INFLUENCE DE QUELQUES OBSTACLES SIMPLES SUR L'ÉCOULEMENT DANS UN « RUISSEAU » EXPÉRIMENTAL

par D. TRIVELLATO et H. DÉCAMPS.

SOMMAIRE

I. — Introduction	357
II. — Conditions d'installation	358
III. — Description de l'installation	359
1. — Le canal d'essai et les obstacles	360
2. — L'alimentation et la restitution du débit	360
3. — Les dispositifs de mesure et de visualisation	362
IV. — Présentation des résultats	362
V. — Rappels concernant les écoulements en charge	364
VI. — Influence de quelques obstacles simples	365
1. — Marche	365
2. — Obstacles plans	369
3. — Rampe	371
4. — Obstacles évolués	371
VII. — Conclusions	380

I. — INTRODUCTION

Dès les études classiques de STEINMANN [1907], THIENEMANN [1912] et HUBAULT [1927], la vitesse du courant a été considérée comme un facteur essentiel de la répartition des organismes aquatiques. Les voies d'approche de l'étude du courant, au laboratoire et sur le terrain, sont fort variées [BOURNAUD, 1963]. En fait, il n'est pas un travail sur l'écologie des cours d'eau qui, directement ou indirectement, ne tienne compte de ce facteur. En 1962, les participants au symposium de Kastanienbaum (Lucerne) recommandaient l'utilisation « d'installations d'essais permettant de reproduire les conditions observées dans les eaux naturelles ».

Une telle installation avait déjà permis à AMBÜHL [1959] d'appliquer les méthodes et les enseignements des hydrauliciens à l'éco-

logie des eaux courantes. Pour la première fois, les conditions de vie étaient étudiées au niveau même du benthos des cours d'eau et l'importance biologique de phénomènes tels que les « couches limites » et les « eaux mortes » mis en évidence. Ce travail était considéré par son auteur comme une esquisse sur les différents aspects des phénomènes physiques de l'écoulement et sur leurs conséquences biologiques. Il n'a pas été repris depuis et plusieurs questions demeurent encore sans réponse.

— Quelles sont les conditions de vie au voisinage du fond pour des vitesses moyennes élevées?

— Quelle est l'influence de la forme d'obstacles variés sur l'écoulement?

— Que se produit-il dans le cas d'un galet dont non seulement la face supérieure mais aussi — et surtout — la face inférieure est colonisée?

Pour tenter d'approfondir ce sujet, une collaboration entre hydrauliciens et hydrobiologistes était nécessaire. C'est ainsi qu'a été entreprise la construction d'une installation d'essai destinée, dans un premier temps à l'observation précise du courant en présence d'obstacles divers, dans un deuxième temps à l'étude du comportement des espèces aquatiques. Cette installation a été réalisée par l'un de nous (D. T.) dans le cadre d'une Thèse d'Université soutenue à l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse. La description détaillée des méthodes et de l'appareil fera l'objet d'une prochaine note.

Nous présentons ici les premiers résultats concernant l'influence de divers obstacles simples sur l'écoulement pour des vitesses moyennes de 1 à 100 cm/s.

II. — CONDITIONS D'INSTALLATION

La réalisation de l'installation tient compte de trois conditions principales :

1. — Les caractéristiques hydrauliques de l'installation doivent être connues afin de préciser les éléments définissant l'écoulement :

— le débit Q ,

— la vitesse moyenne $V_0 = \frac{Q}{S}$

Q : débit en m^3/s ,

S : section du canal d'essai en m^2 .

— le nombre de Reynolds

$$R = \frac{V_0 D}{\nu}$$

V_0 : vitesse moyenne,

D : 4 fois le rayon hydraulique en mètres (ou le diamètre de la conduite),

ν : viscosité cinématique (pour $18^\circ C$, $\nu = 10^{-6} m^2/s$).

2. — Les valeurs des vitesses, des pressions et de l'agitation doivent pouvoir être déterminées localement en certains points précis.
3. — L'observation du comportement d'espèces aquatiques diverses doit être possible en n'importe quel point du canal d'essai et au voisinage des obstacles.

Par suite, 1) l'alimentation sera stable et ne présentera qu'un minimum de perturbation à l'entrée du canal, 2) un appareillage de mesure, adapté à l'installation permettra de connaître avec précision la valeur des grandeurs à mesurer, 3) les matériaux utilisés ne seront pas toxiques pour les animaux.

III. — DESCRIPTION DE L'INSTALLATION

L'appareil comprend trois parties principales (*fig. 1*) :

- Le canal d'essai qui constitue le « ruisseau » expérimental,
- son alimentation et la restitution du débit,
- les dispositifs de mesure et de visualisation.

FIG. 1. — Schéma de l'installation. a) bac de réserve; b) pompe d'alimentation; c) jeu de vannes; d) bassin de mise en charge; e) chambre d'alimentation; f) tranquillisation; g) convergent; h) canal d'essai; i) raccordement; j) vanne de réglage; k) débitmètre à flotteur; l) déversoir de mesure; m) limnimètre à pointe; n) multimanomètre; o) lampe; p) stroboscope; q) appareil de prises de vues.

1. — Le canal d'essai et les obstacles (fig. 1 et 2).

Le canal d'essai (h) est transparent, construit en altuglass. Sa longueur est de 600 mm, sa section de 50×50 mm pour certains essais. Des canaux de sections différentes peuvent être adaptés à l'appareil. Les parois latérales sont fixes, les parois supérieure et inférieure démontables. Ceci permet de disposer des obstacles sur le radier sans modifier l'installation d'une façon importante.

Suivant la nature des obstacles, 5 configurations ont été utilisées dans les expériences de visualisation (fig. 2) :

- configuration 1 : le canal sans obstacle;
- configuration 2 : marche de 8 mm de hauteur;
- configuration 3 : obstacles plans à surfaces planes, arêtes vives, face amont normale à l'écoulement;
- configuration 4 : rampe dont la face amont est plane mais inclinée par rapport au courant;
- configuration 5 : obstacles évolués, aux formes géométriques simples et ne comprenant pas d'arêtes vives. Ils s'apparentent aux obstacles rencontrés dans un cours d'eau.

2. — L'alimentation et la restitution du débit (fig. 1).

2.1. — *Le bac de réserve* (a). — Il sert de réserve au volume d'eau de l'installation générale lors de la vidange.

2.2. — *La pompe de circulation* (b). — Sa tuyauterie d'aspiration est installée dans un aménagement du bac de réserve. Elle alimente le réseau général.

2.3. — *Le dispositif de réglage* (c). — Des vannes, permettant le réglage du débit ont été placées :

- sur l'alimentation du bassin de mise en charge,
- sur le circuit dérivé permettant d'obtenir le débit minimum de 1 litre par seconde.

2.4. — *Le bassin de mise en charge* (d). — Il permet d'éliminer les perturbations dues à la pompe et d'assurer un plan d'eau amont constant facilitant le réglage du débit. Le bassin de mise en charge comprend :

- un bac d'alimentation avec brise-jet et tranquillisateur,
- un départ vers le canal d'essai,
- un retour vers le bac de réserve effectuant la récupération du débit excédentaire,
- un seuil déversant fixe de grande longueur assurant une charge constante.

Configuration 3

obstacles plans

Configuration 4

rampe

Configuration 5

obstacles évolués

FIG. 2. — Caractéristiques des obstacles.

2.5. — *La chambre d'alimentation* (e). — Le canal d'essai est alimenté par un convergent (g) réduisant les perturbations provenant du bassin de mise en charge et permettant de réaliser un écoulement stable. Ce convergent est adapté à une grande chambre d'alimentation (e). La partie amont comprend un dispositif de tranquillisation (f) constitué de plusieurs séries de grilles, de tournures de plastique et d'un jeu de tubulures éliminant les courants vrillants.

2.6. — *La vanne de réglage* (j), mise en place à l'aval du raccordement (i) du canal d'essai, permet le réglage des débits.

3. — Les dispositifs de mesure et de visualisation.

3.1. — *Les débits.* — La mesure des débits se fait par un débitmètre à flotteur (k) et un déversoir de mesure (l) montés en série. Un limnimètre à pointe (m) a été utilisé pour déterminer la hauteur d'eau dans le déversoir de mesure.

3.2. — *La visualisation* [CAMICHEL et ESCANDE 1938, CHARTIER 1937, FOCH et CHARTIER 1938]. — Les visualisations d'écoulement ont été effectuées au moyen de particules d'aluminium, de diamètre moyen $3\ \mu$, entraînées par le courant. Sur les faces supérieures et inférieures du canal d'essai ont été aménagées des fenêtres transparentes permettant le passage d'un faisceau lumineux vertical de très faible épaisseur. Deux lampes aux hallogènes (o) ont été utilisées. Les particules d'aluminium — ou traceurs — sont ainsi rendues lumineuses sur un même plan vertical et ce sont elles qui, photographiées, permettent une visualisation de l'écoulement. Ces photographies sont prises au travers d'un disque stroboscopique (p) dont la vitesse est réglable. Les particules d'aluminium impressionnent alors la pellicule photographique et on obtient une série de tirets dont les longueurs sont fonction de la vitesse du courant et de la fréquence du stroboscope.

3.3. — *Les pressions.* — Les prises de pression sont des orifices bien définis, percés normalement à la paroi sur le radier du canal d'essai. Ces prises, numérotées de 1 à 13 de l'amont vers l'aval, sont reliées à une série de tubes de verre fixés sur un multimanomètre (n) permettant d'obtenir la cote piézométrique.

3.4. — *L'enregistrement des pressions.* — L'influence des obstacles sur les variations de pression a été observée par l'enregistrement des valeurs des pressions en fonction du temps. Ces enregistrements ont été effectués sur une série de prises de pression disposées pour les mesures en régime permanent, au moyen d'un montage électronique. Les écarts à mesurer étant relativement faibles, une chaîne amplificatrice a été nécessaire.

3.5. — *Les vitesses.* — Elles ont été mesurées par 2 méthodes :
— des aiguilles hypodermiques, s'apparentant à l'appareil de Prandtl et Brablee,
— la chronophotographie.

IV. — PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

1. — *Aspect de l'écoulement.* — Les photographies des traceurs dans l'écoulement sont reproduites pour différents obstacles. Le profil exploré est situé à 12 mm de l'axe longitudinal du canal. Ces photographies permettent de mieux définir l'aspect général de l'écou-

lement, d'examiner les rouleaux se produisant à proximité des obstacles et d'apprécier la valeur de la turbulence interne (*fig. 19 à 28, 38 à 46*).

2. — **Lignes de courant.** — Les lignes de courant sont déduites des trajectoires des traceurs. Ces figures permettent de mieux définir l'écoulement et d'effectuer des mesures sur les trajectoires des filets liquides (*fig. 14 à 18, 29 à 37, 47 à 50*).

3. — **Vitesses.** — La répartition des vitesses a été explorée sur différentes sections (*fig. 14 à 18, 29 à 37, 47 à 50*), en particulier :
 — en amont de l'obstacle, dans une zone relativement éloignée où l'influence de celui-ci n'est pas trop importante,
 — à l'amont immédiat ou, pour certaines configurations, sur l'axe de l'obstacle,
 — à l'aval immédiat de la section contractée,
 — dans une zone située en aval du point d'attachement de l'écoulement.

Les valeurs des vitesses V ont été rendues adimensionnelles au moyen de la vitesse moyenne V_0 . Pour un écoulement donné, les différents profils obtenus ont été rapportés sur le dessin des lignes de courant.

4. — **Pressions.** — La valeur des pressions est exprimée en hauteur d'eau (un bar vaut approximativement 10,2 m d'eau). Les résultats obtenus pour différentes vitesses moyennes ont été reproduits. Pour $V_0 < 0,30$ m/s, la précision des mesures est insuffisante et les pressions n'ont pas été indiquées. La pression de référence est fournie par l'indication de la prise n° 1 (*fig. 4, 10, 12*).

Dans le but de reproduire les résultats en valeurs adimensionnelles, nous avons considéré le coefficient de pression C_p défini par :

$$C_p = \frac{\Delta H}{V_0^2 / 2g}$$

ΔH : valeur des pressions différentielles,

V_0 : vitesse moyenne,

g : accélération due à la pesanteur.

5. — Variations de pression.

Pour les différentes prises, les enregistrements donnent une image des variations de pression en fonction du temps (*fig. 5*).

Il est aussi possible de présenter les résultats par la courbe des amplitudes maximales en fonction de l'abscisse des prises de pression dans le canal (*fig. 6*). Ces courbes permettent de situer les zones où les pulsations sont importantes. Les résultats obtenus sont reproduits pour deux vitesses moyennes : $V_0 = 1$ m/s et $V_0 = 0,64$ m/s. Pour permettre une comparaison entre les différents résultats, les

variations de pression ont été calculées sous forme adimensionnelle.

$$A = \frac{\Delta H'}{V_0^2/2g}$$

$\Delta H'$: amplitude mesurée.

Selon l'écoulement, l'importance des amplitudes obtenues peut être située relativement à l'énergie cinétique du mouvement.

Nous reproduisons essentiellement :

- les photographies d'écoulement,
- les trajectoires des lignes de courant avec les profils transversaux des vitesses (valeurs V/V_0),
- la courbe de variation du coefficient de pression C_p en fonction de l'abscisse des prises de pression,
- la courbe donnant la variation de l'amplitude maximale A le long du canal.

V. — RAPPELS CONCERNANT LES ÉCOULEMENTS EN CHARGE

Nous n'envisagerons que le cas de régime permanent où le nombre de Reynolds est :

$$\mathcal{R} = \frac{V_0 D}{\nu} \quad (\text{voir p. 358})$$

Dans une conduite en charge, les forces de pression et les forces de viscosité déterminent le type d'écoulement. Selon leur importance relative, on peut obtenir soit un écoulement laminaire ou visqueux, sans échanges d'énergie entre les différents filets parallèles, soit un écoulement turbulent où les échanges entre les différentes trajectoires et les mouvements transversaux des particules liquides sont très importants. Entre ces deux types d'écoulement existe une série de régimes de transition.

— *Régime laminaire.* — Les couches fluides glissent les unes contre les autres sans mélange des particules d'une couche à l'autre. Au

FIG. 3. — Schéma de la distribution des vitesses dans un canal.

voisinage d'un solide, elles épousent la forme géométrique de la paroi.

La couche limite, située contre la paroi, augmente suivant la longueur du canal par suite des frottements visqueux. Lorsque les deux parties de la couche limite se rencontrent, on obtient un régime où la viscosité règle l'écoulement. Le profil de distribution des vitesses est alors parabolique, V étant nul à la paroi (*fig. 3*).

— *Régime de transition*. — Au-delà d'un certain nombre de Reynolds, de l'ordre de 2 000, existe un régime de transition entre les régimes laminaires et turbulents. Ces derniers seront caractérisés par des variations aléatoires de la vitesse autour de la vitesse moyenne et par des échanges d'énergie transversaux (pour $R = 3\,000$).

— *Régime turbulent lisse*. — Contre la paroi existe un film laminaire — appelé sous-couche limite laminaire — où l'écoulement est visqueux. Au-delà du film laminaire règne l'écoulement turbulent.

— *Régime de transition turbulent*. — Ce régime est fonction des aspérités situées sur les parois. En effet, lorsque le nombre de Reynolds augmente, le film laminaire diminue d'épaisseur et est percé par les différentes saillies de la rugosité. Selon les auteurs, si l'épaisseur des saillies dépasse 5 à 17 fois l'épaisseur du film, le régime de transition peut encore subsister.

— *Régime turbulent rugueux*. — Lorsque le régime est bien établi, au-delà d'une certaine limite du nombre de Reynolds, la vitesse à la paroi dépend de la rugosité. On peut admettre que la couche de transition est proportionnelle à la saillie.

La répartition des vitesses V est alors définie par :

$$\frac{V}{V_0} = 8,48 + 5,75 \log. \frac{y}{\epsilon}$$

V_0 : « vitesse de frottement » de Prandtl,

ϵ : rugosité apparente,

y : compté à partir de la paroi.

Il est intéressant de noter que dans une section déterminée, les vitesses V augmentent proportionnellement à la vitesse moyenne. On peut donc ramener les résultats obtenus à des valeurs adimensionnelles en prenant V_0 comme vitesse de référence.

VI. — INFLUENCE DE QUELQUES OBSTACLES SIMPLES

1. — Marche de 8 mm de hauteur.

1.1. — Considérations générales.

Dans le cas général d'une marche, c'est-à-dire dans le cas simple d'une dénivellation par abaissement brusque du radier, l'écoulement se présente, dans l'ensemble, de la façon suivante :

— Dans la partie amont, l'écoulement a une vitesse moyenne V'_0 . On peut la considérer comme uniformément répartie sur toute la section, ou comme possédant un gradient de vitesse dans la section.

— Dans la partie aval, les filets liquides occupent la section totale de l'écoulement avec une vitesse moyenne V_0 différente de la vitesse amont.

— A l'aval immédiat du décrochement se forme un rouleau à axe horizontal transversal. Ce rouleau se développe différemment selon l'écoulement. Sa longueur d'attachement augmente tout d'abord avec la vitesse moyenne puis diminue pour demeurer relativement stable par la suite.

Ce problème de la marche a fait l'objet de travaux récents [ABRAMOVICH 1963, CLARIA, OIKNINE et SANANES 1966, MASBERNAT et SANANES 1966, OIKNINE et SANANES 1966].

1.2. — Observations sur l'écoulement.

Les trajectoires des particules ont permis d'établir le tracé des lignes de courant.

1.2.1. — Pour une vitesse moyenne de 0,8 cm/s ($\mathcal{R} = 400$) existe un gradient important des vitesses (*fig. 14 et 19*). L'écoulement général est dirigé vers le bas en raison de l'élargissement inférieur. Le point d'attachement¹ est situé à 30 mm de la marche. Le rouleau colle à la paroi aval de la marche. A l'intérieur de ce rouleau, la vitesse maximale mesurée est telle que $V = 0,18 V_0$.

1.2.2. — Au fur et à mesure qu'on augmente les vitesses moyennes, la configuration du rouleau évolue (*fig. 15, 16, 20 et 21*). Le point d'attachement se trouve déplacé vers l'aval et s'éloigne de la marche. Le rouleau est toujours stable, les échanges avec l'écoulement extérieur très réduits. Dans la partie inférieure du rouleau, les vitesses sont très faibles, de l'ordre de $V = 0,08 V_0$.

1.2.3. — Pour une vitesse moyenne de 26,4 cm/s ($\mathcal{R} = 13\,200$), on observe l'apparition d'une turbulence dans le ressaut (*fig. 17 et 22*). Le point d'attachement, après s'être éloigné dans de fortes proportions, s'est rapproché à 80 mm de la marche. Dans la partie du rouleau la plus en amont, les échanges entre les particules commencent à être importants. Dans la partie située le plus en aval, une « valse » des traceurs traduit l'agitation importante qui règne dans cette région.

1.2.4. — A partir d'une vitesse moyenne voisine de 50 cm/s l'écoulement tend à présenter des caractéristiques plus évoluées qui se retrouvent nettement à $V_0 = 99$ cm/s (*fig. 18 et 23*). Dans la partie amont du canal, au radier, apparaît une zone turbulente, de 1 à

1. Point d'attachement ou de recollement.

FIG. 4 à 6. — Cas de la marche (configuration 2). — 4 : répartition des pressions dans le canal. — 5 : variations des pressions en fonction du temps. — 6 : amplitudes maximales des pressions sur la longueur du canal pour deux vitesses moyennes de 0,64 m/s et 1 m/s.

2 mm d'épaisseur. L'écoulement y est à une grande vitesse mais avec de forts échanges transversaux et des filets peu parallèles.

Dans le rouleau, les variations de vitesse sont très importantes. La turbulence de cette zone est intense. La mesure des vitesses est très difficile et l'appréciation d'une vitesse moyenne du rouleau en chronophotographie pratiquement impossible. On peut toutefois, sur certains clichés, relever des valeurs quasi-instantanées de la vitesse des traceurs en certains points. La hauteur du rouleau est supérieure à la hauteur de la marche et les particules sont ascendantes au point de décrochement.

1.2.5. — Il est intéressant d'examiner la ligne de partage entre l'écoulement principal et le rouleau (*fig. 14 à 23*). Pour des vitesses moyennes faibles, la ligne de séparation est très nette; on ne constate pas de singularités. Lorsque la vitesse moyenne augmente, des ondulations apparaissent à l'amont et s'éloignent vers l'aval. Elles constituent une première manifestation de tourbillons secondaires. Pour des vitesses plus importantes, ces ondulations se transforment en encoches profondes, s'enroulent sur elles-mêmes et prennent la forme caractéristique de tourbillons. Les échanges entre le courant principal et le rouleau sont alors très importants et les variations de pression commencent à être très grandes dans la zone de recollement. On peut penser que les perturbations venant de l'amont et les tourbillons secondaires de la ligne de séparation s'amplifient en aval du point d'attachement et créent une grande agitation.

1.3. — Répartition des pressions.

La figure 4 indique la répartition des pressions sur le radier par rapport à la pression de la prise n° 1. On constate une baisse des pressions sur le radier de la partie amont du canal. Au décrochement, la pression de la prise n° 7 est sensiblement la même que celle de la prise n° 8. La pression augmente ensuite pour diminuer après le point de recollement.

1.4. — Variations de pression.

L'enregistrement des pressions sur le radier permet d'évaluer l'agitation qui existe dans l'écoulement. En effet, les variations de direction ou d'intensité des filets d'eau se traduisent par d'importantes variations de pression (*fig. 5*).

La figure 6 indique la variation de l'amplitude maximale sur la longueur du radier, pour deux vitesses moyennes de 0,64 et 1 m/s. Lorsque l'énergie due à l'écoulement est faible, les perturbations locales prennent une importance relative très grande. Au fur et à mesure que l'énergie due à la vitesse augmente, la valeur relative des perturbations diminue. L'agitation la plus importante a lieu dans la zone de recollement où règne une instabilité très marquée. A l'aval de l'obstacle, les variations de pression sont très faibles.

2. — Obstacles plans (fig. 2).

Les obstacles classés dans la configuration 3 présentent des surfaces planes et des arêtes vives. La face amont est normale à l'écoulement; la hauteur et la face aval peuvent varier.

2.1. — Écoulement du rouleau aval.

On retrouve pour cette configuration la même variation de la longueur d'attachement en fonction de la vitesse moyenne. Cette longueur, d'abord très réduite, s'accroît avec la vitesse moyenne. Après être passée par un maximum sortant des limites de l'installation, elle diminue nettement pour devenir relativement constante lorsque le régime turbulent est très important dans le rouleau.

Sur les figures 24 à 33, le rouleau, d'abord court et très près de l'obstacle, s'allonge ensuite vers l'aval en laissant un sillage perturbé. Pour une vitesse moyenne de 2,5 cm/s environ, on note une augmentation de l'instabilité au point d'attachement. Pour une vitesse moyenne supérieure à 7 cm/s, le courant moyen se dirigeant vers l'amont, près du radier, subit un net ralentissement. Il en résulte un tourbillon, tournant en sens inverse, immédiatement à l'aval de l'obstacle. Ce tourbillon est plus prononcé pour la configuration 3 b. Pour une vitesse moyenne supérieure ou égale à 30 cm/s ($Re \geq 15\,000$), on observe une agitation frénétique des traceurs : la turbulence est intense.

Le même phénomène général apparaît en 3 a, 3 b et 3 c.

2.2. — Face amont de l'obstacle.

Au radier, sur la face amont de l'obstacle, existe un gradient positif des pressions en même temps qu'un ralentissement des vitesses. La couche limite augmente d'épaisseur. Un rouleau prend naissance sur la face amont de l'obstacle; son sens de rotation est identique à celui du rouleau principal aval. Il se développe au fur et à mesure de l'augmentation de la vitesse moyenne.

Pour une vitesse moyenne voisine de 40 cm/s, l'écoulement devient turbulent avec les caractéristiques générales d'échanges entre les trajectoires. Pour une vitesse moyenne voisine de 1 m/s on n'observe qu'une zone très turbulente (fig. 28 et 33).

2.3. — Écoulement général.

En présence de l'obstacle, les filets parallèles de l'écoulement amont subissent une contraction importante et on observe un courant ascendant. Pour les configurations a et b, la section contractée se situe à 20-25 mm de l'obstacle, soit environ 3 fois la hauteur de l'obstacle, en régime turbulent. La paroi supérieure du canal présente, pour les configurations a et b, une influence notable sur le développement du courant principal. Des études en cours, avec des canaux de sections différentes, permettent d'éliminer cette influence.

FIG. 7 à 9. — Amplitudes maximales des pressions sur la longueur du canal. —
7 : configuration 3 a. — 8 : configuration 3 b. — 9 : configuration 3 c.

2.4. — *Amplitude des variations de pression.*

Les figures 7, 8 et 9 rendent compte de l'amplitude maximale des variations de pression relativement à la longueur du canal.

Cette amplitude est plus grande pour un obstacle présentant une saillie importante. Le maximum d'amplitude est situé dans la zone de recompression. La perturbation peut se propager vers l'aval sur une distance importante. A l'aval immédiat de l'obstacle le ΔH mesuré est très réduit.

Des irrégularités ont été constatées sur la face amont de l'obstacle : si pour certains écoulements, ΔH est réduit, il peut devenir plus important pour des écoulements différents. On peut également remarquer une valeur sensiblement identique des amplitudes maximales pour les vitesses moyennes de 0,64 m/s ($Re = 32\,000$) et 1 m/s ($Re = 50\,000$).

3. — *Rampe.*

La face amont est plane mais inclinée en sens inverse du courant. La caractéristique essentielle est l'angle α d'inclinaison de cette face amont sur l'horizontale.

Les figures 40 et 41 reproduisent deux trajectoires d'écoulement obtenues pour une même vitesse moyenne : 0,8 cm/s ($Re = 400$). La comparaison de ces deux photographies met en évidence une instabilité tant dans l'aspect de l'écoulement général que dans le ressaut.

Ce phénomène a été fréquemment constaté. La fréquence des oscillations est relativement lente. L'interprétation en est difficile. Parmi les causes possibles, on peut citer l'existence de perturbations venant de l'amont et amplifiées par l'obstacle ainsi que la présence d'un écoulement tridimensionnel dans le rouleau.

La variation de la longueur d'attachement de l'écoulement est semblable à celle des obstacles précédents. Cette longueur augmente avec les vitesses moyennes, diminue ensuite pour demeurer relativement stable lorsque le rouleau est pleinement turbulent. Il est cependant toujours difficile d'observer la position du point de recollement car la zone intéressante est soumise à d'importantes variations d'écoulement.

4. — *Obstacles évolués.*

Ces obstacles ont des formes géométriques simples et ne présentent aucune arête vive. Ils s'apparentent à certains obstacles naturels rencontrés dans un cours d'eau.

Nous rapportons ici les résultats obtenus pour les deux configurations 5 c et 5 d dont les hauteurs sont égales à 8 mm.

4.1. — CONFIGURATION 5 c

Cette configuration correspond à l'écoulement sur un cylindre de section semi-circulaire.

4.1.1. — *Lignes de courant.*

Pour une vitesse moyenne faible, égale à 1,2 cm/s ($Re = 600$), le rouleau est très proche de la paroi, l'écoulement est stable (fig. 34). La contraction de l'écoulement général provoquée par l'obstacle est peu importante. Le décollement a lieu avant l'axe vertical du demi-cercle. Un petit rouleau se forme sur la face inférieure amont de l'obstacle. Les trajectoires générales sont descendantes vers l'aval; dans la partie supérieure on observe un net ralentissement des vitesses.

Pour $V_0 = 3$ cm/s ($Re = 1\,500$) l'écoulement général occupe, en aval, une section plus complète (fig. 35). Dans le rouleau principal, deux parties distinctes existent : près de l'obstacle les particules continuent à tourner d'une façon relativement stable. L'écoulement est désordonné dans la partie aval.

Ce phénomène s'accroît avec la vitesse moyenne et pour $V_0 = 7,47$ ($Re = 3\,785$), le sillage de l'obstacle est agité vers l'aval (fig. 36).

Quand la vitesse moyenne dépasse 30 cm/s (fig. 37 et 39), l'écoulement général subit une contraction plus importante au passage de l'obstacle. Dans le rouleau aval, l'écoulement est très turbulent et le petit rouleau à l'amont de l'obstacle devient turbulent pour une vitesse moyenne de 1 m/s. A ce régime, on constate un décollement très agité à la partie supérieure du canal, en aval de la saillie.

4.1.2. — *Profils des vitesses.*

Aux vitesses moyennes faibles (fig. 34), le profil des vitesses présente l'allure des profils obtenus en écoulement laminaire. Sur les profils 1 à 3, l'obstacle n'influence pas les valeurs des vitesses obtenues sur la paroi supérieure. Par contre, le ralentissement provoqué par l'élargissement à la section 4 est surtout sensible à la partie supérieure de l'écoulement. Dans le rouleau, les vitesses sont telles que $V = 0,15 V_0$.

Pour une vitesse moyenne importante, de l'ordre de 70 cm/s (fig. 37), on retrouve la déformation locale, proche du rouleau, due à une accélération des particules dans cette zone.

4.1.3. — *Répartition des pressions.*

La figure 10 indique les valeurs du coefficient de pression au radier sur la longueur du canal. En amont de l'obstacle, jusqu'à la prise n° 4, on obtient un gradient positif et C_p atteint 0,33. L'accélération du mouvement et la mise en vitesse sur l'obstacle donnent un coefficient de pression négatif aux prises de pression situées sur l'obstacle ($C_p = -0,9$ à l'aval de l'obstacle). La recom-

Fig. 10 et 11. — Configuration 5 c. — 10 : répartition des pressions dans le canal. — 11 : amplitudes maximales des pressions sur la longueur du canal.

pression s'effectue dans une zone voisine de la prise n° 10. Dans la partie plate de la courbe, les coefficients de pression sont voisins de $-0,23$ en 11 et en 12. Au point n° 13, $C_p = -0,30$.

4.1.4. — Variations de pression (fig. 11).

Les variations de pression les plus faibles sont situées sur l'obstacle et à l'aval de celui-ci. On note une augmentation de l'amplitude : — à la prise n° 4 où les vitesses diminuent et la pression augmente, — aux prises 9, 10 et 11, c'est-à-dire dans la zone d'instabilité proche du point de recollement.

Les amplitudes maximales s'atténuent légèrement vers l'aval du canal tout en conservant des valeurs importantes.

4.2. — CONFIGURATION 5 d

Cet obstacle de forme ovoïde, se rapproche des galets rencontrés dans les cours d'eau. Tant en amont qu'en aval, le relief de l'obstacle peut créer un abri pour certaines espèces animales.

4.2.1. — *Lignes de courant.*

L'évolution générale de l'écoulement est voisine de celle de l'obstacle précédent. Il est cependant intéressant d'examiner ce qui se produit au voisinage de l'obstacle.

Pour une vitesse moyenne de 1,2 cm/s (*fig. 42 et 47*), un rouleau bien marqué s'établit sur la face amont de l'obstacle. Ce rouleau s'enroule partiellement sous l'abri formé par l'obstacle. A la partie supérieure de l'obstacle, le gradient des vitesses est élevé. Dans le rouleau aval, l'écoulement est tridimensionnel mais stable.

Ces caractéristiques sont maintenues quand on augmente les vitesses moyennes et pour 3 cm/s (*fig. 43 et 48*), le rouleau amont est amplifié. Le rouleau aval s'est allongé; il laisse vers l'arrière un sillage perturbé. A la paroi aval de l'obstacle, on observe un rouleau stable, tournant en sens inverse du rouleau principal.

Pour une vitesse moyenne de 8 cm/s (*fig. 44*), plusieurs rouleaux évoluent dans la zone de décollement de l'obstacle. Le point d'attachement s'est rapproché, avec les pulsations qui y sont liées.

Pour $V_0 = 31$ cm/s (*fig. 45 et 49*) et $V_0 = 64$ cm/s (*fig. 46 et 50*), le rouleau aval principal est très turbulent. Sur la face amont, le petit tourbillon est toujours stable.

4.2.2. — *Répartition des vitesses (fig. 47 à 50).*

Les profils d'écoulement présentent les mêmes caractéristiques essentielles que pour les autres configurations. L'accélération de l'écoulement due au changement de section est surtout sensible dans la partie inférieure du profil 3.

De nombreux relevés ont été effectués dans le rouleau. Le courant de retour se développe avec des vitesses atteignant $V = 0,22 V_0$ pour une vitesse moyenne de 3 cm/s. Dans l'agitation turbulente obtenue avec des vitesses plus élevées, on obtient $V = 0,34 V_0$ pour une vitesse moyenne de 31 cm/s.

4.2.3. — *Répartition des pressions (fig. 12).*

Les mesures ont été effectuées pour des vitesses situées entre 0,50 m/s et 1,00 m/s. La variation du coefficient de pression C_p en fonction de la position des prises de pression est indiquée figure 12.

Le coefficient de pression maximum est atteint à la prise n° 4 avec $C_p = +0,52$. La pression en aval de l'obstacle est caractérisée par des coefficients de pression voisins de $-0,95$ en 7 et en 8. On obtient ensuite $C_p \cong -0,25$ en 11 et en 12 et $C_p = -0,34$ en 13.

FIG. 12 et 13. — Configuration 5 d. — 12 : répartition des pressions dans le canal. — 13 : amplitudes maximales des pressions sur la longueur du canal.

4.2.4. — Variations de pression.

La figure 13 indique les amplitudes maximales de variation de pression rapportée à $V_0^2/2g$ aux différents points du canal.

La prise n° 7, à l'aval de l'obstacle, ne présente qu'une amplitude réduite des oscillations. Ce point semble être un lieu de repos, situé en dehors de toute perturbation.

An contraire, dans le rouleau, immédiatement en amont du point de recollement en 9 et au point de recollement en 10, l'agitation est très importante. La variation de pression ne permet certainement pas un repos facile dans cette zone, mais c'est en ces points que s'effectuent les échanges de particules entre le rouleau et l'écoulement général.

Les perturbations sont réduites en aval du canal. L'amplitude relative des oscillations est la même pour $V_0 = 0,64 \text{ m/s}$ et $V_0 = 1 \text{ m/s}$.

FIG. 14 à 18. — marche : vitesses, lignes de courant.

FIG. 19 à 23. — marche. 19 : V_0 aval = 0,8 cm/s; 20 : V_0 aval = 4,1 cm/s;
21 : V_0 aval = 8,75 cm/s; 22 : V_0 aval = 26,4 cm/s; 23 : V_0 aval = 99 cm/s.

FIG. 24 à 28. — configuration 3 a. 24 : $V_0 = 0,86$ cm/s; 25 : $V_0 = 2,66$ cm/s;
26 : $V_0 = 7,64$ cm/s; 27 : $V_0 = 30$ cm/s; 28 : $V_0 = 96$ cm/s.

FIG. 29 à 33. — configuration 3a : vitesses, lignes de courant.

FIG. 34 à 37. — configuration 5c : vitesses, lignes de courant.

FIG. 38 et 39. — configuration 5c. 38 : $V_0 = 8,2$ cm/s; 39 : $V_0 = 35,7$ cm/s.

FIG. 40 et 41. — configuration 4 : $V_0 = 0,8$ cm/s.

FIG. 42 à 46. — configuration 5d. 42 : $V_0 = 1,2 \text{ cm/s}$; 43 : $V_0 = 3 \text{ cm/s}$;
44 : $V_0 = 8,4 \text{ cm/s}$; 45 : $V_0 = 31 \text{ cm/s}$; 46 : $V_0 = 64 \text{ cm/s}$.

FIG. 47 à 50. — configuration 5d : vitesses, lignes de courant.

VII. — CONCLUSIONS

1. — Longueur d'attachement du rouleau aval en fonction de la vitesse moyenne (fig. 51).

La longueur d'attachement du rouleau aval est très réduite pour les vitesses moyennes faibles. De légères augmentations de la vitesse moyenne entraînent tout d'abord un important éloignement du point d'attachement vers l'aval. Ce point d'attachement se rapproche ensuite à une distance égale à 6 à 8 fois la hauteur de l'obstacle. Cette position demeure relativement constante aux vitesses moyennes supérieures.

2. — Évolution de l'écoulement dans le rouleau aval (fig. 14 à 50).

Pour les différentes configurations, l'aspect de l'écoulement est généralement semblable aux vitesses moyennes équivalentes.

Aux vitesses moyennes faibles — de l'ordre de 1 cm/s —, on observe un petit rouleau stable en aval de l'obstacle. La longueur d'attachement est réduite. Cette longueur augmente très rapidement avec l'accroissement de la vitesse moyenne et le rouleau devient très long.

Aux environs de 2 cm/s ($R = 1\,000$), la formation du rouleau est moins pure. Les vitesses augmentent ainsi que les petites perturbations internes. Au radier, les particules se dirigeant vers l'amont rencontrent, près de l'obstacle, un gradient de pression positif et amorcent un rouleau secondaire.

Ces phénomènes s'accroissent avec la vitesse d'écoulement. Pour 3 cm/s ($R = 1\,500$), on observe un écoulement instable au point d'attachement. Cette instabilité gagne vers le rouleau et, pour 4 cm/s et 8 cm/s selon les configurations, la zone aval est très perturbée, la partie amont se subdivisant en rouleaux secondaires.

La turbulence générale du rouleau est développée pour 30 cm/s ($R = 15\,000$). On observe une valse désordonnée des particules. Le point d'attachement s'est rapproché de l'obstacle.

Enfin, pour des vitesses moyennes supérieures, le rouleau devient très turbulent. Les caractéristiques générales de l'écoulement varieront peu, notamment entre 60 cm/s ($R = 30\,000$) et 1 m/s ($R = 50\,000$).

3. — Évolution de l'écoulement dans le rouleau amont.

Un petit rouleau horizontal prend naissance sur la face amont, à la partie inférieure de certains obstacles. Une partie de ce rouleau est présente sous l'obstacle dans le cas de la configuration 5 d. L'évolution générale est semblable au rouleau aval. Présent aux faibles vitesses, le rouleau amont devient turbulent entre 60 cm/s et 1 m/s.

FIG. 51. — Longueur d'attachement du rouleau aval en fonction des vitesses moyennes.

4. — Comparaisons entre les différents obstacles.

Il est difficile de séparer la perte de charge provoquée par la saillie de l'obstacle et celle du canal lui-même : l'écoulement en présence d'un obstacle quelconque n'est pas semblable à l'écoulement sans obstacle. On ne peut donc pas rapporter les valeurs obtenues. On constate cependant que les obstacles les plus agressifs, à arêtes vives, provoquent le plus de perte de charge totale.

Par ailleurs, en présence de la rampe (configuration 4), l'instabilité de l'écoulement est plus grande que pour les autres configurations. Le rouleau régulier est rapidement détruit et remplacé par des tourbillons multiples; l'écoulement général subit des pulsations (fig. 40 et 41).

Le rouleau aval est le plus stable pour les obstacles à arêtes vives et face amont normale au courant. Il est moins stable pour les obstacles mieux profilés (configurations 5 c et 5 d).

5. — Variations de pression.

Quelle que soit l'installation d'essai on introduit toujours une certaine instabilité dans le canal. On observe des variations de pression sur toute la longueur du canal. La valeur relative des amplitudes est généralement plus réduite lorsque la vitesse augmente, l'énergie du mouvement prenant une importance plus grande.

La zone la plus agitée correspond au point d'attachement du rouleau aval. A l'abri de l'obstacle, sur la face aval, les oscillations

sont plus faibles. Sur la face amont, les variations de pression peuvent être différentes suivant la stabilité de l'écoulement au point de décollement et suivant le relief de l'obstacle.

6. — Caractérisation des « eaux mortes ».

Suivant les caractéristiques de l'écoulement, notamment suivant la vitesse moyenne, les conditions sont fort différentes à l'amont et à l'arrière des obstacles.

Les échanges entre les rouleaux et l'écoulement général sont d'abord très réduits. Ils deviennent ensuite de plus en plus importants au fur et à mesure de l'augmentation des vitesses moyennes. Si, pour des écoulements faibles, les zones d'abri présentent une indépendance relative par rapport à la pleine eau, il n'en est plus de même aux vitesses moyennes élevées. L'intensité des échanges (oxygénation, chimisme ...) amène une évolution des conditions de vie de ces microhabitats.

Pour des vitesses moyennes faibles, le mouvement des particules est régulier à l'intérieur du rouleau. Il est plus faible qu'en pleine eau. Avec l'augmentation des vitesses moyennes, à ce mouvement moyen se superpose une agitation de plus en plus importante des particules. Cette agitation traduit une turbulence intense aux vitesses moyennes élevées. L'instabilité du point de recollement entraîne l'existence de battements ou de variations de la longueur du rouleau.

D'après ces observations, à partir d'une certaine vitesse moyenne, c'est donc le degré d'agitation du milieu qui règle la vie dans les « eaux mortes ». Cette agitation peut être évaluée par les variations de pression. L'étude de ces variations de pression devrait permettre d'avoir une idée plus précise des conditions de vie au niveau même de la faune benthique. Nous envisageons de poursuivre ce travail par cette étude, dans des conditions plus proches des conditions naturelles : fonds affouillables, obstacles surélevés par rapport au fond.

RÉSUMÉ

Dans une installation d'essai, l'écoulement a été observé en présence d'obstacles simples, pour des vitesses moyennes variant de 1 à 100 cm/s. La technique utilisée a été la chronophotographie de particules d'aluminium en suspension dans l'écoulement. Ce procédé de visualisation a permis d'établir le tracé des lignes de courant et de connaître les valeurs des vitesses en des points précis. La valeur des pressions et l'amplitude des variations de pression ont été mesurées sur le fond du canal d'essai.

1. — L'évolution de l'écoulement a été observée à l'amont et à l'aval des obstacles en fonction de l'accroissement de la vitesse moyenne. Aux vitesses moyennes faibles, on observe un petit rouleau stable en aval des obstacles. Le mouvement est plus lent qu'en pleine eau. Avec l'augmentation des vitesses moyennes, à ce mouvement moyen se superpose une agitation de plus en plus importante des particules. Cette agitation traduit l'existence d'une turbulence qui devient intense aux vitesses moyennes élevées. L'instabilité du point d'attachement du rouleau entraîne l'existence de battements. Un petit rouleau évolue de façon semblable à la face amont de certains obstacles.

2. — En aval des obstacles, la longueur d'attachement du rouleau est très réduite pour des vitesses moyennes faibles. Cette longueur augmente ensuite très rapidement avec l'accroissement de la vitesse moyenne et le rouleau devient très long. L'attachement du rouleau se rapproche ensuite de l'obstacle et demeure relativement stable aux vitesses moyennes supérieures.

3. — Le rouleau aval est le plus stable pour des obstacles à arêtes vives et à face amont normale au courant. En présence d'obstacles mieux profilés, et surtout en présence d'une rampe, l'instabilité de l'écoulement est plus grande que pour les autres obstacles.

4. — Les échanges entre les rouleaux et l'écoulement général sont très réduits pour les vitesses moyennes faibles. Ils deviennent de plus en plus importants au fur et à mesure de l'augmentation des vitesses moyennes.

5. — Les variations de pression ont été enregistrées en plusieurs points du fond du canal. L'amplitude maximale des variations de pression correspond à la zone d'attachement du rouleau aval. A l'abri de l'obstacle, les oscillations sont les plus faibles sur la face aval. Sur la face amont, les variations de pression peuvent être différentes suivant la stabilité de l'écoulement au point de décollement et suivant le relief de l'obstacle.

6. — L'agitation qui règne dans les « eaux mortes » pour des vitesses moyennes élevées peut se traduire par les variations de pression. L'étude de ces variations de pression dans le temps devrait permettre une meilleure connaissance des conditions de vie au niveau même de la faune benthique.

INFLUENCE OF SOME SIMPLE OBSTACLES ON THE FLOW OF WATER IN AN EXPERIMENTAL « STREAM »

The flow of water was observed in an apparatus in the presence of simple obstacles for average speeds varying from 1 to 100 cm/s. The technique used was the chronophotography of aluminium particles in suspension in the flow. This visualisation process enabled us to establish the direction of the current and to discover the values of the speeds at specific points. The values of the pressures and the extent of the variations of pressure were measured along the bottom of the glass channel.

1. — The development of the flow was observed upstream and downstream of the obstacles as the average speed was increased. When the average speed was low, a small stable eddy was observed behind the obstacles. The movement was slower than in the main stream. When

the average speeds were increased, the movement of the particles became more and more noticeable. This movement indicated the existence of a turbulence which became intense when the average speeds were high. The instability of the eddies created pulsations. The tiny eddies evolved in the same way upstream from certain obstacles.

2. — Downstream from the obstacles the length of the eddy was very slight when the average speeds were low. This length increased very rapidly as the average was increased and the eddies became very long. The eddies drew near the obstacles and remained relatively stable at higher average speeds.

3. — The eddy was not stable when the obstacles had sharp edges and when their front was not perpendicular to the current. In the presence of more evenly shaped obstacles, and especially in the presence of an incline, the instability of the flow was greater than for the other obstacles.

4. — The movement of particles between the eddies and the main stream were extremely low when the average speeds were low. They became more important as the average speeds were increased.

5. — The changes of pressure were recorded at several points at the bottom of the channel. The maximum extent of the pressure changes was calculated at the end of the downstream eddy. The oscillations were at their weakest on the downstream side of the obstacles. On the upstream side, the changes of pressure varied with the stability of the flow when it met the obstacle and with the shape of the obstacle.

6. — The agitation which is present in « dead waters » when the average speeds are high can be seen to take place when there are pressure variations. The study of the way this pressure varies with time should lead to a better knowledge of the conditions of life at the level of benthic fauna.

DIE WIRKUNG EINIGER EINFACHER HINDERNISSE AUF DIE STRÖMUNG IN EINEM « VERSUCHSBACH »

In einer Versuchseinrichtung ist die Strömung bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten, von 1-100 cm/s in Gegenwart von einfachen Hindernissen beobachtet worden. Es wurde nach der chronophotographischen Methode mit Aluminiumschnitzeln, die in der Strömung in Suspension gehalten werden, gearbeitet. Dieses Verfahren zur Sichtbarmachung hat es ermöglicht, den Verlauf der Strömungslinie und die Geschwindigkeitswerte am ganz bestimmten Punkten zu ermitteln. Der Wert für die Drucke und die Amplitude der Druckunterschiede wurden auf dem Boden des Versuchskanals gemessen.

1. — Die Strömungsentwicklung wurde vor und hinter den Hindernissen in Abhängigkeit von der zunehmenden mittleren Geschwindigkeit gemessen. Bei geringen mittleren Geschwindigkeiten beobachtet man eine kleine beständige Walze hinter den Hindernissen. Die Bewegung ist hier langsamer als in der Hauptströmung mit zunehmender mittlerer Geschwindigkeit wird diese mittlere Bewegung von einer immer stärkere Unruhe der Partikel überlagert. Diese Unruhe ist das Zeichen

für das Vorhandensein einer Turbulenz, die bei hohen mittleren Geschwindigkeiten besonders intensiv ist. Die Unbeständigkeit des Unteren Endes der Walze bedingt die Bildung von Wirbeln. In ähnlicher Weise entsteht auch eine kleine Walze an der Vorderseite von gewissen Hindernissen.

2. — Hinter den Hindernissen ist die Länge der Walze bei geringen mittleren Geschwindigkeiten sehr klein. Mit der Zunahme der mittleren Geschwindigkeit wird die Walze dann sehr schnell in die Länge gezogen. Danach wird die Walze wieder kürzer; sie bleibt relativ konstant bei höheren mittleren Geschwindigkeiten.

3. — Die hintere Walze ist am beständigsten bei Hindernissen mit scharfen Kanten die quer zur Strömung stehen. Bei allen anderen Hindernissen und vor allem im Falle einer schiefen Ebene, deren Hang die Vorderseite des Hindernisses bildet, ist die Unbeständigkeit der Strömung viel grösser.

4. — Der Austausch von den Walzen zur Hauptströmung ist bei kleinen mittleren Geschwindigkeiten sehr gering. In dem Masse in dem die mittleren Geschwindigkeiten zunehmen wird er immer bedeutender.

5. — An mehreren Stellen am Boden des Kanals wurden die Druckschwankungen aufgezeichnet. Die maximale Amplitude der Druckschwankungen befindet sich am unteren Ende der hinteren Walze. Von allen Punkten in unmittelbarer Umgebung des Hindernisses, sind die Oszillationen an der Leeseite am schwächsten. An der Vorderseite können die Druckschwankungen je nach der Strömungsbständigkeit am Scheitelpunkt und je nach dem Relief des Hindernisses verschieden sein.

6. — Die Unruhe, die sich in den « Totwässern » bei hohen mittleren Geschwindigkeiten bemerkbar macht, kann durch die Druckschwankungen dargestellt werden. Die Untersuchung der Druckschwankungen in Abhängigkeit von der Zeit dürfte eine bessere Kenntnis der Lebensbedingungen im eigentlichen Lebensbereich des Benthos ermöglichen.

TRAVAUX CITÉS

- ABRAMOVICH (G. N.). 1963. — The theory of turbulent jets. *Cambridge, Massachusetts*, 671 p.
- AMBÜHL (H.). 1959. — Die Bedeutung der Strömung als ökologischer Faktor. *Schweiz. Z. Hydrol.*, 21 : 134-263.
- BOURNAUD (M.). 1963. — Le courant, facteur écologique et éthologique de la vie aquatique. *Hydrobiologia*, 21 : 125-165.
- CAMICHEL (C.) et ESCANDE (L.). 1938. — Similitude hydrodynamique et technique des modèles réduits. *Publ. Sci. techn. Ministère air* n° 127.
- CHARTIER (C.). 1937. — Chronophotogramétrie plane et stéréoscopique. *Pub. Sci. techn. Ministère air* n° 114.
- CLARIA (A.), OIKNINE (C.) et SANANES (F.). 1966. — Etude expérimentale du profil des vitesses à l'aval d'une paroi en forme de marche. *C. r. Acad. Sci., Paris*, 262 : 1333-1336.
- FOCH (A.) et CHARTIER (C.). 1938. — Chronophotographie et écoulements à girations. *C. r. Acad. Sci., Paris*, 207.
- LENCASTRE (A.). 1966. — Manuel d'Hydraulique générale, Eyrolles, Paris, 399 p.

- HUBAULT (E.). 1927. — Contribution à l'étude des invertébrés torrenticoles. *Bull. biol. Fr. Belg. suppl.* 9, 388 p.
- OIKNINE (C.) et SANANES (F.). 1966. — Structure de l'écoulement à l'aval d'une paroi en forme de marche. *C. r. Acad. Sci., Paris*, 262 : 962-965.
- SANANES (F.) et MASBERNAT (L.). 1966 — Méthode analytique de détermination de la forme de la ligne de jet d'un écoulement sur une marche en tenant compte du frottement dans la zone de mélange. *C.r. Acad. Sci., Paris*, 262 : 516-519.
- SOCIETAS INTERNATIONALIS LIMNOLOGIAE. 1962. — Symposium über den Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Organismen des Wassers. *Schweiz. Z. Hydrol.*, 24 : 353-484.
- STEINMANN (P.). 1907-08. — Die Tierwelt der Gebirgsbäche. *Annls Biol. lac.* : 30 - 162.
- THIENEMANN (A.). 1912. — Der Bergbach des Sauerlandes. Faunistisch-biologische Untersuchungen. *Intern. Rev. Biol.*, Suppl. 4 : 1-125.

*Institut de Mécanique des Fluides
et Laboratoire d'Hydrobiologie
(Equipe de Recherche Associée au C.N.R.S.)
118, route de Narbonne, 31 - Toulouse.*