

Estudios en honor de  
Francisco Javier Domínguez  
ACh, 5<sup>a</sup> Serie, N° 8 (1985): 243-277

## MODELISATION PHYSIQUE, ANALOGIQUE ET NUMERIQUE EN MECANIQUE DES FLUIDES

J. NOUGARO  
Toulouse

### INTRODUCTION

L'étude d'un mouvement en Mécanique des Fluides s'effectue à partir d'applications des théorèmes fondamentaux à des espaces du premier ordre (espaces linéaires, surfaciques ou volumiques) en considérant des intervalles de temps infiniment petits.

Les équations différentielles obtenues ainsi après l'utilisation d'hypothèses simplificatrices, ne peuvent en général pas être intégrées.

Il y a lieu de recourir à des procédés de résolution mettant en jeu d'autres simplifications.

On utilise dans ces conditions les diverses modélisations de l'écoulement:

- Modélisation physique,
- Modélisation analogique,
- modélisation numérique.

Plus simplement, les résolutions sont obtenues par études sur modèles réduits, par calcul analogique, par calcul numérique.

La première méthode consiste à reproduire à échelle réduite les phénomènes hydrauliques naturels ou artificiels et à observer systématiquement les caractères et les effets des écoulements ainsi réalisés. C'est la théorie bien connue de la similitude à partir des résultats obtenus. De cette maquette on peut transposer à l'écoulement réel avec des erreurs qui sont extrêmement faibles.

Le deuxième procédé ou modélisation analogique se base sur la remarque suivante: les équations différentielles obtenues dans l'étude des mouvements ont parfois une représentation mathématique identique à des phénomènes physiquement différents, il y a analogie alors entre le phénomène hydraulique et le phénomène physique correspondant. On construit un ensemble satisfaisant aux mêmes équations que le phénomène hydraulique à étudier. La mesure des diverses grandeurs physiques permet de déterminer la valeur des grandeurs hydrauliques correspondantes. Cet ensemble est appelé un simulateur analogique.

La troisième procédé, la modélisation numérique consiste à faire traiter les équations générales du mouvement par des calculatrices électroniques pour de petites résolutions; par des traitements numériques plus élaborés et en utilisant alors des calculateurs de plus en plus puissants.

Signalons à cet égard, que de nombreuses méthodes de calcul, dites méthodes graphiques, ont pu être facilement transposées pour être effectuées automatiquement par la machine. En général les calculs numériques comprennent trois classes de problèmes:

- les problèmes de résolution d'équations différentielles,
- les problèmes d'équations aux dérivés partielles,
- les calculs de série en général, aboutissement d'un calcul analytique.

Les exemples d'études qui suivent sont emprutés à des recherches et travaux de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse.

- I. Ecoulements turbulents,
- II. Dynamique des jets,
- III. Ecoulements diphasiques,
- IV. Hydrologie,
- V. Ecoulements et transferts en milieux poreux,
- VI. Ecoulements rhéologiques,
- VII. Transports solides,
- VIII. Ecoulements hydrauliques.

Les responsables des équipes correspondantes, nous ont fourni tous les renseignements et illustrations correspondant à ces divers exemples.

## I ECOULEMENTS TURBULENTS

Les travaux actuels traitant ces problèmes sont dictés par deux soucis majeurs:

Sur le plan fondamental, approfondir deux phénomènes physiques peu étudiés jusqu'ici à cause de leur complexité et,

Sur le plan de retombées dans le secteur aval, diversifier les domaines d'applications qui intéressent des secteurs variés tels que l'aéronautique, la combustion, le génie chimique...

C'est ainsi que deux thèmes ont été abordés:

*Theme 1: Instationnarité interne en écoulement turbulent:*

L'hypothèse de stationnarité du mouvement moyen que l'on fait lors de la décomposition de Reynolds est souvent mise en défaut dans des écoulements cisailés présentant un intérêt réel pour des applications d'Ingénieur. L'écoulement autour d'obstacles insuffisamment profilés fournit un exemple particulièrement révélateur de ce caractère d'instationnarité interne où la non permanence du mouvement macroscopique n'est pas due à une excitation extérieure. D'autres existant dans de nombreuses configurations et notamment celle du jet rond où une stationnarité en moyenne est présumée.

Il est donc prévisible que les modèles de fermetures unipointes classiques, basés sur une hypothèse d'équilibre spectral, se trouvent en défaut dans ces cas et que de nouvelles méthodes de prédétermination sont à élaborer lorsqu'on veut calculer ces écoulements instationnaires.

Deux configurations ont été choisies pour cette étude: le jet rond de tuve où les structures déterministes dans la zone initiale ont mis en défaut les modèles de turbulence classiques, et le sillage d'un cylindre circulaire, sans ou avec transfert de chaleur, l'étendue des zones instationnaires permettant dans ce cas de réaliser une analyse expérimentale plus complète.

Les travaux étant conduits dans trois directions: expérimentale, théorique et numérique, il convient donc d'en présenter les résultats sous ces trois aspects:

Deux études expérimentales ont été effectuées: (Fig. 1)

a) l'une concernant l'écoulement autour d'un cylindre à grands nombres de Reynolds où, partant des mesures des différentes grandeurs moyennes et fluctuantes, spectres, corrélations, nous essayons de pénétrer les différents mécanismes de l'écoulement;

b) l'autre relative au sillage thermique derrière un cylindre, en régime laminaire. Dans ce dernier cas, l'interférométrie différentielle a fourni des indications sur le champ thermique conduisant à une comparaison avec des résultats obtenus par calcul.

—Sur le plan numérique, outre des programmes relatifs aux écoule-

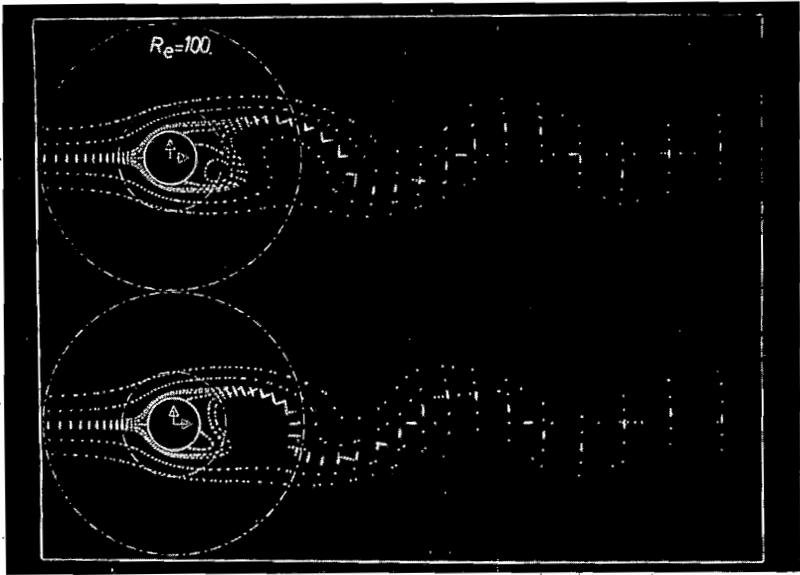


Fig. 1: Ecoulement autour d'un cylindre

ments turbulents stationnaires de type elliptique ou parabolique, nous sommes revenus aux résolutions des équations de Navier-Stokes, en régime instationnaire, en accordant une attention particulière à la minimisation des diffusivités numériques et à l'accroissement de la rapidité du calcul. En effet, la prédétermination des écoulements turbulents instationnaires ne sera correcte que si le "solver numérique" est précis et rapide. C'est ainsi que nous avons mis au point plusieurs codes de résolution des équations de Navier-Stokes — aussi bien en variables hydrodynamiques qu'en variables de Helmholtz — avec des algorithmes tels que A.D.I. optimisé, F.F.T. ou méthodes hermitiennes du quatrième ordre.

— Sur le plan théorique de la modélisation, plusieurs approches ont été étudiées. Elles sont encore en phase de développement.

#### Theme 2: *Effets de densité en écoulement turbulent:*

Dans les problèmes de combustion ou de moteurs à réaction, la masse volumique du fluide est loin d'être constante. Jusqu'ici, faute de théories élaborées, les calculs en combustion sont effectués à partir des modèles de

turbulence établis en fluide incompressible. Cette simplification conduit à des résultats assez éloignés des mesures. En fait, la variable de densité provient de différentes origines souvent présent ensemble: grandes vitesses (compressibilité), chauffage (transfert thermique), mélange de deux ou plusieurs constituants (hétérogénéité massique). Une étude approfondie, excluant la considération simultanée de ces origines a été entreprise sur le troisième cas.

Pour cette recherche, nous avons adopté la configuration du jet turbulent de tube où le  $\text{CO}_2$  en concentration variable de 0 à 100% se débouche dans une atmosphère calme de l'air. Cette configuration a été choisie à cause d'une étude complète du jet air-air que nous avons réalisée précédemment. La bonne connaissance du cas homogène a permis une meilleure appréciation des effets de la variation de la masse volumique.

Ici encore, l'étude a été conduite sous trois aspects: expérience-modélisation et calcul, la fermeture des équations étant réalisée dans l'espace physique au niveau des moments du second ordre.

Les résultats obtenus ont permis de progresser tant sur le plan expérimental sur sur le plan théorique:

—Sur le plan expérimental (Fig. 2), une exploration complète a été



Fig. 2: Ecoulement à la sortie d'un tube

effectuée depuis la sortie du tube jusqu'à la zone de régime affine. Dans chaque section, on a mesuré les profils de concentration et de vitesse moyenne. Par une utilisation judicieuse du fil chaud, nous avons pu mesurer les tensions de Reynolds non contaminées par les fluctuations de concentration. Les résultats de mesure sont comparés aussi bien au cas isovolume qu'aux prédéterminations théoriques ci-après.

—Sur le plan théorique, nous avons élaboré un modèle de turbulence basé sur les équations de transport des moments d'ordre deux, hors des approximations de Boussinesq, usant la décomposition de Favre. Il s'agit donc des équations de transport de:

$$\overline{\rho u^2}, \overline{\rho v^2}, \overline{\rho w^2}, \overline{\rho uv}, \overline{\rho v^2}, \overline{\rho u\gamma}, \overline{\rho v\gamma}, \overline{\varepsilon_t} \text{ et } \overline{\varepsilon\gamma}$$

Ce modèle original a été résolu dans la configuration du jet rond par extension en version B.I.C. du code de calcul N.S.E.P.T. validé dans le cas isovolume.

## II DYNAMIQUE DES JETS

L'étude concerne le comportement dynamique d'un amplificateur fluide analogique. Un tel élément, dont le fonctionnement ne résulte que de l'interaction entre écoulements, a des dimensions hors tour de l'ordre du cm. (Fig. 3) Toutefois, les dimensions des canaux sont telles que la longueur de références que l'on peut associer aux écoulements concernés est de l'ordre du mm. (Fig. 4)

Avec une géométrie d'écoulements aussi complexe (canaux d'alimentation et de commande, zone d'interaction, canaux récepteurs et évènements), on ne peut espérer traiter globalement ce problème, surtout en régime instationnaire. Différentes méthodes sont donc successivement appliquées afin d'obtenir la modélisation du comportement de l'amplificateur complet, et en particulier sa réponse harmonique (ou fréquentielle). Le processus comporte d'abord une modélisation physique qui permet d'introduire des "hypothèses physiques" dans les équations de base auxquelles on applique ensuite un traitement mathématique et numérique.

### 1. Modélisation physique:

Elle est réalisée par "analogie hydraulique" entre un écoulement d'air en charge et un écoulement d'eau à surface libre. L'étude particulière de cette analogie a montré qu'en régime subsonique, des résultats qualitatifs

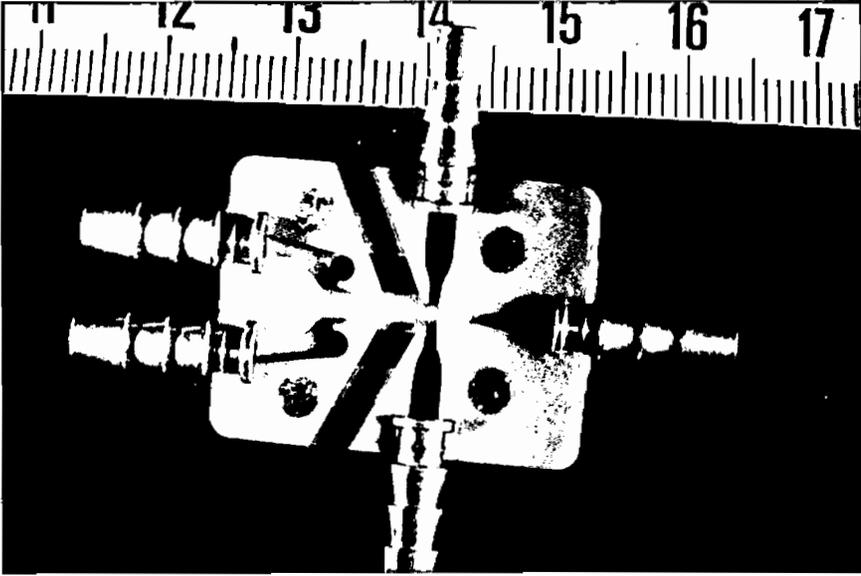


Fig. 3: Amplificateur fluide analogique.



Fig. 4: Ecoulement fluide

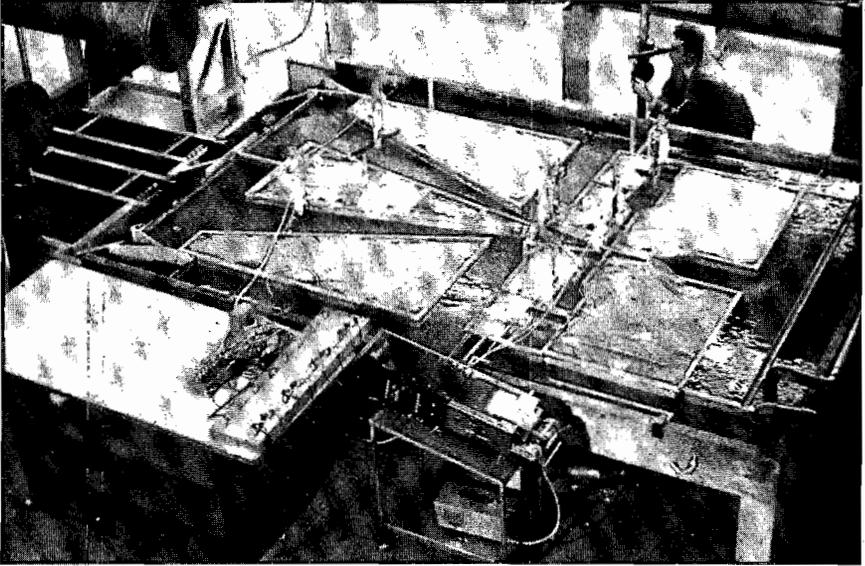


Fig. 5: Modélisation fluïdique

et quantitatifs sont obtenus tant pour les régimes permanents que pour les régimes transitoires.

Dans notre cas, le "modèle" a des dimensions bien supérieures à "l'ouvrage" (Fig. 5); l'échelle des longueurs est de l'ordre de 50.

Les avantages de cette méthode sont essentiellement:

—les grandes dimensions du modèle et la présence d'une surface libre (visualisation et implantation des instruments de mesure),

—le rapport des échelles de temps qui est de l'ordre de quelques milliers. L'observation visuelle des phénomènes dynamiques devient alors possible, les fréquences obtenues étant inférieures au Hertz.

On peut ainsi obtenir de réelles informations sur les phénomènes permanents (interaction jet-paroi; état commuté de l'amplificateur) et sur les phénomènes dynamiques (naturels pour un jet libre; auto-entretenus par interaction du jet avec un partiteur). (Fig. 6)

## 2. *Traitement théorique*

Il est lié essentiellement aux "hypothèses physiques" qui proviennent en partie de la modélisation physique. Il faut ici distinguer les deux types



Fig. 6: Jet avec partiteur

d'écoulements rencontrés: écoulements internes dans les canaux et interaction de jets libres.

a) *Écoulements instationnaires dans les canaux:*

L'hypothèse essentielle concerne la propagation de la perturbation sous forme d'onde plane. L'écoulement dans le plan physique est alors modélisé dans le plan des fréquences par utilisation de la transformation de Laplace. Les résultats sont alors obtenus sous forme de fonction de transfert: par rapport au signal périodique imposé à l'entrée, on obtient le module et le déphasage en tout point du canal, et ceci en fonction de la fréquence d'excitation.

b) *Interaction de deux jets libres:*

Dans ce cas, la perturbation est modélisée directement au niveau des vitesses par superposition à l'écoulement permanent turbulent d'une petite perturbation périodique par rapport au temps et par rapport à l'abscisse longitudinale (axe du jet). Les résultats s'appliquent alors aux valeurs des vitesses instantanées obtenues en tout point et à tout instant.

### 3. *Traitement numérique:*

Chacun des écoulements particuliers ayant été modélisés, on peut lier

numériquement les différents éléments de l'amplificateur et calculer alors, en particulier, sa réponse harmonique.

### III. ECOULEMENTS DIPHASIQUES

Dans le cadre des activités de recherche relatives à l'étude des phénomènes de transfert convectifs-diffusifs-dispersifs dans les écosystèmes d'eaux de surface, nous avons été amenés à développer deux axes dans lesquels les méthodologies de modélisation prennent une place très importante:

—l'analyse des bilans de quantité de mouvement et de masse des espèces biochimiques, ainsi que de la structure verticale des vitesses et concentrations sur des sites donnés, a conduit à réaliser des modèles numériques destinés à expliquer, après calage, ces phénomènes observés in situ sur les mécanismes diffusifs verticaux liés à l'amortissement de la turbulence par le travail des forces d'Archimède dans les écoulements stratifiés, et les mécanismes dispersifs longitudinaux couplés. Ces modèles ont alors l'avantage de pouvoir, par extrapolation, simuler des situations différentes de celles réellement observées et d'en tirer des conclusions à caractère prévisionnel, concernant l'influence des paramètres abiotiques externes et l'action de l'homme sur le milieu.

—l'étude des phénomènes de transfert d'énergie et de masse à l'interface libre a conduit à la réalisation de modèles physiques dans lesquels est simulée l'action des paramètres externes influant sur ces transferts. L'une des préoccupations de cette étude est étroitement liée à la pénétration à l'interface de composés gazeux et en particulier de l'oxygène de l'air par absorption dans la phase liquide, la concentration en oxygène dissous constituant l'un des paramètres clés des cinétiques biochimiques.

#### *1. Modélisation numérique des phénomènes de transfert dans les écosystèmes eaux de surfaces:*

La réponse du milieu aquatique aux diverses sollicitations externes: quelles soient relatives à l'hydrodynamique (action de la marée pour les estuaires, gestion hydraulique des bassins pour les estuaires, action du vent) ou quelles influent sur les bilans de masse ou d'énergie (rejets, rayonnements solaires, absorption à la surface, apports par précipitations, nappes et ruissellement, évaporation...), mettent en jeu des mécanismes de transport proprement dits (convection par le mouvement moyen, diffusion par le mouvement moléculaire et turbulence) et des mécanismes de transformation des espèces par le jeu des réactions chimi-

ques et biochimiques. Les lois classiques d'évolution des grandeurs locales moyennes (au sens habituel de la turbulence) conduit à l'écriture des équations aux dérivées partielles de bilan de quantité de mouvement, des masses et d'énergie dont la dépendance vis-à-vis des quatre coordonnées d'espace et de temps pose d'importants problèmes de résolution.

Une simplification consiste alors à définir des moyennes spatiales des grandeurs classiques (vitesse, concentration, etc...) sur une droite ou une section: l'on est alors amené à résoudre des modèles à deux ou trois variables classiques dans lesquels, outre le temps, interviennent par exemple l'abscisse longitudinale (cas des modèles unidimensionnels, de rivières appliquées aux écoulements non stratifiés) ou l'abscisse et la cote (cas des estuaires et des milieux stratifiés). L'examen des équations traitées montrent alors que l'interaction nécessaire à la définition de grandeurs spatiales moyennes, conduit à introduire par suite de la présence des termes non linéaires convectifs des corrélations du second ordre représentant un transport supplémentaire fictif dû à la dispersion de la grandeur dans le domaine d'intégration. Par exemple, si  $u_i$  est une composante de la vitesse et  $C_\alpha$  une concentration de l'espèce  $\alpha$ ,  $\langle u_i \rangle$  et  $\langle C_\alpha \rangle$  les moyennes spatiales de  $u_i$  et  $C_\alpha$ , le transport dispersif de la grandeur  $\alpha$  sera alors:

$$\langle (u_i - \langle u_i \rangle) (C_\alpha - \langle C_\alpha \rangle) \rangle$$

terme dont la prise en compte est fondamentale pour rendre compte du phénomène de transfert.

Or, précisément, ce mécanisme de dispersion, qui fit l'objet des travaux de G.I. TAYLOR est le résultat d'un équilibre entre le transport convectif longitudinal et le transport diffusif transversal. L'un des problèmes fondamentaux est d'utiliser une hypothèse de fermeture correcte de ce terme dans les modèles numériques de transport.

Outre cet aspect, la modélisation numérique des écosystèmes exige une bonne compréhension des cinétiques chimiques et biochimiques pour lequel le travail expérimental de terrain et de laboratoire fait l'objet d'une étroite collaboration avec l'équipe d'hydrobiologie de l'U.P.S.

Les hypothèses sur les fermetures des flux dispersifs et sur les cinétiques font alors l'objet d'allers et retours modèle-écosystème par les simulations la constitution de banques de données et l'identification des paramètres semi-empirique.

Notre laboratoire travaille actuellement sur deux sites:

- un bief de la rivière Lot,
- la lagune *EBRIE* en Côte d'Ivoire.

Ces deux sites ont la particularité de mettre en évidence l'influence très forte sur le mécanisme de transport diffusif-dispersif de la stratification en densité, par destruction de turbulence sous l'action du travail des forces d'Archimède dans le mouvement fluctuant.

Sur la rivière Lot, le phénomène apparaît en période d'étiage lorsque la production de turbulence sur le fond est faible, et sous l'action du rayonnement solaire; le gradient de température peut devenir suffisant (de l'ordre du degré par mètre) pour diminuer notablement les échanges diffusifs verticaux et provoquer une stratification notable en oxygène dissous. Une modélisation verticale a été réalisée en traitant sur le bief en régime établi, les équations de bilan thermique et d'oxygène dissous. La production d'oxygène dissous est supposé être essentiellement due à la photosynthèse, le flux à la surface libre ayant été négligé par suite des faibles vitesses de frottement sur l'interface. Les résultats de la modélisation en accord avec les relevés expérimentaux mettent en évidence la nécessité de prendre en compte le phénomène pour la gestion hydraulique du bief en période d'étiage et d'ensoleillement.

Sur la site *EBRIE* où la marée induit des nombres de Reynolds assez importants, la stratification persiste par suite de la pénétration des eaux salées lors du flux en période sèche. L'un des aspects fondamentaux étudié dans l'écosystème est le transport de sel qui constitue par ailleurs un traceur de choix. Les effets de la stratification saline ont conduit à tester différentes hypothèses de fermeture des flux dispersifs et à rendre compte de l'évolution journalière et mensuelle de la salinité locale moyenne.

## *2. Modélisation physique des phénomènes de transfert de masse et de quantité de mouvement à l'interface:*

Toujours à partir des préoccupations relatives aux échanges mutuels air-eaux de surface, et pour connaître en particulier l'action du vent sur le frottement à l'interface, et sur l'absorption par le jeu de la présence des rayons, l'équipe a construit trois modèles physiques ou contacteurs dans lesquels on réalise un écoulement co-courant eau et de gaz. Deux installations permettent de faire circuler du  $\text{CO}_2$  ou un autre gaz, la troisième permet de faire circuler un film de liquide non miscible à la surface de l'eau.

Le schéma de principe du contacteur n° 2 avec les dimensions sont données sur la figure 7.

Le modèle physique permet ainsi de mettre en évidence l'influence du

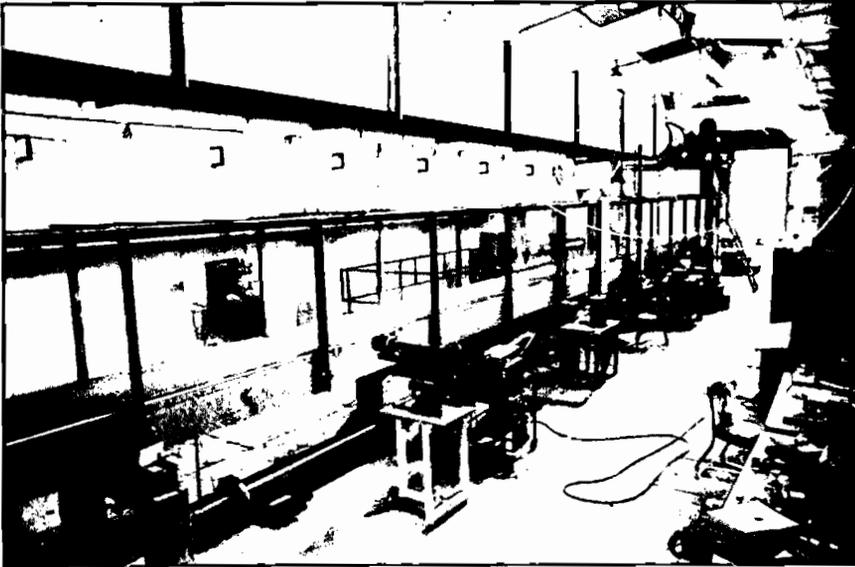


Fig. 7: Contacteur pour étude d'environnement

développement des vagues et de la structure fluctuante à la surface libre, sur le frottement interfacial et sur l'absorption.

L'un des objectifs est en particulier de se faire une idée claire sur le rôle que jouent les structures des différentes tailles de la zone d'agitation interfaciale de la phase liquide, sur le coefficient d'absorption.

#### IV. HYDROLOGIE

Nous allons brièvement donner quelques renseignements sur les problèmes de modélisation numérique, analogique et physique qui ont été traités dans ce domaine.

1. *Simulation numérique des écoulements en milieux non saturés avec prise en compte du phénomène d'hystérésis de la relation succion teneur en eau:*

Le modèle mathématique utilisé est l'équation de Richard:

$$\operatorname{div} [k \operatorname{grad} (\psi + z)] = C \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

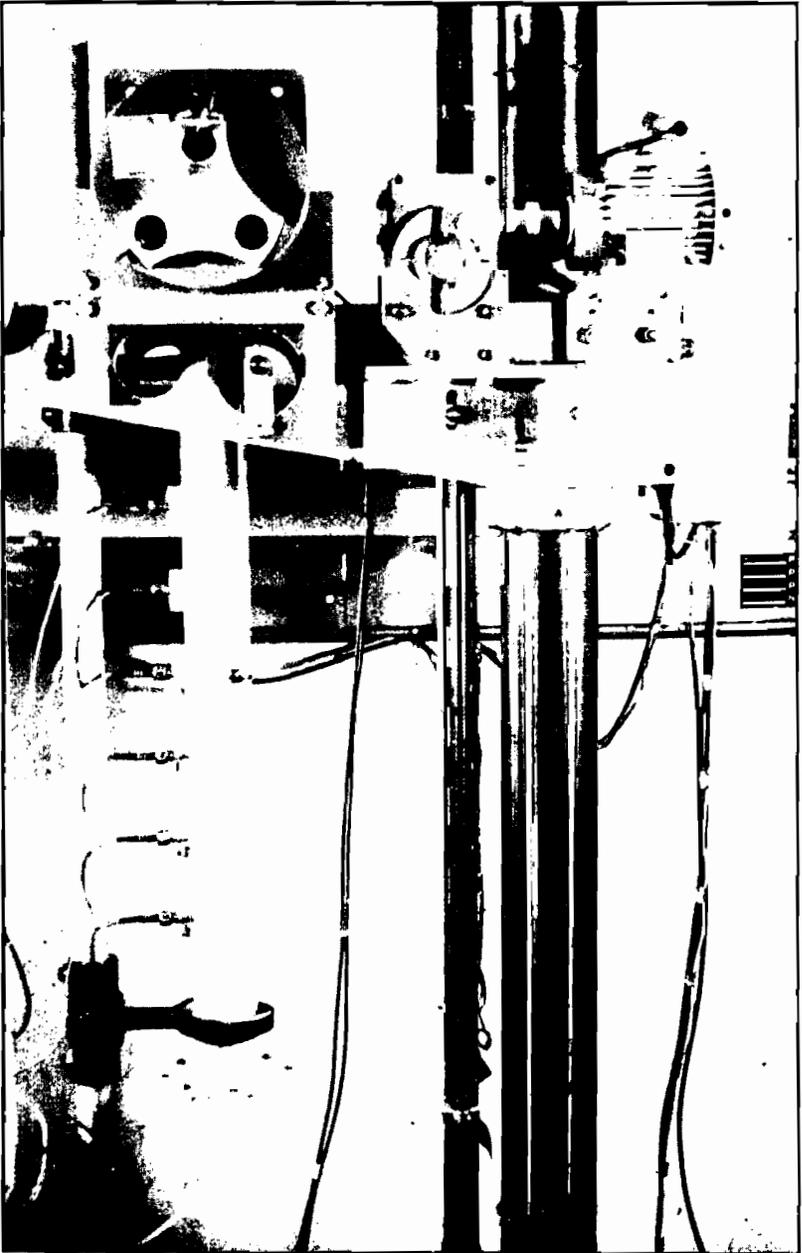


Fig. 8: Etude hydrologique sur colonne

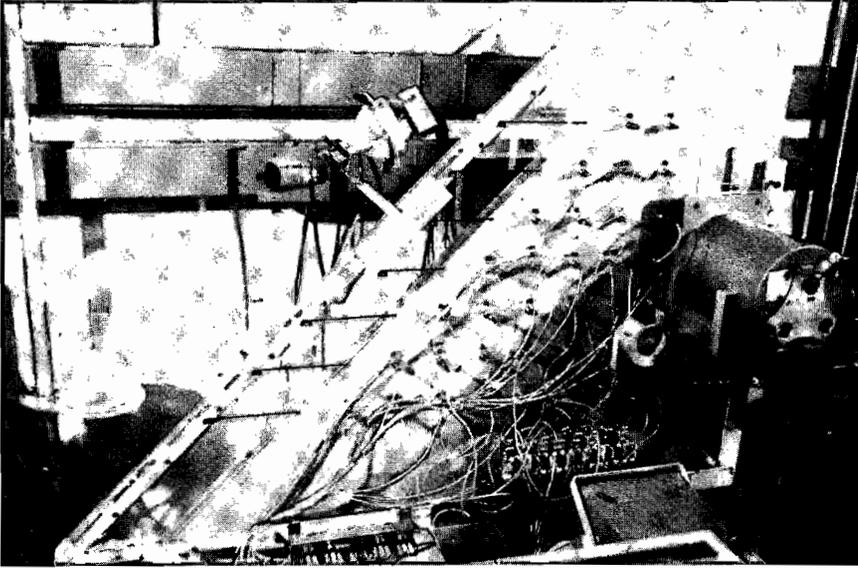


Fig. 9: Etude hydrologique sur digue

Le modèle numérique utilisé est un modèle aux éléments finis à 1 ou 2 dimensions d'espace.

Les résultats du modèle numérique ont été comparés aux mesures faites en laboratoire sur colonne (Fig. 8) ou dans une digue (Fig. 9).

### 2. Simulation d'un milieu poreux par un réseau de tubes capillaires:

Ce modèle a permis de tester l'influence de la distribution des diamètres sur la perméabilité équivalente, la dispersion hydrodynamique transversale et longitudinale.

### 3. Simulation des écoulements transitoires à surface libre:

Le modèle mathématique utilisé est l'équation de Saint-Venant:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \text{div}(h\vec{v}) = Q$$

$$g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g(I_x - J_x)$$

$$g \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = g (I_y - J_y)$$

Le modèle numérique utilise la méthode des éléments finis. Un tel modèle permet l'étude de la propagation d'une crue dans une plaine, l'étude des écoulements dans un estuaire, dans un étang relié à la mer...

#### 4. Calcul des écoulements dans les réseaux de distribution d'eau:

— Le calcul en régime permanent est effectué par la méthode de Hardy Cross,

— Le calcul en régime transitoire est effectué à l'aide de la méthode des caractéristiques. Les points singuliers généralement rencontrés sur un réseau sont pris en compte (anti-bélier, réservoir hydropneumatique, station de pompage, ...)

#### 5. Ecoulements dans les réseaux d'assainissement:

Trois modèles de simulation sont utilisés:

a) Le modèle de crue dynamique fondé sur l'utilisation de l'équation dynamique complète:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = (I - J)$$

b) Le modèle de crue cinématique fondé sur l'utilisation de l'hypothèse d'écoulement uniforme  $I = J$ .

c) Le modèle de crue diffusante qui néglige les effets d'inertie mais permet d'introduire un effet d'atténuation de l'onde de crue.

#### 6. Modèles stochastiques de simulation de réservoirs:

a) modèles autorégressifs,

b) modèle utilisant les chaînes de Markov discrétées.

#### 7. Modèles de prévision de crue:

a) modèle autorégressif et à moyenne mobile (type *BOX* et *JENKINS*).

b) modèle utilisant la fonction de transfert du système hydrologique:

— cas des systèmes non linéaires,

— cas des systèmes à entrées multiples.

### V. ECOULEMENTS ET TRANSFERT EN MILIEUX POREUX

Les recherches conduites sur les Milieux Poreux s'articulent autour de trois thèmes principaux:

- Transfert de chaleur et de masse sans changement de phase,
- Transfert de chaleur et de masse avec changement de phase,
- Ecoulements polyphasiques isothermes.

Les sujets des recherches qui s'inscrivent dans chacun de ces thèmes sont généralement issus de situations industrielles existantes ou potentielles mais leurs objectifs visent principalement au développement des connaissances scientifiques à partir desquelles pourront éventuellement s'élaborer les solutions techniques.

Dans le contexte des études en cours, ces objectifs concernent notamment:

1. la recherche d'équations de fermetures,
2. l'élaboration et la vérification de modèles mathématiques,
3. l'analyse de certains phénomènes particuliers.

Compte tenu des caractéristiques spécifiques au milieu poreux, les recherches sont développées à partir d'une analyse des phénomènes effectuée en adoptant deux échelles d'observations:

- a) microscopique ou échelle du pore,
- b) macroscopique ou échelle du continu fictif équivalent en milieu poreux.

Les méthodes d'approches retenues, identiques pour chaque sujet laisse une place de choix à l'analyse expérimentale fine des phénomènes; les résultats obtenus sont toujours confrontés à ceux d'une analyse théorique dont l'exploitation se fait par voie analytique ou numérique.

Dans le cadre de ces différentes voies d'approches, plusieurs types de modélisation sont indépendamment ou conjointement utilisées:

*Modèles physiques:* Ces modèles sont largement mis en oeuvre lorsqu'il s'agit d'analyser des phénomènes particuliers n'impliquant pas, à priori tout au moins, un réexamen des équations de bases auxquelles sont sensés obéir ces phénomènes. D'une manière générale, il s'agit alors de créer les conditions favorables à l'apparition de ces phénomènes (convection, thermomigration, changement de phase) dans des configurations géométriquement simples de milieux poreux (plaques, tubes) auxquelles sont imposées des conditions aux limites appropriées.

Des moyens de mesure des variables caractéristiques (température, saturation, ...) appropriées (thermocouples, absorption de rayonnement nucléaire:  $\kappa$ ) sont utilisés pour suivre l'évolution spatiotemporelle de ces variables. Le choix des différentes grandeurs physiques est alors utilisé en vue d'exploiter les résultats (recherche de corrélations entre grandeurs adimensionnelles, etc. ...) Les figures 10 et 1 fournissent quelques exem-

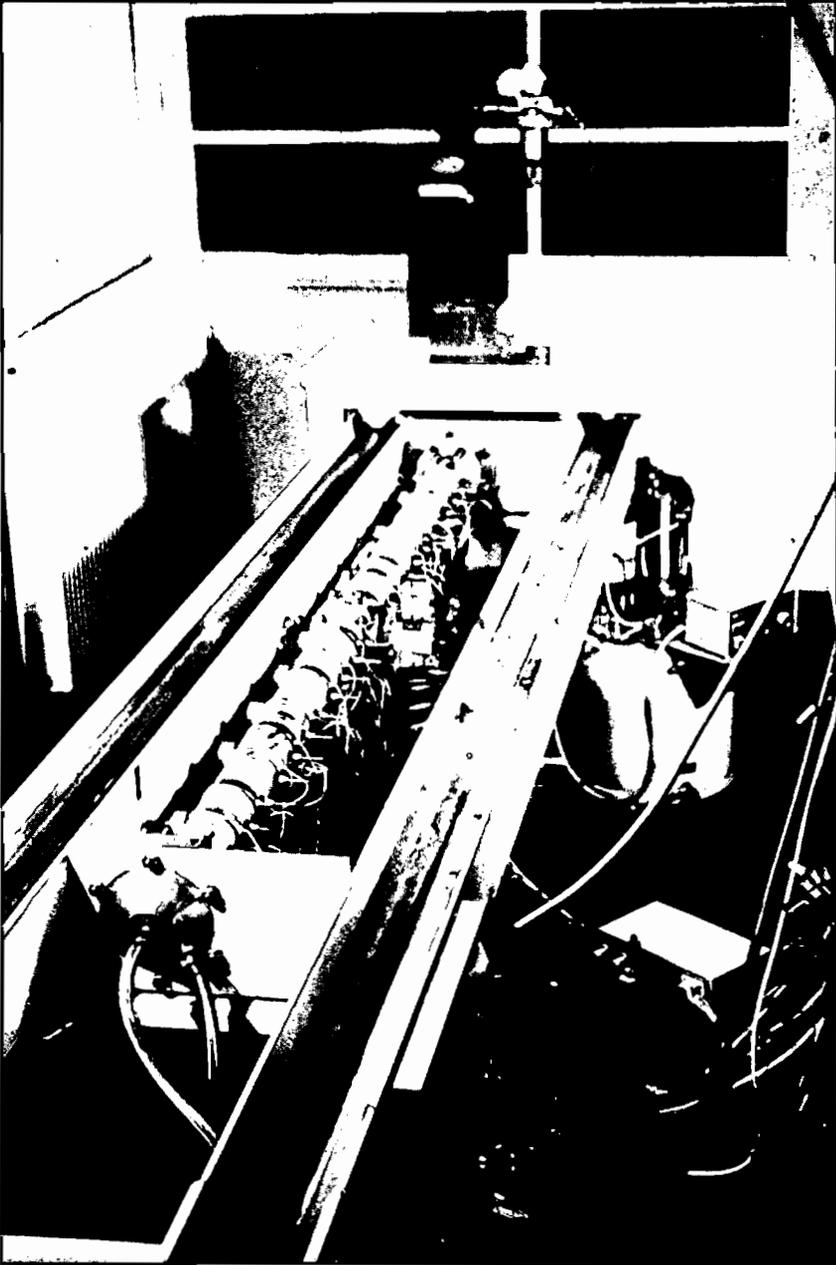


Fig. 11: Etude de géothermie

ples de réalisation en convection naturelle autovaporisation et géothermie.

*Modèles analogiques:* Nous mentionnerons les deux moyens les plus spectaculaires actuellement mis en oeuvre:

— *l'analyse Hele-Shaw* dans l'analyse qualitative des phénomènes des transferts thermiques. Le procédé de visualisation utilisé est fondé sur la strioscopie et l'interférométrie différentielle. (Fig. 12). Dans le premier cas, il s'agit d'observer la lumière diffractée par des particules en suspension (visualisation des lignes de courant), dans le second, d'utiliser la variation d'indice du fluide avec la température pour réaliser un champ d'interférences (visualisation des isothermes). La cellule est reproduite par la figure 13.

— *l'analyse de réseau* pour l'examen de certains phénomènes d'écoulements polyphasiques en milieu poreux. Le milieu poreux réel est identifié à un réseau de canaux, —constituant une maille de base carrée, interconnectée. Les diamètres de ces canaux obéissent à la loi de distribution de pore caractéristique du milieu poreux considéré. Le tracé est obtenu sur ordinateur et sert à la réalisation d'un modèle analogique à usage expéri-

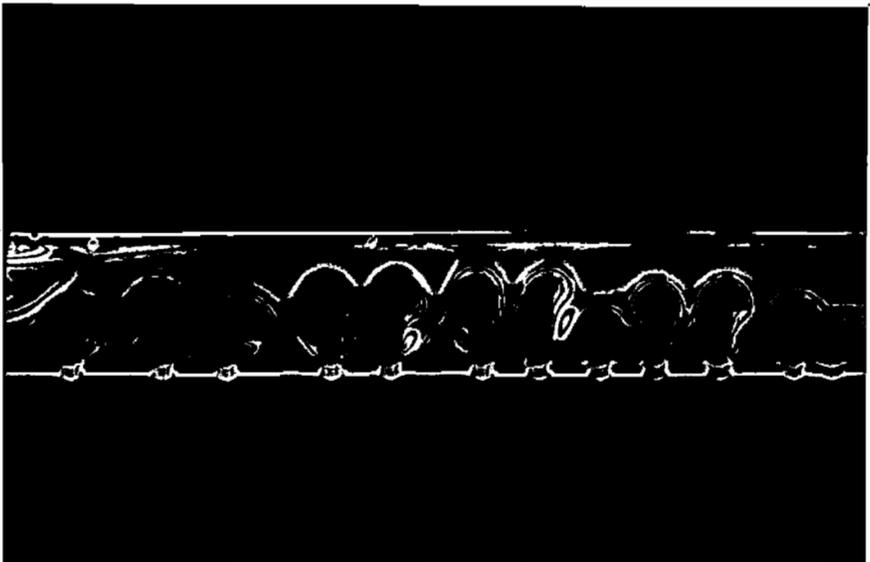


Fig. 12: Etude Hele-Shaw.

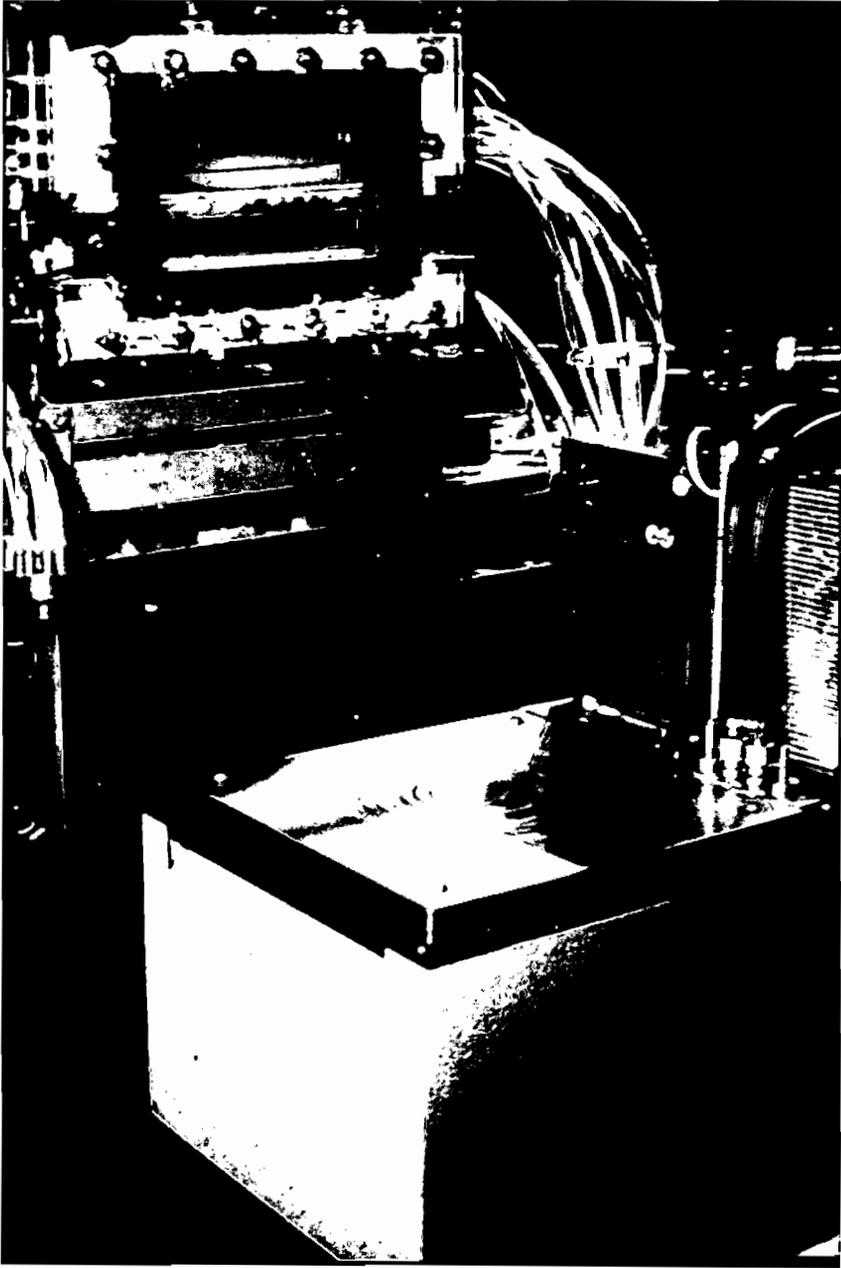


Fig. 13: Cellule Hele-Shaw

mental. Les phénomènes d'imbibition capillaire sont notamment approfondis par usage de tels modèles de simulation. (Fig. 14).

*Modèles numériques:* En règle générale, les équations auxquelles obéissent les phénomènes étudiés sont du type parabolique ou elliptique non linéaires et éventuellement couplées (convection, thermomigration, auto-vaporisation).

Les méthodes de résolution utilisées sont soit des méthodes aux différences finies avec utilisation de différents schémas de discrétisation (implicite ou explicite) soit des méthodes aux éléments finis fondées sur l'utilisation du principe de *GALENKIN* (recherche d'un extrémum minimum).

Les résultats les plus significatifs dans cette approche sont ceux obtenus sur la thermomigration.

## VI. ECOULEMENTS RHEOLOGIQUES

Les but principale des actions entreprises est le développement de recherches à caractère fondamental sur certains types d'écoulements, plus particulièrement non newtoniens. Ces études sont suggérées par des prob-

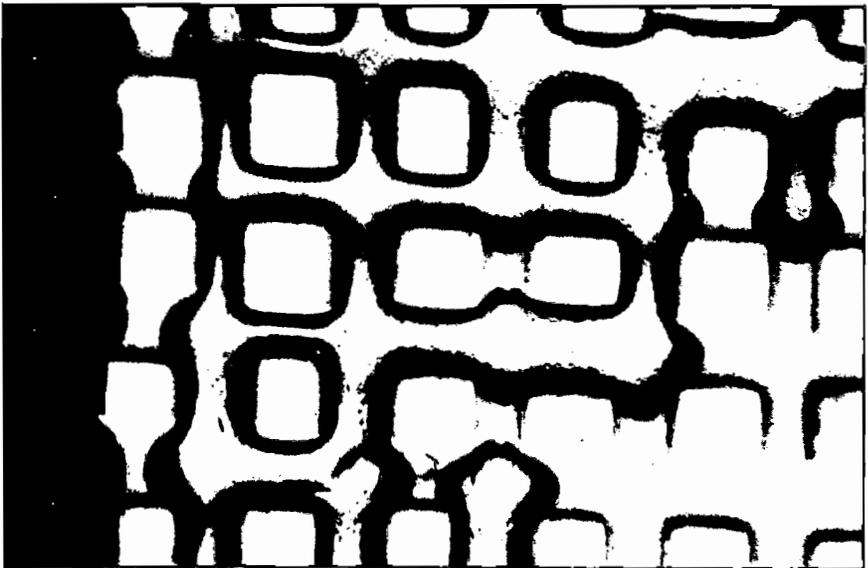


Fig. 14: Réseau de simulation en milieu poreux

lèmes biomédicaux, mais la formulation du phénomène physique est aussi générale que possible, de telle manière que les résultats obtenus puissent être appliqués dans d'autres domaines tels que: les Génies Chimiques, Energétiques, Agroalimentaires, ...

Les deux principaux thèmes étudiés sont:

— *les écoulements non newtoniens*: Ecoulements pulsés non newtoniens en conduites cylindriques circulaires, tronconiques, en conduites souples. Régimes transitoires - Effets d'entrée.

— *la biomécanique des fluides*: hémodynamique artérielle - circulation extracorporelle - valves - simulateur cardiaque - rhéologie du liquide synovial.

A priori, un modèle mathématique est plus commode à manipuler et plus performant, à condition qu'il soit le plus proche possible du phénomène physique; pour cela, il doit s'appuyer sur un modèle expérimental qui demande parfois plus de manipulations, mais qui permet de se rapprocher davantage de la réalité.

Pour ces raisons, nous avons adopté la méthode d'approche suivante: pour chaque sujet d'étude, nous faisons une analyse expérimentale du phénomène; les résultats issus de cette analyse sont confrontés à ceux d'une étude théorique dont l'exploitation s'effectue analytiquement ou numériquement.

Les écoulements considérés sont pulsés newtoniens et pseudoplastiques en conduites cylindriques circulaires ou tronconiques. Dans ces écoulements, nous nous intéressons aux régimes établis, transitoires dans l'espace (effets d'entrée), transitoires dans le temps (arrêt ou démarrage de l'écoulement, ou variation brusque de gradient de pression de forme quelconque).

Nous voyons que ces écoulements sont très étroitement liés à ceux rencontrés en hémodynamique artérielle, mais aussi, en d'autres domaines tels que: le transport de polymères, de boues de minerais, de produits alimentaires, l'économie d'énergie de transport en régime pulsé et par conduites pneumatiques, l'étude de transfert de masse et de chaleur en Génie Chimique, ...).

Les méthodes utilisées sont:

— *Une méthode analytique* applicable à ces cas particuliers (écoulement newtonien, ou faible nombre de Reynolds, ou très basse fréquence par exemple) pouvant servir de référence;

— *Une méthode de discrétisation des graphes rhéologiques du fluide non newtonien*: le principe de cette méthode consiste à considérer, à chaque instant, le fluide comme constitué de couches emboîtées et douées de viscosités

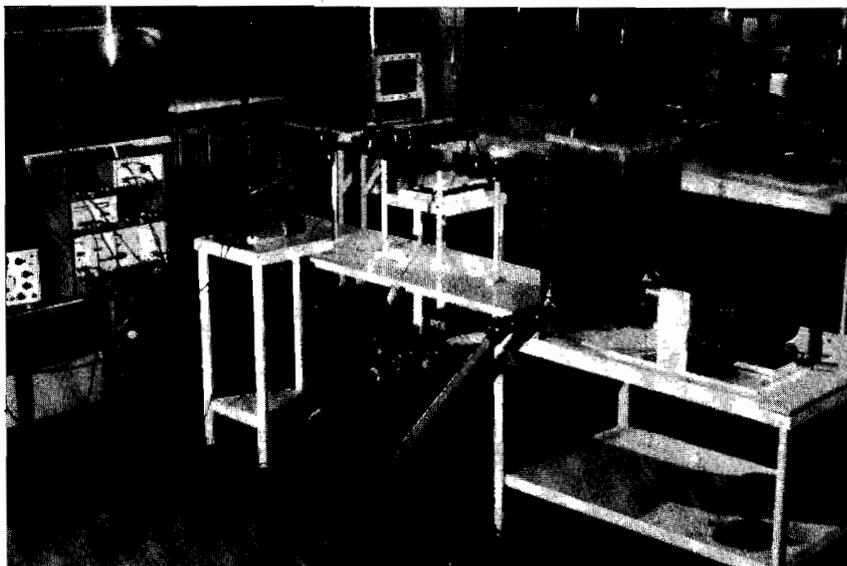


Fig. 15: Simulation d'écoulement sanguin

différentes, mais bien définies. Ceci revient à traiter l'écoulement non newtonien de l'ensemble du fluide comme la juxtaposition de plusieurs écoulements newtoniens associés à chacune de ces couches.

En fait, on est amené à effectuer des discrétisations plus ou moins fines du graphe rhéologique du fluide considéré.

Cette méthode conduit ainsi à la résolution de systèmes d'équations linéaires menée plus commodément.

— *Une méthode numérique aux différences finies* permettant d'obtenir des solutions avec une grande précision, mais le temps de calcul est parfois assez long.

— *Une méthode expérimentale* basée sur la vélocimétrie à laser, appliquée à des solutions aqueuses de hauts polymères. Le dispositif expérimental réalisé permet de créer des écoulements pulsés résultant de la superposition d'un écoulement oscillatoire à un écoulement continu. (Fig. 15).

Le comportement rhéologique des solutions de polymères utilisés est déterminé à l'aide d'un rhéomètre cône-plateau, type Shirley-Ferranti. Les mesures de vitesses sont effectuées à l'aide d'un vélocimètre à laser qui est, à l'heure actuelle, le seul dispositif capable de faire des mesures précises en écoulement non newtonien.

Cette méthode demande beaucoup de manipulations, mais permet de se rapprocher davantage du phénomène physique. En particulier, elle permet d'apprécier la limite de la validité du modèle rhéologique du fluide utilisé.

Dans une dizaine de cas, ces quatre méthodes ont pu être appliquées simultanément et les résultats obtenus d'origines diverses, se sont avérés concordants.

Ainsi, nous avons pu étudier, de façon systématique, les propriétés de ces types d'écoulements et établir des corrélations entre les paramètres hydrodynamiques, rhéologiques du fluide et géométriques de la conduite.

### VII. TRANSPORT SOLIDE

Les études dans ce domaine concernent principalement le déplacement de particules par un fluide.

1. *Principe de la méthode de simulation numérique:* Si on considère une particule liquide ou solide dans un écoulement turbulent, nous admettons que, sous l'action des fluctuations aléatoires des divers paramètres physiques, son déplacement suit un processus stochastique.

Si, à l'instant  $t$ , la particule se trouve au point  $M$  où la vitesse moyenne de l'écoulement est  $\vec{V}$ , à l'instant  $(t + \Delta t)$ , elle se trouvera au point  $M'$  défini par:

$$\overrightarrow{MM'} = (\vec{V} + \vec{W}) \Delta t + \overrightarrow{\Delta x}$$
, où  $\vec{W}$  est la vitesse de glissement de la particule par rapport au milieu ( $\vec{W} = \vec{0}$  si la particule examinée est une particule fluide), et  $\overrightarrow{\Delta x}$  un vecteur aléatoire qui doit représenter l'action fluctuante du milieu fluide.

En fait, on peut écrire:

$$\overrightarrow{MM'} = \left[ \vec{V} + \left\{ \vec{W} + \frac{\overrightarrow{\Delta x}}{\Delta t} \right\} \right] \Delta t = \{ \vec{V} + \vec{V}' \} \Delta t$$

où  $\vec{V}'$  est un vecteur aléatoire de moyenne  $\vec{W}$  et que l'on suppose distribué suivant une loi normale de variance  $\vec{\sigma}$ .

2. *Application à l'étude du déplacement de particules solides en conduite:* On considère une conduite où on injecte des particules solides dans une section droite; on étudie la répartition des particules lorsqu'elles traversent une section droite "loin" à l'aval de la section d'injection.

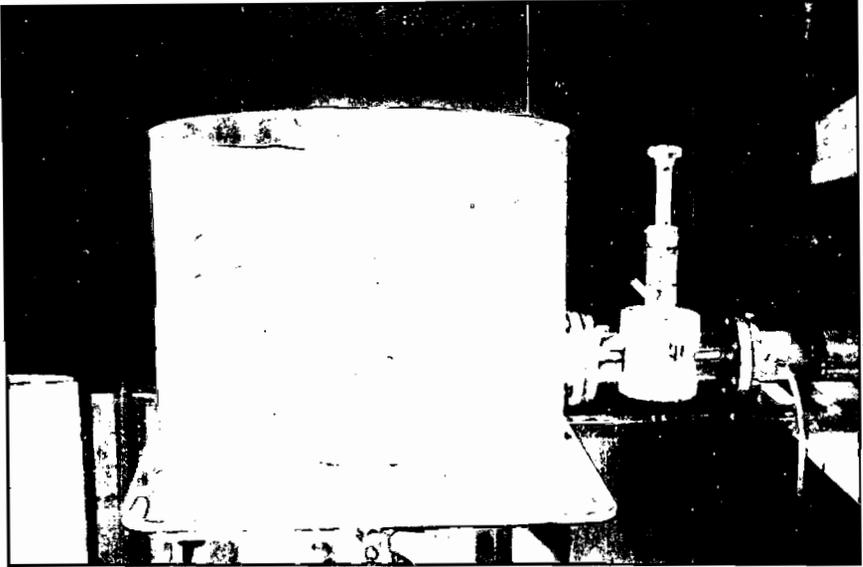


Fig. 16: Etudes de décanteur

L'application du modèle de simulation nous a permis de retrouver des résultats expérimentaux en faisant varier la caractéristique  $\sigma$  de la partie aléatoire; en fait, dans un premier temps, nous avons considéré  $\sigma$  comme une constante dans l'écoulement, mais nous essayons des lois plus complexes pour affiner les résultats.

3. *Application à l'étude des décanteurs*: Des modèles tridimensionnels ont été programmés afin de rendre compte du rendement de ces appareils aussi bien dans le cas d'un décanteur circulaire que rectangulaire.

Dans ce cas, nous avons développé des méthodes de mesure afin d'étalonner ces modèles dans les meilleures conditions possibles. Les résultats obtenus permettent de montrer d'une part que l'on arrive bien à décrire le comportement des particules liquides et des particules solides, et, d'autre part, que l'étalonnage est suffisamment précis pour donner des valeurs numériques aux caractéristiques aléatoires du déplacement, notamment la variance, pour espérer proposer des abaques déterminant ces valeurs dans différentes configurations hydrauliques. Figures 16 à 20.



Fig. 17: Etudes de decanteur

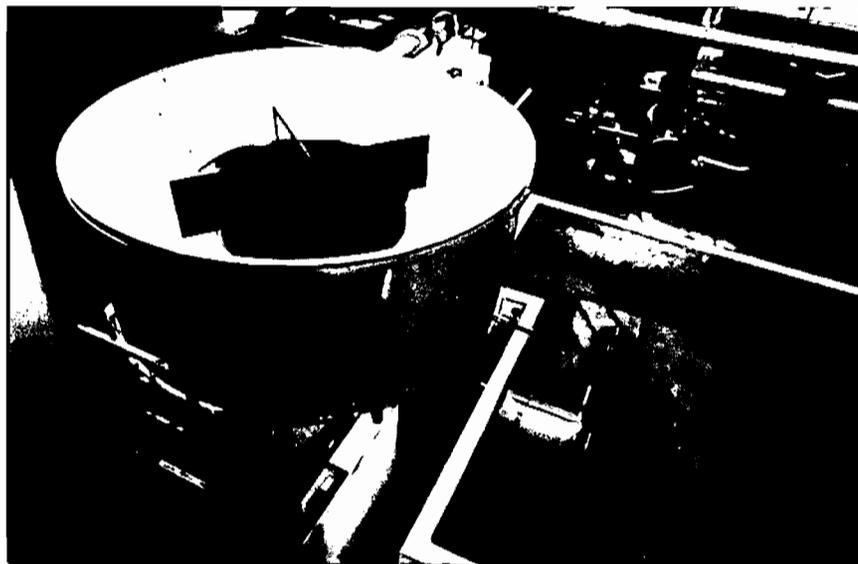


Fig. 18: Etudes de decanteur

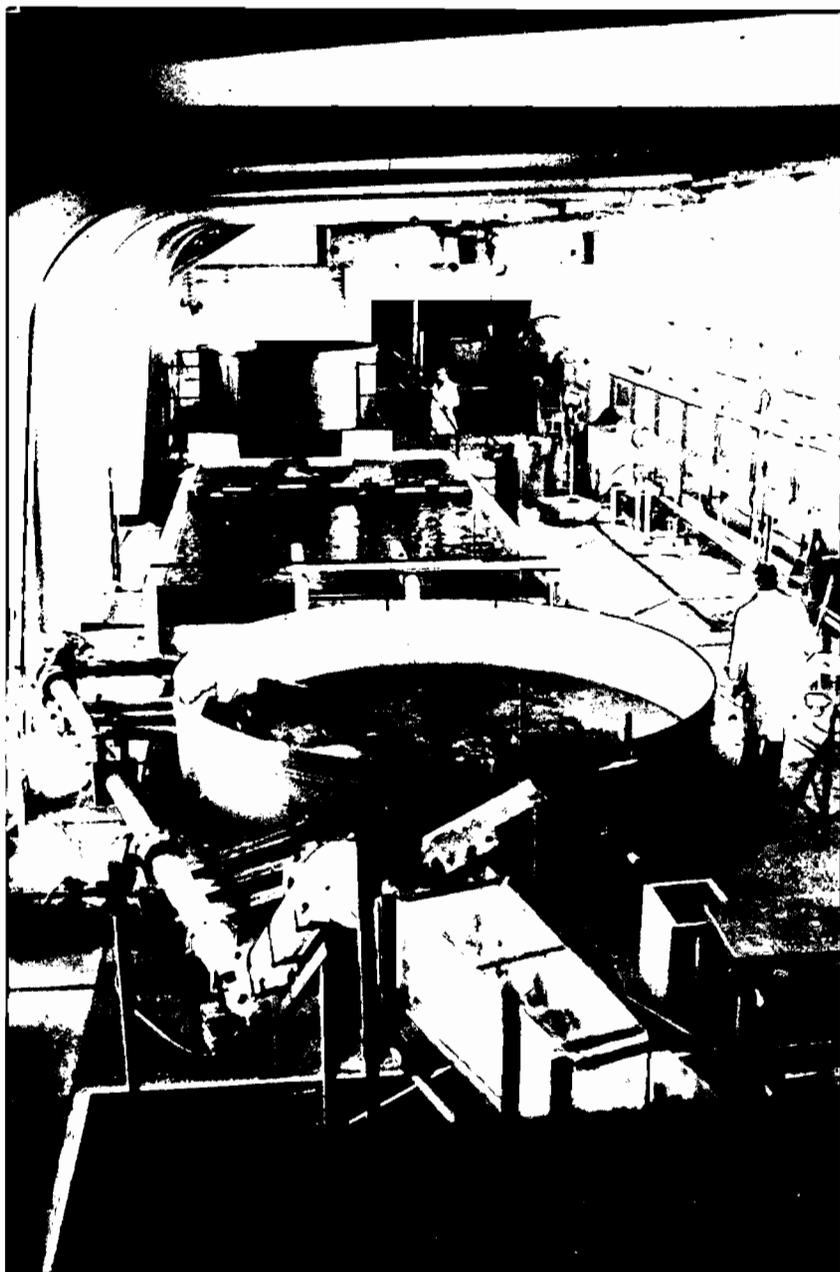


Fig. 19: Etudes de décanteur

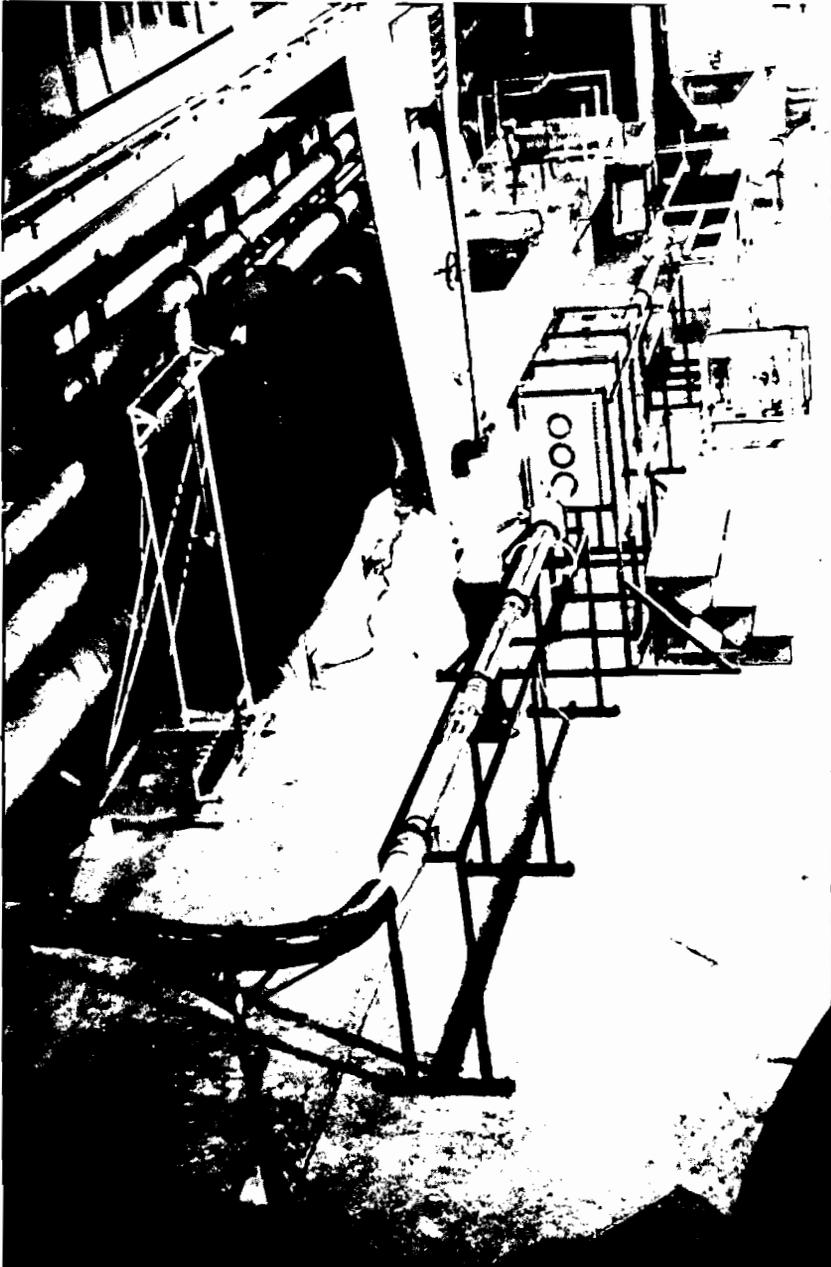


Fig. 20: Etudes de décanteur



Fig. 21. Exemple de maquette hydraulique.

### VIII. ECOULEMENTS HYDRAULIQUES

Notre laboratoire a effectué de très nombreuses études s'appuyant sur les lois de similitude et leur apportant ainsi une vérification expérimentale.

Il serait impossible dans cet exposé de citer plus de mille recherches effectuées dans ce but pendant plus de soixante ans.

Nous nous bornerons à citer quelques exemples caractéristiques:

- Ecoulement dans des tubes pour des liquides de viscosité différentes,
- Ecoulements dans des ouvrages hydroélectriques et, en particulier, sur des barrages déversoirs,
- Ecoulements en régimes transitoires dans des canaux découverts,
- Oscillations du plan d'eau dans les réservoirs d'équilibre,
- Suppressions dans les conduites forcées,
- Transport de matériaux par des fluides.

— Quelques figures illustrent certaines de ces réalisations. Elles montrent des installations qui dépassent parfois la dimension du laboratoire d'essais pour aboutir à des modèles de caractère semi-industriel. Figures 21 à 27.

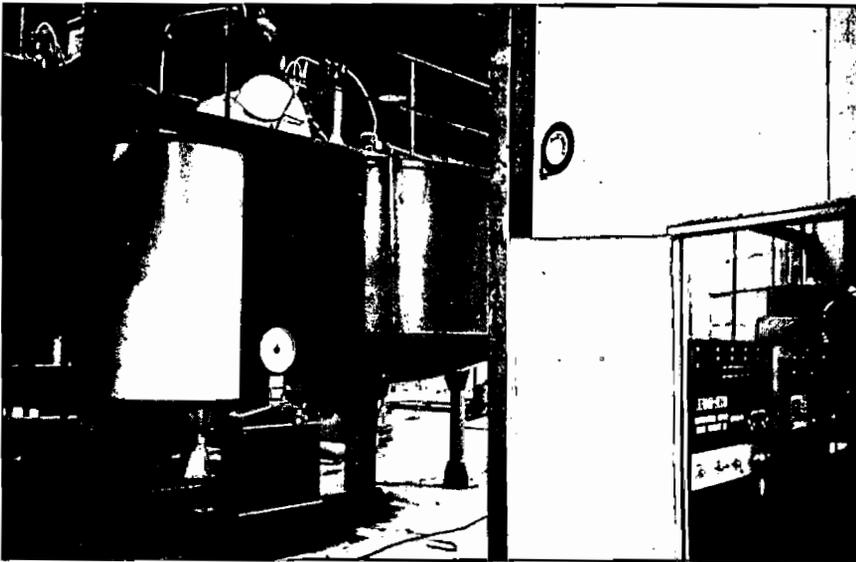


Fig. 22. Exemple de maquette hydraulique



Fig. 23. Exemple de maquette hydraulique

#### CONCLUSION

Les quelques exemples qui précèdent montrent comment de nombreux problèmes en mécanique des fluides peuvent se résoudre à l'aide d'une modélisation physique, d'une modélisation analogique, ou d'une modélisation numérique.

Il est quelquefois nécessaire d'utiliser deux de ces trois méthodes pour obtenir des solutions de problèmes parfois forts complexes. C'est le rôle d'un Laboratoire de Mécanique des Fluides de choisir et d'adapter de telles méthodes de calcul.



Fig. 24. Exemple de maquette hydraulique

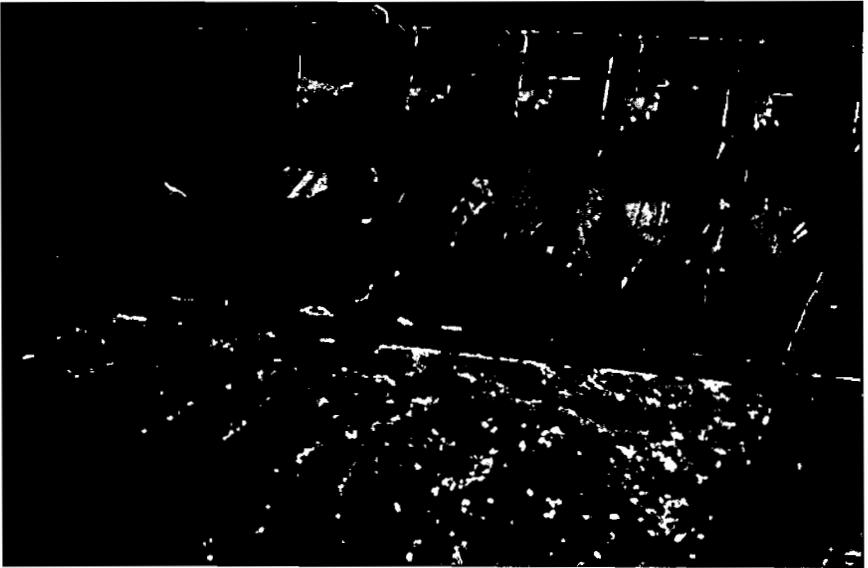


Fig. 25. Exemple de maquette hydraulique

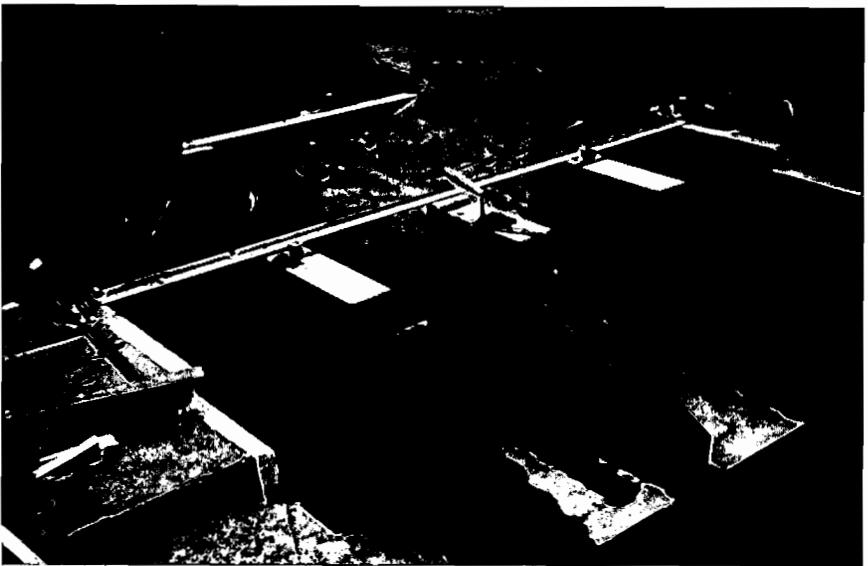


Fig. 26. Exemple de maquette hydraulique

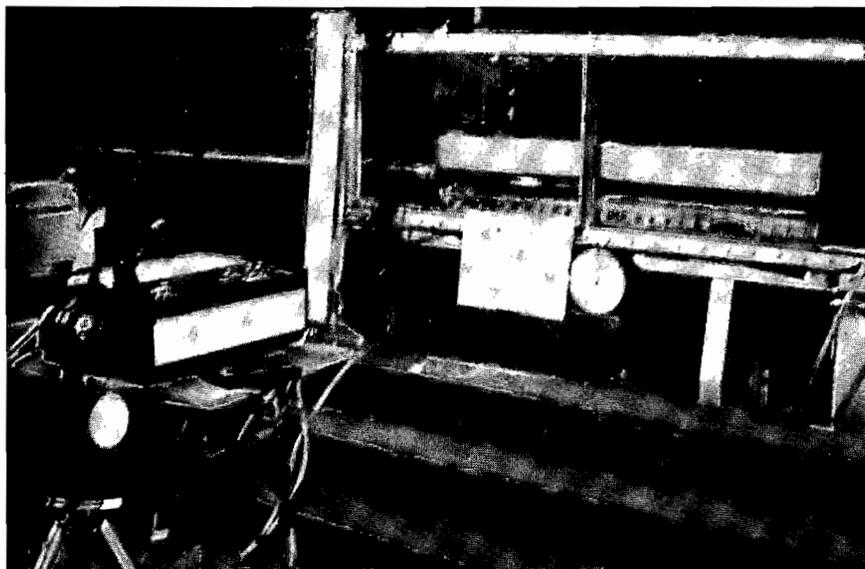


Fig. 27. Exemple de maquette hydraulique