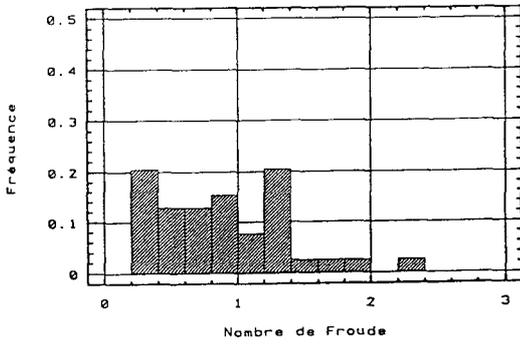
J1

Pente 2% $q = 5.46 \text{ m}^2/\text{s}$



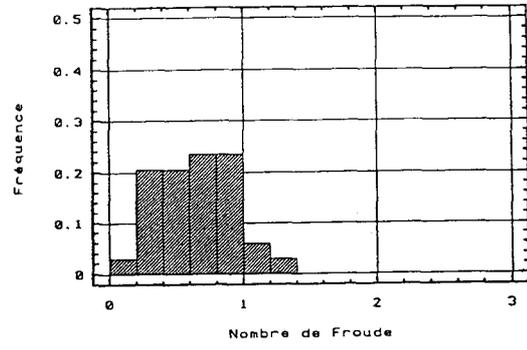
J1

Pente 15% $q = 0.43 \text{ m}^2/\text{s}$



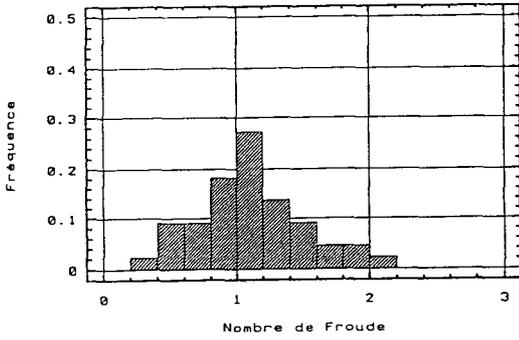
J1

Pente 10% $q = 0.43 \text{ m}^2/\text{s}$



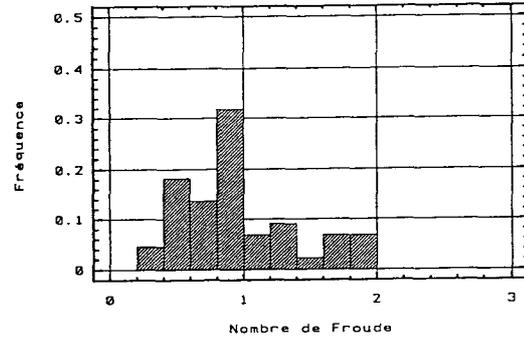
J1

Pente 15% $q = 1.18 \text{ m}^2/\text{s}$



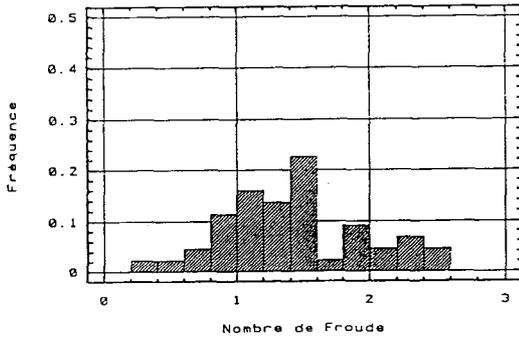
J1

Pente 10% $q = 1.18 \text{ m}^2/\text{s}$



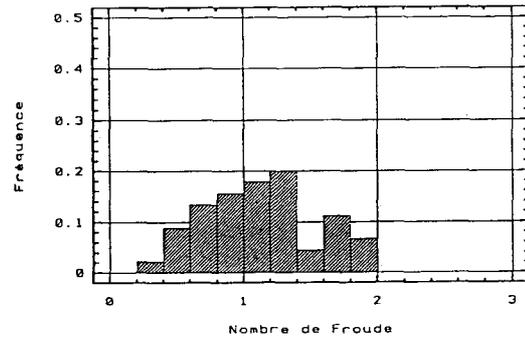
J1

Pente 15% $q = 1.75 \text{ m}^2/\text{s}$



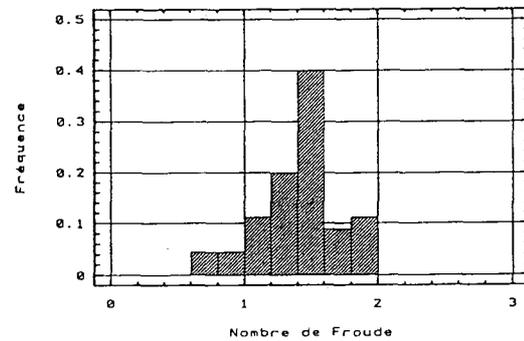
J1

Pente 10% $q = 1.75 \text{ m}^2/\text{s}$



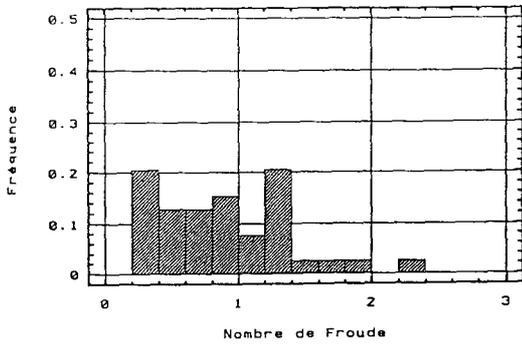
J1

Pente 10% $q = 5.46 \text{ m}^2/\text{s}$



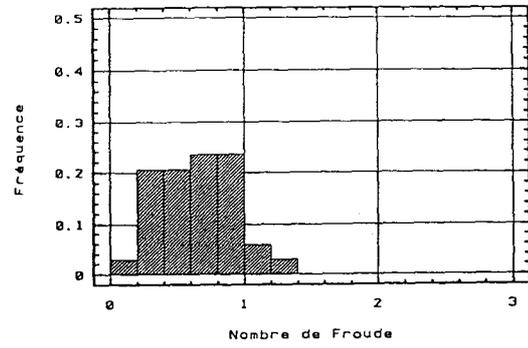
J1

Pente 15% q = 0.43 m²/s



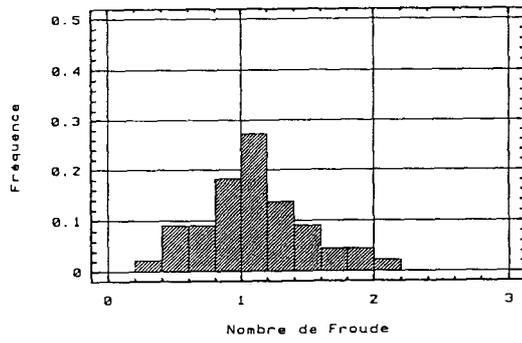
J1

Pente 10% q = 0.43 m²/s



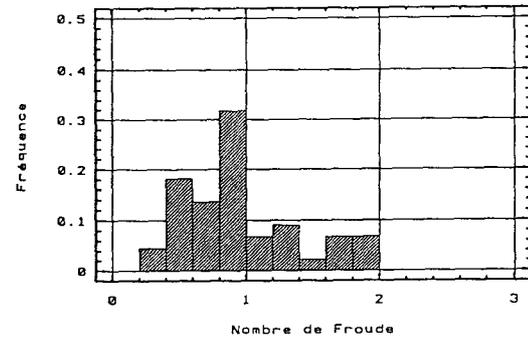
J1

Pente 15% q = 1.18 m²/s



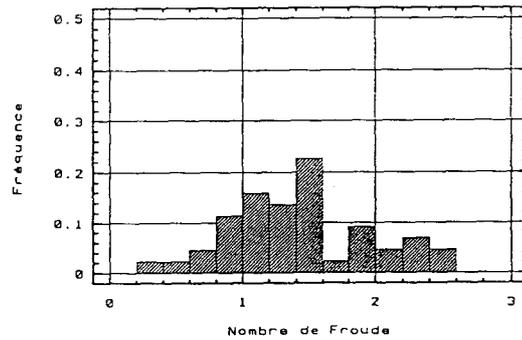
J1

Pente 10% q = 1.18 m²/s



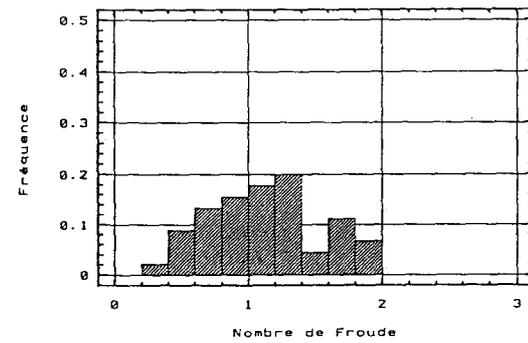
J1

Pente 15% q = 1.75 m²/s



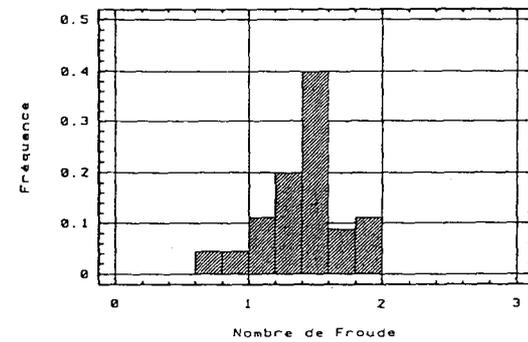
J1

Pente 10% q = 1.75 m²/s



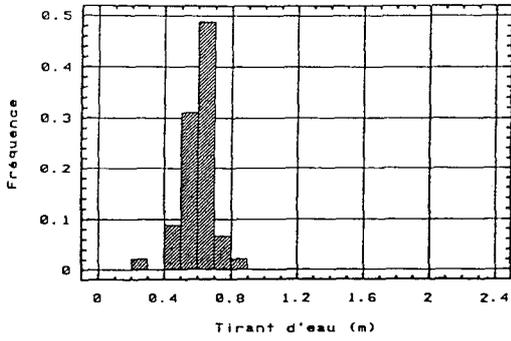
J1

Pente 10% q = 5.46 m²/s



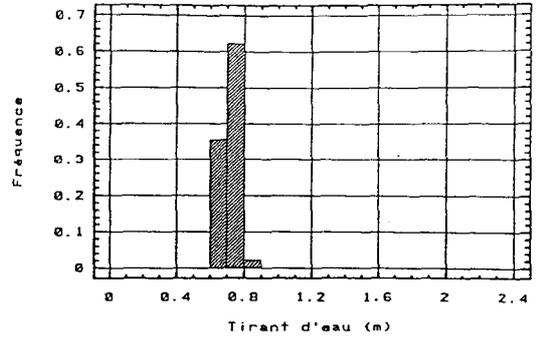
J1

Pente 5% $q = 0.43 \text{ m}^2/\text{s}$



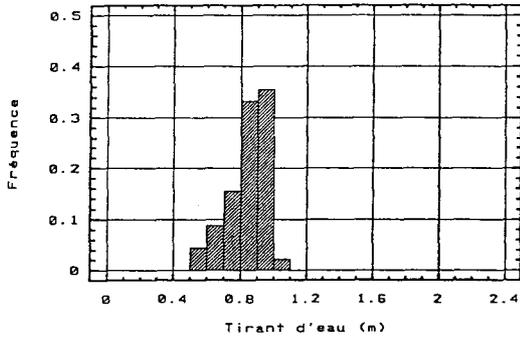
J2

Pente 2% $q = 0.43 \text{ m}^2/\text{s}$



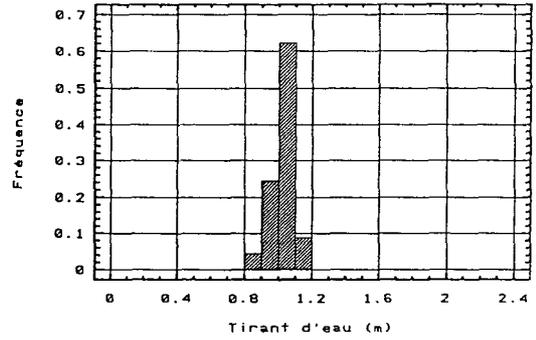
J2

Pente 5% $q = 1.18 \text{ m}^2/\text{s}$



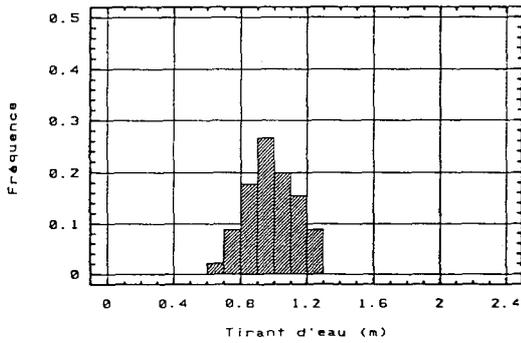
J2

Pente 2% $q = 1.18 \text{ m}^2/\text{s}$



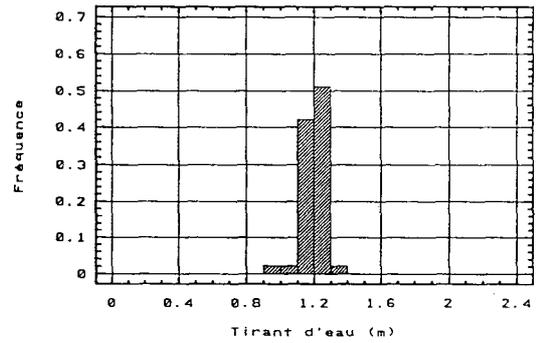
J2

Pente 5% $q = 1.75 \text{ m}^2/\text{s}$



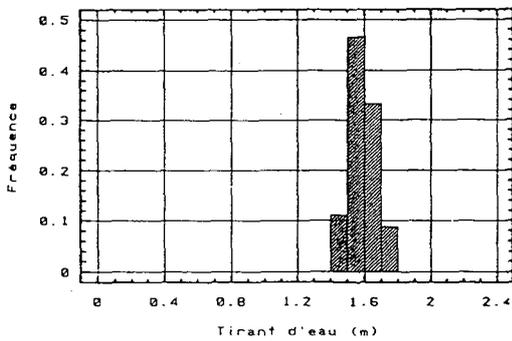
J2

Pente 2% $q = 1.75 \text{ m}^2/\text{s}$



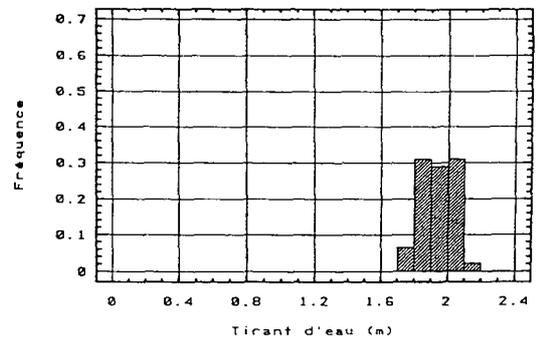
J2

Pente 5% $q = 5.46 \text{ m}^2/\text{s}$



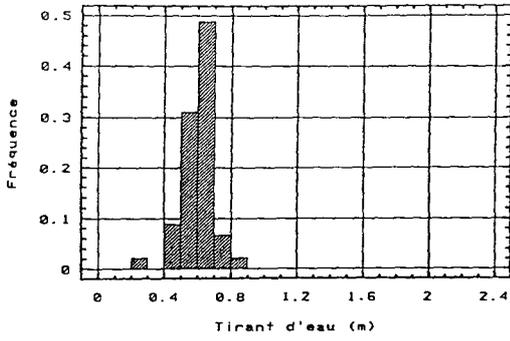
J2

Pente 2% $q = 5.46 \text{ m}^2/\text{s}$



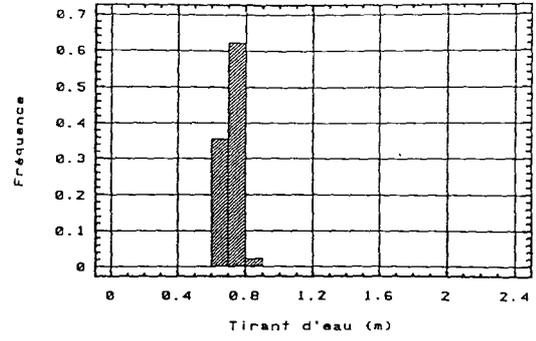
J2

Pente 5% $q = 0.43 \text{ m}^2/\text{s}$



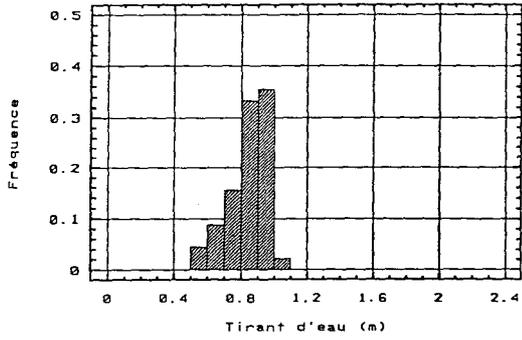
J2

Pente 2% $q = 0.43 \text{ m}^2/\text{s}$



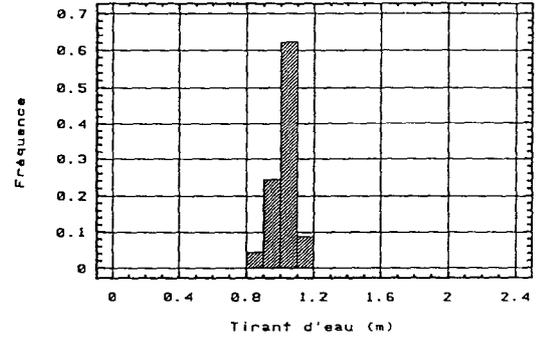
J2

Pente 5% $q = 1.18 \text{ m}^2/\text{s}$



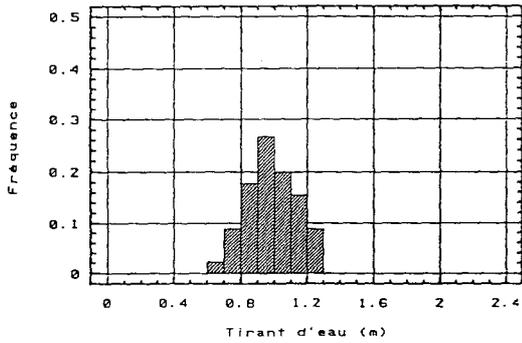
J2

Pente 2% $q = 1.18 \text{ m}^2/\text{s}$



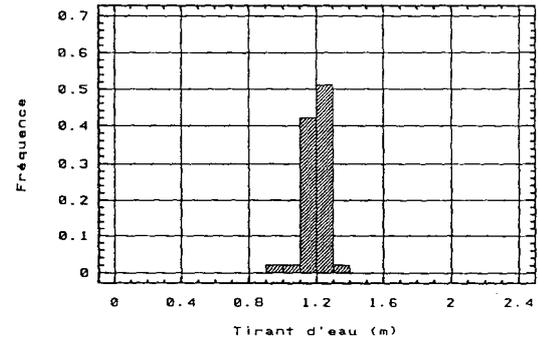
J2

Pente 5% $q = 1.75 \text{ m}^2/\text{s}$



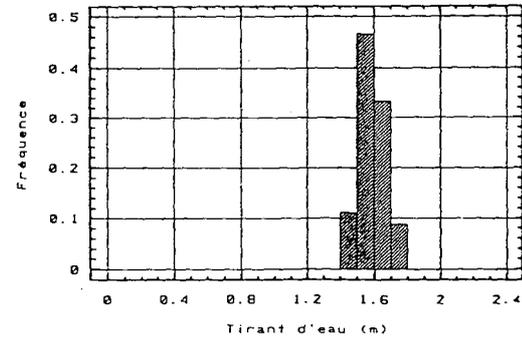
J2

Pente 2% $q = 1.75 \text{ m}^2/\text{s}$



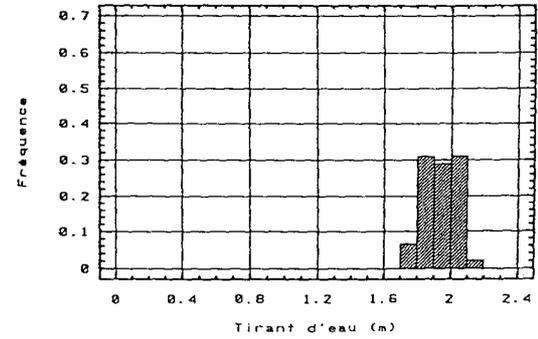
J2

Pente 5% $q = 5.46 \text{ m}^2/\text{s}$



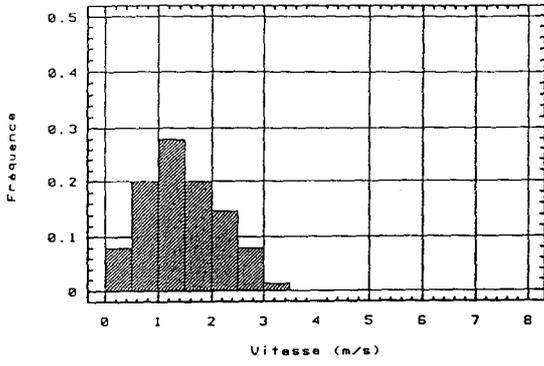
J2

Pente 2% $q = 5.46 \text{ m}^2/\text{s}$



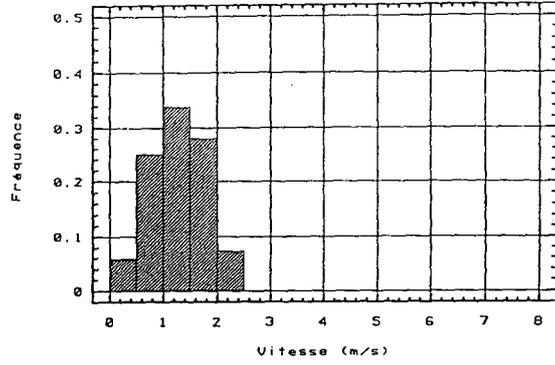
J2

Pente 15% q = 0.43 m2/s



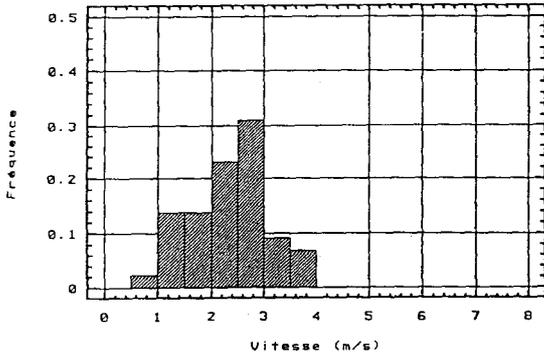
1

Pente 10% q = 0.43 m2/s



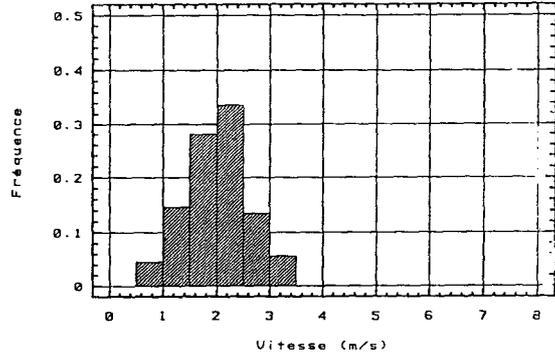
J1

Pente 15% q = 1.18 m2/s

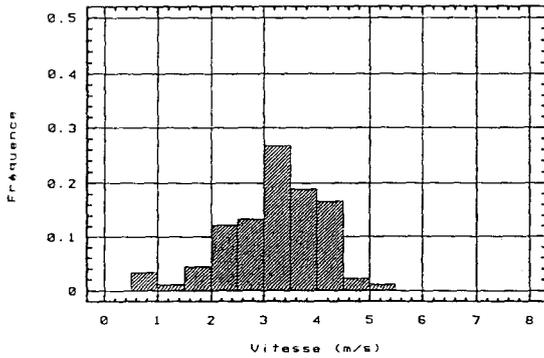


J1

Pente 10% q = 1.18 m2/s

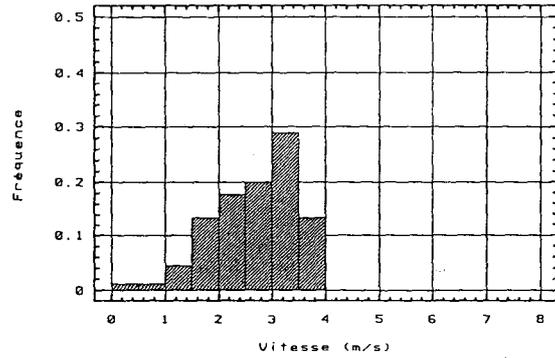


Pente 15% q = 1.75 m2/s

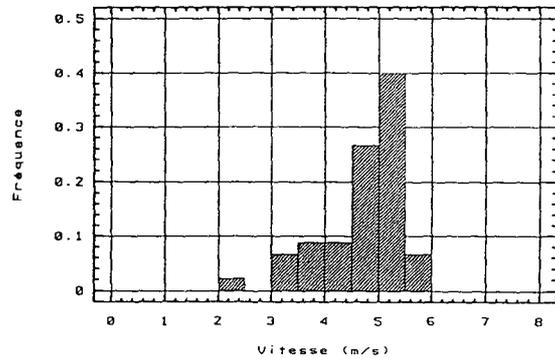


J1

Pente 10% q = 1.75 m2/s

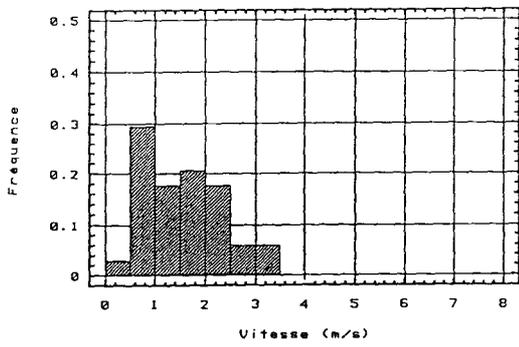


Pente 10% q = 5.46 m2/s



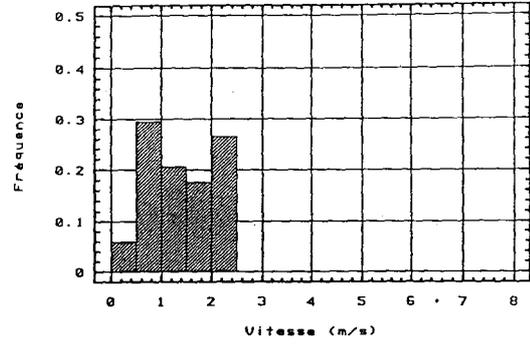
J1

Pente 15x q = 0.43 m2/s



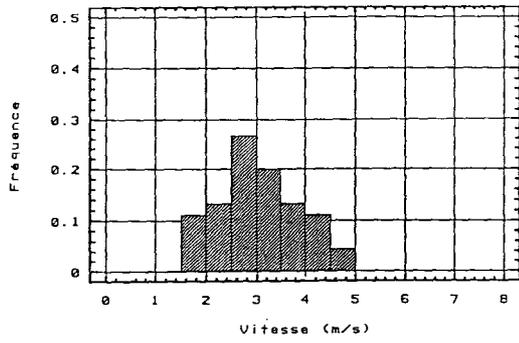
J2

Pente 10x q = 0.43 m2/s



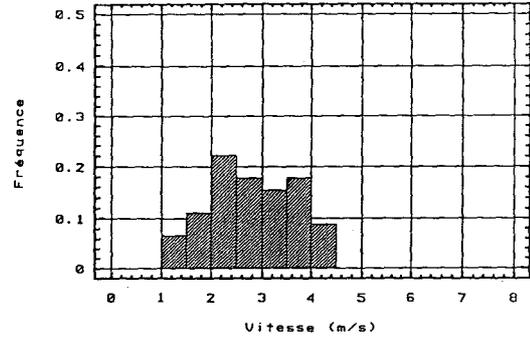
J2

Pente 15x q = 1.18 m2/s



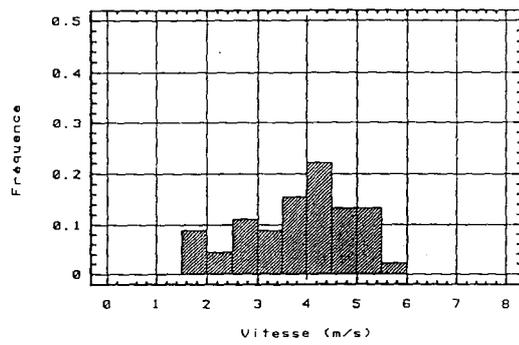
J2

Pente 10x q = 1.18 m2/s



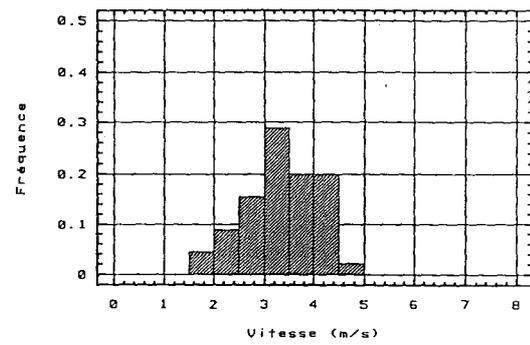
J2

Pente 15x q = 1.75 m2/s



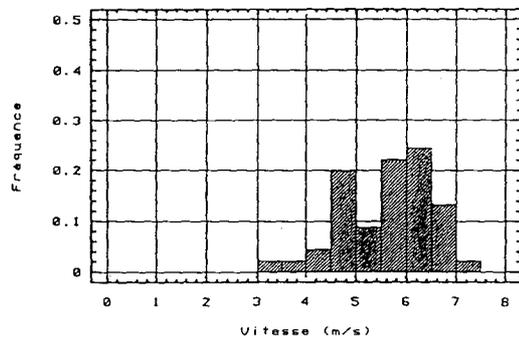
J2

Pente 10x q = 1.75 m2/s



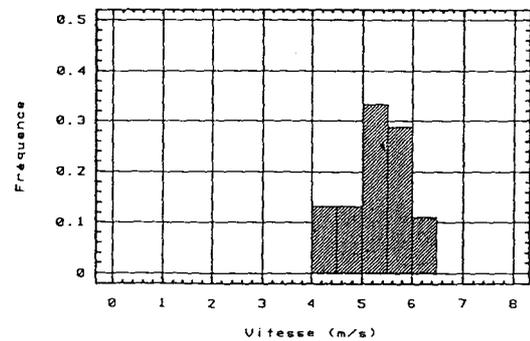
J2

Pente 15x q = 5.46 m2/s



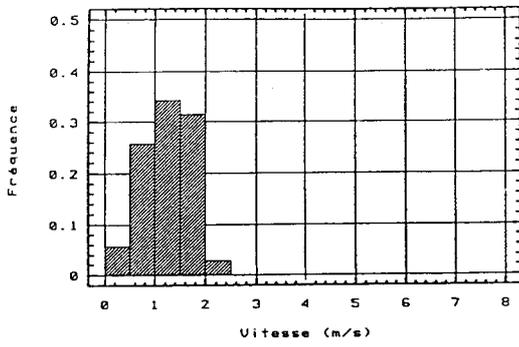
J2

Pente 10x q = 5.46 m2/s



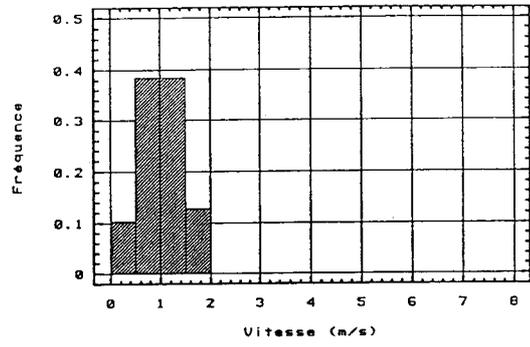
J2

Pente 5x q = 0.43 m2/s



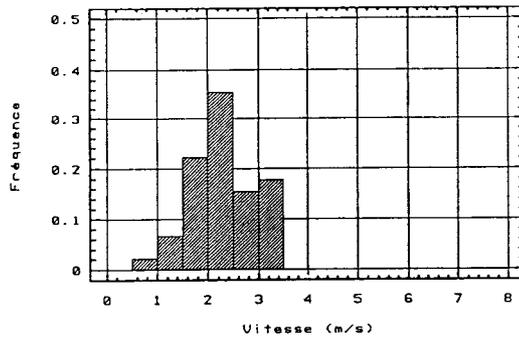
J2

Pente 2x q = 0.43 m2/s



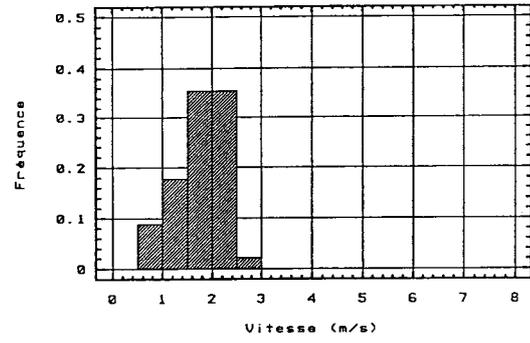
J2

Pente 5x q = 1.18 m2/s



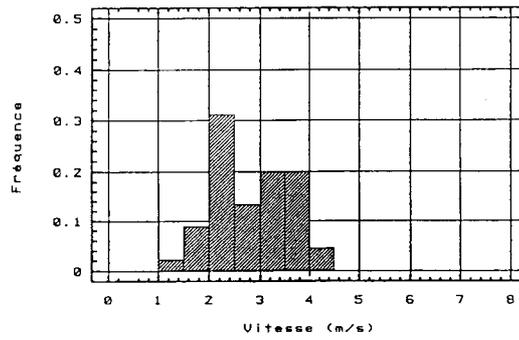
J2

Pente 2x q = 1.18 m2/s



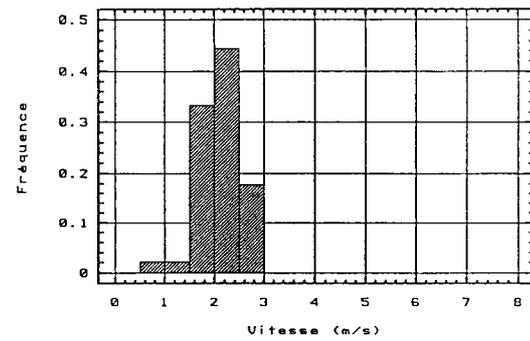
J2

Pente 5x q = 1.75 m2/s



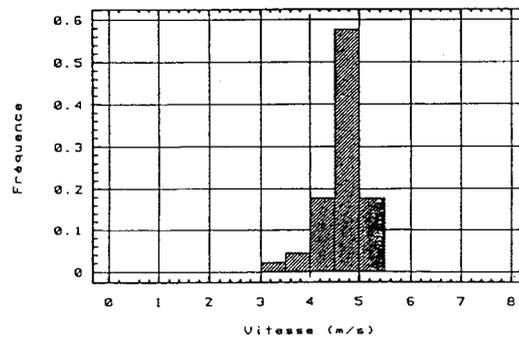
J2

Pente 2x q = 1.75 m2/s



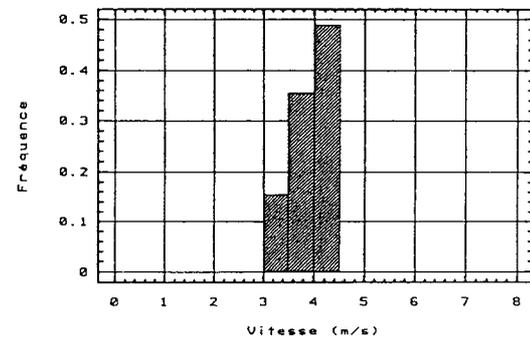
J2

Pente 5x q = 5.46 m2/s



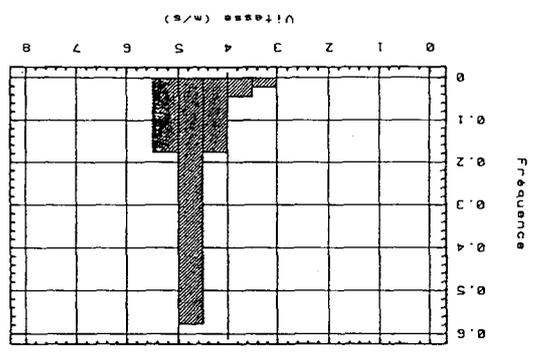
J2

Pente 2x q = 5.46 m2/s

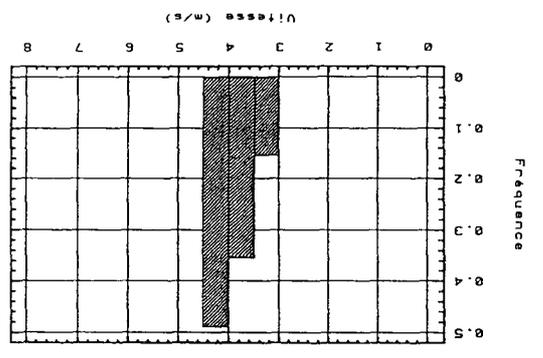


J2

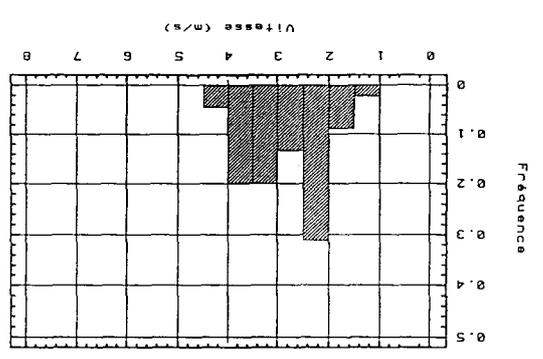
J2



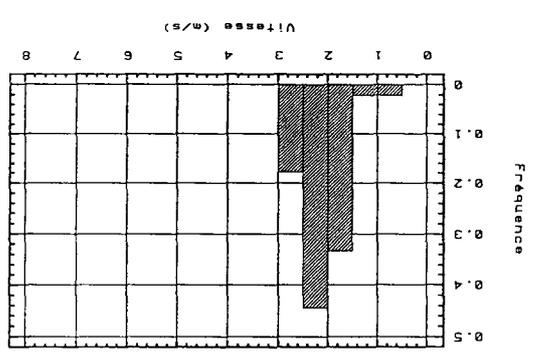
J2



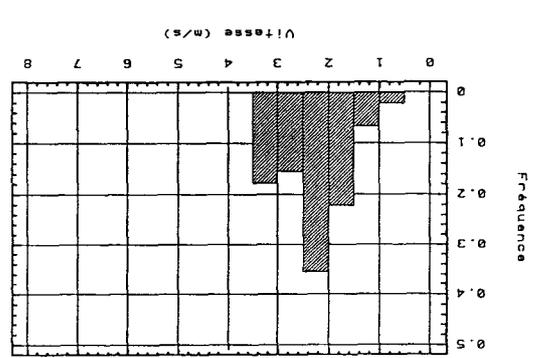
J2



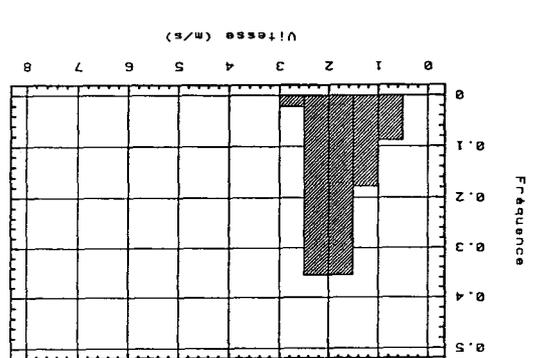
J2



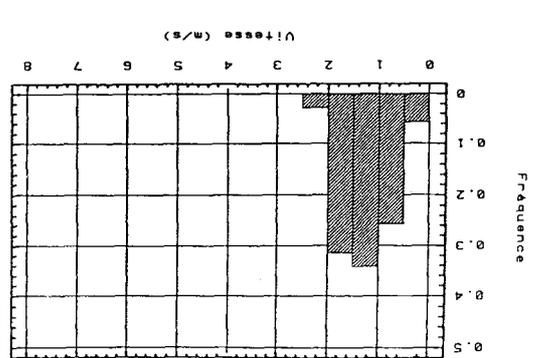
J2



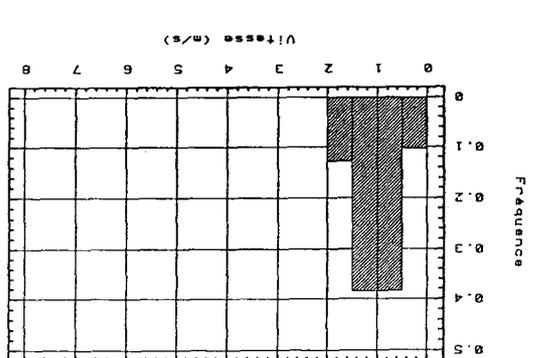
J2



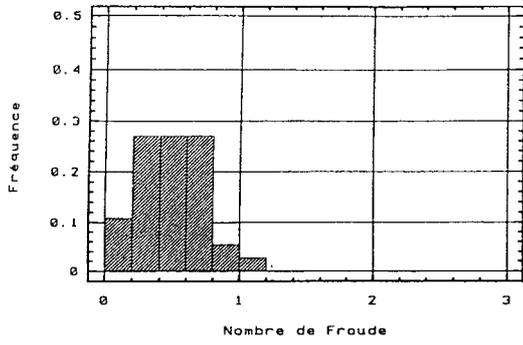
J2



J2

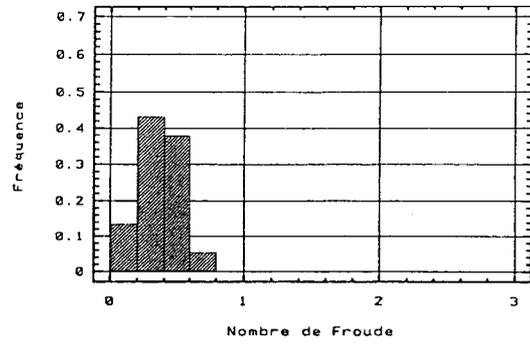


Pente 5% $q = 0.43 \text{ m}^2/\text{s}$



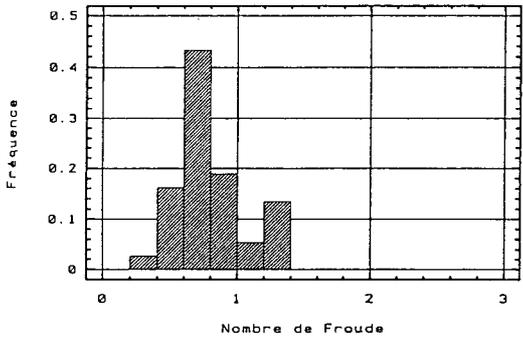
J2

Pente 2% $q = 0.43 \text{ m}^2/\text{s}$



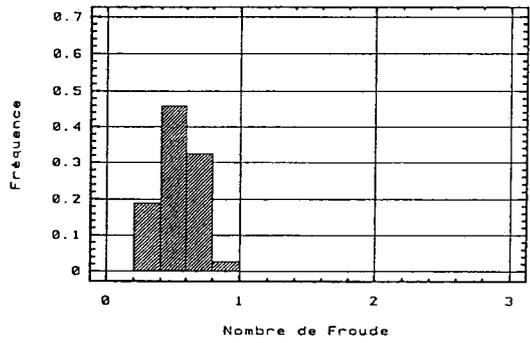
J2

Pente 5% $q = 1.18 \text{ m}^2/\text{s}$



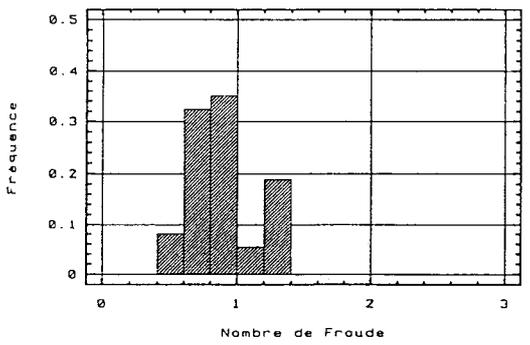
J2

Pente 2% $q = 1.18 \text{ m}^2/\text{s}$



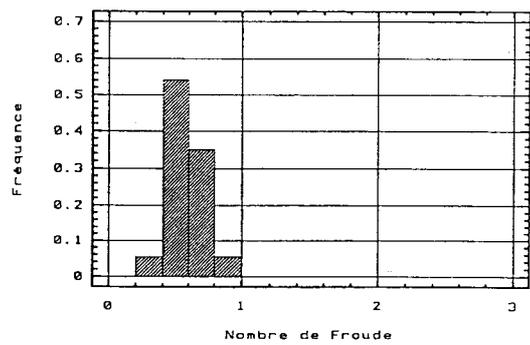
J2

Pente 5% $q = 1.75 \text{ m}^2/\text{s}$



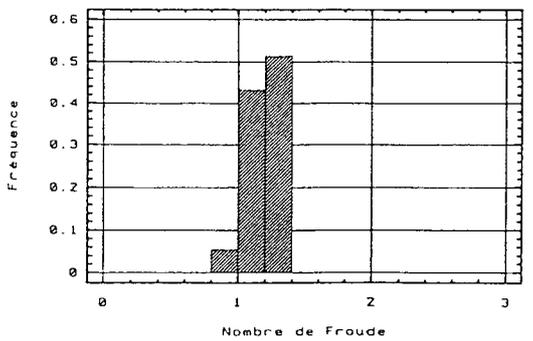
J2

Pente 2% $q = 1.75 \text{ m}^2/\text{s}$



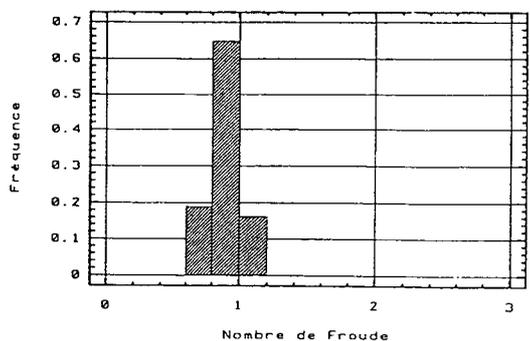
J2

Pente 5% $q = 5.46 \text{ m}^2/\text{s}$



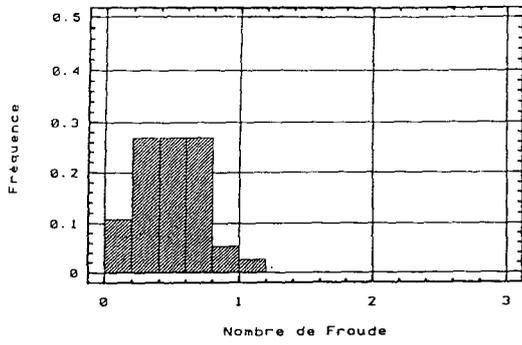
J2

Pente 2% $q = 5.46 \text{ m}^2/\text{s}$



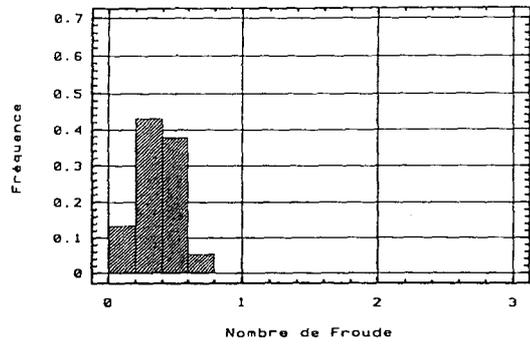
J2

Pente 5% $q = 0.43 \text{ m}^2/\text{s}$



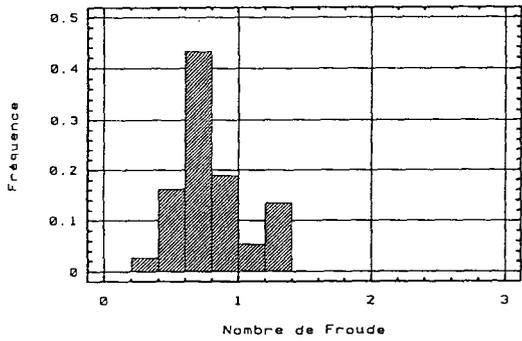
J2

Pente 2% $q = 0.43 \text{ m}^2/\text{s}$



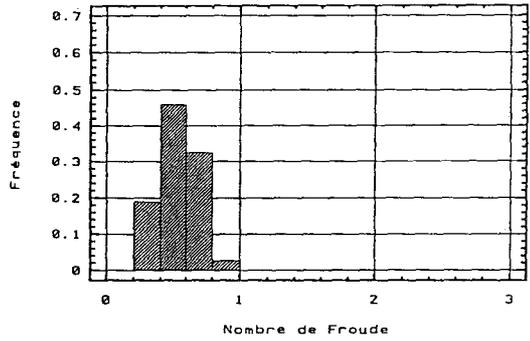
J2

Pente 5% $q = 1.18 \text{ m}^2/\text{s}$



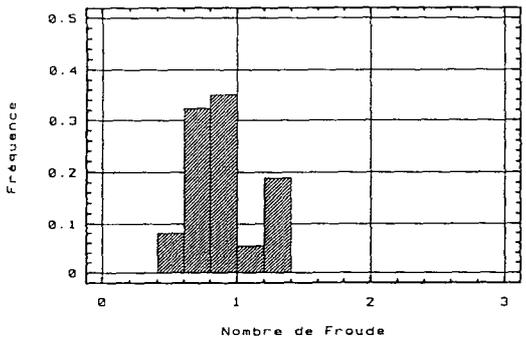
J2

Pente 2% $q = 1.18 \text{ m}^2/\text{s}$



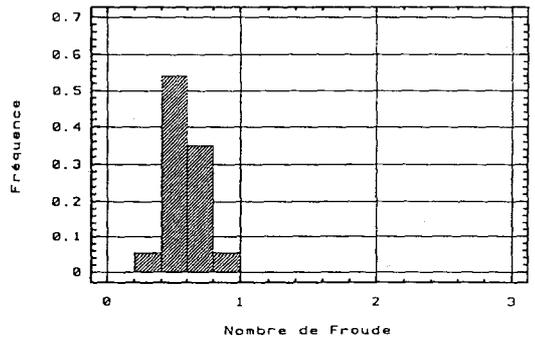
J2

Pente 5% $q = 1.75 \text{ m}^2/\text{s}$



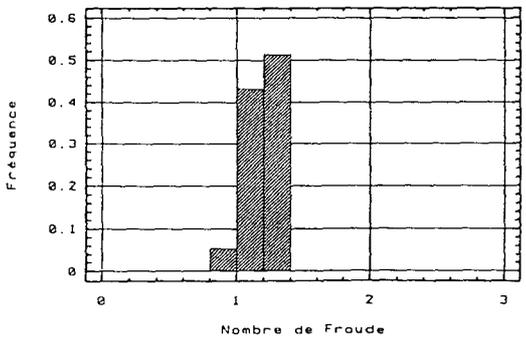
J2

Pente 2% $q = 1.75 \text{ m}^2/\text{s}$



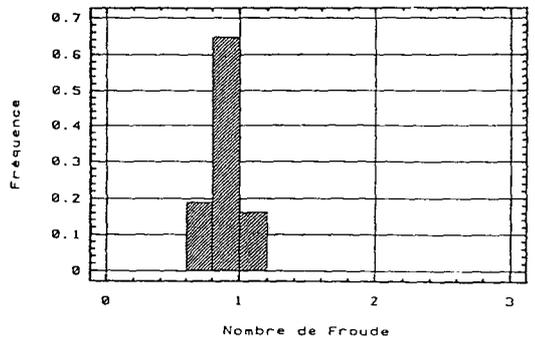
J2

Pente 5% $q = 5.46 \text{ m}^2/\text{s}$



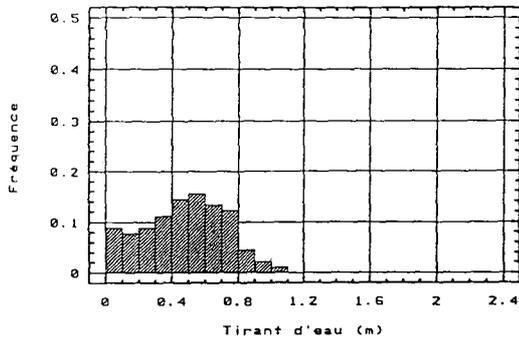
J2

Pente 2% $q = 5.46 \text{ m}^2/\text{s}$



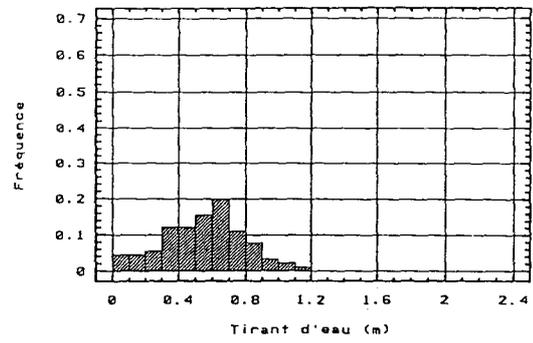
J2

Pente 5% $q = 0.43 \text{ m}^2/\text{s}$



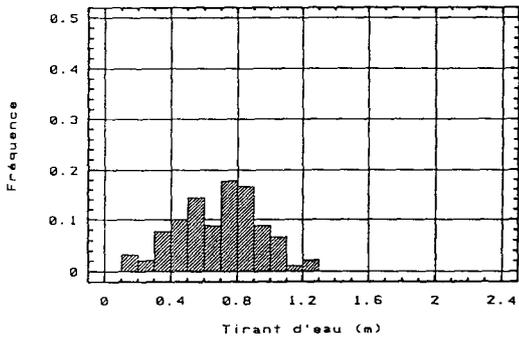
J1

Pente 2% $q = 0.43 \text{ m}^2/\text{s}$



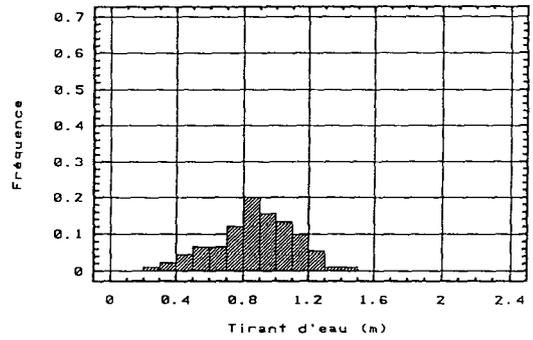
J1

Pente 5% $q = 1.18 \text{ m}^2/\text{s}$



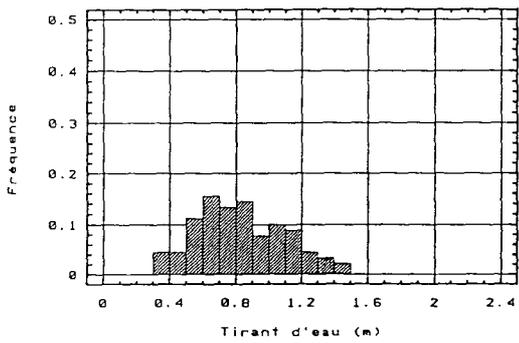
J1

Pente 2% $q = 1.18 \text{ m}^2/\text{s}$



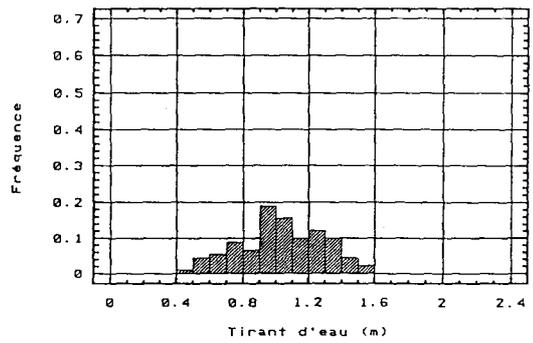
J1

Pente 5% $q = 1.75 \text{ m}^2/\text{s}$



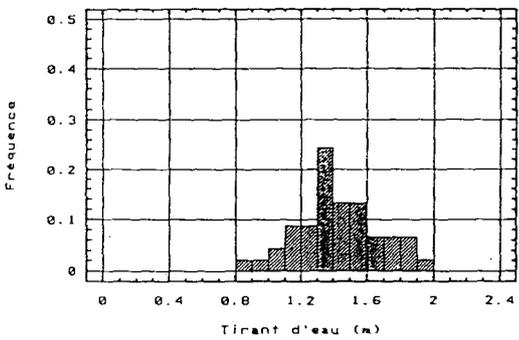
J1

Pente 2% $q = 1.75 \text{ m}^2/\text{s}$



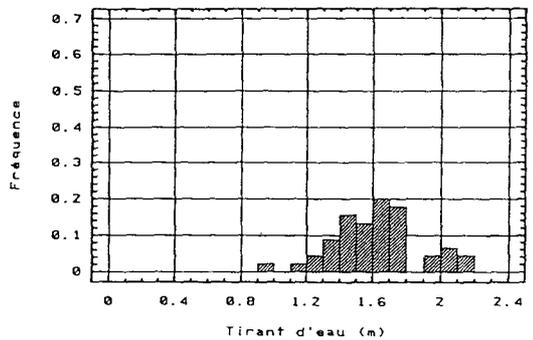
J1

Pente 5% $q = 5.46 \text{ m}^2/\text{s}$



J1

Pente 2% $q = 5.46 \text{ m}^2/\text{s}$



J1