

IGHEM - Montréal 96

D.COURTEAU

EDF-DEPT

Division Technique Générale

37, Rue Diderot BP41

38040 Grenoble Cedex FRANCE

Tél. (33) 76208828

Fax (33) 76208813

G.JOSSINET

EDF-DER

Service Ensembles de Production

25, Allée Privée

Carrefour Pleyel

93206 Saint-Denis

Cedex FRANCE

Tél. (33) 1 43698834

Fax (33) 1 43698823

N.PICARD, J.L. ROUSSET

EDF-DER

Laboratoire National

d'Hydraulique

6, quai Watier BP49

78041 Chatou

Cedex FRANCE

Tél. (33) 1 30877943

Fax (33) 1 30878086

UN OUTIL NUMERIQUE DE MODELISATION DES ECOULEMENTS AU SERVICE DE LA DEBITMETRIE DANS LES CENTRALES HYDROELECTRIQUES.

Résumé:

L'installation de débitmètres à ultrasons à poste fixe sur les installations hydroélectriques du parc EDF nécessite d'optimiser leur emplacement longitudinal et radial et de définir avec la meilleure précision possible le coefficient de correction hydraulique. Au travers d'une étude du cas de l'usine de ST-CHAMAS, la pertinence d'une approche par modélisation numérique pour l'implantation d'un matériel de type monovoie a été analysée comparativement à une démarche expérimentale basée sur des mesures par moulinets. Le comparatif conduit à confirmer la bonne qualité de prédiction du champ des vitesses par le modèle numérique dont l'étude de sensibilité aux conditions limites amont doit être poursuivie.

A NUMERICAL MODELLING FLOW TOOL FOR HYDROELECTRIC POWER STATIONS FLOWMETERS.

Abstract:

The installation of stationary stations ultrasound flowmeters on EDF's hydroelectric park installations calls for the best longitudinal and radial positioning. It also requires the definition, with the best accuracy possible, of the hydraulic correction coefficient.

From the example of a case study at the ST-CHAMAS station, the necessity for a numerical modelling approach regarding the implantation of a single-track type of material has been comparatively analysed. It was the result of an experimental move based on current flow measurements.

The comparative led to confirm the good forecasting quality of the speed field by the numerical model whose sensitivity study to upstream limit conditions must be pursued.

1. INTRODUCTION:

Sur les installations de production hydroélectriques du parc EDF, la connaissance des débits transitant dans les adductions en temps réel ou différé est un paramètre important contribuant directement ou indirectement:

- au suivi des performances des machines,
- au contrôle des débits de restitution,
- à la sûreté des installations.

Le degré de précision requis ainsi que les dérives des solutions classiques par des mesures indicielles (de type contrôles piezométriques dans un convergent ou Winter-Kennedy) nécessitent souvent la mise en oeuvre de méthodes de mesure de référence qui peuvent conduire à des essais lourds et coûteux en terme d'indisponibilité des machines. Une réponse adaptée passe par la mise en oeuvre de Débitmètres à UltraSons (DUS) qui présentent les avantages suivants [1]:

- de bonnes qualités de justesse, de répétabilité et de reproductibilité,
- un faible temps de réponse,
- une possibilité de mesure dans les deux sens de l'écoulement.

L'installation de ce type de débitmètres à poste fixe nécessite d'optimiser leur emplacement longitudinal et radial et de définir avec la meilleure précision le coefficient de correction hydraulique (rapport entre la vitesse moyenne vue par le DUS le long du trajet acoustique et la vitesse moyenne débitante recherchée dans la section).

Cette démarche peut être conduite par voie expérimentale en disposant de mesures de référence réalisées in-situ qui reste une solution souvent coûteuse. Une autre possibilité se situe au niveau d'une approche par modélisation numérique des écoulements permettant une bonne qualité de prédiction du champ des vitesses. Dans le cadre de l'étude réalisée pour l'usine de ST-CHAMAS, on dispose de données d'essais qui vont permettre de tester l'approche numérique.

2. CAS DE L'USINE DE ST-CHAMAS:

2.1. PRESENTATION:

L'usine de ST-CHAMAS, de part sa situation en aval de la chaîne de la Durance, contribue à l'alimentation en eau douce de l'étang de Berre naturellement constitué d'eau saline. La participation d'EDF à la reconquête de cet étang du point de vue environnemental (essentiellement sous l'aspect piscicole) nécessite d'envisager la possibilité de mettre en oeuvre une mesure en continu des débits turbinés sur les trois conduites forcées. Cette démarche permettrait d'améliorer la connaissance actuelle des rejets qui sont reconstitués à partir des caractéristiques énergétiques des installations. Afin de maximiser les performances des DUS et de réduire les coûts d'installation une optimisation de l'instrumentation de mesure doit être réalisée. Elle est basée sur l'utilisation des résultats des essais de réception aux moulinets réalisés en 1967 sur la conduite alimentant la turbine FRANCIS du groupe 3. Les caractéristiques de l'aménagement sont présentées en annexes 1 et 2.

2.2. JAUGEAGE AUX MOULINETS:

Le débit a été déterminé par intégration du champ des vitesses dans une section droite à partir d'une batterie fixe de 61 moulinets disposée dans une conduite d'amenée d'environ 5,5 mètres de diamètre. La section de jaugeage située entre la prise d'eau et la cheminée d'équilibre se situait à une distance d'environ 34 diamètres à l'aval d'un coude (d'angle 160° et 175° dans les plans vertical et horizontal) et de la prise d'eau, ainsi qu'à respectivement 4,5 et 6 diamètres à l'amont de l'entrée d'un convergent (d'angle au sommet de $13,7^\circ$) et du piquage de la cheminée d'équilibre (Annexe 2).

Afin de compenser l'absence d'alignement droit suffisamment important à l'aval (5 diamètres recommandés par le code C.E.I.), le nombre de moulinets a été porté de 33 répartis sur deux perches diamétrales à 61 répartis sur 3 perches diamétrales et 6 perchettes radiales (Annexe 1). Le coefficient d'obstruction correspondant était de 4%, le diamètre moyen de la section a été obtenu à partir de mesures sur 6 diamètres avec un écart maximal de 0,6% sur la valeur de 5,5 mètres.

Tous les moulinets de type OTT à hélice autocomposante au pas de 0,25 ont présenté un fonctionnement normal durant tous les essais, aucun matériau n'a été trouvé accroché aux hélices lors du démontage. La vitesse de chaque moulinet a été calculée à partir des étalonnages réalisés par traînage en eau morte dans un canal.

En annexe 3 et 4, on observe que les courbes d'iso-vitesses débitantes (composante U, vue d'aval) ne sont pas tout à fait concentriques et présentent un décentrage en position rive gauche haut ce qui confirme l'intérêt d'avoir augmenté le nombre de rayons d'exploration. On observe par ailleurs une bonne conservation de la position du cœur de l'écoulement avec l'augmentation de débit.

2.3. MODELISATION NUMERIQUE DE L'ÉCOULEMENT :

Le code de calcul numérique ESTET permet en particulier de modéliser les écoulements par la résolution des équations de Navier-Stokes combinant les méthodes des différences et des volumes finis, dans des domaines tridimensionnels, en régime permanent. Le maillage mis en oeuvre pour ce cas est de type structuré et monobloc en coordonnées cartésiennes et curvilignes orthogonales.

Compte tenu de la complexité du circuit, de la symétrie de la chambre de mise en charge et d'une étude préliminaire montrant le besoin de conditions fines en entrée, il a été nécessaire de réaliser trois parties distinctes (annexe 2) :

- le canal (120 000 noeuds),
- la moitié de la chambre de mise en charge (680 000 noeuds),
- une conduite jusqu'à la partie aval de la cheminée d'équilibre (430 000 noeuds).

La résolution spatiale dans le plan de mesure est du trentième du diamètre soit environ 1000 noeuds et suivant l'axe de l'écoulement d'un demi-diamètre.

Les conditions limites prises en compte sont les suivantes:

- profil plat dans le canal avec un raccordement en paroi par un profil de type logarithmique,
- équilibrage en débit des conduites.

Les calculs ont été menés pour les débits extrêmes relevés en essai de 20 et 90 m³/s.

En annexe 3 et 4, on observe que les courbes d'iso-vitesses débitantes (composante U, vue d'aval) ne sont pas tout à fait concentriques et présentent un décentrage en position rive droite avec une rotation du cœur de l'écoulement en position rive gauche bas avec l'augmentation de débit. On note par ailleurs l'existence de vitesses non-débitantes maximales (composante normale V et orthonormale W) de très faibles valeurs, respectivement de 0,5 et 1% par rapport aux vitesses débitantes. En annexe 5 et 6, l'évolution du profil des vitesses met en évidence la déformation de l'écoulement dont le cœur se déplace de la rive gauche vers la rive droite pour un observateur mobile de la prise d'eau vers la cheminée. Ces observations sont vraisemblablement liées à la mémoire que l'écoulement conserve des singularités amont.

2.4. COMPARAISON MODELE NUMERIQUE / MESURE AUX MOULINETS:

L'analyse comparée de la modélisation et des résultats d'essais conduit aux remarques suivantes (annexes 3 et 4):

- la position du cœur de l'écoulement est pratiquement symétrique par rapport à l'axe vertical pour le débit de 20 m³/s et au centre de la conduite pour celui de 90 m³/s, ce qui laisse à penser que l'influence des conditions limites au niveau de la prise d'eau est importante, notamment en ce qui concerne les conditions d'alimentation en débit des deux autres conduites.

- la répartition des vitesses débitantes dans la section est bien représentée par le modèle.

Une analyse plus fine en comparant les profils de vitesse sur chaque diamètre au droit des positions des moulinets permet de situer la majeure partie des vitesses issues du modèle dans une bande de +/- 7% par rapport aux résultats des essais. On peut donc en conclure à une représentativité correcte de l'approche par modélisation numérique qui peut permettre d'optimiser l'emplacement radial et longitudinal d'un DUS.

2.5. OPTIMISATION D'UNE MESURE PAR DEBITMETRE ULTRASONORE MONOVOIE :

La débitmétrie par ultrasons monovoie est sensible à l'évolution des profils d'écoulement et nécessite quelques précautions dans sa mise en oeuvre. Un DUS réalise l'intégration du champ des vitesses de l'écoulement le long de sa ligne de visée acoustique. La vitesse moyenne $\int_0^L V dl$, L=longueur du trajet acoustique dans l'eau et V vitesse locale de l'eau) qui en résulte est généralement supérieure à la vitesse moyenne débitante recherchée (Vd) dans la section. Dans la gamme de nombre de Reynolds concernée (zone du régime turbulent rugueux), les différents modèles de représentation d'écoulements turbulents axisymétriques permettent d'approcher le coefficient de correction hydraulique (Kh=Vus/Vd) [réf. 2, 3 et modèle de Prandtl).

2.5.1. SIMULATION BASEE SUR LES RESULTATS D'ESSAIS :

A partir des données moulinets, il a été réalisé une simulation du comportement d'un DUS monovoie, disposé dans chacun des six plans diamétraux définis par la position des moulinets (annexe 1). L'hypothèse de conservation du profil des vitesses entre les deux plans de positionnement des sondes ultrasonores distantes d'un diamètre pour des capteurs montés à 45° a été vérifiée a posteriori par la modélisation numérique.

Le graphe de l'annexe 5 synthétise pour les six plans et pour six paliers de débits (de 20 à 90 m³/s), la répartition du coefficient de correction hydraulique Kh.

Les résultats conduisent aux remarques suivantes :

- les vitesses V_{us} calculées pour chaque DUS à partir de l'intégration des profils de vitesses débitantes sur les diamètres O à D sont systématiquement supérieures de 1,4 à 4,7 % aux vitesses moyennes mesurées par les moulinets : cette constatation est conforme au principe de comportement d'un DUS placé dans un écoulement faiblement perturbé,

- le coefficient de correction hydraulique moyen estimé à partir des données d'essais et de la simulation des DUS vaut 1,033 avec un écart-type (σ) de $\pm 0,008$, soit une correction de -3,3 % avec une incertitude de $\pm 1,6\%$ pour un intervalle de confiance à 95%,

- les coefficients théoriques de correction hydraulique calculés selon les références citées précédemment sont compris entre 1,038 et 1,049 avec une valeur moyenne de 1,045 dans cette plage de débit, ils se situent à seulement +1% de la valeur moyenne issue des données d'essai.

Dans ces conditions le DUS autorise une précision moyenne d'au plus $\pm 1,6\%$ sur la mesure de vitesse débitante basée sur les données de référence des mesures aux moulinets s'il est placé sur n'importe quel diamètre de la section de mesure.

L'examen du résultat de simulation à partir des données moulinets a également montré que la position optimale d'un DUS installé dans la section de mesure serait le diamètre D en raison de la faible dispersion des valeurs de Kh ($\pm 0,4\%$).

2.5.2. SIMULATION BASEE SUR LES DONNEES DU MODELE :

Des simulations du DUS ont été également réalisées uniquement à partir des données du modèle.

Elles ont été limitées aux débits extrêmes de 20 m³/s et 90 m³/s pour des raisons de temps et de coût de calcul. Les coefficients de correction hydraulique ainsi déterminés, en remplaçant les données moulinets par celles issues du modèle, sont très proches de ceux obtenus dans la première démarche (annexe 5). Les coefficients hydrauliques moyens (1,033 à référence moulinets et 1,035 à référence modèle) sont quasiment identiques.

La représentativité du modèle est suffisante pour réaliser les travaux d'optimisation du DUS et les résultats confortent la démarche de création d'un modèle pour le choix du point de mesure et l'optimisation de l'instrumentation.

Bien que la présence de vitesses non débitantes ait été détectée, leur influence est très faible sur la mesure par ultrasons (dans le rapport de la projection sur le trajet acoustique à 45°). Elle peut toutefois être éliminée par un montage à visée reflex (une paire de capteurs montés en V) ou à deux lignes de visées croisées (deux paires de capteurs montés en X).

3. CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE DEVELOPPEMENT:

La démarche mise en oeuvre a permis de confirmer la pertinence de l'approche par modélisation numérique de l'écoulement pour le choix de l'implantation d'un DUS monovoie. Le même principe pourrait être appliqué pour des DUS multivoies. L'analyse comparative des données expérimentales obtenues par les moulinets et de celles issues de la modélisation numérique montrent que cette dernière n'introduit pas de biais sur la valeur moyenne du coefficient de correction hydraulique (écarts voisins de 0.2 % à associer à une dispersion de ± 1.5 %). On observe cependant la présence d'un décalage de la position du coeur de l'écoulement entre les essais et le modèle. La sensibilité de ce dernier aux conditions d'alimentation en débit des deux autres conduites doit être prochainement vérifiée afin d'évaluer la qualité de prédiction du champ des vitesses dans la section de mesurage.

Si la bonne qualité du modèle numérique se confirmait, cette démarche pourrait être appliquée en substitution aux campagnes d'essais pour l'étalonnage de DUS. Elle permettrait d'améliorer pour un moindre coût les performances des mesures de débit par la définition de la position optimale de débitmètres à ultrasons.

Références :

[1] G. JOSSINET

« Débitmètres ultrasonores pour conduites fermées - Evaluation et perspectives d'emploi à EDF »
Colloque débitmétrique de la Société Hydrotechnique de France - Grenoble - avril 1994.

[2] V. FRONEK

« Ultrasonic measurements of oil flow in laminar flow-turbulent flow transition region »
Flow Measurement of Fluids - H.H. Dijkstra, E.A. Spencer (eds.) - North-Holland Publishing Company

[3] DOU GUOREN

« General law of laminar and turbulent flows in pipe and open channel »
Scientia Sinica, Octobre 1982, Vol 25, N°10.

USINE DE ST- CHAMAS

CARACTERISTIQUES:

Un canal d'aménée de section trapézoïdale à écoulement libre de 14 kms,

Une chambre de mise en charge,

Une conduite par groupe constituée de deux tronçons:

- Longueur 200 m, diamètre 5,5 m,
- Longueur 160 m, diamètre 5 m,
- Une cheminée d'équilibre entre les deux tronçons.

Trois groupes à axe vertical:

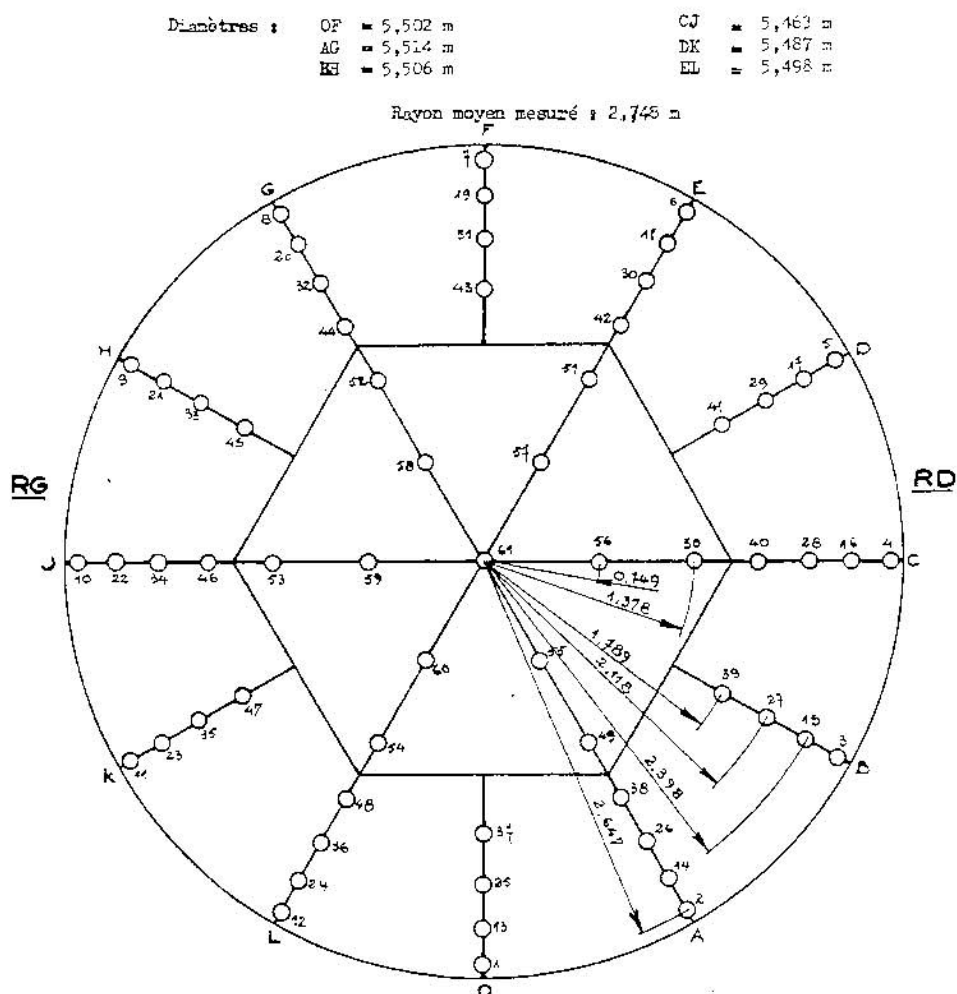
- Une turbine Francis-C.A.F.L.- VEEVEY 1964

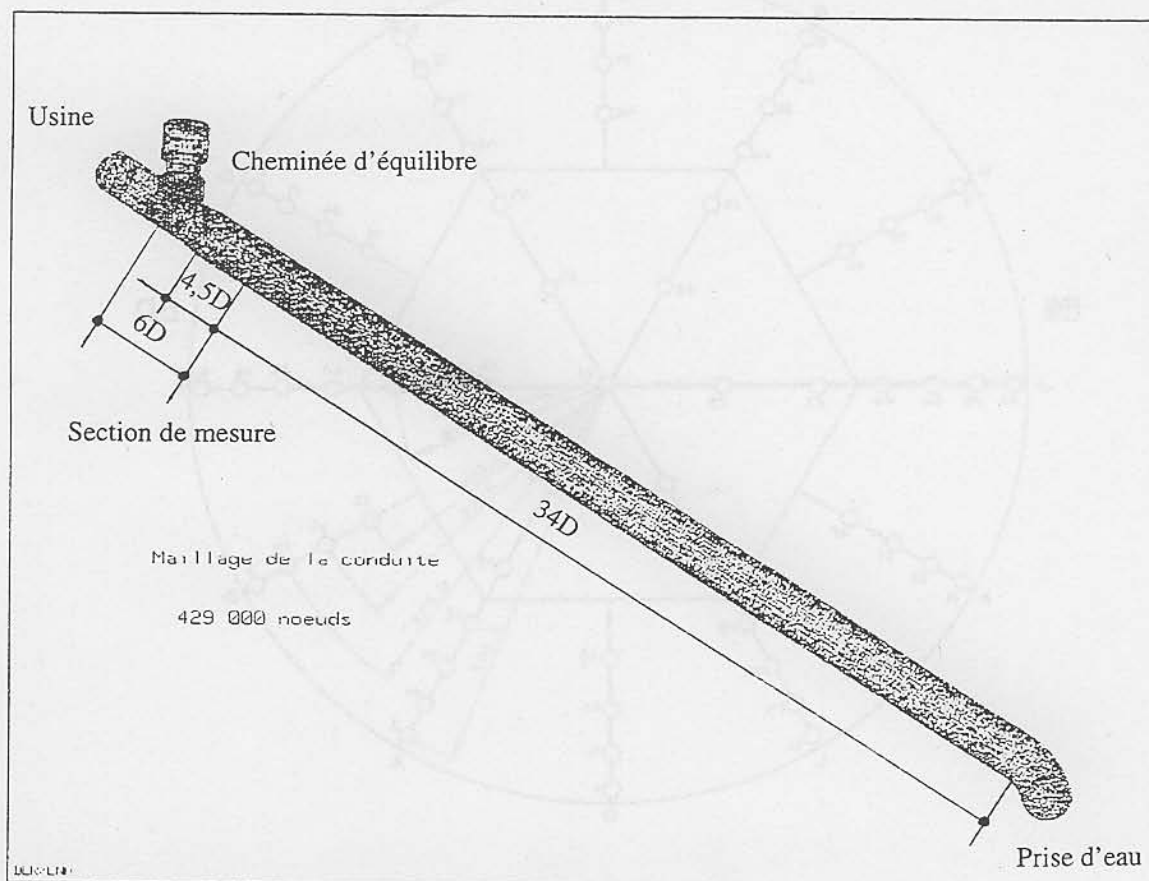
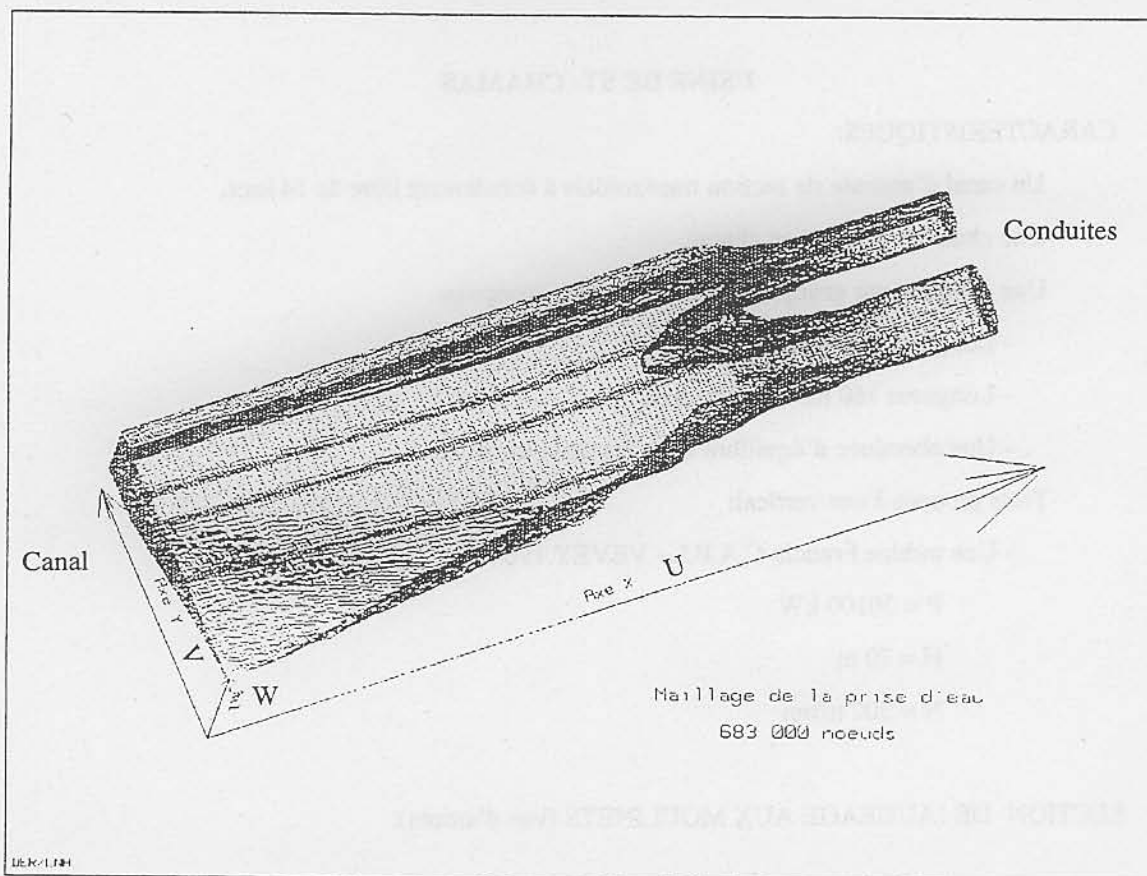
$$P = 50100 \text{ kW}$$

$$H = 70 \text{ m}$$

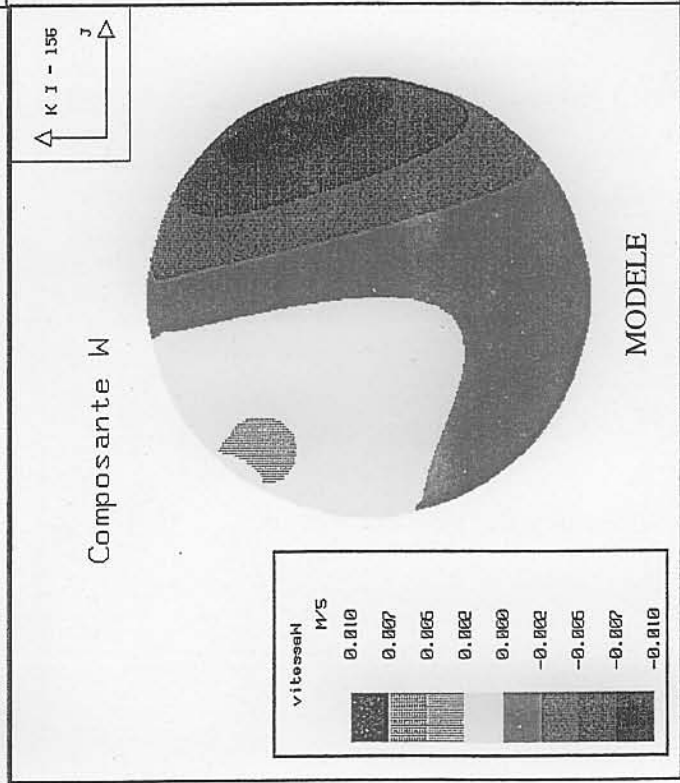
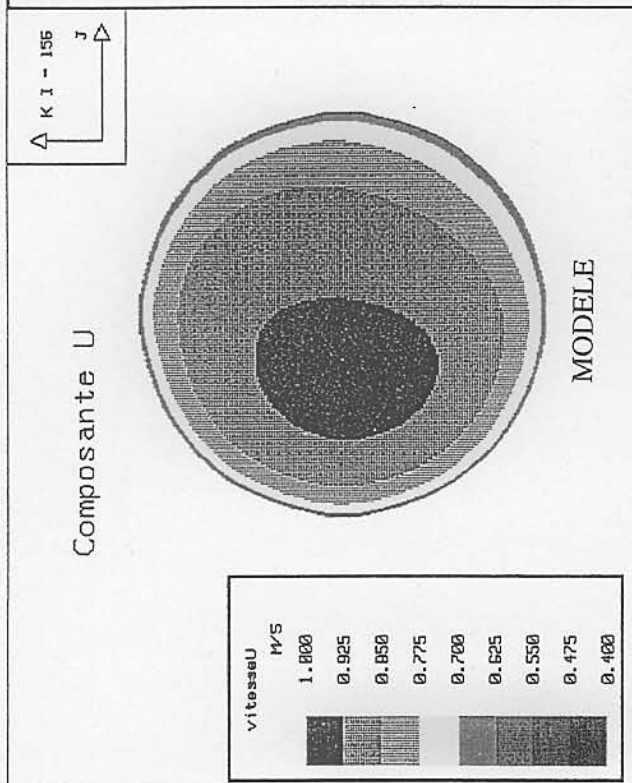
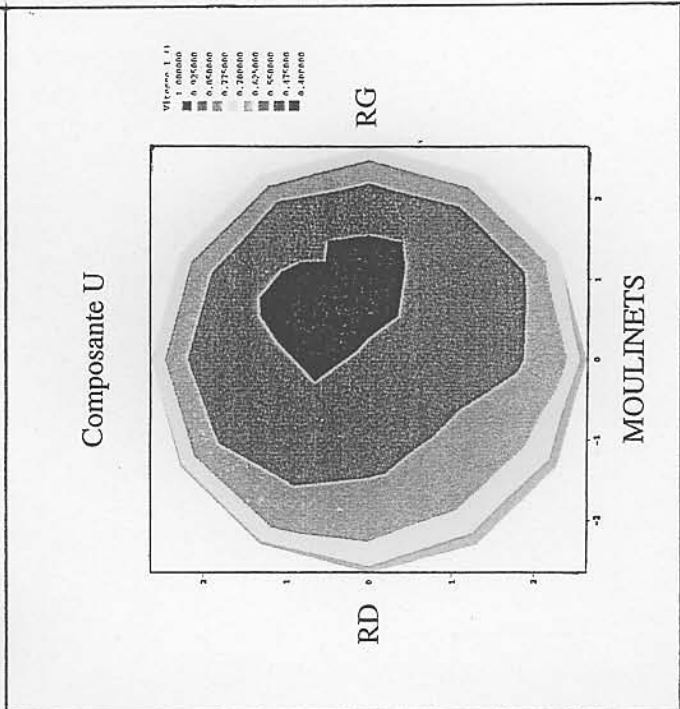
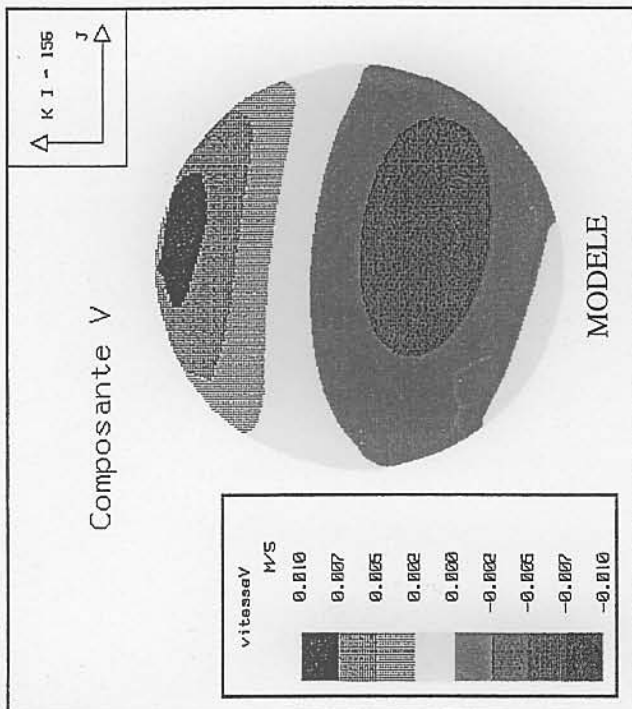
$$N = 200 \text{ tr/mn}$$

SECTION DE JAUGEAGE AUX MOULINETS (vue d'amont):



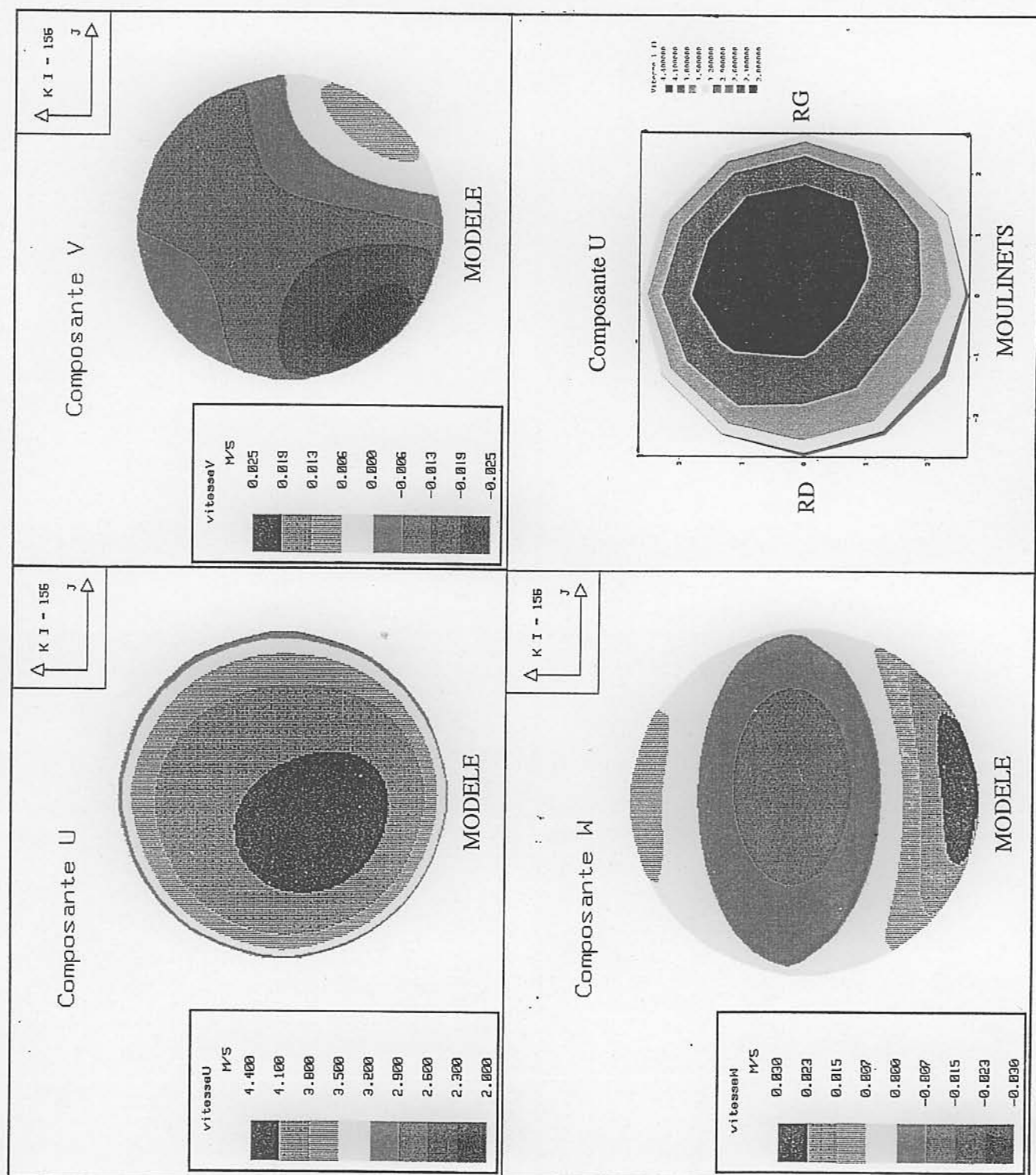


COMPARAISON DES CHAMPS DES VITESSES MODELE / ESSAIS:
DEBIT DE 20 M3/S -VUE D'AVANT



- ANNEXE 4 -

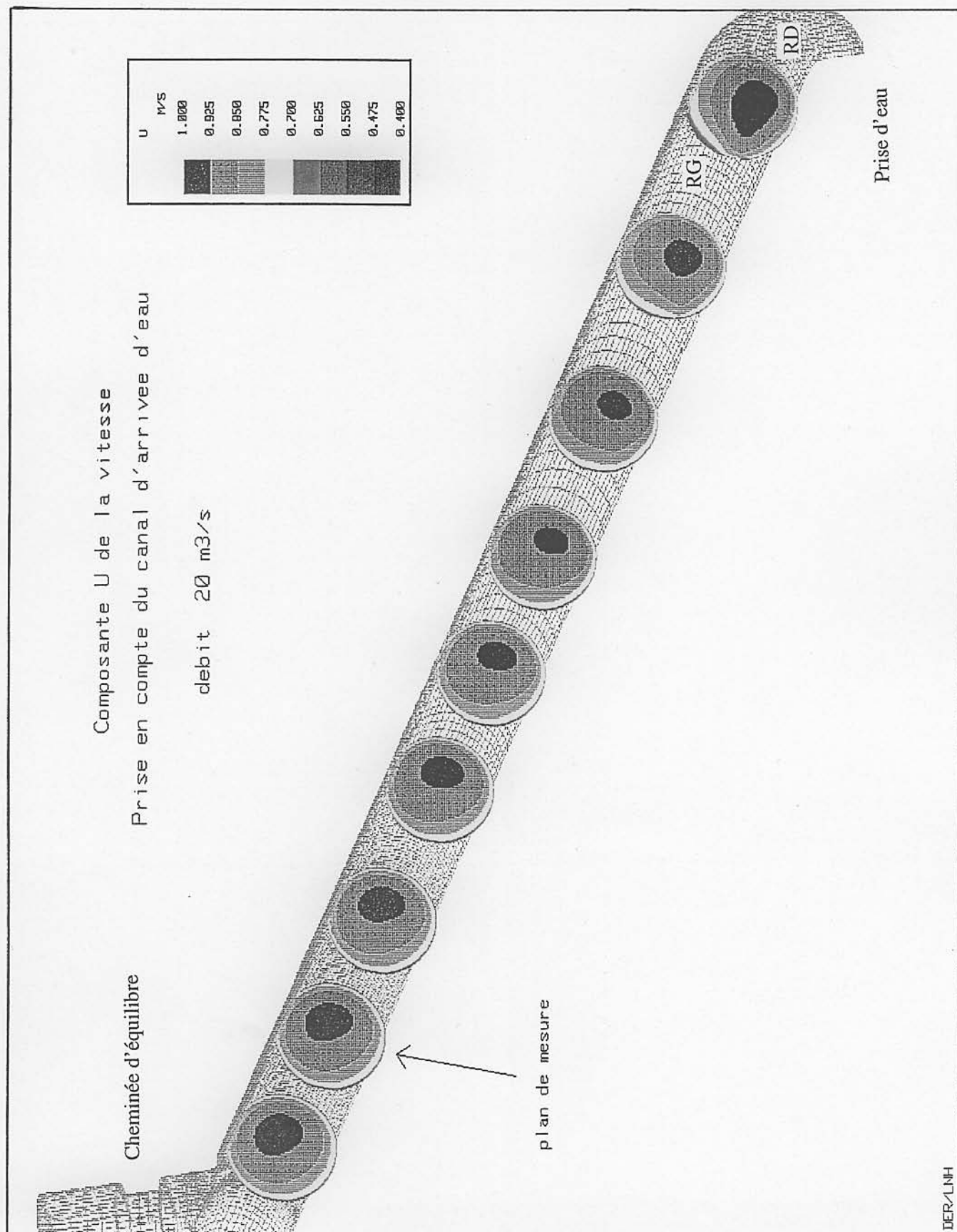
COMPARAISON DES CHAMPS DES VITESSES MODELE / ESSAIS:
DEBIT DE 90 M3/S -VUE D'AVANT



EVOLUTION DU PROFIL DES VITESSES DANS LA CONDUITE:

DEBIT 20 M3/S

VUE D'AVANT

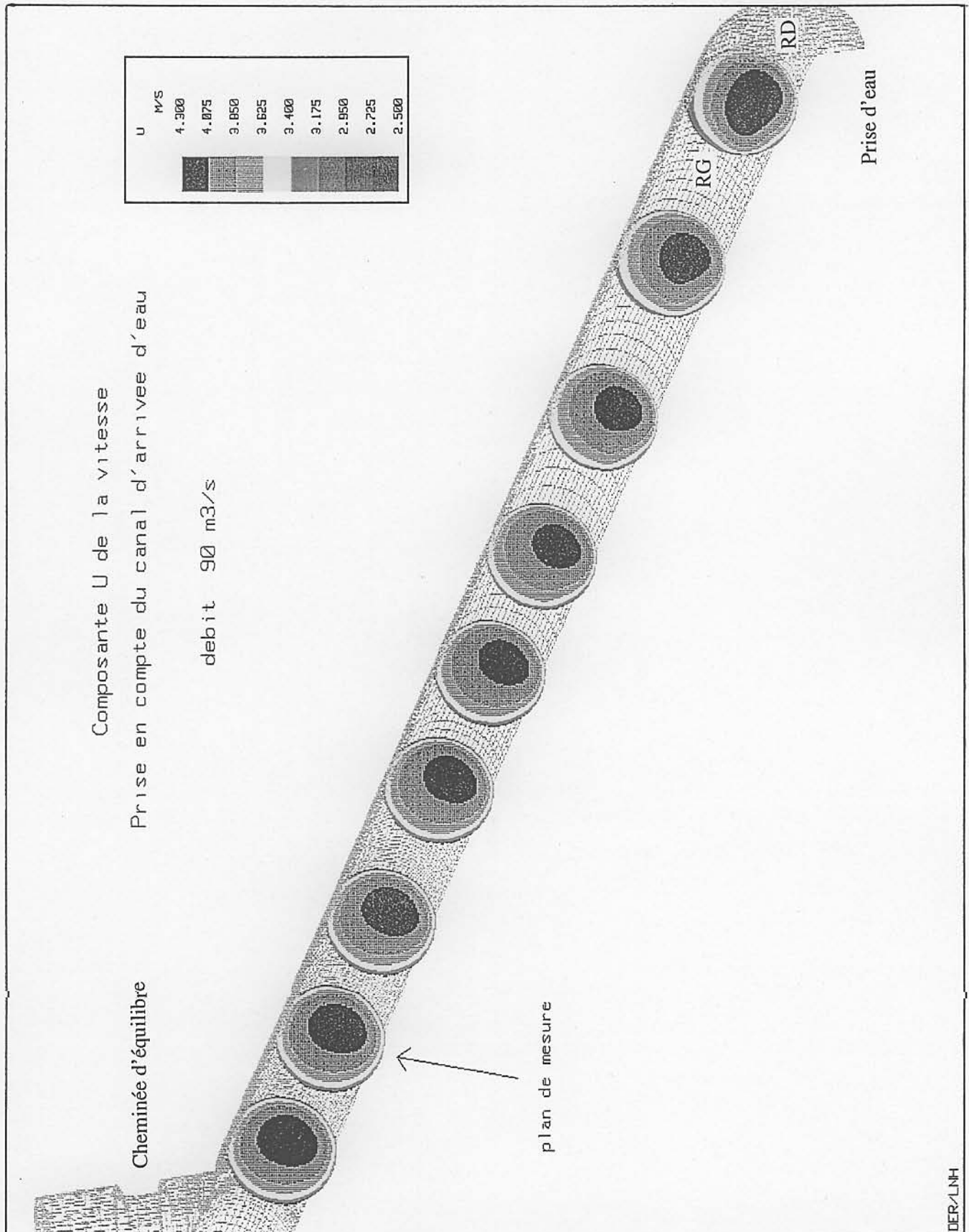


- ANNEXE 6 -

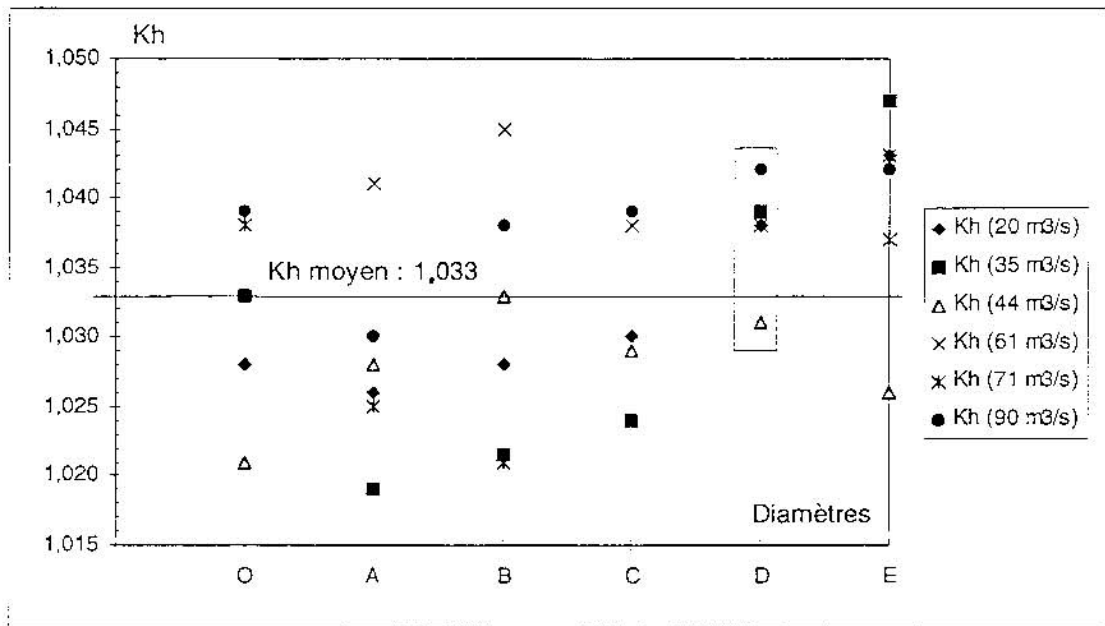
EVOLUTION DU PROFIL DES VITESSES DANS LA CONDUITE:

DEBIT 90 M3/S

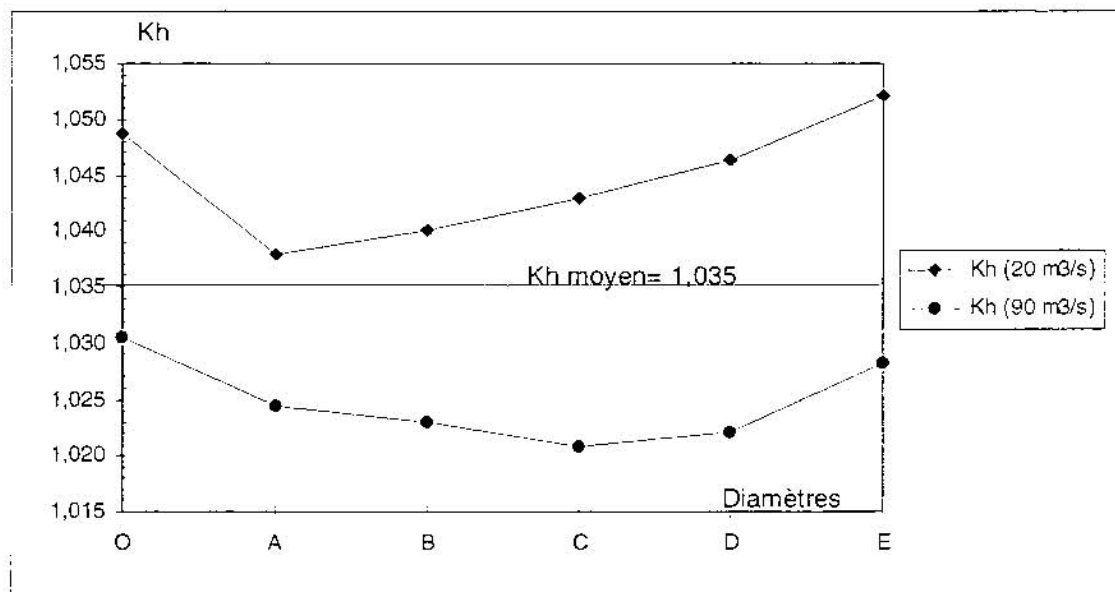
VUE D'AVANT



COMPORTEMENT D'UN DEBITMETRE A ULTRASON MONOVOIE
RESULTATS DE SIMULATION



résultat de simulation du DUS d'après moulinets



résultat de simulation du DUS d'après modèle