

10/90

وزارة التعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

2ex

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : HYDRAULIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Etude de Transport Solide et Application
des Techniques Nucléaires*

Proposé par :
CDTN(HCR)

Etudié par :
B.MOAD
K.HARBI

Dirigé par :
B.M. UPPALURI
N.HOCINI

بسم الله الرحمن الرحيم

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

وزارة التعليم العالي
المدرسة الوطنية
المتعددة التقنيات

Departement : HYDRAULIQUE
Promoteur : B.M. UPPALURI
Elève Ingénieur : B. MOAD
K. HARBI

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة - BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

دائرة : الري
الموجه : UPPALURI

بمليذ مهندس : معاد بدر الدين
حربي كمال

الموضوع : دراسة نقل المواد الصلبة وتطبيق التقنيات النووية
الملخص :

إن دراسة التعرية ونقل المواد الصلبة تمثل أهمية كبيرة في حماية المنشآت المائية . ومن هذا المنظار تتألف دراستنا من الناحية الأولى باعطاء نظرة شاملة على العوامل المؤثرة على التعرية ، ومن الناحية الثانية تقديم نظري لظاهرتي المواد العالقة ونقل المواد الصلبة في قاع الانهار . ولقد أعطينا في الجزء الثاني من الاطروحة تقنيات قياس الرواسب العالقة في لاودية وذلك باعطاء الطرق التقليدية ومساوتها . وبعد ذلك درسنا بشكل مفصل التقنيات النووية المطبقة حديثا في الجزائر . وأخيرا قمنا باعطاء مثال لمعالجة النتائج المأخوذة من معيار نووي

Sujet : L'étude de transport solide et application des techniques nucléaires

Resumé:

L'étude de l'érosion et transport solide représente une grande importance pour protéger les ouvrages hydrauliques . Dans cette optique notre étude consiste d'une part de donner une vue générale sur les facteurs influençant sur l'érosion et d'une autre part une approche théorique des phénomènes de suspension et du charriage . Alors que dans la deuxième partie nous entamons les techniques de mesure des sédiments en suspension dans les oueds et ceci en donnant en premier lieu les méthodes classiques ainsi que leurs inconvénients . Après nous étudions avec détails la technique nucléaire appliquée récemment en Algérie . En fin nous donnons un exemple de traitement des résultats de prélèvements et de la jauge nucléaire

Subject: Study of solid transport and application of nuclear techniques

Abstract:

The study of sediment transport is of at most importance for the protection of hydraulic structures . With this in view the present work comprises of, on the one hand, the study of the phenomena of erosion and the mechanism of sediment transport, on the other, techniques of measurements of transport of suspension in the rivers . The principales and the application of the nuclear gauging techniques in the study of the sediment transport are discussed with an illustrative example.

REMERCIEMENTS



Ce travail a pu être réalisé grâce à la collaboration avec le personnel du centre de développement des techniques nucléaires (H C R) particulièrement :

- M^{eme} Hocini Nadia : attachée de recherche pour la soumission du sujet et ses orientations tout le long du travail .

- M^r Souag : docteur 3^{eme} cycle en hydro-géologie pour nous avoir autorisé l'accès au centre .

- M^r Drif : ingénieur en électronique pour ces explications .

C'est pour nous un agréable devoir de remercier D^r UPPALURI de nous avoir acceptés sous sa direction .

Nous voudrions réserver une place particulière dans nos remerciements à M^r OUAAR (service hydrologie INRH) pour ces conseils .

Nos remerciements vont également aux messieurs le président et membres de jury .

Nous remercions enfin toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de cette modeste mémoire .

D E D I C A C E S

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance :

- A mon père
- A ma mère
- A mes frères
- A mes soeurs
- A toute la famille
- A tous mes amis

MOAD BEDREDDINE

&

HARBI KAMEL

I-1-1 : Cylindre horizontal	31
I-1-2 : Cylindre vertical	32
I-1-3 : Bouteille échantillonneuse instantannée.....	32
I-1-4 : Bouteille à siphon	32
I-2 : Echantionneur à intégration dans le temps.....	35
I-2-1 : Bouteilles échantillonneuses modifiées	35
I-2-2 : Les turbisondes.....	37
I-2-2-1 : La turbisonde U.S.P 46 .R.....	37
I-2-2-2 : Turbisonde Neyrpic.....	39
I-2-3 : Echantillonneur BECCHI.....	39
I-3 : Echantillonneur à système de pompage	39
CHAPITRE II : APPAREILS DE MESURE " IN SITU "	45
II-1 : Principes et appareillages des turbidimètres optiques et ultra-sons.....	45
II-2 : Rappels sur l'interaction de la matière	47
II-2-1 : Lois d'absorption de rayonnement gamma	49
II-3 : Jauges nucléaires	51
II-3-1 :Jauge C.A ZIEGLER.....	51
II-3-2 : Jauges de l' A.I.E.A	52
II-3-3 : Jauges de l'U.S departement of agricul- ture [MS .G II].....	52
II-3-4 : Jauges de la société " Atome industiel "...	55
II-3-5 : Jauge à transmission de l'Institut Hongrois	55
II-3-6 : Jauges à transmission de G.S TAZIOLI	55
II-3-7 : Jauge à diffusion.....	61
CHAPITRE III : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES JAUGES NUCLEAIRES	61
III-1 : Description du dispositif expérimental	61

III-2 : Fonctionnement de la jauge " LABEN "	62
CHAPITRE IV : PRINCIPE DE MESURE PAR LES JAUGES NUCLEAIRES ...	
IV-1 : Mesure de la concentration des sédiments en suspension.....	67
IV-2 : Précédés de mesure.....	67
IV-2-1 : Détermination expérimentale du solide d'influence.....	67
IV-2-2 : Etalonnage.....	69
IV-2-2-1 : Etalonnage " in situ ".....	72
CHAPITRE V : EXEMPLES D'EXPERIENCES DE TERRAIN	
V-1 : Station de mesure sur bassin BS 21 N° 1.....	74
V-2 : Résultats de mesure sur le micro bassin BS 21 N° 1.....	77
CONCLUSION GENERALE	87
BIBLIOGRAPHIE	95
ANNEXES (I et II).....	89

Introduction :

Les conditions physiques, géomorphologiques, hydroclimatiques et les constructions divers (batiments, routes, usines,) tels que : la prédominance des formations marneuses peu résistantes, climat capricieux, et la surexploitation des terres ... etc favorisent le phénomène d'érosion . De ce fait, les quantités énormes du sol fertiles sont enlevées et transportées par voie hydrique; provoquant l'envasement des ouvrages hydrauliques (les barrages, les ports, etc...).

En Algérie le problème de l'érosion, devient de plus en plus dramatique et si'on n'intervient pas rapidement avec des remèdes efficaces, le pays est ramené vers un danger permanent.

On a pendant trop négligé le problème de l'érosion. La résolution rapide de ce problème doit autant son importance à la prévention rapides, des capacités des retenues, qu'au domaine agricole.

L'érosion est définie comme l'usure de la terre sous l'action permanente d'agents atmosphériques (vents, pluies, ...). L'érosion des terres sur les versants provoquée par l'action de la pluie et son ruissellement est doublée d'une dégradation du lit et des berges des oueds. L'accroissement de la vitesse de ruissellement en régions de fortes pentes peut provoquer l'entraînement rapide d'éléments rocheux de toutes tailles.

L'érosion accélérée prend toute son ampleur sur les sols en pente surtout lorsqu'ils sont laissés nus et sans protection végétale ou lorsqu'il sont mal exploités.

L'érosion hydrique, à la fois pluviale et fluviale se traduit dans les oueds par un transport solide. Cette érosion est un phénomène complexe, très répandu en Algérie et dans toutes le zones semi-arides qui sont caractérisées par des pluies torrentielles.

Le taux d'érosion spécifique atteint en Algérie les valeurs les plus importantes d'Afrique du Nord /10/, dépassant les 2000 t/km²/an sur la plupart des bassins versants de l'Atlas (Rhiou, sly, mazafran, Isser, Soumam, etc...) /10/.

Il atteint 4000 t/km²/ an sur la chaîne des côtiers DAHRA et 5000t/km²/ an sur le bassin très dégradé de l'oued AGRIOUN qui alimente le barrage d'IGHILEMDA /10/.

Le phénomène se manifeste surtout en période des crues, telles que celles de Mars 1974 qui ont particulièrement touché la région Algéroise. En espace de trois jours ont transité près de 30 millions de tonnes de sédiments à travers les stations de mesures des bassins côtiers de l'Algérois /10/.

Lors des violentes crues orageuses d'été et d'automne des concentrations supérieures à 200 g/l sont régulièrement observées :

Le tableau suivant représente les fortes concentrations observées sur quelques bassins d'Algérie.

Bassin	Chleff	Hodna	ISSER	Aurès	
Oued	Rhiou Ami-Moussa	LEHAM (Rocad sud)	S ^t Traïlle LAKHDA-RIA	EL ABIODH M'CHOUNECHE	
DATE	11-07-71	6-10-57	24-8-52	26-9-71	24-09-75
Concentration	390	674	460	387	470

Parmi les divers conséquences de l'érosion, nous citons :

- a- Pertes et difertilisation des terres à caractère agricole;
- b- L'envasement des barrages et canaux d'irrigation ;
- c- La destruction des ouvrages d'art;
- d- Relèvement des lits de cours d'eau entraînant un accroissement des risques d'inondation et une menace pour les voies de communication.

Vue l'importante agressivité de l'érosion, montre que les divers conséquences de ce phénomène sont des vraies dangers sur les infrastructures hydrauliques à titre d'exemple l'infrastructure hydraulique Algérienne est amputée annuellement d'un potentiel de réserve en eau équivalent à 20 millions de m³ du fait de l'envasement des retenues /9/.

Objet du travail :

Il est évident donc que le phénomène de sédimentation et les mesures de transport solide sont des problèmes complexes attirant plusieurs chercheurs. Dans cette optique de diverses études ont été effectuées pour caractériser le mécanisme de l'érosion et le processus de sédimentation. Mais à cause de la complexité de ce phénomène et des différentes variables entrant en jeu, il est toujours resté l'un des problèmes hydrauliques qui ont besoin plus de développement.

De point de vue l'échantillonnage et des mesures de sédiments en suspension et en charriage, on rencontre aussi des difficultés.

Dans notre étude on présente une aperçue sur la théorie de la sédimentation et les différentes techniques d'échantillonnages et de mesure. L'application des techniques nucléaires pour la quantification des sédiments, ainsi que leur avantages que présentent par rapport aux méthodes classiques de mesures est une de ces mesures.

Présentation du travail :

Selon l'objet de la présente étude cité ci-dessus, on a divisé notre travail en deux parties principales.

La première partie concernant les processus de l'érosion et l'étude théorique de la sédimentation pour les deux phénomènes le charriage et la suspension.

La deuxième partie concernant les techniques de mesure des sédiments en suspension. Dans cette partie, on a consacré une étude détaillée sur l'application des techniques nucléaires.

A la fin, nous avons présentés un exemple d'application rassemblant, la méthode des jauges nucléaires et la méthode de prélèvement.

Deux annexes sont données à la fin de cette étude le premier concernant quelques formules utilisées en Algérie pour déterminer le transport solide. Le deuxième concernant quelques études antérieures faites en Algérie par quelques chercheurs..

PREMIERE PARTIE

Chapitre : I Processus d'érosion

Généralités

Le transport de sédiments dépend des facteurs influençant l'érosion du sol, le régime d'écoulement et les caractéristiques des cours d'eau.

Le détachement de fragments ou de particules de sol, ou de roches de leur position initiale par l'eau et les autres agents atmosphériques et géologiques, tels que le vent, la glace, les volcans et les tremblements de terre, est appelé l'érosion.

Les chercheurs de l'UNESCO [22] distinguent trois types d'érosion: L'érosion géologique, érosion des sols et l'érosion du réseau de drainage. La première a pour origine les actions intenses de la terre tels que : Le volcanisme les seismes et les glissements de terrain, la seconde est étroitement liée aux terres agricoles.

La troisième, c'est l'érosion des berges et du fond des chenaux par l'écoulement. Dans ce dernier type d'érosion, le ruissellement de surfaces des parties amonts d'un fleuve ou d'un cours d'eau est l'origine d'apport des sédiments par le biais de l'un des deux premiers types d'érosion cités ci-dessus, deux facteurs liés au courant d'eau contribuent à la capacité d'une rivière de transporter son débit solide, à savoir la vitesse du courant et son énergie.

Les différents processus d'érosions sont décrits ci-après

1-1) Les causes naturelles

1-1-1) Agréssivité climatique

L'érosion est accélérée surtout dans les régions de type climatique à deux tranchées; l'une sèche et l'autre humide.

De plus les grandes régions d'érosion sont celles qui sont affligées d'un climat à longue saison chaude.

Or le climat de l'Afrique du Nord est justement caractérisé par l'opposition nette de deux saisons bien tranchées, surtout en ce qui concerne ses deux éléments principaux : La température et les précipitations.

Elle est particulièrement vigoureuse en oranais où l'on passe sans transition d'un hiver froid (5 mois, Novembre à Mars) et pendant lesquels tombent toutes les pluies, à un été chaud et pratiquement sans pluies.

Ce caractère général est la base du jeu des facteurs climatiques comme agents d'érosion.

- La pluie

On doit s'intéresser à l'abondance pluviale, à son intensité et sa durée horaire de pluies douces ou orageuses, de phase alternée d'humidité et de sécheresse et particulièrement la sécheresse estivale.

Les estimations de l'effet de l'intensité de la pluie sur la perte en sol (érosion) sont données dans le tableau [2] ci-dessus.

Quantité totale de pluie (mm)	Intensité max de pluie (mm/h)	Durée de la pluie (h)	Perte en sol (tonne/ha)
65	7,5	30 ^h 35"	0,4
47,5	70,0	1 ^h 52"	51,2
22,5	87,5	0 ^h 15"	2,2

Il est évident que la pluie intense et de courte durée est agressive pour le sol.

L'exemple suivant donné par la station de ZENESVILLE, OHCO, sur sol nu, (les mesures sont faites entre 1934 et 1942) montrent l'action de l'intensité sur le phénomène d'érosion.

Classes d'intensité pluviale mm/h pendant 5 mn	Nombre de pluies	Erosion moyenne par pluie (T/Km ²)
0 - 25,4	40	375
50,8 - 76,2	40	1178
127 - 152,4	4	3632
228,6 - 254	1	4793

- Influence de l'intensité des pluies sur l'érosion [13]

Le tableau donne des chiffres très significatifs, les transports de terre croient nettement avec l'intensité des pluies.

On considère généralement que l'érosion augmente très sensiblement dès que l'intensité pluviale dépasse 1,5 mm/mn.

En Algérie on a considéré comme dangereuses les pluies qui atteignent ou dépassent 30 mm en 24 heures, 20 mm en 2h et 15 mm en 1heure.

I-1-2) Morphologie :

L'érosion est très intense dans les régions de montagnes quelque soit leur situation géographique.

Cela démontre l'influence de la pente, de l'Altitude et du relief.

- La pente :

Dans une région climatique donnée l'intensité de l'érosion dépend essentiellement de la nature du sol et de la pente.

Il faut signaler cependant que l'érosion intervient quand le sol est mal protégé en toute inclinaison. Nous rappelons les expériences de BENETT (USA) qui a estimé le temps nécessaire aux agents de l'érosion pour faire disparaître sensiblement 20 cm de terre des différentes situations de sol et de pente.

En général, une forte inclinaison correspond à une forte érosion. L'érosion augmente plus vite que la pente. A titre d'exemple considérons le tableau suivant établi par ROOSE 1967 à SEFA.

En Afrique de l'Ouest, il a comparé la forêt, la terre nue cultivée sous une pente de 7,23 et 65% tout du point de vue pente en terre que ruissellement.

Tableau : Relation entre la pente et l'érosion [13] et l'occupation des sols (Roose 1967).

EROSION T/HA/AN			RUISSELLEMENT %			
Pente %			Pente %			
7	23	65	7	23	65	
Forêt	0,03	0,1	1,0	0,14	0,6	0,7
Culture	75	295	24	24		
Terre nue	138	570				

Le tableau montre l'augmentation de l'érosion et du ruissellement dans les terrains nus et cultivés avec l'augmentation de la pente.

1-1-3) La lithologie

L'érosion étant la décomposition et l'altération de la roche, elle est liée avec les caractéristiques de la roche en place ou autrement dit la lithologie.

Les roches, et / ou meubles (les roches non consolidées) sont facilement ^{altérables} ~~solubles~~. En outre les roches dures consolidées résistent à l'érosion.

Aussi, les roches comportant des minéraux altérables peuvent être érodées par l'action chimique du milieu hydrique.

En Afrique du nord la turbidité moyenne des cours d'eau est fonction de la lithologie du bassin versant. Au Magreb, l'analyse de 70 bassins versants dont on connaît l'érosion, permet d'avancer les chiffres moyens de la turbidité suivant la lithologie dominante du bassin;

- Roches tendres, marnes 30 g/l.
- Roches moyennement résistantes 10 g/l.
marno-schiste, marno-calcaire, marno-grés.
- Roches résistantes (schistes, alluvions quaternaires encroutés) 06 g/l.
- Roches dures (grés, petites, micaschistes, calcaires) 2 g/l.

Les causes anthropiques:

La couverture végétale et les techniques culturelles constituent les facteurs principaux dépendant de l'action humaine qui accélère ou réduit l'érosion selon le cas.

En Afrique du nord la perte en terre est multipliée par environ (2) dans les mêmes conditions d'observations faites par Mr ROOSE (1967) au SENEGAL ;

- 8,7 tonnes/ha en culture traditionnelle.
- 14,1 tonnes/ha en culture mécanisée.

Le couvert végétal :

Suivant sa hauteur et sa densité, la couverture végétale constitue un isolant régulateur de l'action des agents et phénomènes climatiques: précipitations, vents et températures.

A l'égard des précipitations le rôle du couvert végétal est primordial.

Dans les régions équatoriales, les terres vierges mises en culture après déforestation perdent en quelques années leurs réserves d'humus. En sol nu dont, la température jusqu'à 5 cm de profondeur dépasse 25°, on a observé des pertes atteignant une tonne par mois, soit 10% de la quantité initiale en un an.

Dans les régions tempérées humides, la perte n'est que d'une tonne par an et par hectare.

Remarque :

1- La mise en culture substituée à la végétation naturelle une végétation qui n'assure qu'un très faible degré de couverture.

2- Une exploitation intensive ou mal adaptée, non seulement déclenche l'érosion par suppression de la couverture végétale protectrice et régénératrice, mais encore diminue considérablement les capacités de résistance du sol aux processus d'érosion.

V-1 Généralités

On entend par transport solide le débit total de sédiments fluviaux se mouvant en suspension et par charriage. La part de ces sédiments en suspension étant de plusieurs fois plus forte, très souvent on ne pense qu'à elle lorsqu'on parle du transport solide en général.

“ Mr Fortier (1973) [16] a exprimé ces deux types de transport d'une façon statistique :

Si on désigne par N_1 le nombre de grains qui touchent le fond, sur N morceaux de matière, solide présent dans un trançon assez étendu de rivière, la probabilité pour qu'en prenant un grain ou hasard celui-ci touche le fond est égale à N_1/N . Si N_1/N est voisin de zéro il ya suspension et si N_1/N est voisin de 1 il ya charriage, pour distinguer, charriage et suspension il faut fixer des valeurs N_1/N .

Si par exemple : $N_1/N \ll 0,01$ il ya suspension. //

$N_1/N \gg 0,99$ il ya charriage.

En réalité les matériaux ont des dimensions très différentes, on observe alors simultanément deux modes de transport. Les dimensions les plus petites sont transportées par suspension et les plus grandes par le charriage.

D'une manière générale le tableau suivant rassemble les différents aspects du transport, solide dans les écoulements naturels et dans écoulements industriels, en fonction d'une classification des dimensions des particules.

Dimensions (diamètre moyen)	Désignation	Zone concernées	Modes de transport	Nature des phénomènes
de 4 à 62 μ	Silt	lacs, retenues de barrages, zones d'eau morte...	suspension et courants, de densité	Mécanique
de 0,24 μ à 4 μ	Vases	lacs, estuaires, littoral	Suspension et courants de densité	Mécanique et physico-chimique
de 0,062 mm à 2 mm	Sable	- littoral - cours d'eau	suspension ou charriage	Mécanique
de 2 mm à 64 mm	Graviers	- cour d'eau	Charriage	Mécanique
de 64 mm à 250 mm	Galets	- Plages - Rivières à porte pente - Torrents	Charriage	Mécanique
250 mm	Blôcs	Torrent à très porte pente	Charriage	Mécanique

* Classification de l'"American Geophysical Union"

II-2) Transport solide par charriage

II-2-1) Approche sur le phénomène de Seuil

La notion de seuil de mouvement pour un grain posé sur le fond est parfaitement valable et ne présente pas de difficultés si toutes les conditions aux limites du problème sont bien précisées.

Selon une expérience faite dans un canal consistant à regarder une surface (Ω) du fond pendant la durée T, il a été constaté que tant que rien ne bouge, on ne peut rien conclure, mais par contre si quelques grains partent, il ya déjà débit solide.

Si N détachement ont lieu durant le temps T, le débit solide G_c est donné par

$$G_s = \frac{N \cdot P}{T} \quad (1) \text{ où } P: \text{ poids des grains.}$$

Pour d'autres données T et Ω , on obtient un nombre N différent malgré les conditions hydrauliques moyennes identiques. Il est clair que N est une variable aléatoire.

Il ne peut donc y avoir de définition précise du début de débit solide sans définir avec précision les conditions des expériences et sans une approche statistique ou probabiliste.

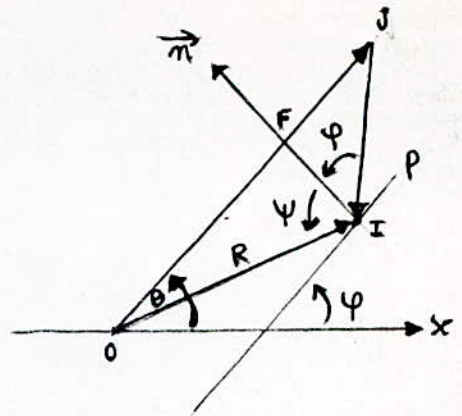
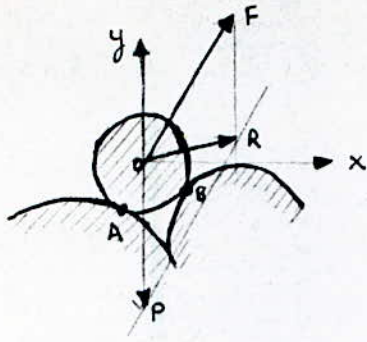
On traite le phénomène du début de charriage en trois étapes :

- 1- Les expériences mécaniques de détachement d'un grain.
- 2- Les expériences et la loi de shields.
- 3- L'interprétation des expériences par la théorie probabiliste.

II-2-1-1) Détachement d'un grain:

Supposant un lit plat et l'écoulement dirigé selon OX on suppose aussi que le phénomène est bidimensionnel dans le raisonnement qui va suivre (en réalité il est tridimensionnelle).

- Soit deux appuis A et B.
- Soit les actions hydrodynamiques F et le poids P et leur résultante R.



- Si R est comprise entre A et B : Les réactions R_A et R_B équilibrent R et par conséquent le grain est stable.

- Si R est à l'extérieur de l'angle AB (par exemple du côté B) la réaction en A s'annule, le grain ne prend appui qu'au point B.

Il peut y avoir équilibre si R est située dans le cône de frottement au point B. A la limite lorsque R est sur ce cône le granulat est au seuil de mouvement.

Soit :

Ψ : L'angle de frottement en B.

\mathcal{J} : L'angle du plan tangent en B avec Ox .

θ : L'angle de F avec Ox

L'instabilité est caractérisée par : (triangle OIJ)

$$\frac{F}{P} \geq \frac{\sin(\mathcal{J} + \Psi)}{\cos[\theta - (\mathcal{J} + \Psi)]} \quad (2)$$

d'où en projetant sur les axes Ox et Oy

$$\begin{cases} \frac{F}{P} \geq \cos \theta \cdot \frac{\sin(\mathcal{J} + \Psi)}{\cos[\theta - (\mathcal{J} + \Psi)]} \\ \frac{F}{P} \geq \sin \theta \cdot \frac{\sin(\mathcal{J} + \Psi)}{\cos[\theta - (\mathcal{J} + \Psi)]} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{si } \theta \longrightarrow \frac{\pi}{2} ; \quad \frac{F}{P} \geq 1 \text{ et } \begin{cases} \frac{F_x}{P} \geq 0 \\ \frac{F_y}{P} \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{F_x}{P} \geq 0 \\ \frac{F_y}{P} \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

Le détachement d'un grain dépend donc de la position de la position de ce grain (γ et θ), des caractéristiques de contact entre grain (ψ) et d'un nombre de Reynolds (Re), caractérisant l'écoulement autour du grain.

θ Varie avec Re à une certaine géométrie.

Autour des grains à $\theta \approx \frac{\pi}{2}$ en régime turbulent, le critère de détachement devient $-\frac{F_y}{P} \gg 1$. Ce critère est retenu dans cette théorie. Le grain peut quitter le lit, suivant l'angle de R . avec α . Il faut alors que :

$$\gamma + \psi - \frac{\pi}{2} > 0.$$

ou le grain roule sans décoller du lit :

$$\gamma \leq \frac{\pi}{2} - \psi .$$

II-2-1-2) Les expériences et la loi de shields

Le rôle de la force tractrice dans l'arrachement ou raclage du lit des cours d'eau a été étudié par nombreux auteurs, [STEIGER, KRAPE, KREUTER ...] cité par Leliavaky. [5]

Les résultats de ces expériences ont été regroupé par Leliavaky sur le graphe : $\tau_c = f(D)$ (Fig: II-1).

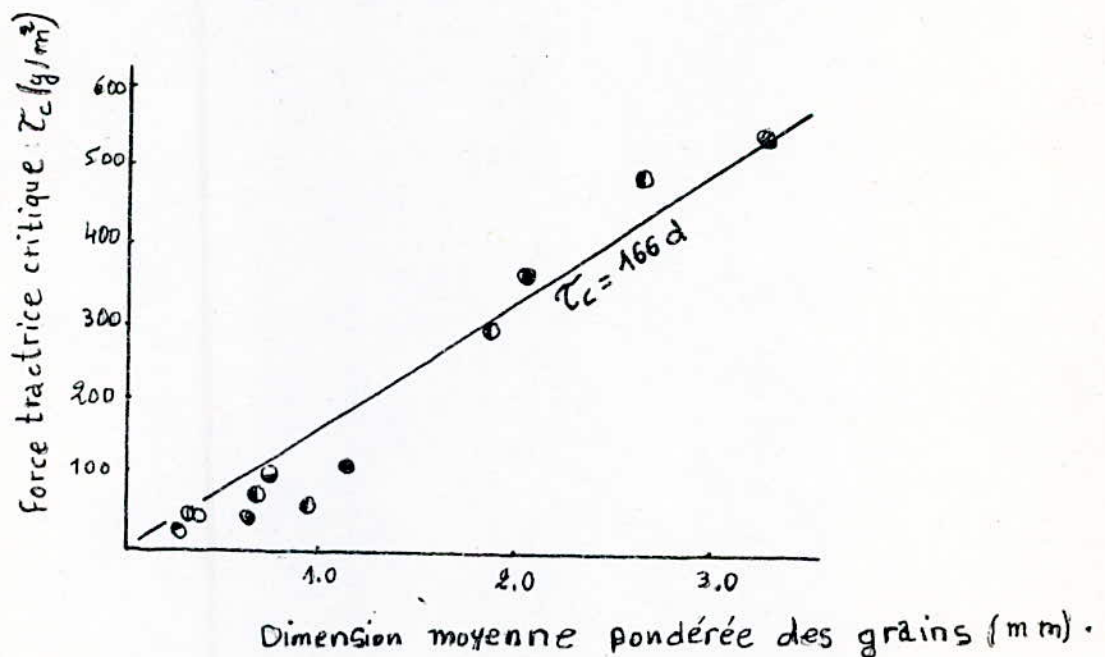


Fig II-1 - La force tractrice critique en fonction du diamètre du grain

D'ici on remarque qu'il ya une relation linéaire entre la force tractrice critique et le diamètre moyen du grain :

Cette étude ne tient pas compte des autres facteurs (γ, J, \dots) qui peuvent influencer sur la force tractrice, donc c'est une approximation grossière.

D'autre côté on a remarqué que la force tractrice est calculée d'après la formule : $\tau_0 = \gamma \cdot H \cdot J$ où : H : le tirant d'eau :

J : pente du rivièrè ; γ = poids spécifique de l'eau,

Kramer et Shields ont traité ce problème d'une façon scientifique, mathématique développée et expérimentale. Les résultats de ces études couramment connus sous la formule de Shields.

Une autre théorie récente basée sur la turbulence, des sédiments en suspension complète, la théorie de la force tractrice, bien que ces deux théories concernent deux phases différentes, qui sont le charriage et la suspension .

Les recherches de shields constituent une tentative de réunir ces deux théories. Dans cette optique Shields a introduit dans l'analyse du problème de la force tractrice, le concept de PRANDTL de "couche limité laminaire". Il a trouver que le rapport $\frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) \cdot D}$ est en fonction de $\frac{D}{\delta}$.

où : τ_0 : la force tractrice.

δ : l'épaisseur de la couche limité.

Pour le confirmer, il a pu regrouper dans un diagramme, quelques résultats de la figure (II.1) ainsi que ses propres résultats (fig: II.2).

Ce même auteur a reussit de définir une courbe moyenne, de début de transport, malgré une importante dispersion.

En partant du critère d'arrachement $FY/p \geq 1$, où FY est la portance hydrodynamique qui est exprimée (d'après Newton) sous la forme :

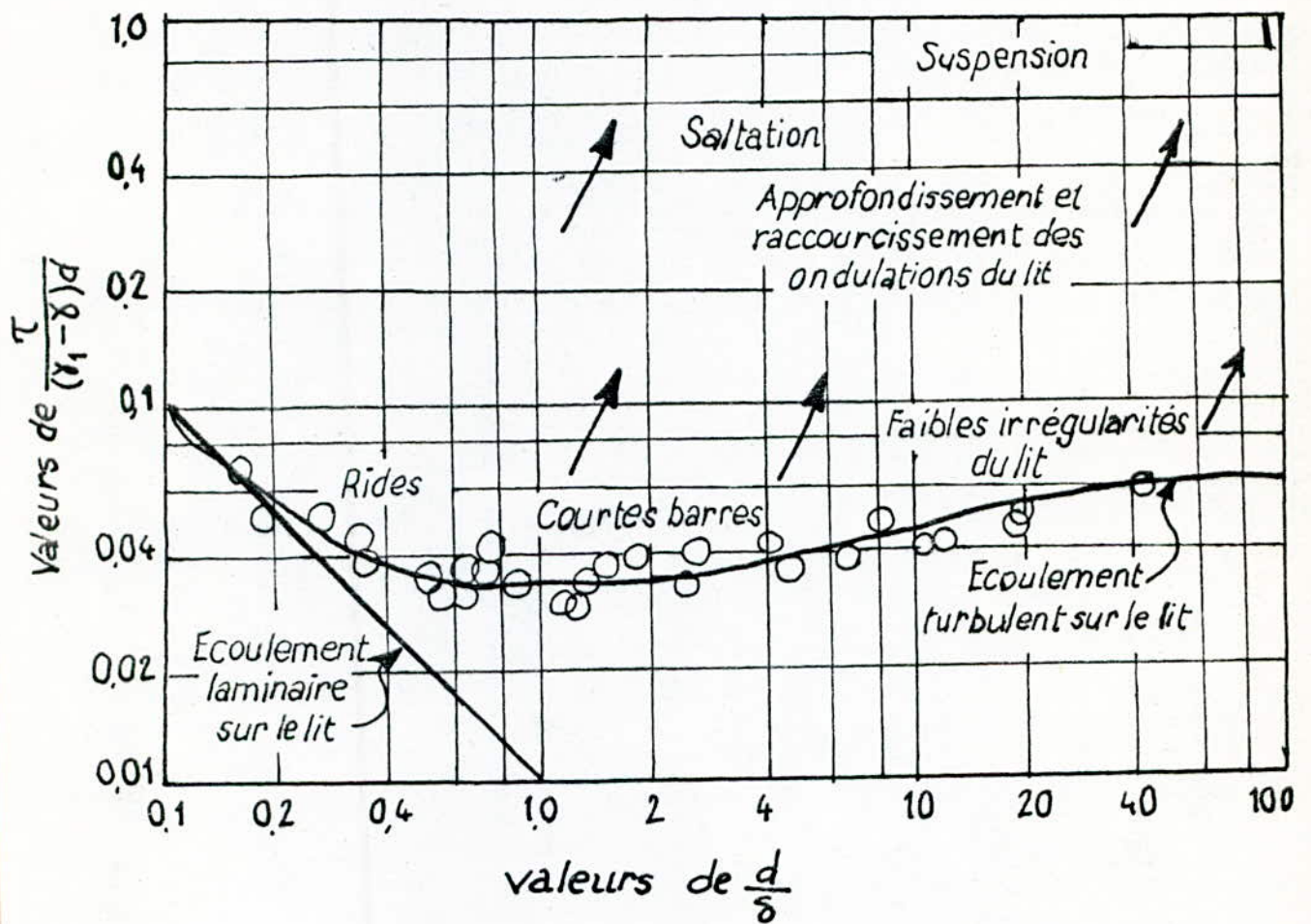


Fig: III: Diagramme de SHIELDS

$$F_y = -\frac{1}{2} \rho C_y (X_e) a D^2 U_*^2 \quad (6)$$

où :

C_y : coefficient de traînée.

D : diamètre de la particule.

a : coefficient de forme.

X_e : nombre de Reynolds de la particule = $\frac{U_* \cdot D}{\nu}$

U_* : vitesse de frottement au fond.

Le poids P sous l'eau s'écrit : $P = \beta g (\rho_p - \rho) D^3$ (7)
il vient donc que :

$$\frac{-F_y}{P} = \frac{\rho C_y X_e a D^2 U_*^2}{2 \beta g (\rho_p - \rho) D^3} \quad (8)$$

On pose : $Y = \frac{\rho U_*^2}{g (\rho_p - \rho) D}$ (9)

$f = \frac{a}{\beta}$ où f : constante de forme.

On obtient alors :

d'où $Y \geq \frac{1}{f C_y X_e} \left(\frac{-F_y}{P} = f C_y X_e Y \geq 1 \text{ (critère d'arrachement)} \right)$ (10)

à la limite on a $Y_{cr} = \frac{1}{f C_y (X_e)_{cr}}$ (11)

L'équation (11) exprime une relation entre Y_{cr} et $(X_e)_{cr}$ c'est à dire une courbe dans le plan $(Y_{cr}, (X_e)_{cr})$: courbe de Shields fig. (II-3).

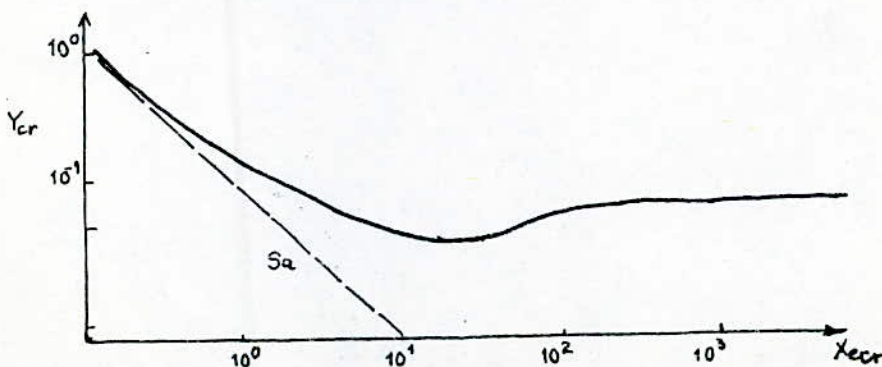


Fig II-3 : courbe de Shields

Interprétation du diagramme :

Sur la courbe de Shields (fig.II.2) on constate que la courbe descendante de la partie gauche correspond au cas où les particules de sédiments se trouvent entièrement dans la couche laminaire. La partie de droite pratiquement horizontale correspond à la destruction totale de la couche laminaire. Dans le premier cas l'écoulement agit entièrement par viscosité et dans le second il est complètement turbulent. La zone entre ces deux limites extrêmes, correspond aux régimes de transition.

En outre le passage d'un lit lisse à des rides, dunes, etc... dépend aussi du paramètre qui est fréquemment représenté sous la forme :

$$\frac{\sqrt{\tau_0/\rho} \cdot d}{\gamma}$$

où :

$$\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

: vitesse de frottement

$$\tau_0$$

: la force de frottement tangentielle ou force tractrice,

$$\gamma$$

: viscosité dynamique.

Conclusion :

1- La courbe de Shields est valable pour des granulométries uniformes ou presque, malgré une assez grande dispersion, comme

le montre la courbe $\frac{(\gamma_s - \gamma) \cdot D}{\tau_c} = f\left(-\frac{D}{\delta}\right) \approx 0,04$.

2- Le phénomène de début de mouvement n'aura plus de sens quand la granulométrie devient très étendue.

3- Selon des conditions hydrauliques, il peut en effet y avoir charriage partiel des sédiments plus fins sans que les grossiers soient instabilisés. Il se produit un pavage du lit.

4- Si le lit n'est pas pavé et si l'écoulement est assez fort pour mobiliser toutes les tranches granulométriques le début de charriage total semble encore suivre la loi de Shields à condition d'employer le diamètre moyen.

II-2-1-3) Interprétation probabiliste des expériences de SHIELDS (d'après YALIN) :

EINSTEIN a retenu comme hypothèse, le critère de détachement $F_y \geq P$.

F_y : Force de portance agissant sur le grain.

P : Le poids réduit par la poussée d'ARCHIMEDE.

Ila montré donc expérimentalement que F_y est une grandeur aléatoire stationnaire et Gaussienne.

La densité de probabilité : $R = \frac{F_y}{\overline{F_y}}$ (12)

$\overline{F_y}$: Moyenne temporelle de F_y .

et donc : $f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\left[\frac{(r-1)^2}{2\sigma^2}\right]}$

Toute mesure du début de mouvement se ramène en effet à compter le nombre de grains qui se sont détachés pendant une durée T sur une surface Ω . Ce nombre N peut s'écrire :

$$N = P_* \cdot \frac{T}{t_*} \cdot \frac{\Omega}{\alpha D^2} \quad (13)$$

où αD^2 = surface occupée par le grain.

D'après EINSTEIN & ELSAMMI :

$$P_* = \int_a^\infty f(r) dr \quad \text{avec} \quad a = \frac{P}{\overline{F_y}} = \frac{1}{h(x)y} \quad (14)$$

représente la probabilité de voir un grain se déplacer à un instant quelconque t ; et d'après YALIN qui suggère $t_* = \alpha_* \cdot \frac{D}{U_*}$ (15)

α_* = constante.

t_* = période des plus grandes fluctuations à la distance D du fond.

II-3) Transport de sédiments en suspension :

La suspension est un état d'équilibre purement mécanique entre les forces de gravité, qui ont tendance à entraîner les particules vers le fond de la rivière, suivant la loi de chute limite propre de chacune des particules et les échanges turbulents de quantités en mouvement, qui tendent à homogénéiser la concentration le long d'une verticale.

II-3-1) Etude du mouvement de la particule:

Lorsqu'une particule est en mouvement dans un liquide au repos, trois forces extérieures peuvent agir sur cette particule :

- Force extérieure (gravitaire ou centrifuge) F_E .
- Force d'entraînement F_p .
- Force de traînée F_t .

1) La force extérieure : est exprimée par l'équation de Newton:

$$F_E = m_p \cdot a_p \quad (15)$$

m_p = La masse de la particule ; a_p = L'accélération de la particule.

2) La force d'entraînement : Qui est donnée par la formule suivante

$$F_p = \frac{m_p}{\rho_p} \cdot \rho_l \cdot a_p \quad (16)$$

$\frac{m_p}{\rho_p} = V_s$: (le volume de la particule)

ρ_p, ρ_l ; masse volumique respectivement de la particule et de liquide.

3) La force de trainée : représente la résistance opposée par le liquide au déplacement de la particule, dûe aux forces de viscosité et d'inertie

$$F_t = \frac{1}{2} \cdot C_t \cdot \rho_l \cdot A_p \cdot V_p^2 \quad (17)$$

où A_p = aire de la projection de la particule sur un plan perpendiculaire à la direction de son mouvement.

V_p = vitesse de chute de la particule

C_t = le coefficient de trainée, dépend des régimes d'écoulement.

- Etude du C_t en fonction du régime:

Le régime d'un liquide en hydraulique est caractérisé par les différentes valeurs du nombre de Reynolds (Re) qui exprime le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité

$$Re = \frac{V_p \cdot D}{\nu}$$

D = diamètre de la particule.

ν = viscosité du liquide (de l'eau)

On distingue trois zones de valeurs de (Re) données sur la figure (II-4).

1er zone = $Re \leq 1$ (écoulement laminaire) la figure (II-5a) montre les lignes de courant qui épousent la forme de la particule.

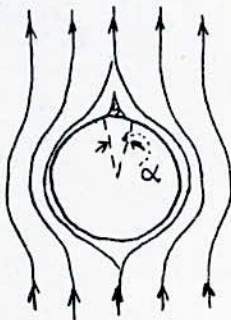


Fig:(II.5a)

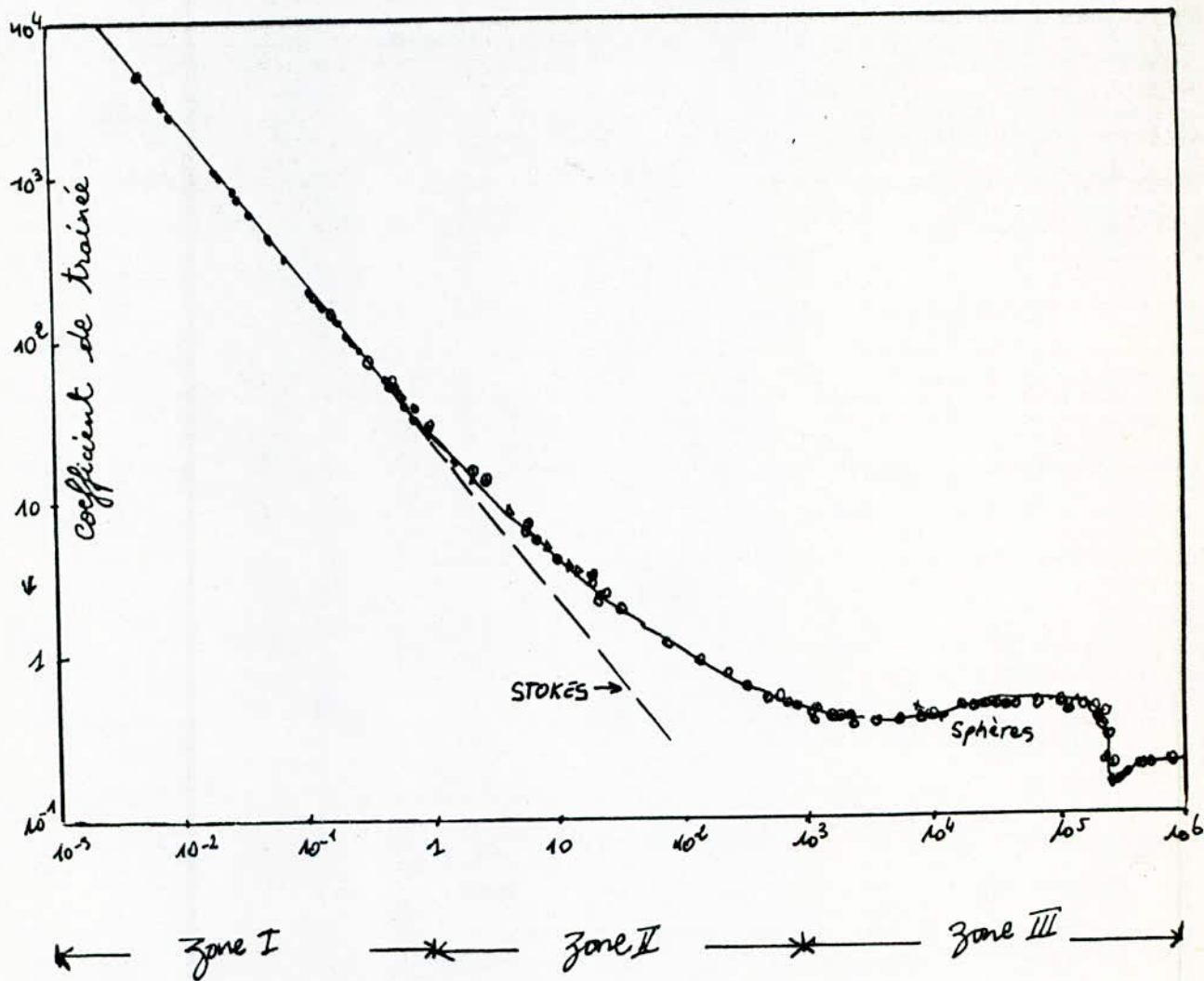


Fig: (II-4) : Variation du coefficient de traînée (C_t) en fonction du nombre de Reynolds (Re).

La vitesse limite de chute est donnée par la formule de Stokes (30).

Les particules concernées ont un diamètre $D < 0.15$ (mm).

2eme zone: $1 < Re \leq 10^3$ dans ce cas la zone de décollement (Fig II-5b) des lignes d'écoulement autour de la particule augmente.

Sur la courbe (Fig. II-5a), on constate que dans cette zone $C_x = f(Re)$ commence à s'éloigner de la ligne droite initiale (zone II), cela est dû à l'inertie qui ne peut plus être négligée devant la force de la viscosité. Les particules correspondant ont le diamètre D compris entre 0,15 et 1,5 mm.

3eme zone: $Re > 10^3$: Les valeurs de vitesse deviennent importantes, ce qui provoque le détachement des lignes de courant, la zone devient importante (Fig. II-5c).

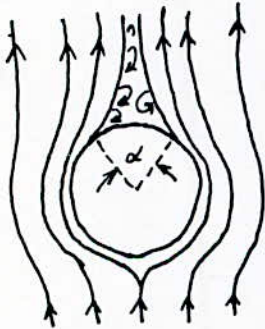


Fig. II-5b



Fig. II-5c

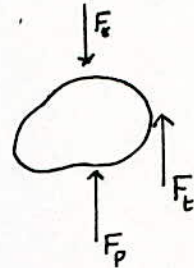
Dans la zone III (fig II.4) le coefficient de trainée diminue de même que la force; cette dernière dépend uniquement de la différence des pressions normales.

II-3-2) Equation de vitesse de la particule :

Soit une particule soumise aux différentes forces (F_E, F_t et F_p) dont la résultante est donnée par la loi fondamentale de la dynamique :

$$F = m \frac{dv}{dt} \quad (18)$$

On a donc :



$$F = m_p \frac{dv_p}{dt} = F_E - F_t - F_p \quad (19)$$

En remplaçant chaque force par sa formule, (15), (16), (17) on obtient :

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = m_p \cdot a_p - \frac{C_t \rho_e A_p v_p^2}{2} - \frac{m_p}{\rho_p} \cdot \rho_e \cdot a_p \quad (20)$$

$$\text{d'où : } \frac{dv_p}{dt} = a_p \left(1 - \frac{\rho_e}{\rho_p} \right) - \frac{C_t \cdot \rho_e \cdot A_p \cdot v_p^2}{2 \cdot m_p} \quad (21)$$

Selon la nature de la force extérieure, deux cas se présentent :

a) Si la force extérieure est gravitaire :

Dans ce cas a_p , est équivalente à l'accélération de pesanteur "g" donc l'équation (21) devient :

$$\frac{dv_p}{dt} = g \left(1 - \frac{\rho_e}{\rho_p} \right) - \frac{C_t \cdot \rho_e \cdot A_p \cdot v_p^2}{2 m_p} \quad (22)$$

b) Si la force extérieure est une force centrifuge :

Alors :

$$a_p = rw^2 \quad \text{avec}$$

r : rayon de rotation.

w : vitesse angulaire.

L'équation (21) devient :
$$\frac{dv_p}{dt} = rw^2 \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_p} \right) - \frac{C_t \cdot \rho_l \cdot v_p^2 A_p}{2 m_p} \quad (23)$$

Pour que la particule soit entraînée dans le fluide, la vitesse du fluide doit être supérieure ou égale à la vitesse de sa chute.

D'abord on essayera d'étudier les conditions de vitesse limite de chute suivant chaque régime d'écoulement.

11-3-3) Vitesse limite de chute :

La force de trainée augmente avec la vitesse de la particule par rapport au fluide, on atteint une vitesse constante lorsque la force accélérante ($F_e - F_p$) est contrebalancée par la force de trainée (F_t). Quand le milieu est liquide et cette vitesse limite est atteinte, on peut considérer que la particule tombe avec vitesse constante sur tous son parcours.

$$F_t = F_e - F_p \quad (24)$$

D'où on a :

$$\frac{dv_p}{dt} = g \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_p} \right) - \frac{C_t \cdot v_p^2 \cdot \rho_l \cdot A_p}{2 m_p} = 0 \quad (25)$$

Si on a une particule sphérique :

et

$m_p = \left(\frac{\pi \cdot D^3}{6} \right) \rho_p$ L'équation (25) devient :

$$\frac{dv_p}{dt} = g \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_p} \right) - \frac{3 C_t \cdot v_p^2 \cdot \rho_l \cdot \pi \cdot D^2}{4 \cdot \pi \cdot D^3 \cdot \rho_p} = 0 \quad (26)$$

Donc on aura :

$$\frac{3.C_t.V_p^2.\rho_e}{4.D.\rho_p} = g \left(1 - \frac{\rho_e}{\rho_p}\right) \quad (27)$$

$$V_p^2 = \frac{4.D.g(\rho_p - \rho_e)}{3.C_t.\rho_e} \quad (28)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{4.g(\rho_p - \rho_e).D}{3.C_t.\rho_e}} \quad (29) \text{ avec } \rho_e = \rho(\text{eau})$$

D'après l'équation (29), la vitesse limite de chute dépend :

- De la nature, de la forme, et de la densité de la particule;
- De la densité de l'eau;
- Du coefficient de traînée et en d'autre terme du régime d'écoulement puisque C_t est fonction de (Re) .

D'ici, on distingue différentes formules pour la vitesse limite de chute.

1) La vitesse de chute en régime laminaire :

Dans ce cas, la force de traînée F_t est donnée par la formule de Stokes : $F_t = 3\pi D \mu V_p$ (30) pour les particules fines de forme sphérique on remplace F_t dans l'équation (22) qui devient :

$$m_p \frac{dV_p}{dt} = m_p \left(1 - \frac{\rho_e}{\rho_p}\right) g - 3\pi D \mu V_p \quad (31)$$

$$d'où : \frac{dV_p}{dt} = \frac{(\rho_p - \rho_e)g}{\rho_p} - \frac{18 \cdot \mu \cdot V_p}{D^2 \cdot \rho_p} \quad (32)$$

La vitesse limite est atteinte pour $\frac{dV_p}{dt} = 0$; d'où

$$V_p = \frac{1}{18} \frac{g}{\mu} \cdot (\rho_p - \rho_e) \cdot D^2 \quad (33) \text{ (Loi de Stokes)}$$

de l'équation (28)

$$\text{on a : } C_t = \frac{4 \cdot (\rho_p - \rho_e) \cdot g \cdot D}{3 \cdot V_p^2 \cdot \rho_e} \quad (34)$$

En remplaçant V_p par la formule (33) on obtient :

$$C_t = \frac{4(\rho_p - \rho) \cdot g \cdot D}{3 \cdot \rho \cdot g (\rho_p - \rho) \cdot D^2} \cdot \frac{18 \mu}{V_p} = \frac{24 \cdot \mu}{D \cdot \rho \cdot V_p} \quad (35)$$

comme $Re = \frac{V_p \cdot D}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)}$; on aura donc $C_t = \frac{24}{Re}$ (36)

2) La vitesse de chute dans le régime transitoire:

Dans ce cas, on peut appliquer l'approximation suivante:

$$C_t = \frac{18}{Re^{0,6}} \quad (37)$$

L'équation de vitesse V_p devient

$$V_p = \frac{0,153 \cdot g^{0,71} \cdot D^{1,14} (\rho_p - \rho)^{0,71}}{\rho^{0,29} \cdot \mu^{0,43}} \quad (38)$$

3) La vitesse de chute dans le régime turbulent :

Dans ce régime, le (Re) applicable à la particule est supérieur à 10^9 ,

C'est le cas de graviers, galets, alors C_t vaut par approximation 0,44 d'où

$$V_p = 1,74 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot (\rho_p - \rho) \cdot D}{\rho}} \quad (39) \text{ (équation de Newton)}$$

Les équation 33, 38 et 39 indiquent que la décantation des particules se fait pour des vitesses supérieures à la vitesse limite de chute, par contre pour les vitesses inférieures à la vitesse limite de chute, les particules seront transportées en suspension.

DEUXIEME PARTIE

1) Rappel des techniques d'échantillonnage :

Dans le but , de déterminer ou estimer la concentration des sédiments en suspension , plusieurs dispositifs de prélèvements d'échantillons d'eau trouble ont été élaborés par des laboratoires hydrauliques .

En principe , l'échantillonnage doit être fait selon les points suivants :

-Au cours des prélèvements , le régime d'écoulement est inchangé .

-L' échantillon^{doit} être représentatif de la suspension du milieu .

-La facilité d'utiliser les appareils de mesure. Les avantages et les inconvénients des échantillonneurs , sont décrits en vue des points cités ci-dessus .

Il existe différentes méthodes de prélèvements d'échantillons basées sur la prise en continu par pompage ou par prise instantanée d'un échantillon par différents systèmes .

1-1) Echantillonneurs instantanés :

Les échantillonneurs instantanés consistent en un cylindre horizontal ou vertical équipé à ses extrémités par des dispositifs permettant une fermeture brutale (en une fraction de seconde), de cette façon l'échantillon est prélevé au point choisi.

1-1-1) Cylindre horizontal :

C'est un tube cylindrique maintenu parallèle à l'écoulement. Les extrémités sont fermées brutalement. On utilise principalement deux modèles :

Le modèle "TAIT BINCKLEY" fig : (1-1)

Le modèle "Tait Binckley" est constitué de trois tubes métalliques coaxiaux reliés par deux manchons en caoutchouc souple. Au moment de la fermeture, le tube central qui est monté sur le roulement, tourne sur lui même grâce à la torsion des manchons, de cette façon l'échantillon est emprisonné.

- Le modèle "Cylindre horizontal instantané" (fig 1-3) :

L'obturation des deux clapets se fait sur impulsion de ressorts. Il a pour inconvénient de perturber violemment l'échantillon lors de la fermeture.

D'autres modèles se basant sur le cylindre horizontal à fermeture par clapets et dont les mécanismes de manoeuvre sont différents ont été mis à l'épreuve, nous citerons :

- Sonde du Pr COLLET.
- Echantillonneur VAN VEEN.
- Sonde de laboratoire de CHATOU.

- de la Pr COLLET.
- Echantillonneur VAN VEEN.
- Sonde de laboratoire de CHATOU.

1-1-2 Cylindre vertical "SLIP BOTTLE" (Fig.1-2)

Le fonctionnement de cet échantillonneur est semblable à un piston, une fois le tube de haut libéré coulisse sous l'effet de la pesanteur et assure ainsi la fermeture du cylindre.

L'inconvénient principal de ce système est que la prise d'échantillon ne se fait pas dans le sens du courant, de plus la géométrie du cylindre crée une turbulence au lieu d'échantillonnage, conjointement à cela, le prélèvement ne sera pas représentatif pour la mesure.

1-1-3 Bouteille échantillonneuse instantanée:

En général, c'est une bouteille ordinaire 500 - 1000 ml, d'un goulot de diamètre variable. Lors des prélèvements la bouteille est lestée et plongée à une profondeur déterminée grâce à un câble. L'eau turbide est soumise dès son entrée dans la bouteille à une forte turbulence due à l'échappement d'air. Ceci fait ralentir le processus de remplissage; par conséquent, la bouteille échantillonneuse n'est pas réellement instantanée

1-1-4 Bouteille à siphon:

L'appareil se compose de quatre parties :

- Une bouteille en verre ou en plastique de capacité 0,568 l
- Un tube d'échappement d'air de diamètre intérieur 0,476 cm
- Un tube de prélèvement de diamètre intérieur 0,635 cm avec une canule de diamètre 0,027 cm.

Le matériel pour le montage sur un support muni d'un système de protection est généralement une planche sur laquelle est disposée une série de bouteilles échantillonneuses insérées dans des boîtiers.

L'ensemble est installé près d'une pile ou à proximité d'une berge.

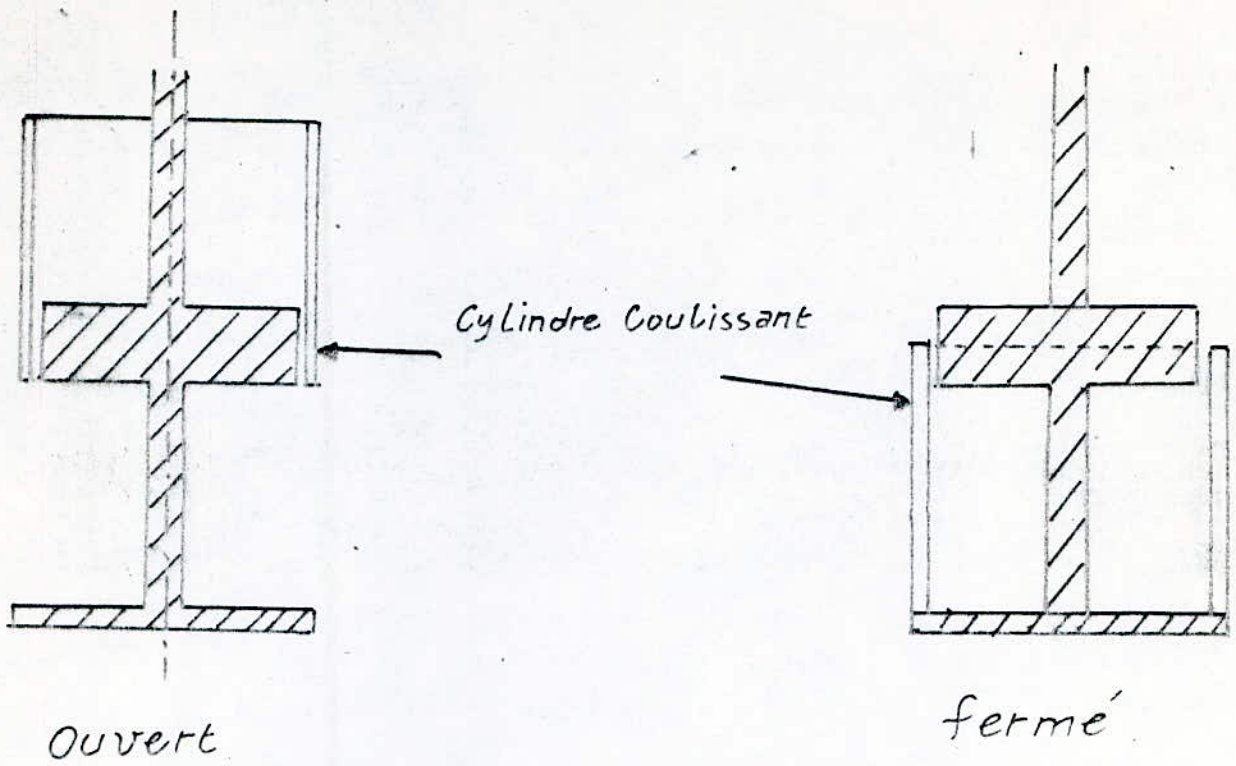


Fig: I-2 - Schéma du cylindre vertical

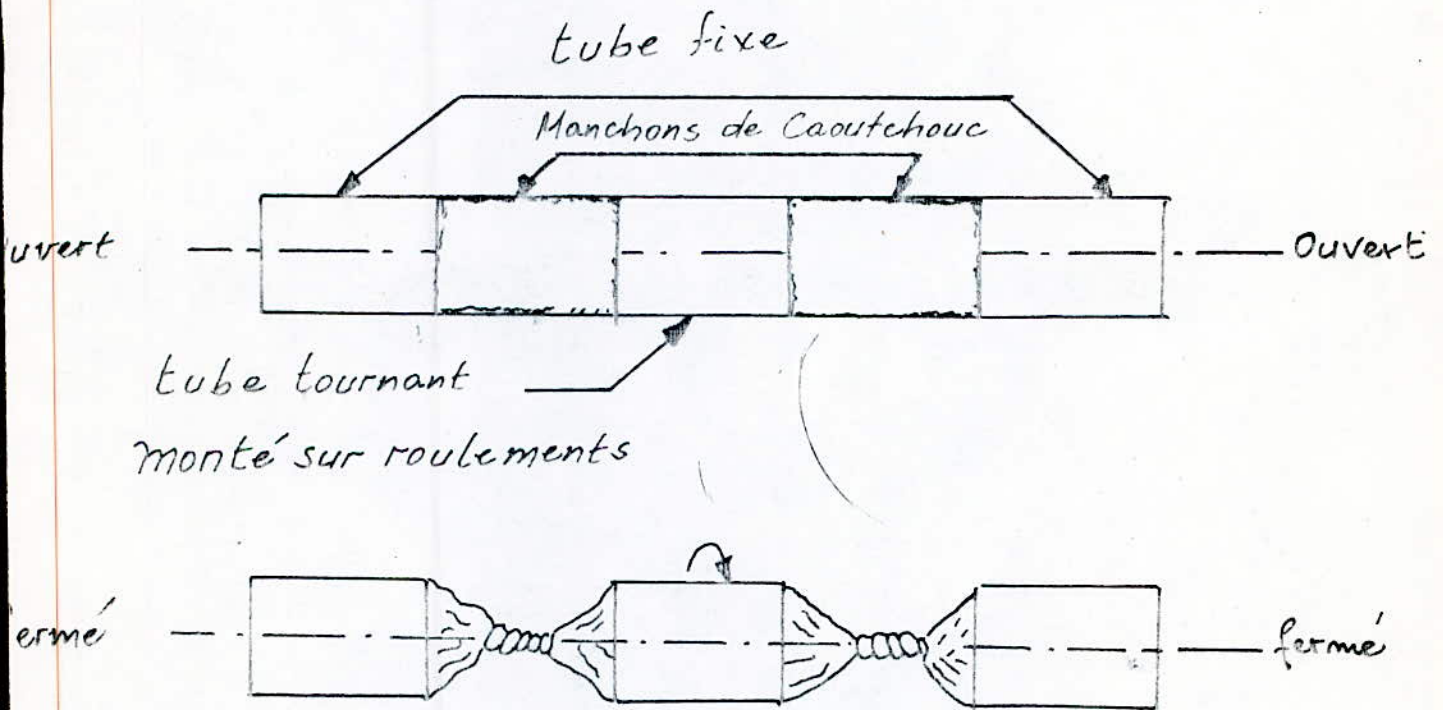


Fig: I-1 - Schéma de l'appareil "TAIT-BINCKLEY"

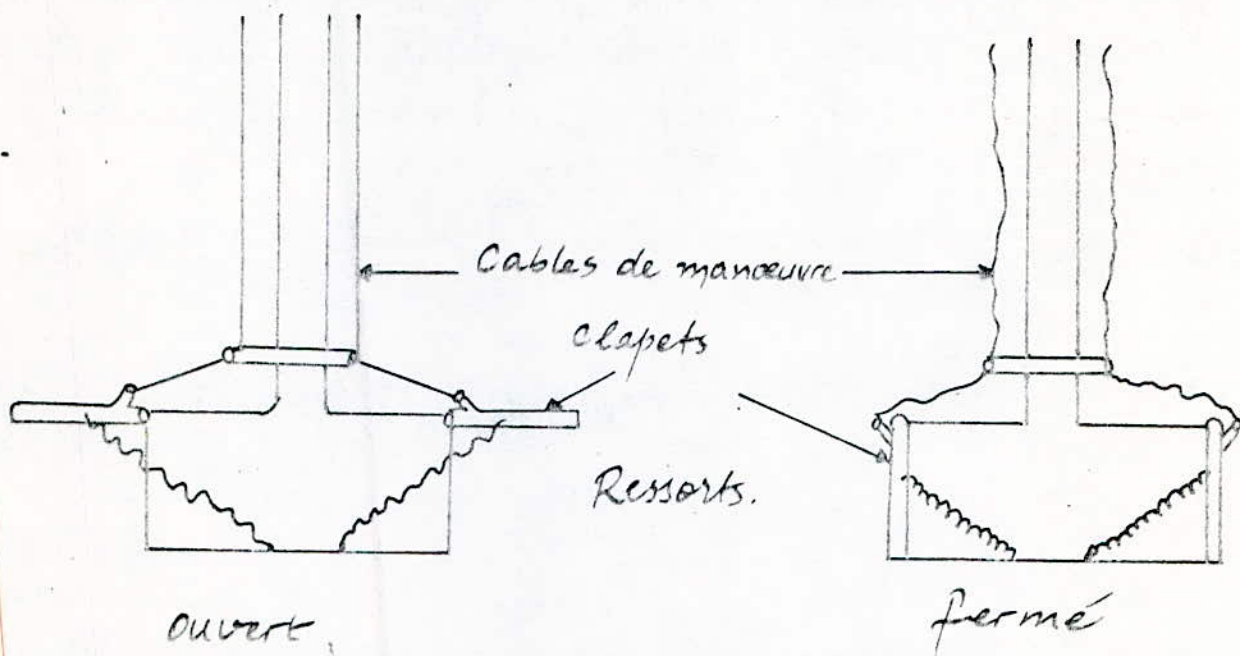


Fig-I-3 - Schéma du cylindre
 horizontal instantané

Cet appareil donne plusieurs valeurs de concentration sur une seule verticale de la section de mesure.

Principe d'échantillonnage:

Lorsque la surface du cours d'eau s'élève au niveau de la canule de prise, le mélange eau - sédiment entre et comme la surface de l'eau continue à monter, l'eau chargée monte aussi dans le tube de prélèvement, quand le niveau d'eau atteint le point C (fig 1.4), l'écoulement débute au dessus du siphon, et la bouteille se remplit sous l'action de la force AC - Le remplissage continue jusqu'à ce que l'échantillon s'élève en F dans la bouteille, puis l'eau est obligée de monter dans le tube d'échappement de l'air.

En conclusion sur les échantillonneurs instantanés, la fermeture brutale des clapets perturbe violemment la turbidité et de ce fait demeure un inconvénient malgré les corrections apportées(*) La géométrie des appareils n'est pas conforme à l'écoulement dans la mesure où le fuselage n'est pas hydrodynamique. De ce fait une forte zone de turbulence est créée par l'échantillonneur et ses attaches. En d'autre côté ces échantillonneurs sont inadaptables dans le cas des rivières à forte turbulence.

1-2) Echantillonneurs à intégration dans le temps (Echantillonneurs à remplissage lent):

On distingue dans cette catégorie, les bouteilles modifiées et les turbidimètres.

1-2-1) Bouteilles échantillonneuses modifiées :

Ce sont des dispositifs se composant d'un récipient standard dans un boîtier, avec un dispositif d'abaissement et d'ouverture au point d'échantillonnage. Le récipient standard n'est autre qu'une bouteille en verre d'une capacité connue.

(*): Par exemple le laboratoire Chatou a substitué un système de fermeture par cisaillement au système par rabattement dans la sonde du Pr COLLET.

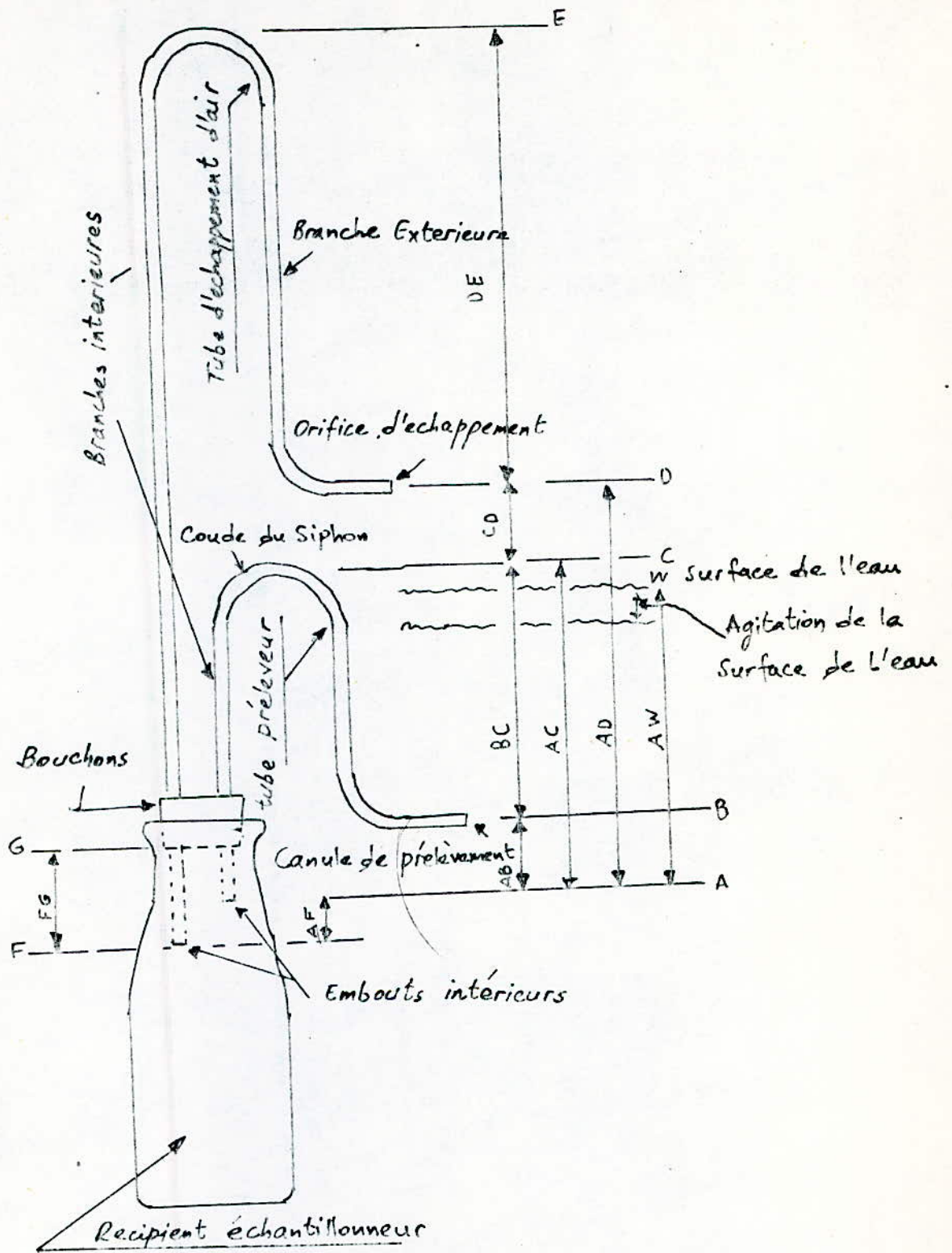


Fig: I-4 - L'échantillonneur à un seul niveau.

Parmi les bouteilles de prélèvement utilisées on peut citer les échantillonneurs standard américains (samplers.U.S), dont plusieurs types ont été développés.

- Les échantillonneurs U.S.D.H.48 (conçues en U.S.A) [16].

- Les échantillonneurs U.S.U.59 A,B,C,D (conçues en U.S.A) [16].

I-2-2) Les turbidisondes :

Les turbidisondes sont des appareils qui ont un profil hydrodynamique, comprend une loge pour la bouteille de prélèvement. L'eau y pénètre par un tube de prise et la vitesse de prise est réglée par des venturis qui créent une dépression en fonction de la vitesse de courant. La turbidisonde est alimentée en air comprimé et supportée par un pneumo-câble. Un envoi d'air sous-pression empêche l'eau d'entrer dans la bouteille jusqu'à son arrivée au point de prélèvement.

Les turbidisondes les plus récentes comportent :

a- Un ajustage de prélèvement.

b- Un ajustage d'alimentation en air comprimé.

(caractéristique qui les distingue des échantillonneurs précédents).

c- Un ajustage d'évacuation d'air communiquant avec une trompe latérale en forme de Venturi.

Parmi ces turbidisondes nous citerons :

I-2-2-1) La turbidisonde U.S.P.46.R :

Cette turbidisonde a été mise au point par l'Américain corps of Engineers [16]. C'est un appareil profilé en saumon avec aileron vertical et empennage horizontal de queue. La turbidisonde U.S.P.46.R a un poids de 50 kg qui permet des prélèvements jusqu'à 40 m (fig:1-5).

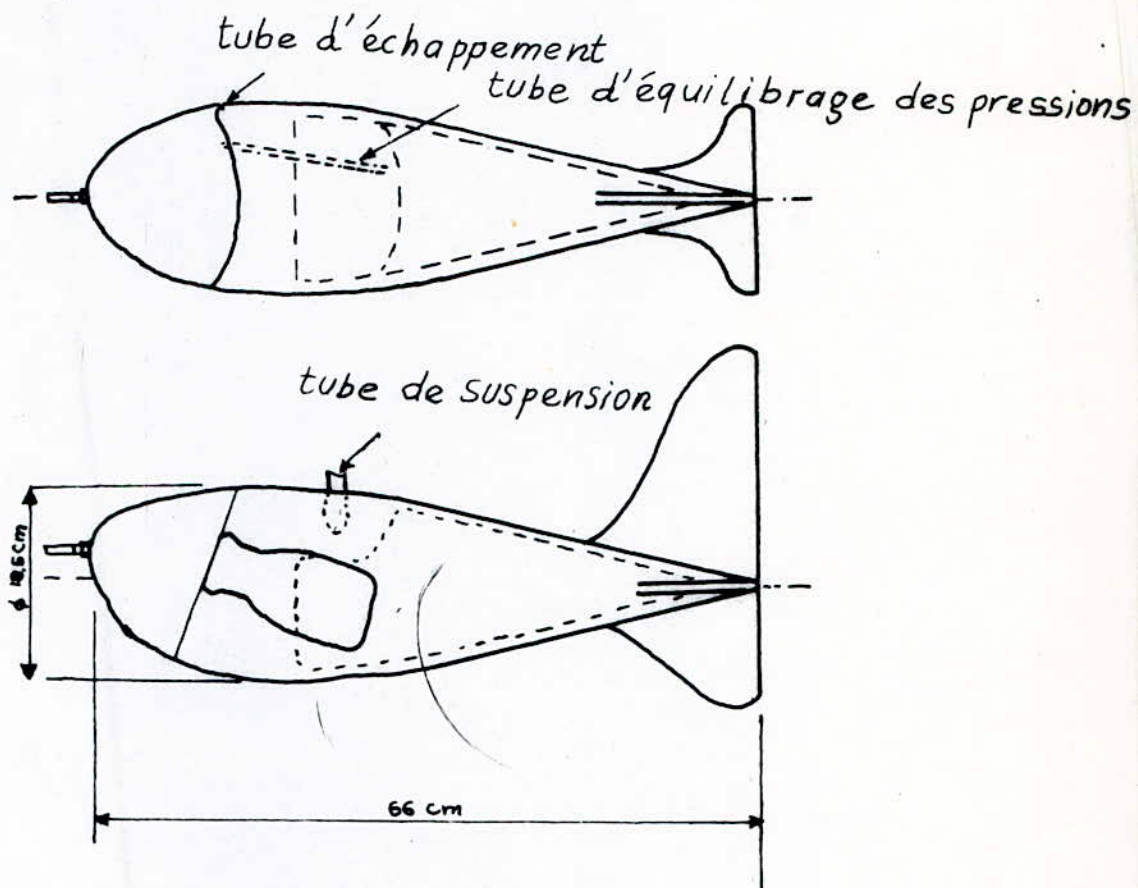


Fig. 1-1 LA TURBIDISONDE USP.46R

1-2-2-2) La turbidisonde NEYRPIC:

Cette turbidisonde à été mise au point par le laboratoire NEYRPIC (GRENOBLE) [19] pour l'étude des transports de sédiments en suspension sur l'oued Medjerdah en Tunisie (fig:1-6).

Il existe d'autre turbidisondes, comme la turbidisonde "OTT" et la turbidisonde des services "E.D.F".

1-2-3) Echantillonneur BECCHI /20/ :

L'institut de Génie civil de l'université de Florence a mis au point ce type d'échantillonneur qui est constitué d'un sachet en papier filtre muni d'un goulot conique en polythène, contenu dans une cage métallique perforée.

Les informations fournies par ce type d'appareil représentent la mesure d'un poids de sédiment avec un maximum de 50 kg.

L'intégration de la mesure peut-être dans l'intervalle de temps allant de quelques heures à une semaine. La distribution granulométrique du sédiment en suspension peut être obtenue par cet échantillonneur.

1-3) Echantillonneurs à système de pompage :

Plusieurs échantillonneurs munis d'une pompe pour les mesures des débits solides en suspension ont été conçus par les laboratoires hydrauliques Européens et Américains.

Ce système s'avère plus méthodique dans le cas où il permet d'obtenir des échantillons importants d'eau chargée et d'éviter de remonter chaque fois le matériel. De plus il paraît plus économique que ces échantillonneurs classiques. Ceci est valable dans le cas où l'on utilise des pompes à mains tel que le type JAPY, utilisée fréquemment par les hydrologues de l'ORSTOM dans leurs travaux en Afrique tropicale.

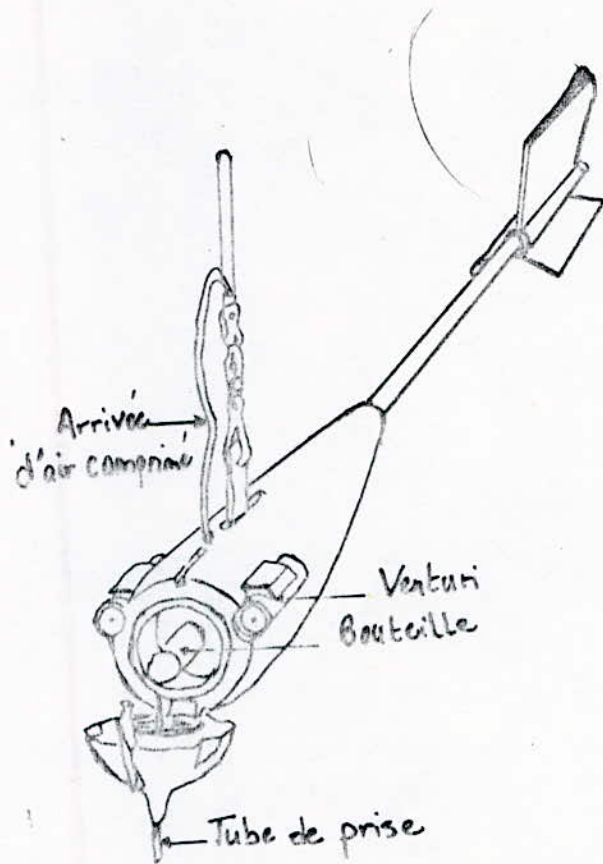


Fig: I-6 - Turbidisonde NEYRPIC

Le principe de prélèvement :

L'extrémité du tuyau d'aspiration est fixé convenablement à un saumon de jaugeage équilibré et immergé à la profondeur voulue. Le débit de la pompe est réglé de façon que la vitesse de l'eau dans l'ajutage de prélèvement soit égale à celle du courant.

Ceci est obtenu par des mesures de vitesses d'écoulement en moulinet.

Parmi les échantillonneurs à pompage les plus connus :

- Echantillonneur à poids cumulés : L'échantillonnage se fait en un point déterminé de la section au cours d'eau. fig(1-7).

- Echantillonneur à prélèvement continu E.D.F
électricité de France . (fig: 1-8).

- Echantillonneur CRICKMORE.

- Automate préleveur d'échantillon.

- Echantillonneur à aspiration de l'institut Polonais
hydroengineering.

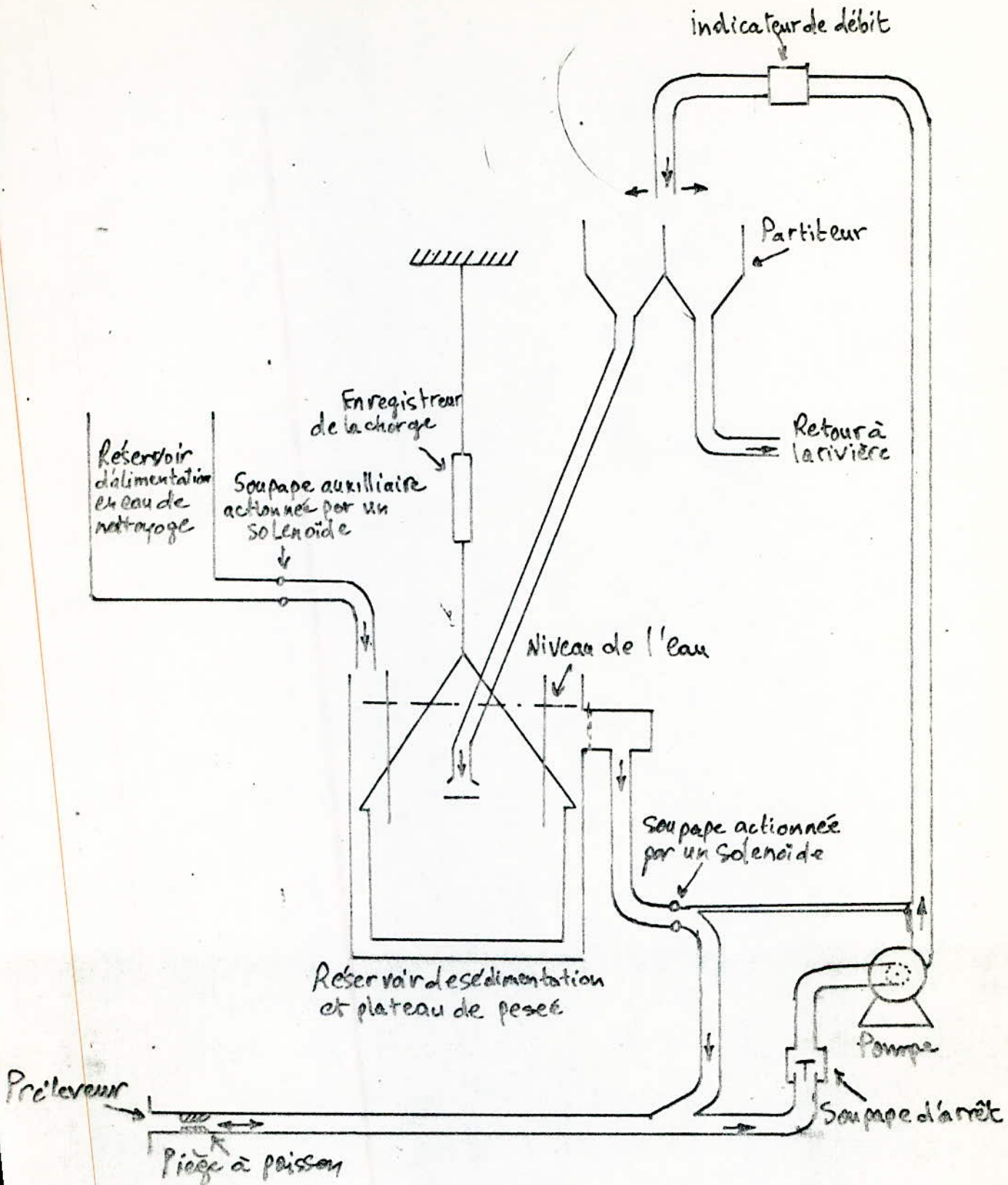


Fig. I-7 - SCHEMA DE L'ECHANTILLONNEUR ENREGISTRANT LES POIDS CUMULÉS

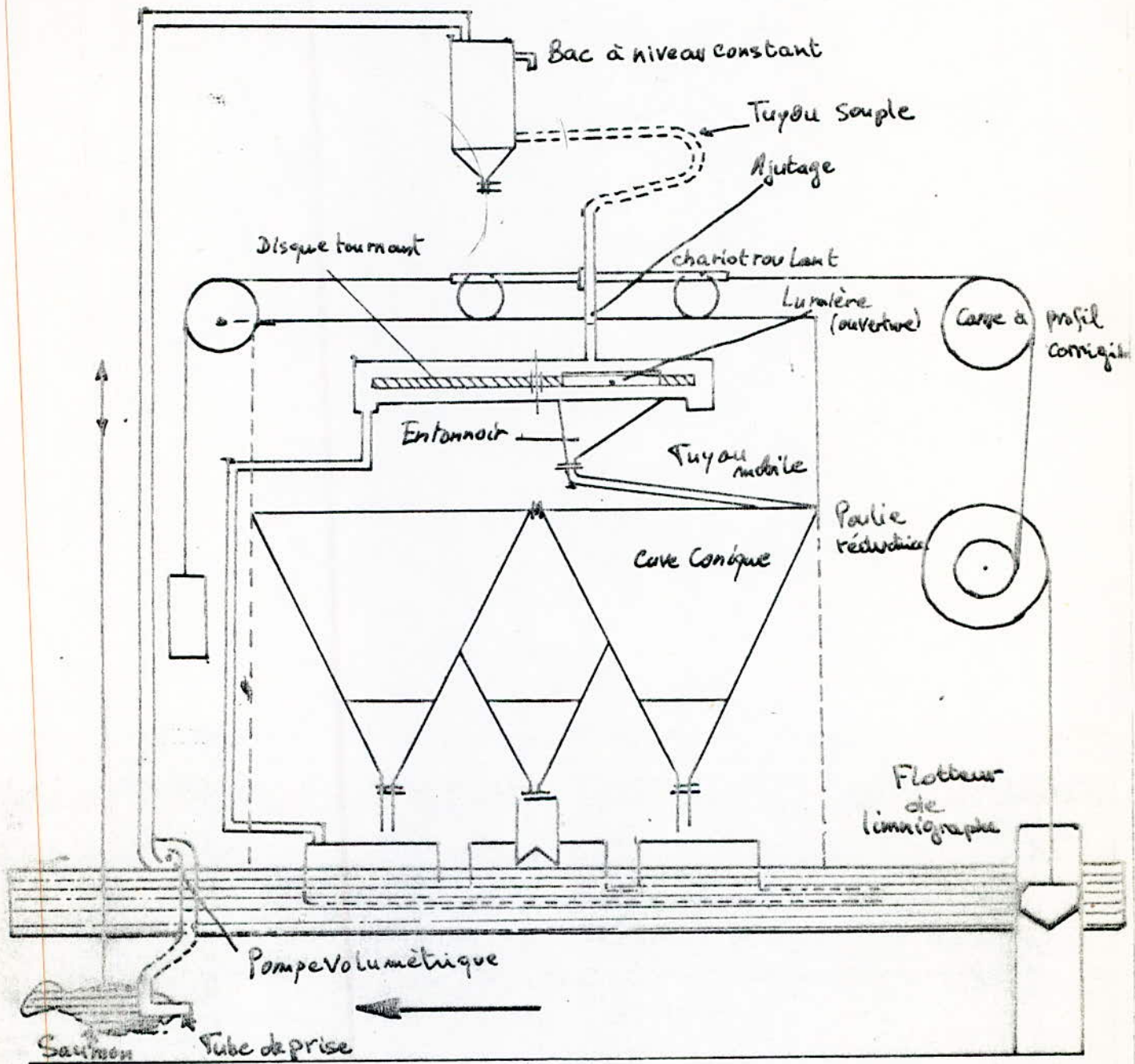


Fig. I-8 - Appareil EDF pour prélèvements continus.

Tableau recapulatif des principales caractéristiques de préleveurs

utilisés pour les sédiments en suspension

Préleveurs instantanés	Préleveur à intégration	Préleveur à pompe
<ul style="list-style-type: none"> * Les plus anciens des appareils : * Fournissent toujours un échantillon instantané du mélange eau-sédiments. * Utilisés en général pour les cours d'eau transportant de l'argile ou des limons. * <u>Inconvénients</u> : <ul style="list-style-type: none"> - perturbation du milieu turbide. - géométrie de l'appareil non conforme (fuselage non hydrodynamique). - inadaptable dans les rivières à forte turbulence. 	<ul style="list-style-type: none"> * est préféré pour la plupart ^{des recherches} : * utilisé pour recueillir des mélanges eau-sédiments pendant un certain intervalle de temps. * Il contribue une réduction des variations dues aux fluctuations temporelles. * Il recueille en plusieurs point par verticales. * Il fournit un échantillon intégré de la surface au fond. * Préleveur jusqu'à grandes profondeurs (40 à 55 mm). * <u>Inconvénients</u> : <ul style="list-style-type: none"> - une grande quantité de prélèvement. - utilisé pour les mesures discontinues. 	<ul style="list-style-type: none"> * utilisé pour des études scientifiques particulières : * Recueillir un échantillon à des intervalles de temps déterminés (ex: au cours d'une crue). * Utilisé en général pour des cours d'eau transportant de l'argile ou des limons. * En général installé de façon permanente avec une prise d'eau fixé dans les cours d'eau à un point déterminé d'une verticale.

II) Appareils de mesures "In Situ" de la concentration des sédiments

Dans le but d'une bonne compréhension des mécanismes qui contrôlent la répartition des sédiments en suspension, il est recommandé l'utilisation des instruments permettant une mesure continue et in situ de la turbidité. Car tous les échantillonneurs classiques que nous avons vu dans le chapitre précédent présentent l'inconvénient qui est en effet, la durée assez longue, en général supérieure à 24 heures, des opérations de prélèvement, ainsi que l'analyse en laboratoire. Ce qui fait que la détermination de la concentration n'est pas immédiate.

Comme avantage de ces procédés de mesure "in situ", est que la variation de la concentration en un point peut-être enregistrée d'une façon continue durant de longues périodes.

La mesure in situ est basée sur :

a) soit l'utilisation des effets d'absorption ou dispersion de la lumière;

b) soit sur l'utilisation de la radioactivité par transmission où la source est artificielle, ou de la radioactivité naturelle des sédiments.

II-1) Principes et appareillage des turbidimètres optiques et ultrasons.

Le principe des turbidimètres optiques repose sur la mesure soit de l'absorption d'un rayon lumineux, soit de la dispersion de la lumière par l'eau turbide.

Un certain nombre de facteurs intervient également, en particulier la forme, la couleur et la nature minéralogique des particules.

Enfin La longueur d'onde du rayonnement optique le rend facilement absorbable par la matière en suspension. Compte tenu de ces limites, il est donc difficile de s'attendre à de bons résultats sauf dans le cas d'une concentration faible de grains ayant sensiblement le même diamètre (sédiment monodispersé). L'emploi de ces appareils est limité à faibles concentrations, de l'ordre de 20 g/l.

Pour des instruments optiques et pour des sédiments monodispersés de granulométrie supérieure à 1 μm : on a :

$$\boxed{V_{\text{rec}} = V_{\text{em}} \cdot e^{-\beta}} \quad (40)$$

V_{rec} : signal reçu.

V_{em} : signal émis.

β est donnée par la formule : $\boxed{\beta = h \cdot \frac{1}{d} \cdot cx}$ (41)

où

x : distance émetteur - récepteur.

c : concentration de sédiments.

d : diamètre de la particule.

h : coefficient qui dépend des propriétés du sédiment.

Pour des instruments à ultrasons, la forte dépendance du signal reçu avec la taille des sédiments est beaucoup plus complexe, compte tenu du retard de vibration des particules en suspension par rapport aux ondes ultrasonores et de la perte d'énergie qui dépend de la taille des sédiments.

Il existe des appareils de mesure de concentration (3g/l) et qui ont été expérimentés dans l'estuaire de la Gironde [17].

Ces appareils ont été réalisés par la British Dock Board (1970).

Les services d'E.D.F à CHATOU (FRANCE) ont aussi mis au point un turbidimètre optique basé sur l'utilisation des cellules

photo-électriques pour la mesure de la turbidité (fig:III.1).

En fin on peut dire que ces méthodes optiques permettent d'éviter le prélèvement et l'analyse d'innombrable échantillons.

L'impossibilité d'appliquer ces méthodes pour des concentrations plus élevées est à la base du développement des jauges radioactives de turbidimétrie.

II-2 Rappels sur l'interaction du rayonnement électromagnétique avec la matière.

L'interaction des photons avec la matière s'effectue par la transfert de leur énergie aux éléments constitutifs du milieu.

Ce phénomène est décrit principalement par les trois processus suivants :

a)- Effet photo-électrique:

Les photons sont des particules sans charge ni masse, ils sont caractérisés par leur énergie.

Le photon disparaît et cède toute son énergie ($h\nu$) à un électron lié du milieu. Celui-ci acquiert donc une énergie cinétique

$$\boxed{E = h\nu - E_0} \quad (42) \text{ où } E_0 : \text{énergie de liaison de l'électron.}$$

b)- Effet Compton :

Le photon entre en collision avec un électron libre du milieu subit une déviation θ et perd une partie de son énergie $h\nu$.

Après la collision, il se produit une énergie $h\nu'$.

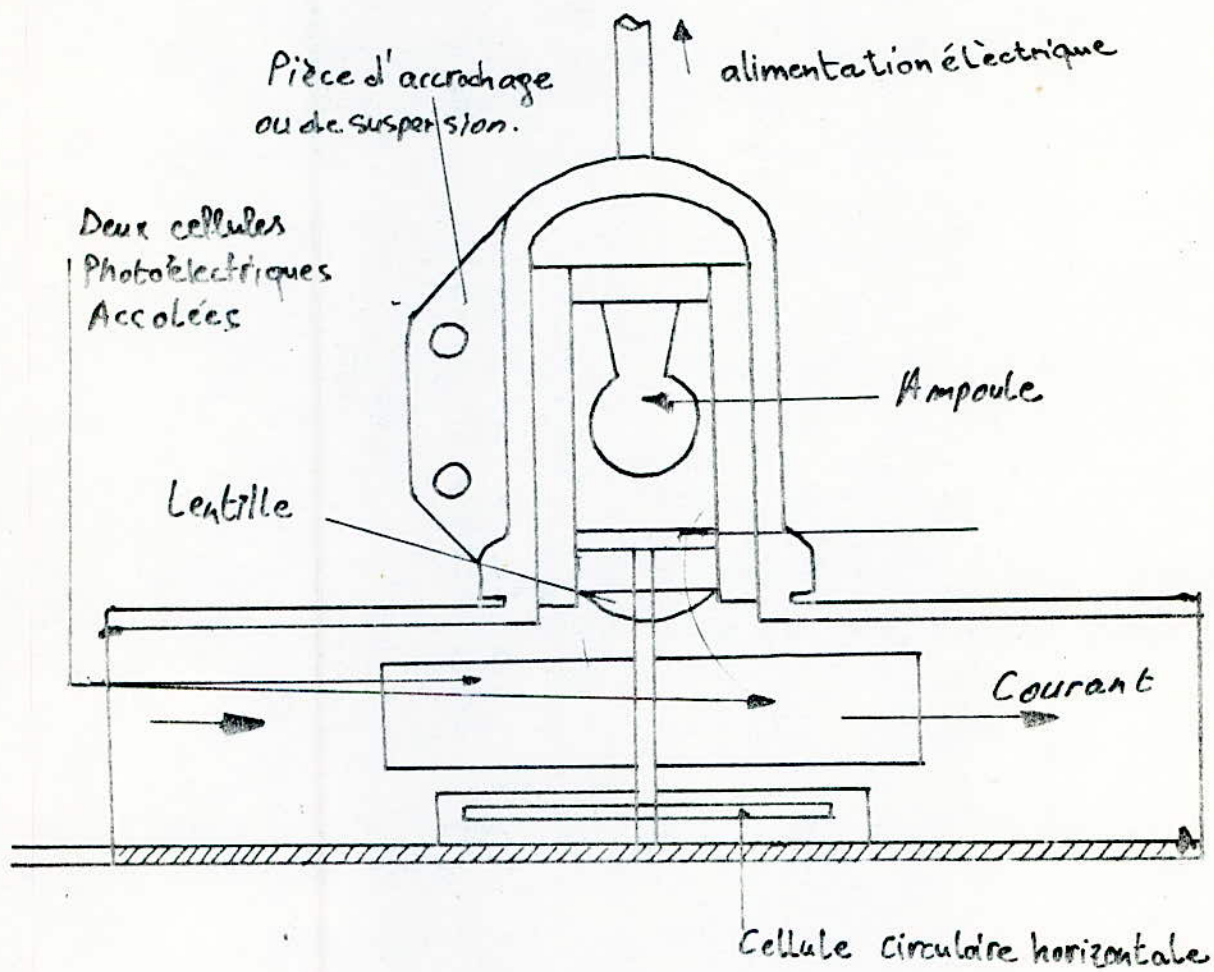


Fig:II-1- Turbidimètre Photoélectrique EDF

Donc l'énergie cinétique de l'électron après interaction est :

$$\boxed{E = h\nu - h\nu'} \quad (43)$$

où $h\nu$: énergie du photon incident.
 $h\nu'$: énergie du photon diffusé.

c) - Effet de création de paire :

Cet effet ne se produit que lorsque le rayonnement incident possède une énergie supérieure à $2 m_0 c^2 = 1,022$ Mev. nécessaire à la production de l'effet.

Le photon peut au voisinage d'un champ électromagnétique intense (noyau d'un atome) se matérialiser en donnant naissance à une paire d'électron - positron.

L'excédent d'énergie ($E - 1,022$) Mev est communiqué sous forme d'énergie cinétique aux deux particules. L'électron créé se ralentit dans le milieu, le positron s'annihile avec un électron du milieu après ralentissement. L'énergie de masse $2m_0 c^2$ ainsi libérée se traduit sous la forme de deux photons γ de 0,511 Mev, émis chacun à 180° l'un de l'autre.

II-2-1) Loi d'absorption du rayonnement gamma.

A) Absorption des photons n'ayant subi aucune interaction.

Le photon γ qui a subi une interaction Compton en traversant le milieu ne peut-être détecté bien que l'angle de déviation soit très faible.

Dans un tel cas si N_0 représente le taux de comptage observé en absence de milieu interposé entre la source et le détecteur, le taux de comptage N observé en présence d'un milieu interposé d'épaisseur X sera donné par :

$$\boxed{N = N_0 e^{-\mu x}} \quad (43)$$

μ : coefficient d'absorption linéaire total exprimé en cm^{-1} .
 x : épaisseur exprimée en cm.

μ est donné par la formule :

$$\mu = N_a \sigma = \frac{N \cdot \sigma \cdot \rho}{A} \quad (45)$$

A : Nombre de masse de la substance constituant le milieu.

N : Nombre d'Avogadro = $6,62 \cdot 10^{23}$.

σ : Séction efficace totale d'interaction : somme des sections efficaces compton, photo-électrique, création de paire.

ρ : Densité du milieu.

N_a : Densité atomique du milieu.

Le coefficient d'absorption **Linéaire** total est donné par la formule suivante :

$$\mu_a = N_a (\sigma_c + \sigma_m + \sigma_{pp}) + Z N_a \sigma_c \quad (46)$$

où

σ_c : Section efficace compton.

σ_m : Section efficace photoélectrique.

σ_{pp} : Section efficace de création de paire.

Z : Numéro atomique.

. Le coefficient d'atténuation massique est défini par :

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma}{m} \quad (47)$$

où

m : masse du noyau diffuseur.

- Seul l'effet compton est relatif à un seul électron. L'atténuation des photons par la matière est due, soit à une absorption totale comme dans l'effet photoélectrique, soit à une diffusion compton qui est en général inélastique.

L'effet compton devient dominant pour les valeurs

d'énergie supérieures à 500 kev.

Aux énergies plus basses des photons, l'effet photoélectrique est prédominant.

B) Absorption des photons détectés subissant une interaction Compton.

La loi d'absorption précédente reste applicable à condition d'introduire le facteur correcteur (β) dans l'équation (43) où on a :

$$\boxed{N = N_0 \beta e^{-\mu x}} \quad (48)$$

où β est le facteur de Build-up, dû à la diffusion Compton multiple. Ce facteur est une fonction de l'énergie E et de l'épaisseur du milieu interposé entre source-détecteur. Il est particulièrement important pour les matériaux légers où l'effet Compton est relativement plus important que les effets photoélectriques et de productions de paires.

11-3) Jauges nucléaires:

Durant les vingt dernières années, plusieurs jauges nucléaires ont été mises au point par différents auteurs /5,6,11,12,17,20/ mais très peu d'entre elles ont été employées pour des mesures directes en compagnie.

Les jauges radioactives de turbidimétrie sont constituées d'un ou plusieurs détecteurs qui permettent de mesurer la diffusion ou l'absorption par le milieu turbide d'un rayonnement x ou γ émis par une source radioactive (Am^{241} , Cd^{109} , Cs^{137}). Le type de l'appareil est caractérisé par la géométrie de détection et la nature de la source.

11-3-1) Jauge C.A. Ziegler:

La Jauge C.A. Ziegler est réalisée par la société Panametrics Inc. Waltham; Massachusetts, /1/. Son principe consiste à comparer l'absorption du rayonnement x de 22 kev émis par une source radioactive de Cd^{109} de période égale à 470 jours, par l'eau

distillée avec son absorption par l'eau turbide (fig II-2).

Le rapport des intensités des deux rayonnements est fonction du rapport des densités des deux liquides.

Cette jauge est utilisée pour une gamme de concentration allant de 1 à 50 g/l avec une précision d'environ 20%.

Mais cette jauge présente quelques inconvénients parmi lesquels, on cite :

- une distance faible entre source-détecteur qui est de 8 cm;
- une faible énergie du rayonnement émis par la source radioactive de cd^{109} ,
- la courte durée de vie de la source et son prix élevée.

II-3-2) Jauges de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA):

Deux jauges ont été réalisées par J.F Comeron et T. Florowski /17/.

Ces Jauges utilisent, deux sortes de sources, l'une à cd^{109} de 2m ci, l'autre à Am^{241} de 100mci pour des performances voisines: notamment pour la jauge cd^{109} . Elles sont plus simples et aisément portatives.

Ces jauges sont applicables pour les cours d'eau peu profonds (2 à 3 mètres), aussi bien que pour des larges rivières (plus que 10 mètres). Certains auteurs donnent une précision de $\pm 0,3$ g à une concentration de 10 g/l, pour un temps de comptage de 3 minutes, ce qui est assez optimiste compte tenu de l'absence de cellule de référence. La jauge de l'AIEA est représentée dans la figure (II-3).

II-3-3) Jauge de l'Us, département of Agriculture MSG.II :

J.R.Mc HENRY et des collaborateurs (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE) /1/, ont présenté une nouvelle sonde en 1965 au cd^{109} (MS.GII) d'une sensibilité supérieure aux précédentes, et cela après avoir procédé à des essais pour comparer les sondes de l'AIEA et celle de la panametrics.

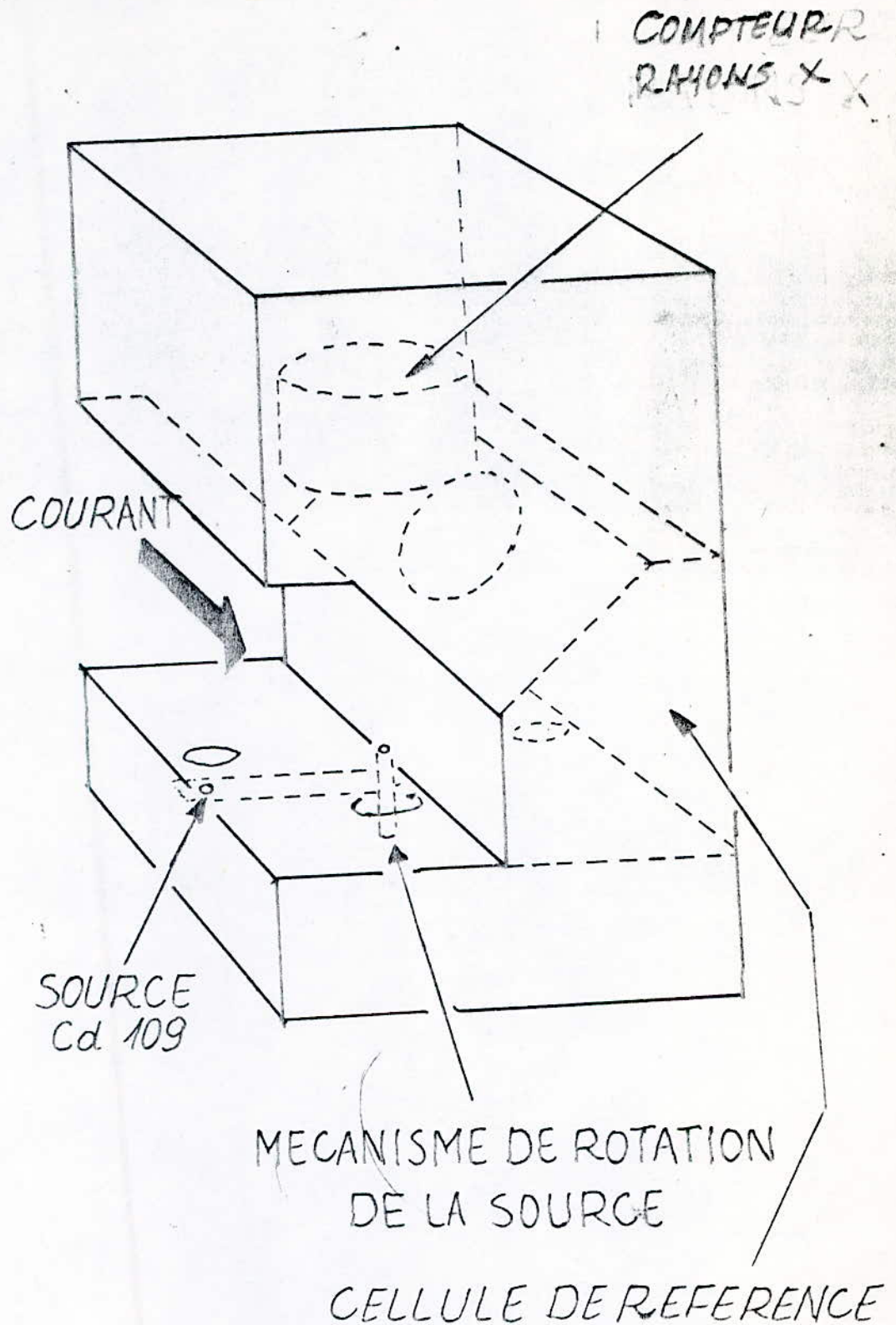


Fig. II-2 : Sonde « Panametrics » : représentation schématique de la tête de mesure

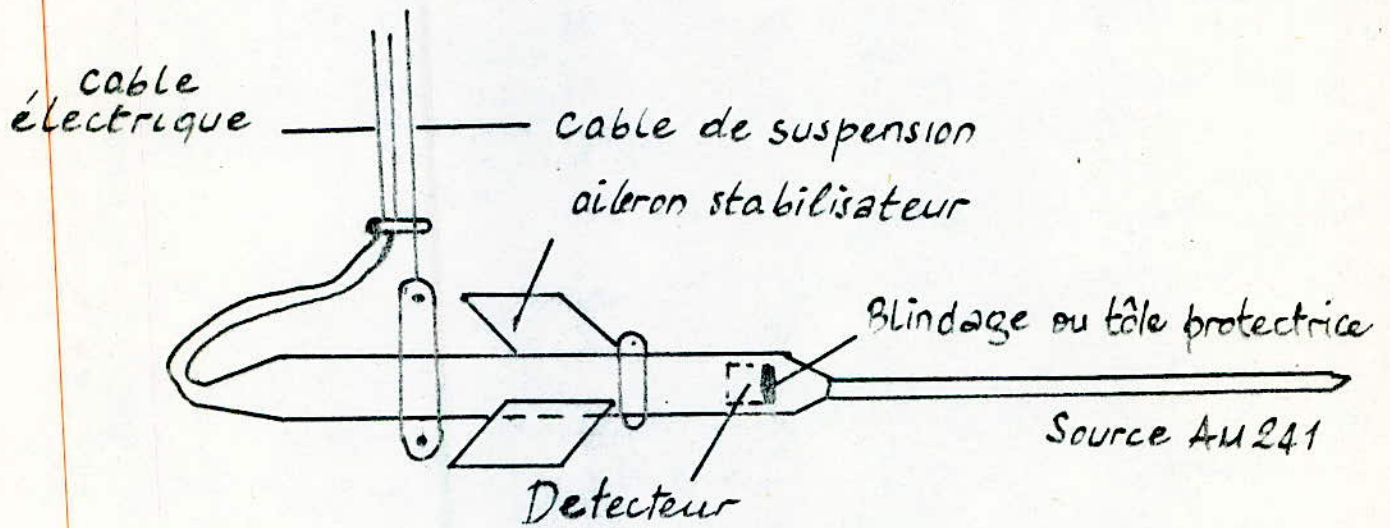


Fig. II-3 . Jauge de l'Agence Internationale
de l'Energie Atomique

11-3-4) Jauge nucléaire de la société Atome Industriel :

Le bâti de cette sonde est prismatique à base rectangulaire en acier inoxydable [fig II-4]. La source est un dépôt de 100 mci de ^{241}Am d'activité portée à sec dans une coupelle d'acier, scellée dans une enveloppe en plastique. Le détecteur est en cristal d'iodure de sodium (NaI/TL) associé à une sonde SPP3 et une échelle de comptage ECP2.

La source et le détecteur peuvent être déplacés l'un par rapport à l'autre en fonction de la turbidité. La distance optimale se situe à 32 cm pour des turbidités inférieures à 30 g/l.

La sonde que nous décrivons, constitue un matériel lourd et assez peu maniable, réalisé à partir d'une électronique de laboratoire.

11-3-5) Jauge à transmission de l'institut hongrois de recherche et de développement des ressources hydrauliques :

Cette jauge a été développée récemment. Son principe repose sur la transmission d'un faisceau de rayonnement émis par une source d'Am-241. La source et le détecteur sont placés solidement dans un tube métallique, perforé de 100 mm de diamètre (fig II-5).

11-3-6) Jauges à transmission de G.S TAZIOLI :

Ces jauges ont été mises au point en ITALIE en 1976 /3/. Elles sont caractérisées par un fonctionnement automatique et une autonomie pratiquement illimitée. Elles ont été installées dans les cours d'eau naturels à régime torrentiel, caractérisés par des transports solides grossiers.

Deux types de sources ont été utilisées :

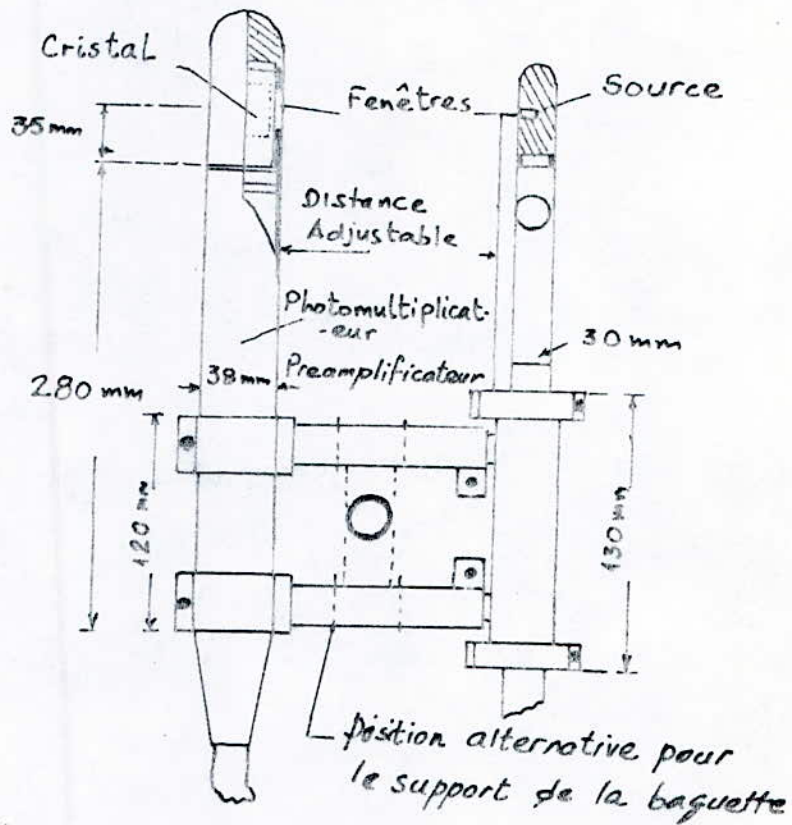


Fig: II-4 : ATOMIC ENERGY AGENCY SEDIMENT
 CONCENTRATION GAUGE (^{241}Am)

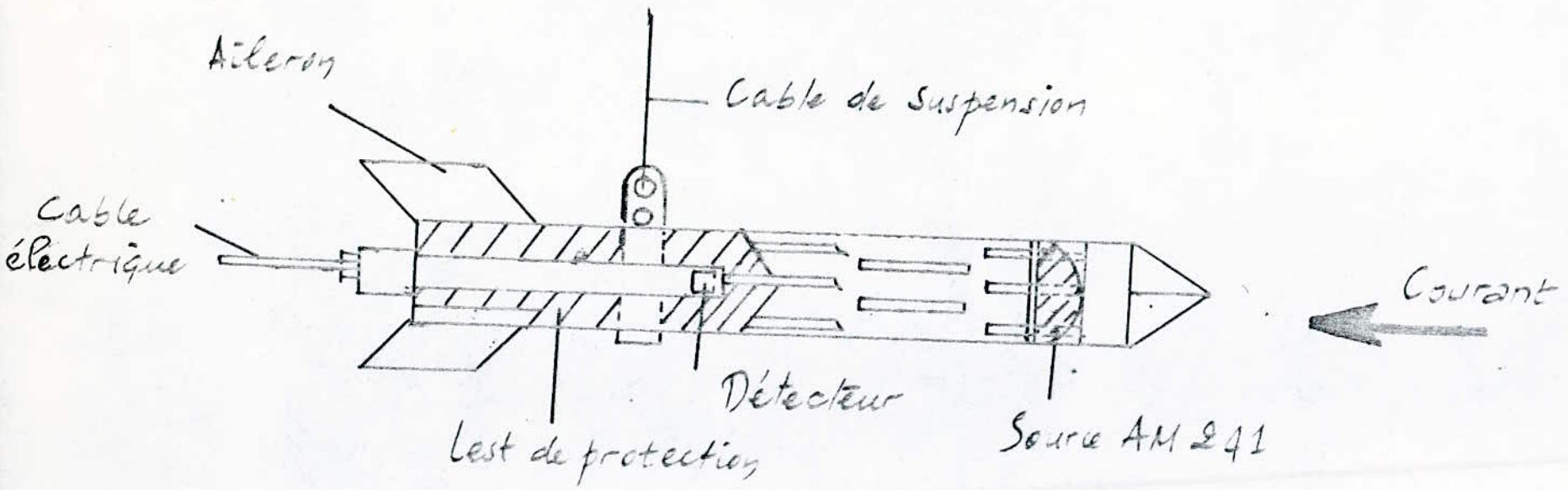


Fig. II-5 . Jauge à transmission (Hongrie)

a) Jauge à l'Am - 241 :

Cette jauge se compose d'une source de 100 mci d'Am - 241 et d'un détecteur gamma, contenus dans deux tubes d'acier, maintenus à une distance de 0,32 m par une plaque d'acier rectangulaire.

La structure est fixée sur le lit du cours d'eau par un mur de béton et un tube d'acier à une distance de 1 m par rapport à l'une des rives du cours d'eau (fig II-6). Elle est reliée à une cabine à 40 m plus loin par un câble multiconducteur sous terrain.

La détection et l'enregistrement se fait par des équipements électroniques que nous décrivons plus loin dans le chapitre (III).

b) Jauge au cs - 137 :

Cette jauge est constituée d'une structure mécanique rigide formée de deux tubes en acier de 9 mm d'épaisseur distants de 0,90 m l'un de l'autre. Le premier tube contient le détecteur tandis que le second ^{contient} la source radioactive de 150 mci. La jauge peut être installée en permanence dans un cours d'eau et permet des mesures de concentration des sédiments en suspension dans une section de 0,90 x 0,30 m (Fig. II-7)

La section jaugée se situe entre 0,20 et 0,5 m du fond. La jauge est installée dans un canal venturi de 16 m de long et de 2,10 m de haut, dans un bassin versant de sud Italien où elle a fonctionné durant cinq ans. La cabine est à 20 m du cours d'eau.

Dans le chapitre suivant, les équipements de détection et d'enregistrement sont présentés.

Ces jauges ont un fonctionnement automatique grâce à un interrupteur qui déclenche l'électronique lorsque le niveau de l'eau dépasse 0,35 m par rapport au fond du canal et la désactive 40 minutes après la retombée du niveau du dessous de ce seuil.

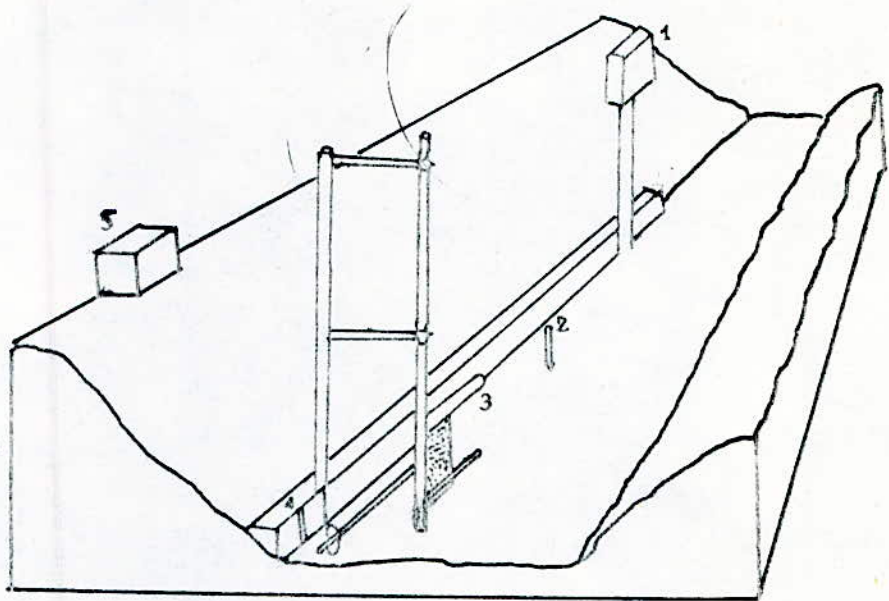


Fig: II - 6 Jauge à l'Am-241. pour la mesure de la concentration des sédiments.

- 1: Limnigraphe;
- 2: tige métallique, attrape débris;
- 3: Jauge à l'Am 241;
- 4: Switch d'activation;
- 5: Cabine contenant l'électronique de comptage et d'impression.

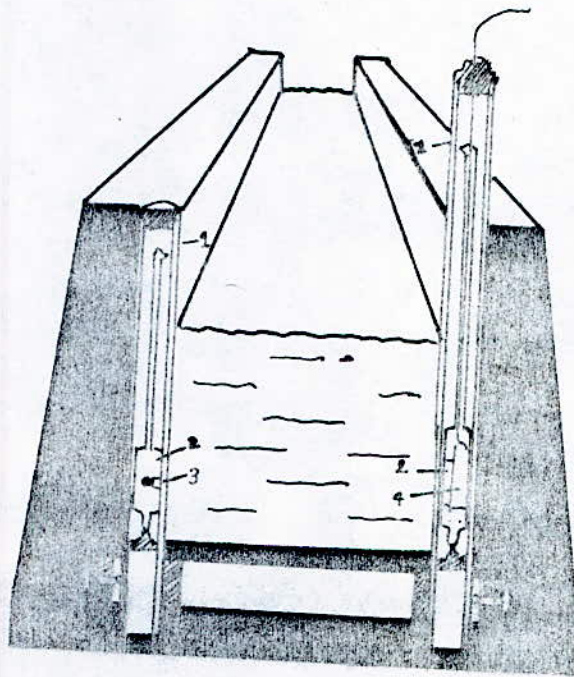


Fig: II - 7 Dispositif pour la mesure des sediments en suspension
(D'après G.S. TRZIOLO, 1976)

- 1: Tube d'acier de 9mm d'epaisseur;
- 2: collimateur de plomb;
- 3: Source de Cs-137 de 100mCi;
- 4: Sonde à scintillation pour rayonnement gamma.

II-3-7) Jauge à diffusion :

L'AIEA a réalisé une jauge à diffusion /20/ où la source est de 100 mci d'Am-241 (fig II-3). Cette jauge est solidaire d'une tige métallique, qui sort du cylindre contenant le détecteur. En général les jauges à diffusion des rayons gamma, utilisant une source d'Am-241 de 100 mci sont utilisées pour des faibles concentrations à partir de 1-2 g/l.

Les jauges à diffusion sont plus sensibles et précises mais la sensibilité est insuffisante dans le cas des faibles concentrations.

III) Principe de fonctionnement des jauges nucléaires :

Le principe est basé sur l'interaction des photons avec le milieu testé. cette interaction s'accompagne par une perte d'énergie partielle ou totale du photon. Ce phénomène est décrit principalement par deux effets, qui ont été présentés dans le chapitre précédent.

Le dispositif expérimental de la jauge nucléaire "LABEN" est décrit comme suit :

III-1) Déscription du dispositif expérimental :

Au laboratoire on utilise un banc de mesure pour les turbidités ou de densité des roches, ce banc est composé de :

- La jauge nucléaire.
- Ictomètre IPP4. SAPHYMO \pm STEL ,
- Echelle de comptage ECS 1 - NARDEUX ;
- Interface IEC 1 - NARDEUX ;

- Imprimante IPN 2;

a) La jauge nucléaire :

Elle comprend un détecteur muni d'un cristal NaI (TL) et d'une source d'Am - 241 de 100 mci.

b) Ictomètre

C'est un appareil qui assure principalement les fonctions suivantes:

- Alimentation du détecteur (12V)
- Sortie sur échelle de comptage.
- Sortie sur enregistreuse.
- Lecture directe du nombre de chocs/seconde.

c) Echelle de comptage ECS 1:

C'est un appareil qui compte des impulsions provenant du détecteur pendant des temps préfixés.

d) Interface TEC 1

Il permet en choix des temps de comptage et des temps d'attente qui sont ajustables entre 1 et 9999 sec , et le fonctionnement cyclique de l'échelle EC5 1 .

e) Imprimante IPN 2

L'imprimante permet l'enregistrement des résultats disponibles en sortie de l'échelle de comptage .

III)-2 Fonctionnement de la jauge " LABEN "

La jauge " LABEN " est une jauge à transmission mise au point par la société LABEN de MILAN (ITALIE) , équipée d'une source d'Am-241 de 100 mci .

La structure métallique est constituée de trois châssis réglables en fer, contenant un tube porte-détecteur et une tête porte-source (Fig.III-1). Le solide d'influence peut être réglé par un collimateur en plomb. Ce solide d'influence est défini comme étant le volume existant dans le milieu testé, et à l'intérieur duquel une partie du flux émis par la source peut rejoindre le détecteur

Il est clair qu'une partie seulement du flux émis peut atteindre directement le détecteur sans subir d'interaction dans le milieu, et qu'une autre partie subit une série de diffusions compton avant d'atteindre le détecteur. Voir la figure(III-2).

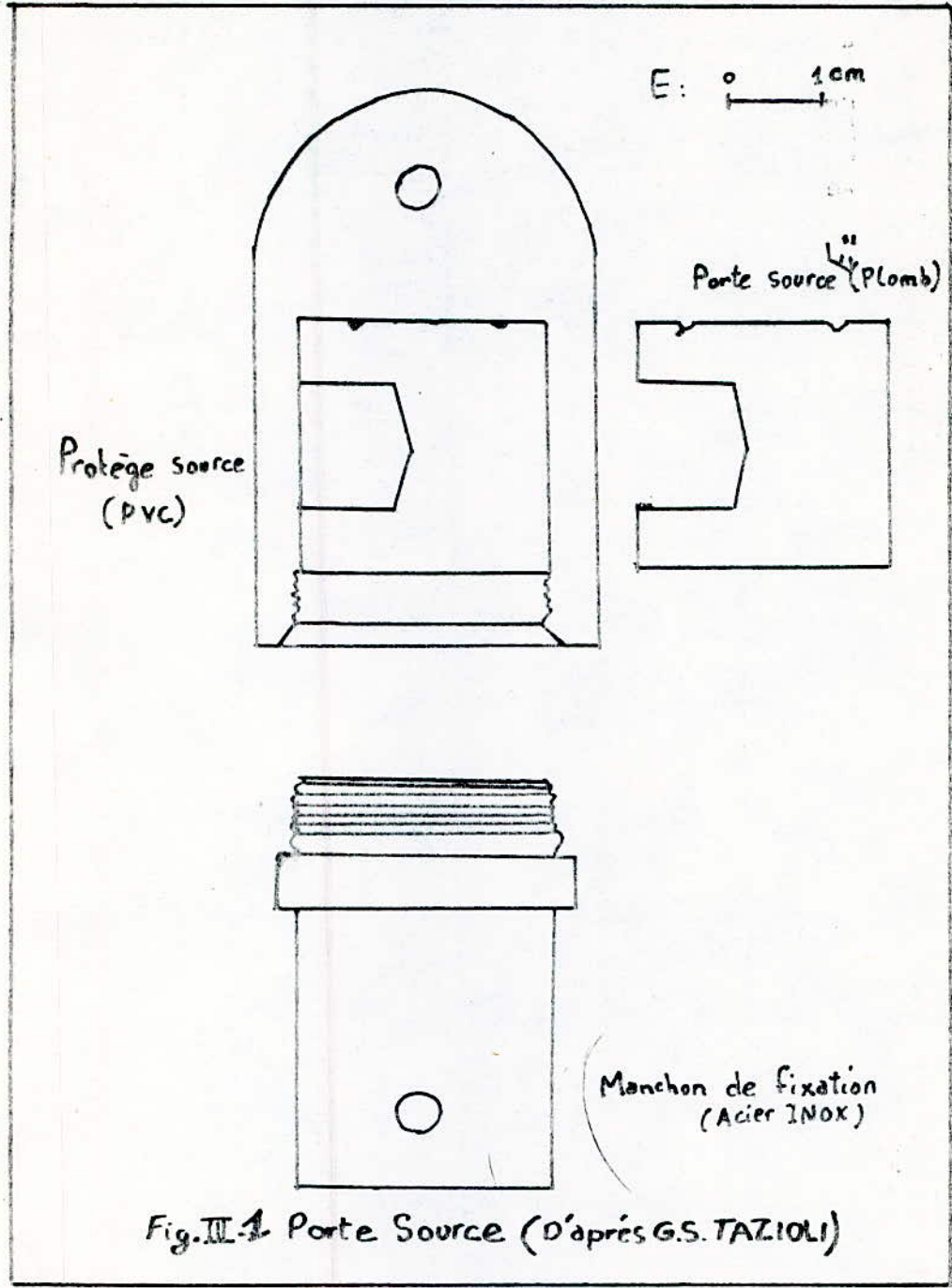
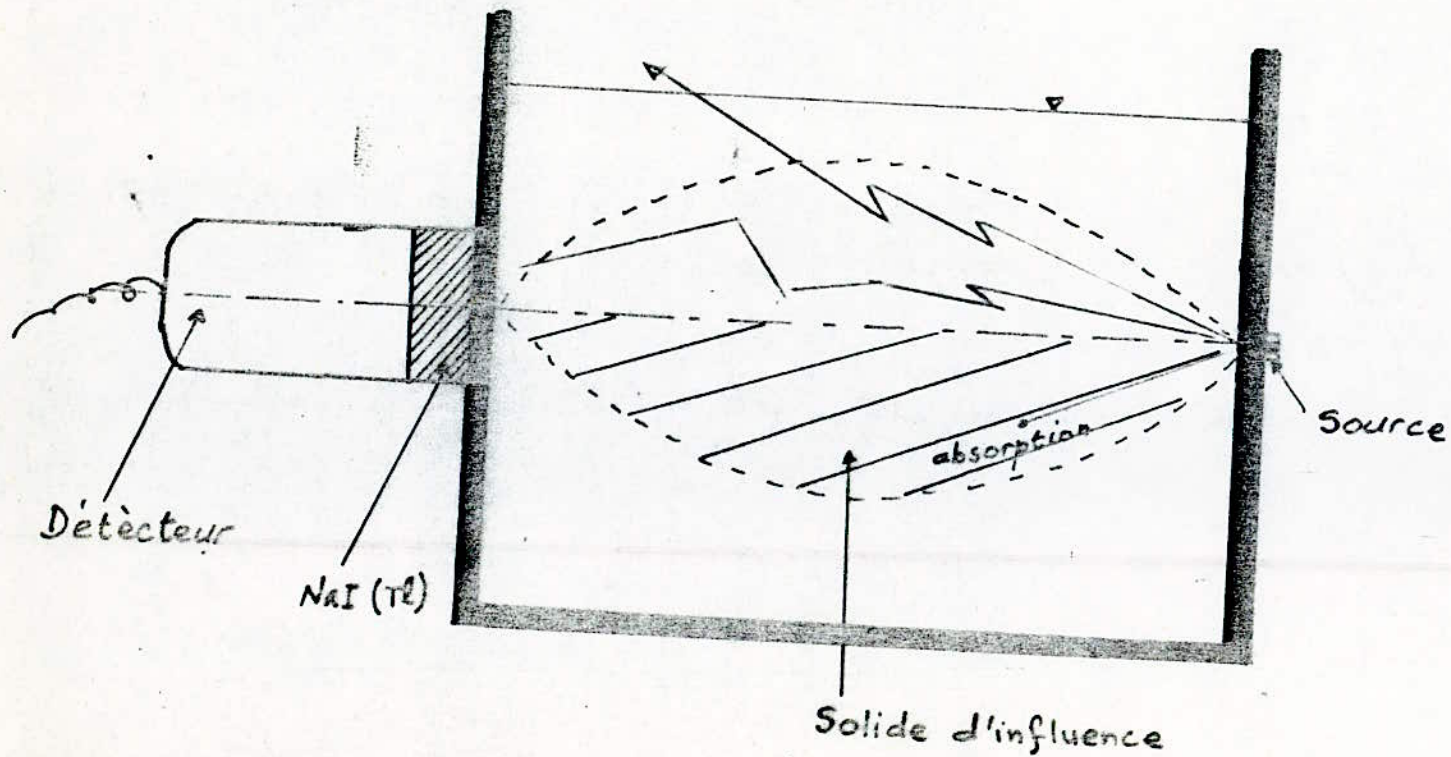


Fig. III-1 Porte Source (D'après G.S. TAZIOLI)

FIG III-2 SOLIDE D'INFLUENCE



Cette jauge est noyée dans un canal en béton pouvant résister à des conditions hydrodynamiques très critiques.

Dans le but de faire un déclanchement automatique de l'électronique de la jauge LABEN, on a fixé une sonde conductimétrique dont la fonction principale consiste à émettre un signal à l'alimentation, chaque fois qu'elle est complètement immergée, elle joue donc le rôle d'un détecteur du niveau d'eau elle est disposée, en compagnie, à une hauteur qui dépend de la hauteur du solide d'influence c'est à dire que le jaugeage d'un volume d'eau doit être entièrement contenu dans le solide d'influence.

La jauge "LABEN" à un équipement électronique contenu dans un container étanche (fig III-3). Cet équipement est placé dans une cabine en maçonnerie à 50 mètre de la sonde.

La sonde est reliée à la cabine par un câble électrique multiconducteur sortant du détecteur.

Le fonctionnement :

Quand la sonde conductimétrique est noyée, l'électronique se déclanche.

Le flux émis par la source à travers le milieu turbide est capté par le détecteur qui est relié à l'échelle de comptage (Sc) et au timer (TM); ce dernier à pour but le contrôle du fonctionnement de l'échelle de comptage et de l'imprimante.

L'enregistrement des chiffres provenant de l'échelle de comptage et des deux chiffres des cycles de mesure se fait sur un rouleau de papier.

Le fonctionnement est complètement automatique avec une autonomie pratiquement illimitée.

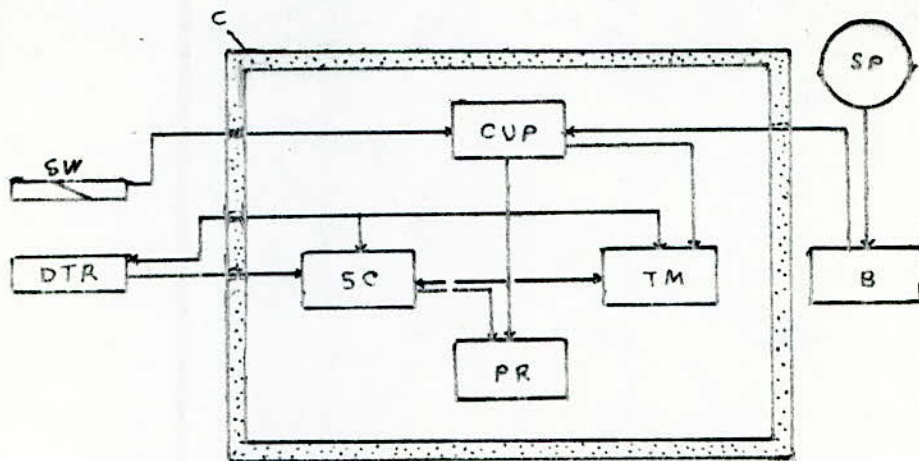


Fig:III-3 : BLOC-DIAGRAMME DE L'EQUIPEMENT LABEN (ITALIE)

C : CONTAINER ETANGHE

CUP : ALIMENTATION ET CONTROLE AUTOMATIQUE

DTR : DETECTEUR A SCINTILLATION GAMMA

SC : ECHELLE DE COMPTAGE

TM : TIMER

PR : IMPRIMENTE

B : BATTERIE

SC : PANNEAU SOLAIRE

SW : Sonde CONDUCTIMETRIQUE

IV) Principe de mesure par les jauges nucléaires:

IV-1) Mesure de la concentration des sédiments en suspension :

La mesure de la concentration des sédiments en suspension est basée sur l'atténuation des rayons, émis par une source d'Am²⁴¹ à travers un milieu turbide.

La source peut-être disposée à une distance variable du détecteur. Cette distance ayant un effet important sur la sensibilité de mesure, doit être optimisée à la base de données, sur la sensibilité et le volume d'influence qu'on veut jauger. /18/.

L'américium a été choisi pour les raisons suivantes :

- Sa longue période radioactive (458 ans).
- La faible énergie de la radiation émise (60 kev) permet d'obtenir des bonnes sensibilités de mesure.
- Les risques d'irradiation du personnel entourant la jauge sont relativement faibles.

IV-2) Procédés de mesures:

Les jauges nucléaires doivent-être étalonner avant l'emplacement au niveau des cours d'eau. Pour cela, il est indispensable de déterminer le solide d'influence expérimentalement au laboratoire et sur le site.

IV-2-1) Détermination expérimentale du solide d'influence :

Une petite cuve de simulation est équipée d'un détecteur et d'une source d'Am - 241, d'activité 100 mci. Le détecteur est maintenu dans une position fixe, tandis que la source est disposée à des distances successives par rapport au détecteur. Ceci a été réalisé au moyen de la structure mécanique représentée en fig (IV-1).

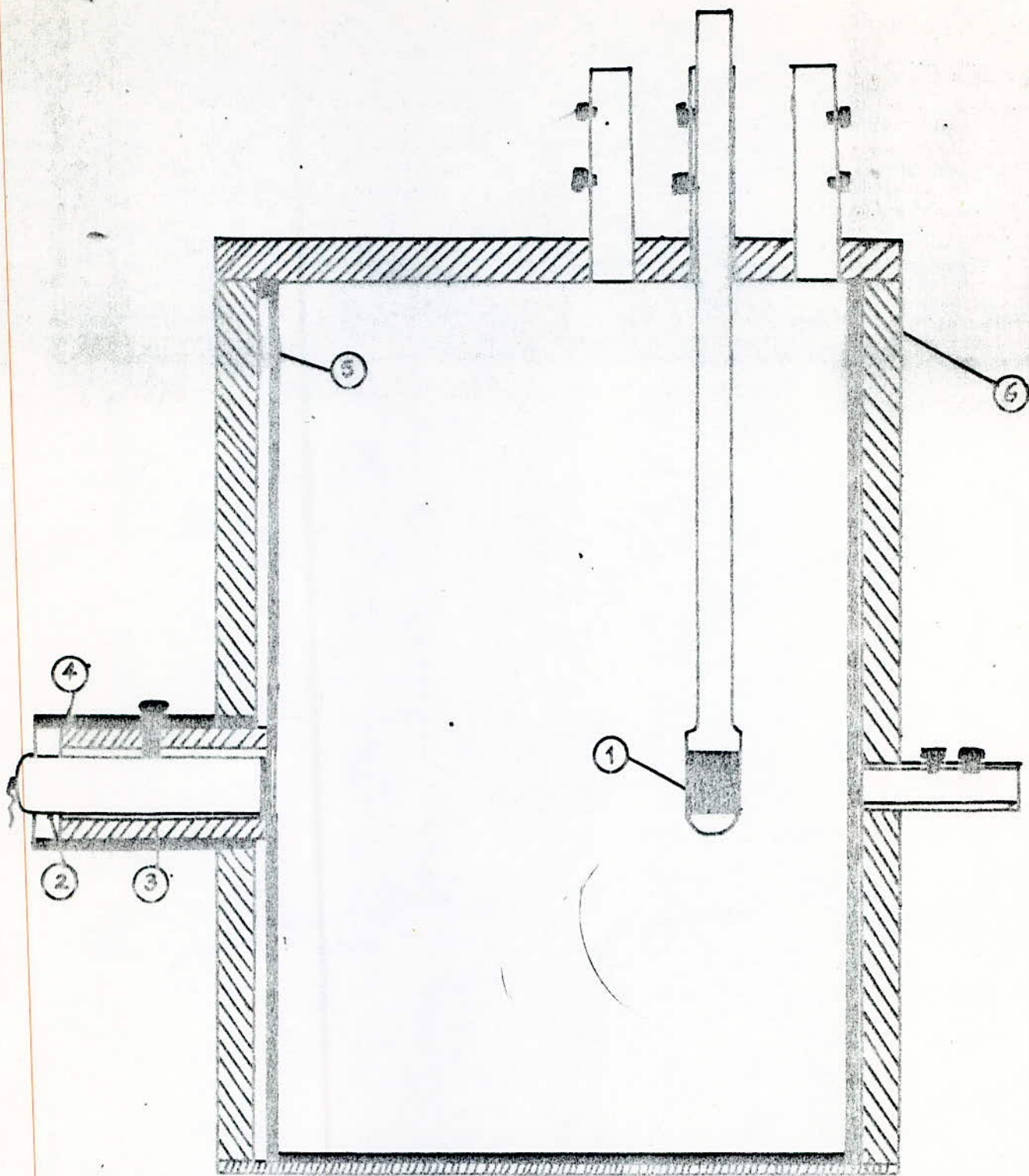


Fig. IV-1 : Petite cuve de simulation

- 1: Source Am²⁴¹ 100 mCi ; 2: détecteur à scintillation NaI(Tl)
 3: Colimateur de plomb ; 4: tube en acier ; 5: cuve (foam x foam)
 6: structure en mécanique en tube d'acier

E: 0 ————— 5cm

De point de vue expérimental la cuve est remplie d'eau claire à une hauteur inférieure à celle de l'axe (source - détecteur) et le taux de comptage est enregistré. L'opération est ensuite répétée pour différentes hauteurs. Sur un graphe, on reporte en abscisses la hauteur en (cm) et en ordonnées le taux de comptage en (cps). La courbe $N_w = f(H)$, représentée en fig (IV-2), est ensuite tracée.

A partir d'une certaine hauteur (H), le taux de comptage devient pratiquement constant. En suite, on note donc la demi-hauteur H du solide d'influence qui servira à l'étalonnage de la jauge.

IV-2-2) L'étalonnage :

Le fonctionnement correct des jauges nucléaires dépend de l'étalonnage soit au laboratoire, soit in situ.

L'étalonnage a été réalisé au moyen d'une cuve de simulation.

Un étalonnage préalable est effectué au laboratoire avec des solutions salines et des sédiments fins, l'étalonnage définitif est ensuite effectué in situ après l'installation de la jauge, en utilisant les sédiments naturels du site.

Remarques :

Si en éloignant la source du détecteur dans les limites données par le constructeur nous réduisons la hauteur de la zone d'influence, nous gagnons en volume d'eau testé et en sensibilité.

Par contre si en rapprochant la source du détecteur la hauteur de la zone d'influence augmente cependant la perte en sensibilité est compensée par une grande linéarité de la courbe d'étalonnage (taux de comptage élevé). /18/.

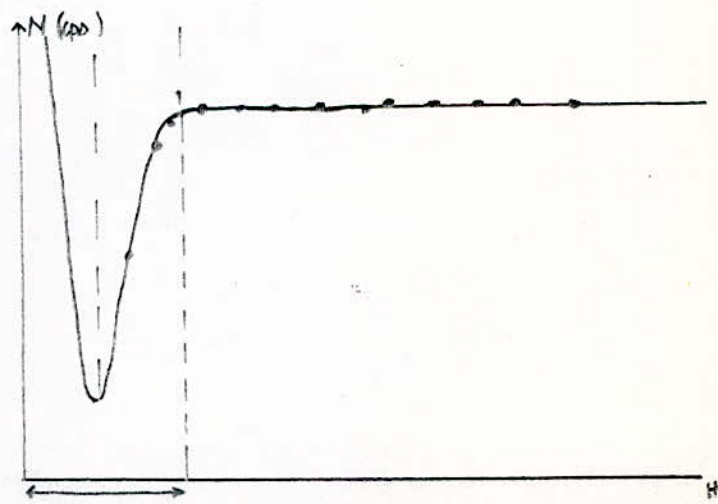
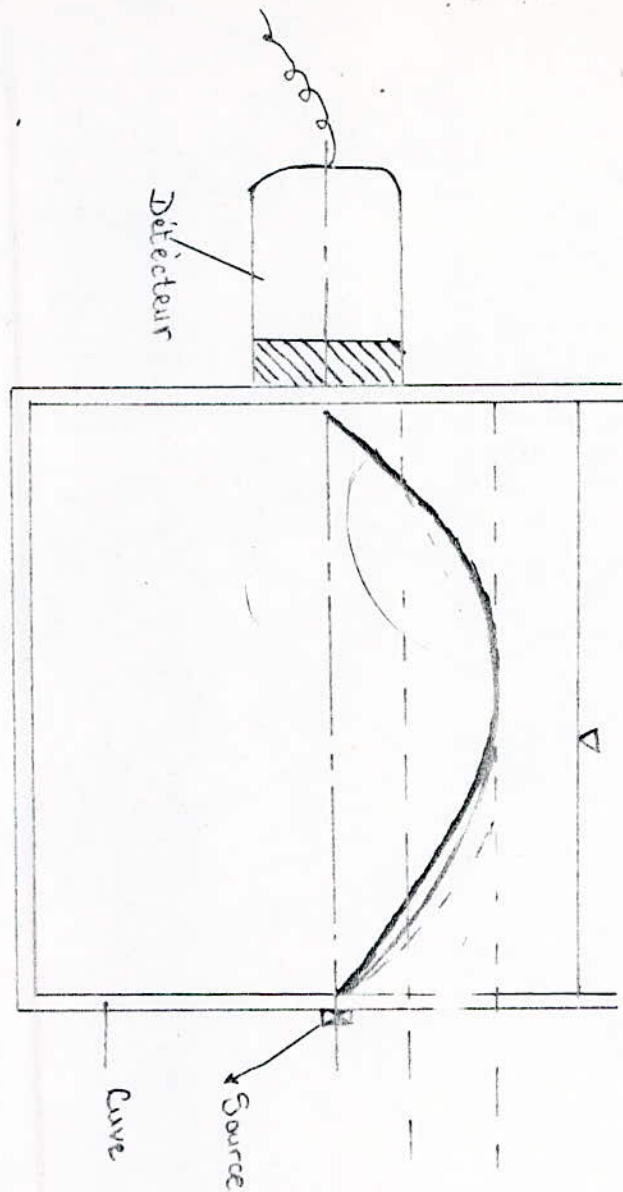


Fig. 2 : Détermination expérimentale du solide d'influence.

a) Mesure de la turbidité :

Pour obtenir une eau turbide avec une concentration $C(g/l)$ donnée, l'opération consiste à :

1) Dans une cuve de simulation contenant un volume V d'eau claire, on verse une quantité M d'un sédiment de composition chimique connue au préalable. La concentration de l'eau turbide est donnée : $c = \frac{M}{V}$.

2) Assurer que le niveau de la surface libre de l'eau dépasse la demihauteur du solide d'influence, ce dernier est déterminé expérimentalement.

3) Avant que l'on injecte le sédiment, une pompe commence à brasser l'eau dans le but d'assurer un maximum d'homogénéité dans la distribution des grains des sédiments dans l'eau.

4) Réduire à l'état poudre les sédiments utilisés, après un chauffage dans une étuve; on les concasse tantôt manuellement, tantôt à l'aide d'un concasseur à boules métalliques.

5) Après ces opérations, les sédiments sont dilués dans l'eau avant d'être introduits dans la cuve.

b) Contrôle de la turbidité :

La concentration des sédiments en suspension est contrôlée par gravimétrie. Elle consiste à des prélèvements d'échantillons à l'aide d'une bouteille pendant chaque mesure faite par la jauge.

c) Resultats :

Les prélèvements, pour chaque mesure, ont été fait en différents points de la cuve de simulation.

Donc à chaque concentration $c(g/l)$, on associe le taux de comptage relatif (N_s/N_w) .

où : N_s : taux de comptage (sédiment - eau) : eau turbide.

N_w : taux de comptage de l'eau claire.

une courbe d'étalonnage /20/ est représentée dans la fig (IV-3).

Remarque :

Pour obtenir de très fortes concentrations au laboratoire^{et} pour compléter la courbe l'étalonnage, il est possible d'utiliser soit solutions salines, soit les résultats obtenus lors de crues où le transport solide est important /18/.

VI-2-3-1) Etalonnage "in situ" de la jauge :

La jauge est placée au niveau du bassin selon les données obtenues au laboratoire, à savoir :

- La demi-hauteur du solide d'influence avec une marge de sécurité de 10 cm pour éviter l'effet de charriage.
- La distance optimale entre source et détecteur.

Afin de vérifier la courbe d'étalonnage obtenue au laboratoire, on procède à un étalonnage in situ.

Pour cela on construit une cuve au niveau de la jauge.

Les concentrations sont obtenues par des prélèvements dans différents points de la cuve, et pour chaque mesure on relève le taux de comptage N_t correspondant.

On trace la courbe $N_t/N_w = f(c)$ que l'on comparera avec celle : faite au laboratoire. Cette courbe est déterminée sur place. Elle représente la courbe d'étalonnage définitive de la jauge.

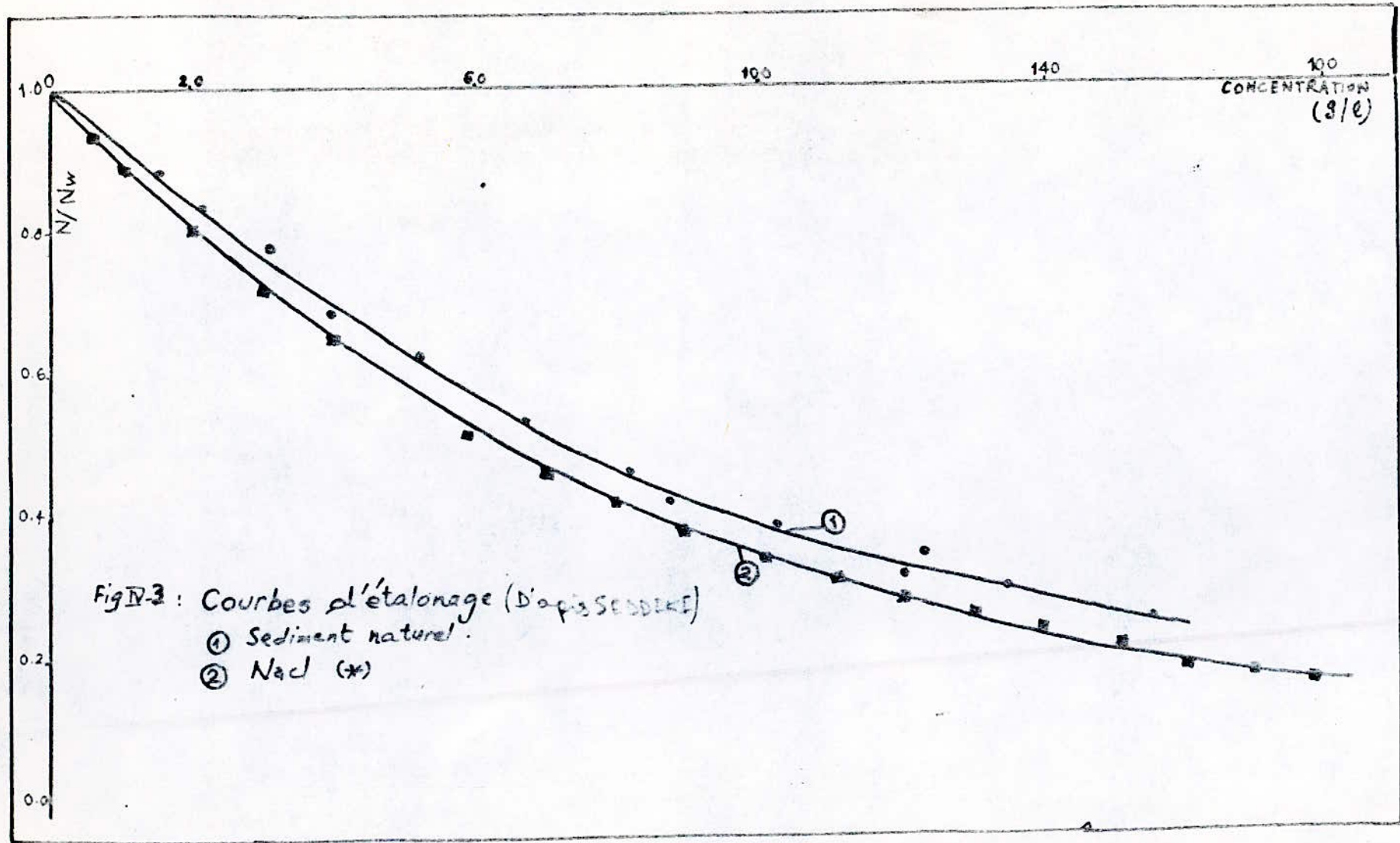


Fig IV-3 : Courbes d'étalonnage (D'après SEDDIKI)
① Sediment naturel.
② Nacl (*)

V) Exemple d'expérience de terrain :

La première jauge nucléaire pour la mesure du transport solide en ALGERIE a été installée, étalonnée et rendue opérationnelle les 27 et 28 Février 1984.

Cette jauge est du type LABEN, utilise une source d'Am-241 d'activité 100 mci. Le site choisi pour cette première installation a été le micro-bassin de Beni-Slimane B.S.21 N° 1 (fig V-1), (fig V-2) . Il s'agit d'un des micro-bassins retenus pour l'étude des formes d'érosion les plus répandues dans la région de l'oued ISSER . /20/.

V-1) Station de mesure sur le bassin B.S.21 N° 1 :

Cette station est équipée par un canal Neyrtec précalibré en béton, dont les dimensions sont les suivantes :

- Longueur : 31 m.
- Largeur : 4 m.
- Hauteur : 1,5 m.
- La pente est d'environ : 0,5%.

Le transport solide en suspension est constitué par des argiles limoneuses, un faible transport par charriage constitué par des galets de diamètre variant entre quelques centimètres jusqu'à 10 cm.

Dans le but d'obtenir des tirants d'eau, en crues ordinaires, supérieures à 10 ÷ 20 cm et des vitesses d'écoulement très faibles, engendrant de sensibles gradients de concentration des sédiments en suspension, il a été réalisé à l'amont du canal Neyrtec, un petit canal en béton de 0,35 m de large, 0,40 m de hauteur et 8 m de long (fig: V-2)

La mesure du transport solide s'effectue dans une section comprise entre 10 et 30 cm du fond du canal.

Les conditions d'écoulement dans ce canal pendant les crues, devraient permettre une distribution homogène des sédiments en

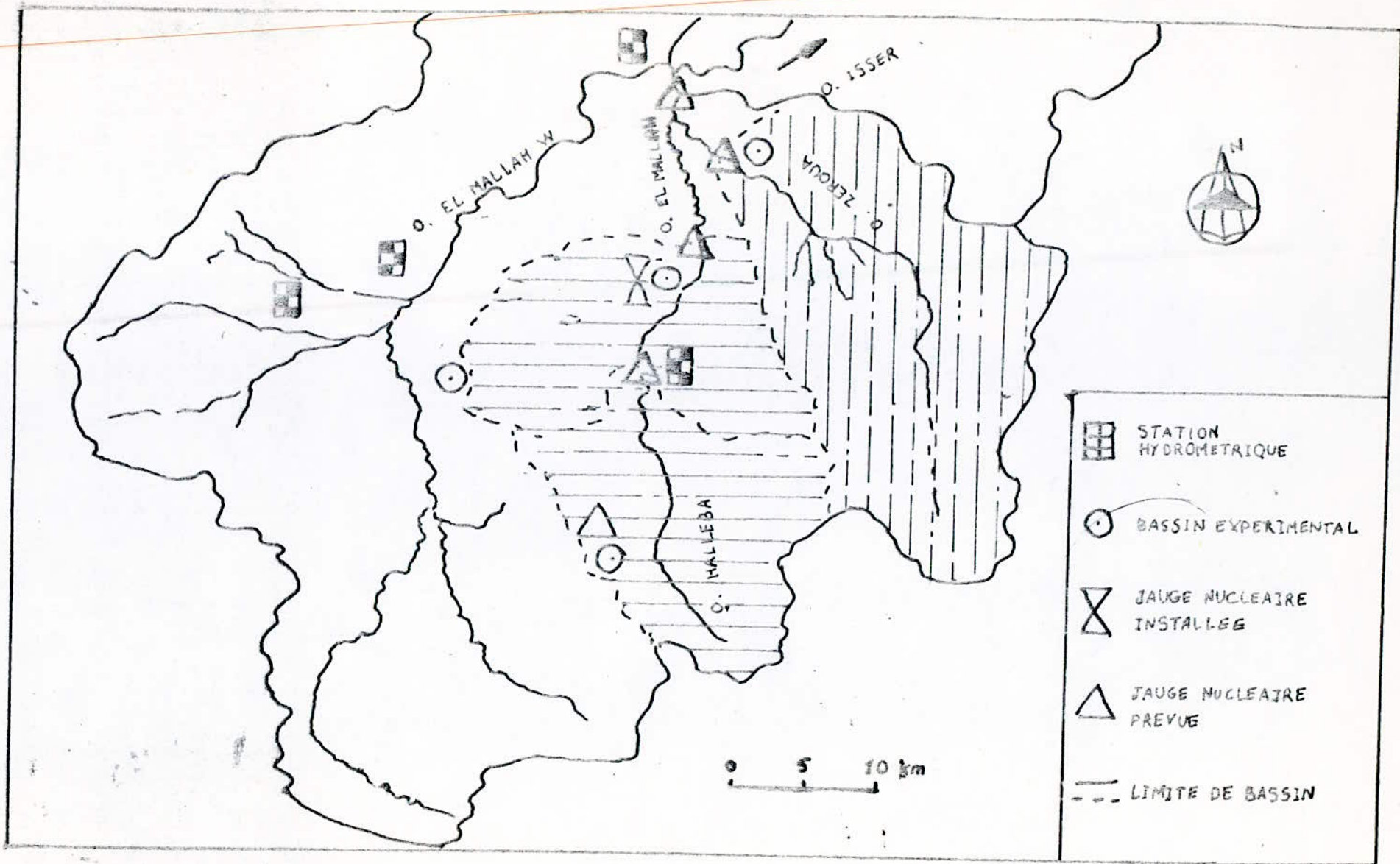


Fig. V-1 - Stations de mesure choisies pour l'installation d'équipements nucléaires pour la mesure du transport solide en suspension

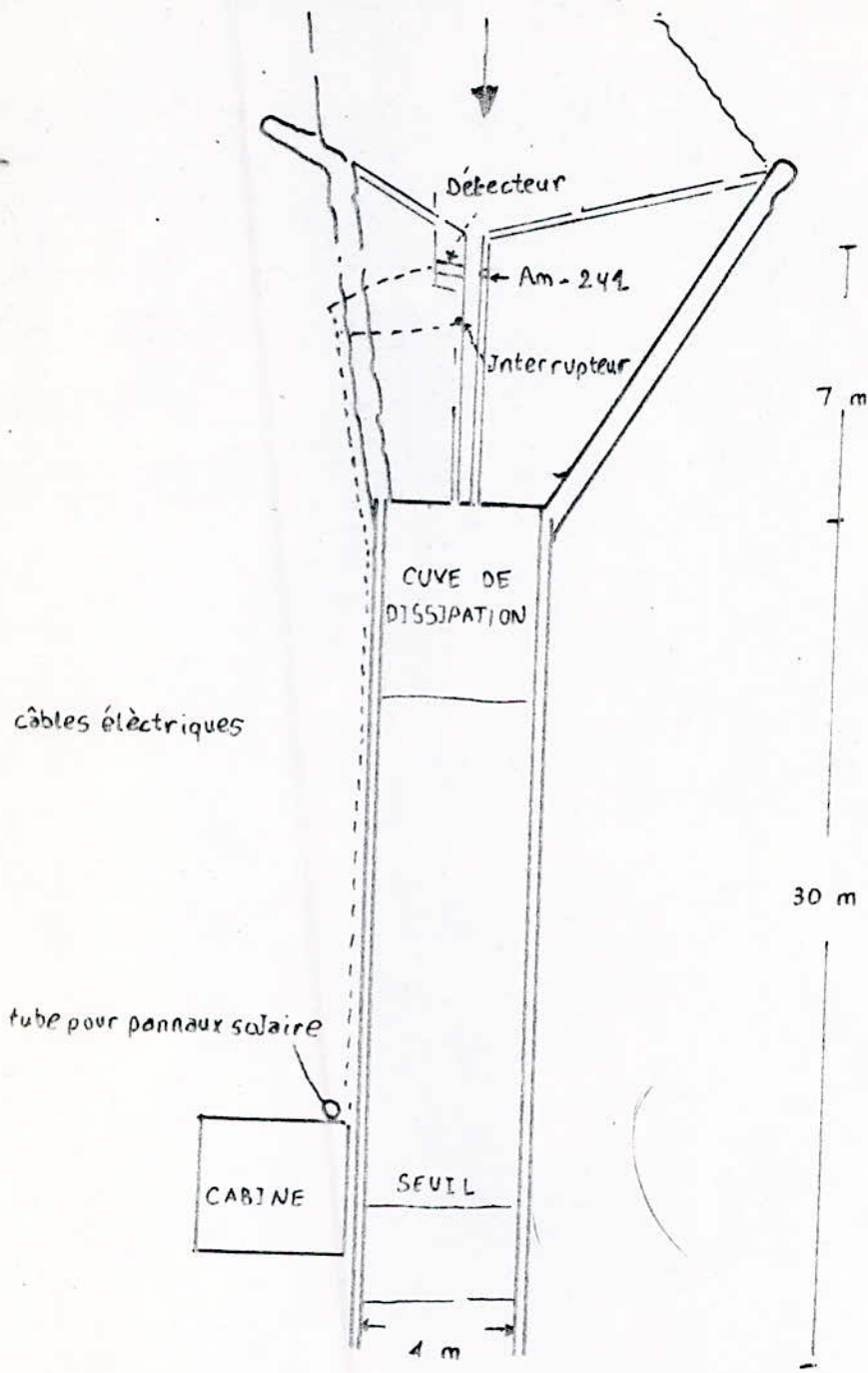


Fig. V-2 - Schéma de la station de mesure du transport solide et liquide sur le bassin B:S: 21 - N: 1.

hauteur, avec des tirants d'eau suffisants pour effectuer des mesures turbidimétriques.

V-2) Résultats de mesure sur le micro-bassin B.S.21 N° 1:

Les premiers résultats obtenus sur le terrain sont relatifs à l'étalonnage de la jauge LABEN 83.

Pour une géométrie (distance source-détecteur) de 35 cm, un solide d'influence de 20 cm à été relevé (fig V-3) et qui correspond à un volume de 44 litres.

Les courbes d'étalonnages du micro bassin B.S.21.N° 1 utilisant une solution saline (NaCl) et le sédiment argileux du site même sont représentées dans la (fig V-4).

Le premier enregistrement de crue c'est effectué le 26.04.1984. L'ensemble des appareils de mesure ont répondu convenablement.

Le niveau d'eau dans le petit canal a été de 21,5 cm, c'est-à-dire de 1,5 cm au dessus de l'axe source - détecteur (valeur déduite de la figure (V-4) à partir du taux de comptage enregistré (15770 cps).

Pour un fonctionnement correct, le niveau minimum de l'eau dans le canal doit être de 20 cm au dessus de l'axe source - détecteur. (L'étalonnage de la jauge étant fait sous cette condition).

Cette crue était donc trop petite pour permettre un quelconque dépouillement de données, néanmoins c'est le premier résultat important acquis; il nous renseigne sur l'efficacité de réponse de la jauge elle-même, sur le niveau d'eau dans le canal, et sur la durée de la crue qui dans ce cas précis n'a pas excédé les dix minutes.

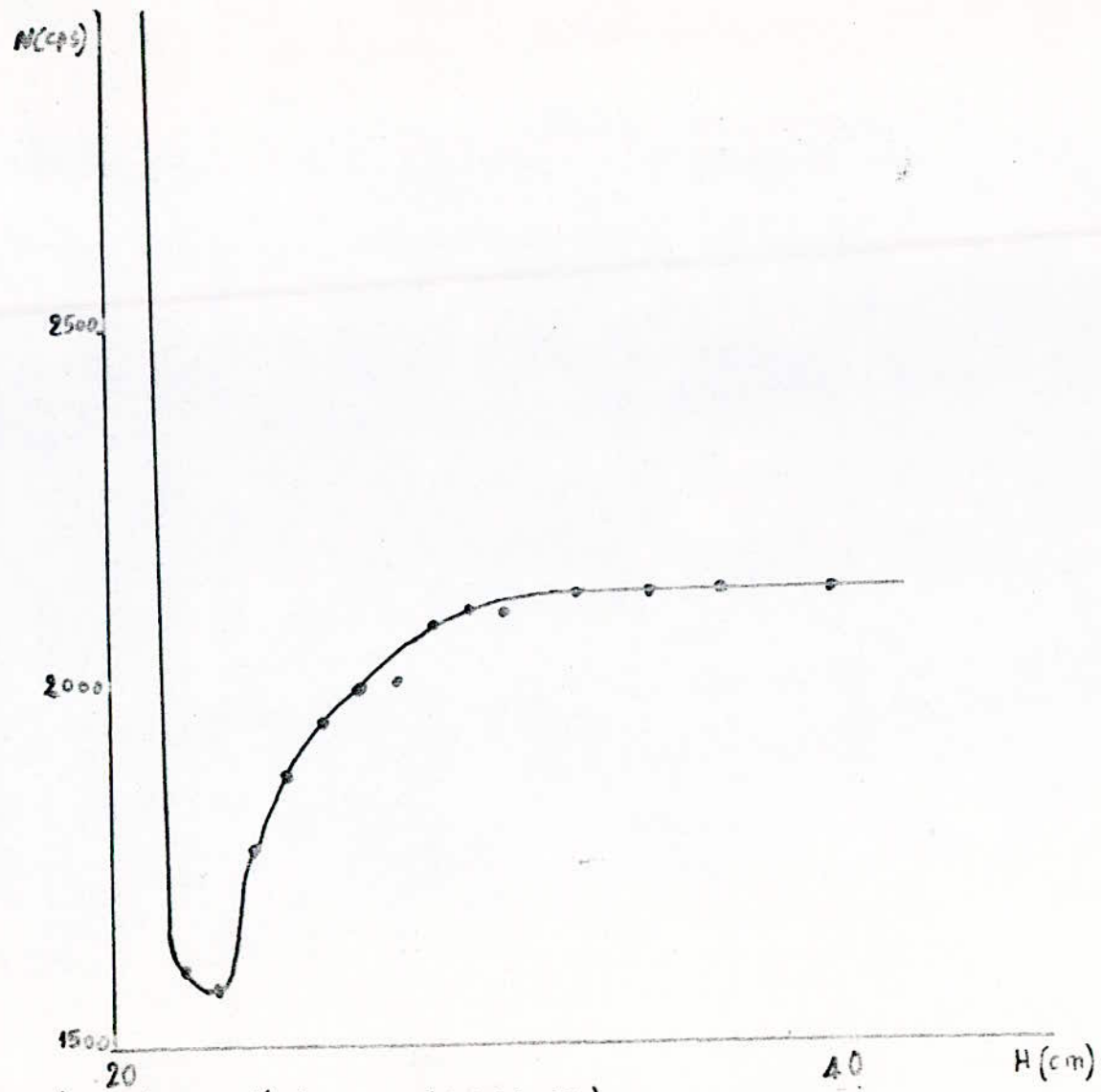
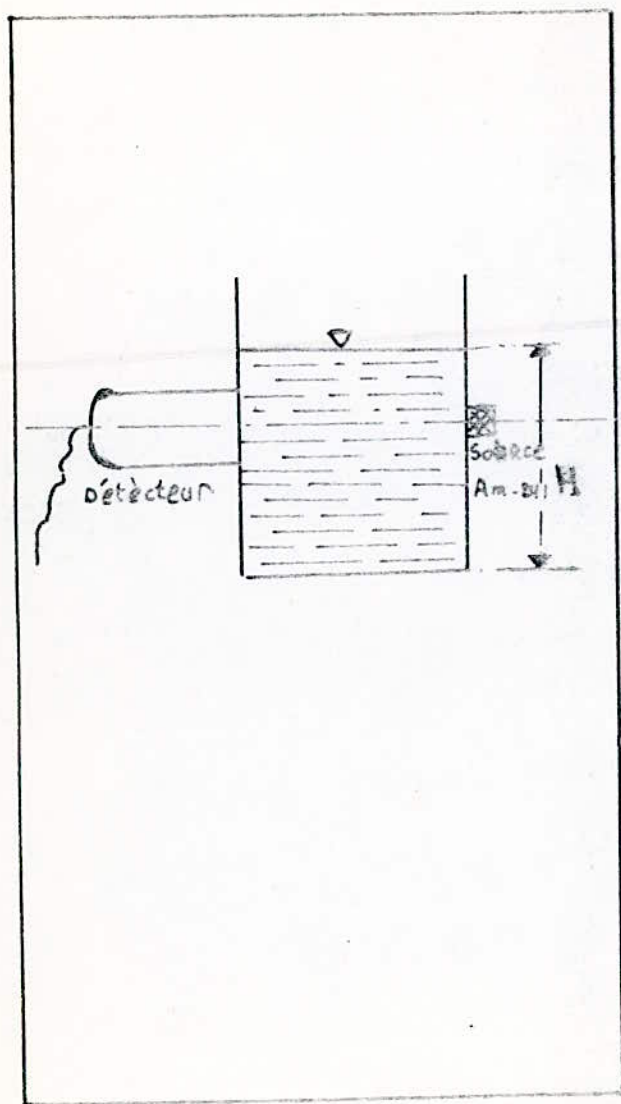


Fig. V-3 Relevé du volume d'influence (BS 21 N°1)
 hauteur du volume d'influence $H = 20\text{ cm}$

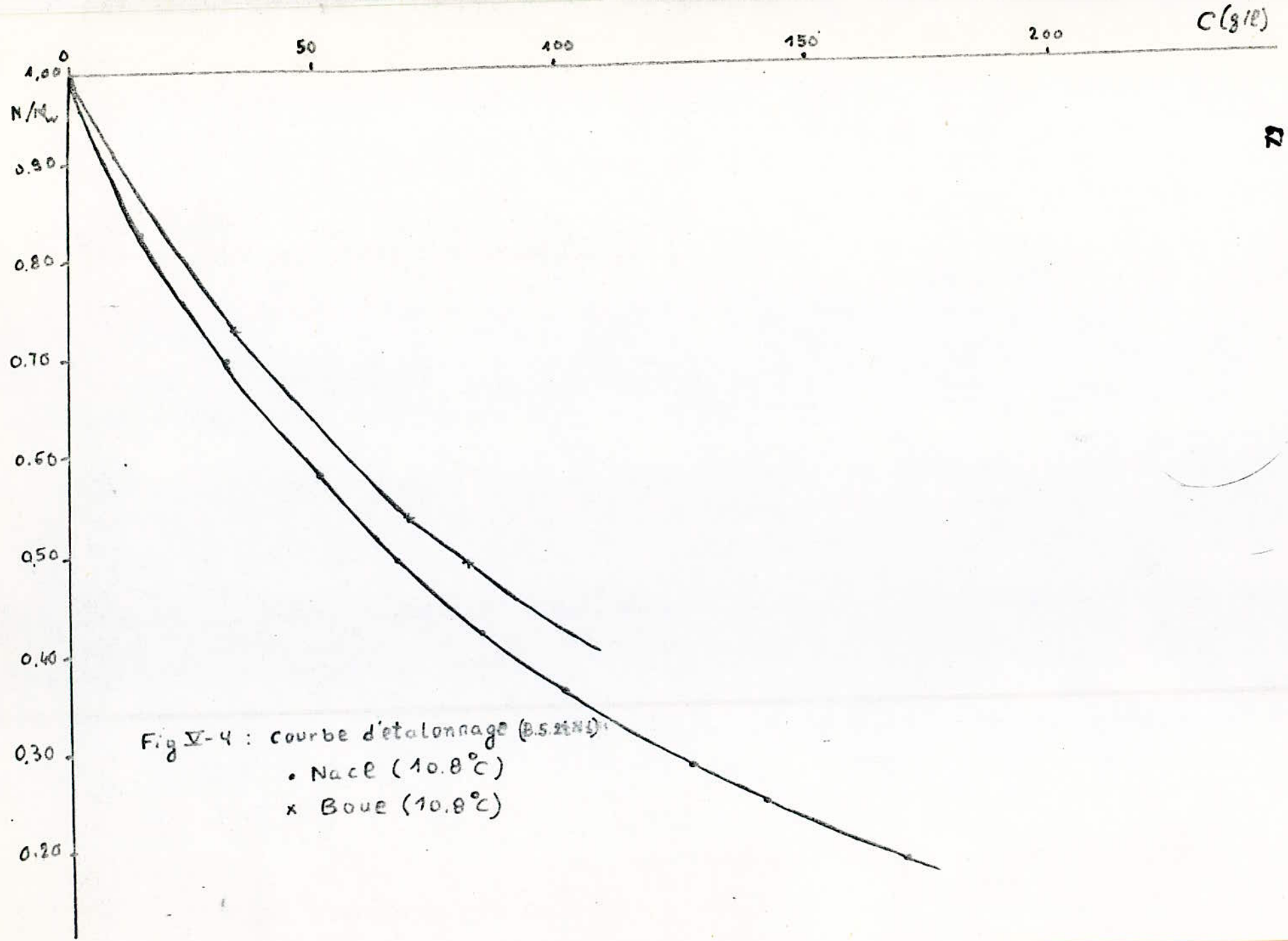


Fig V-4 : courbe d'étalonnage (0.52184)
 • NaCl (10.8°C)
 x Boue (10.8°C)

Exemple :

La jauge à transmission installée au B.S.21 I, nous permet de délivrer des enregistrements continus de la turbidité pendant les périodes de crue.

La figure (V-5) donne l'exemple d'un enregistrement de la crue du 26-09-85.

cette figure comprend les courbes suivantes :

- L'Hydrogramme de crue.
- Deux turbidigrammes, l'un par la méthode classique tandis que l'autre par la méthode des jauges nucléaires :

Notre but est de comparer la concentration moyenne et le débit moyen des sédiments en suspension faite par la méthode nucléaire, avec celle faite par la méthode classique pendant la même période de fonctionnement de la jauge qui est dans notre cas du 7h 57' à 8h 28'.

Pour tracer les solidogrammes correspondant aux deux procédés de mesure (classique et nucléaire) il est nécessaire de déterminer les débits solides pour cela on procède comme suit :

- A partir de la figure (V-5) à chaque pas de temps on relève : les données suivantes :
- La concentration correspondante à la méthode nucléaire [turbidigramme en traits pleins] (fig V-5).
- La concentration correspondante à la méthode classique [turbidigramme en pointillées] (fig V-5).
- Le débit liquide écoulé (hydrogramme) (fig V-5) pour cela on dresse le tableau suivant :

CS/E Q/E/s

BS 21 I

crue du 26/09/85

de 7^h57 à 8^h28

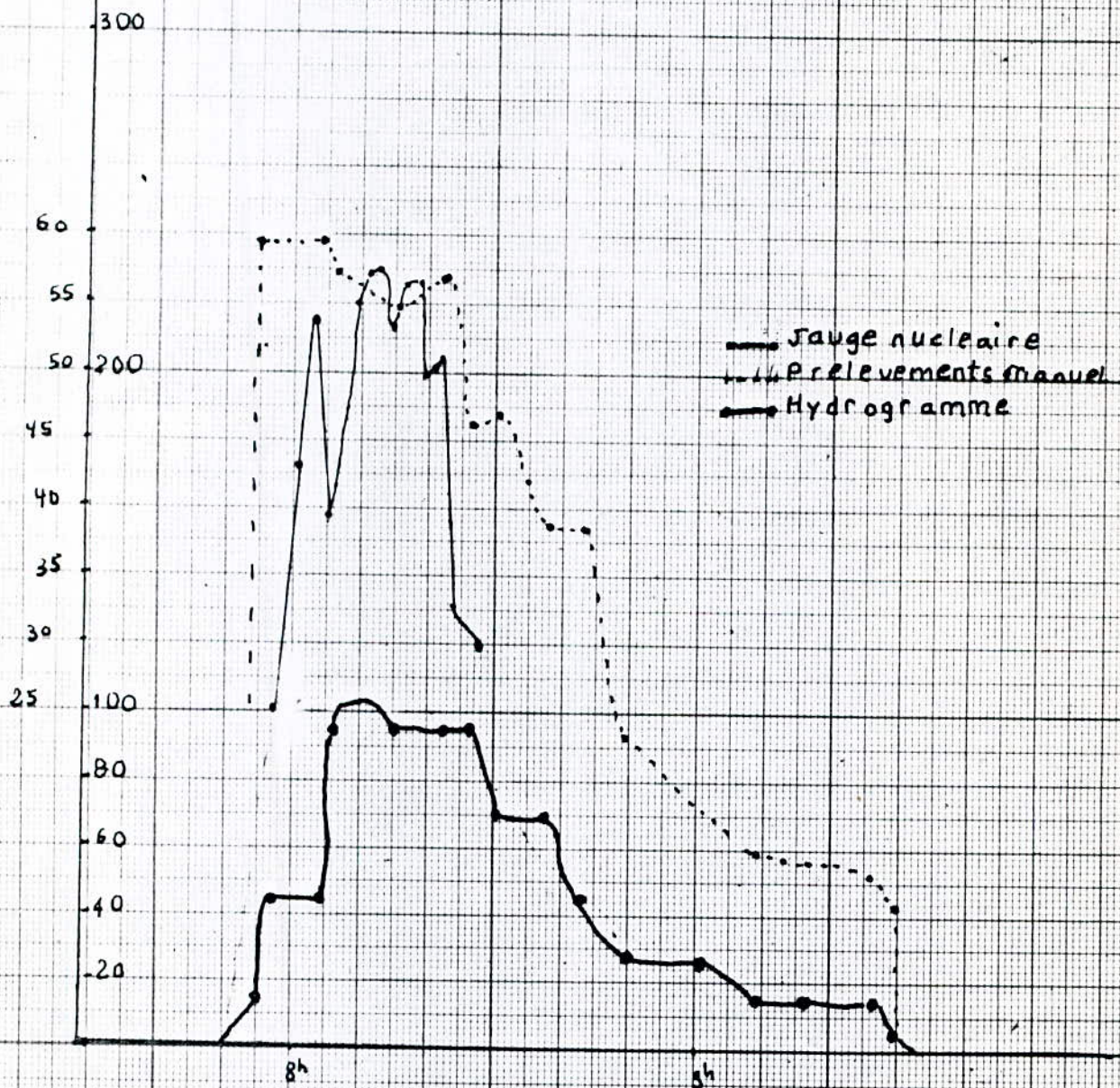


Fig: V-5

Temps	Q_{le} (l/s)	C_e (g/l)	C_j (g/l)	Q_{sd} (g/s)	Q_{sj} (g/s)
7 ^h 55	15	52,5	-	780	-
7 ^h 57	44	59,5	25	2618	1100
8 ^h	44	59,5	37,5	2,618	1650
8 ^h 05	44	58,5	38,5	2574	1694
8 ^h 10	102	56	55	5712	5610
8 ^h 15	94	54,5	53	5123	4982
8 ^h 20	94	56	49,5	5264	4653
8 ^h 25	94	47,5	31,5	4465	2961
8 ^h 28	90	46	29,5	4140	2655
8 ^h 30	70	46,5	---	3255	----
8 ^h 35	68	41	---	2788	----
8 ^h 40	54	38,5	---	2079	----
8 ^h 45	36	32,5	---	1170	-----
8 ^h 50	26	23,5	---	611	----
8 ^h 55	26	20,5	---	533	----
9 ^h	26	18,5	---	481	----
9 ^h 05	22	16	----	352	-----
9 ^h 10	15	14,5	---	217,5	----
9 ^h 15	14	14	---	196	---
9 ^h 20	14	13,5	---	186	----
9 ^h 25	14	13	---	182	---
9 ^h 30	4	4	---	16	---

A partir du tableau cité ci-dessus on trace les courbes suivantes:

- Le solidogramme qui correspond à la méthode classique (Fig.V-7)
- Le solidogramme qui correspond à la méthode nucléaire (Fig.V-6)

Dans les 2 figures (V-6 et 7), on trace l'hydrogramme de crue.

Calcul:

Le volume des sédiments transportés durant la crue, pendant un temps de 31 mn (7^h57 à 8^h28), à partir des solidogrammes représentés dans les figures (V-6 et 7) correspondent à une surface mesurée à l'aide d'un planimètre.

$$V_{sel} = 31,7 \cdot \text{échelle} = 31,7 \times (400 \cdot 10 \cdot 60) = 7.608.000 \text{ g.}$$

$$V_{sj} = 28,5 \cdot \text{échelle} = 28,5 \times (400 \cdot 10 \cdot 60) = 6.840.000 \text{ g.}$$

V_{sel} : Volume transporté, calculé à l'aide de la méthode classique.

V_{sj} : " " " " " " " " nucléaire:

Le volume liquide écoulé pendant cette durée :

$$V_e = 23 \cdot \text{échelle} = (10 \cdot 60 \cdot 10) \cdot 23 = 138.000 \text{ l.}$$

Le débit solide moyen est donné par la relation suivante:

$$Q_{Smoy} = \frac{V_s}{T} \quad \text{dans notre cas } T=31 \text{ mn}$$

A.N. - Méthode classique: $Q_{Smel} = \frac{V_{sel}}{T} = \frac{7.608.000}{31 \cdot 60} = 4090,32 \text{ g/s}$

- en jauge nucléaire: $Q_{smj} = \frac{V_{sj}}{T} = \frac{6840000}{31 \cdot 60} = 3677,42 \text{ g/s}$

$$Q_{Smel} = 4,090 \text{ Kg/s}$$

$$Q_{Smj} = 3,677 \text{ Kg/s}$$

La concentration moyenne des sédiments en suspension est donnée par la relation suivante:

$$C_m = \frac{V_{solide}}{V_e}$$

Q [kg/s]

cas de la jauge

6000

5200

4400 110

3600 90

2800 70

2000 50

1200 30

400 10

7^h57

8^h

8^h28

8^h30

8^h

8^h30

SOLIDOGRAMME

HYDROGRAMME

Fig. V-6

Le cas du prélèvement

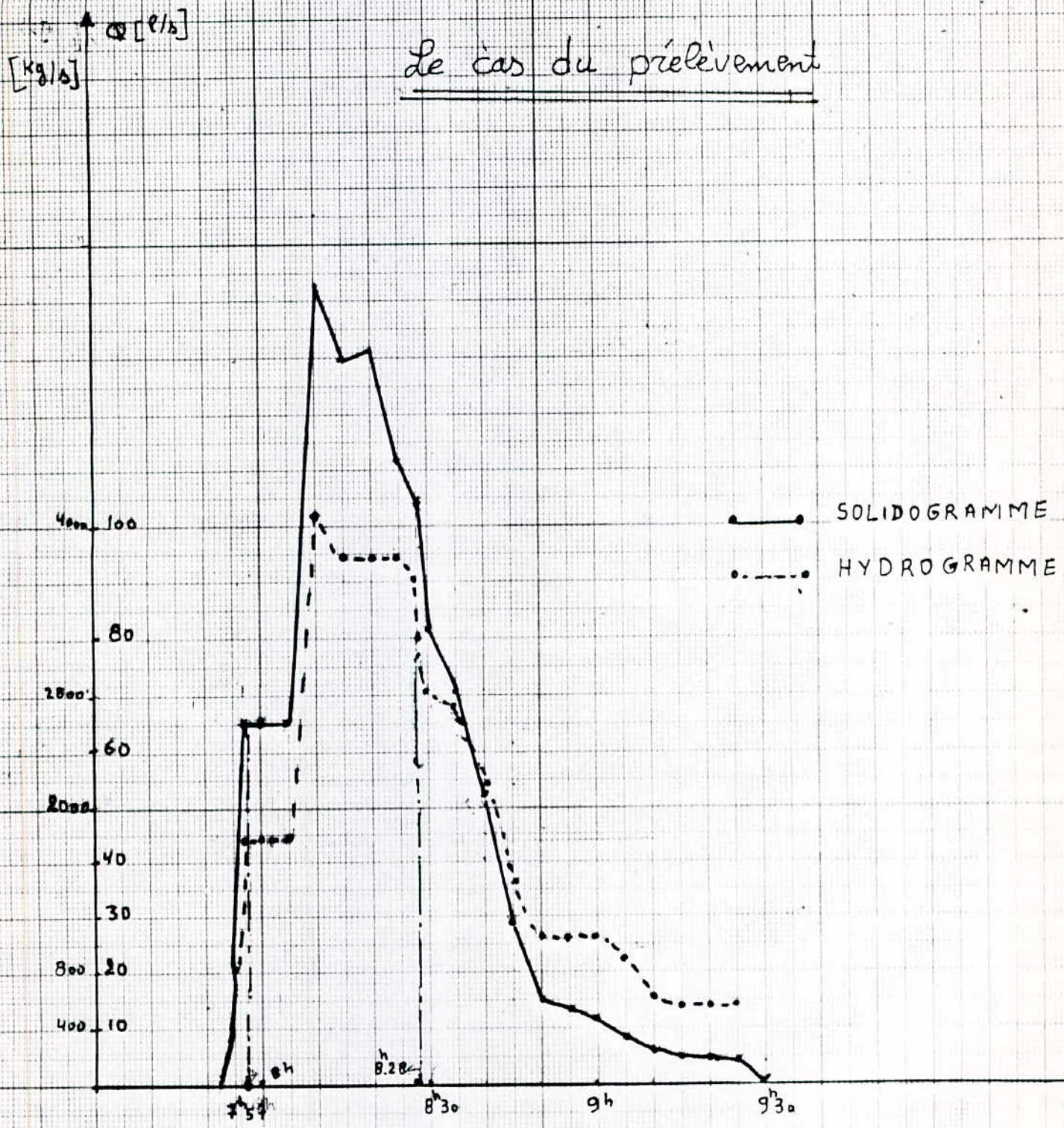


Fig: - V - 7

A.N - Méthode classique

$$C_{\text{mcl}} = \frac{V_{\text{sel}}}{V_{\text{le}}} = \frac{7608000}{138000} = 55,13 \text{ g / l}$$

- méthode de la jauge

$$C_{\text{mj}} = \frac{V_{\text{sj}}}{V_{\text{le}}} = \frac{6840000}{138000} = 49,57 \text{ g/l}$$

Les résultats

méthode classique : $\Phi_{\text{smcl}} = 4,090 \text{ kg / s}$
 $C_{\text{mcl}} = 55,13 \text{ g / l}$

Méthode de la jauge nucléaire :

$\Phi_{\text{smj}} = 3,677 \text{ kg / s}$
 $C_{\text{mj}} = 49,57 \text{ g / l}$

Remarque :

Les résultats obtenus par la méthode classique montrent qu'il y a une différence appréciable comparée à la méthode nucléaire, ceci est dû probablement au fait que les échantillonneurs standards précités n'ont pas été utilisés pour le prélèvement. Par contre l'échantillonnage a été effectué directement à l'aide de bouteilles en plastiques. Ce qui a perturbé le milieu d'où une turbidité non représentative.

CONCLUSION

L'érosion des terres agricoles et l'envasement des barrages , des infrastructures portuaires etc ... sont des problèmes importants dans le domaine hydraulique , particulièrement dans les pays méditerranéens .

En Algérie , ces phénomènes posent énormément des problèmes dans la conception , la maintenance et la gestion des ouvrages hydrauliques .

Les processus d'érosion et le phénomène de transport de sédimentation ont été étudiés , on constate donc que les conditions climatiques , socio-économiques et géomorphologiques favorisent le processus en Algérie .

Pour quantifier le transport de sédiments par les cours d'eau il est nécessaire de réaliser des mesures à l'échelle spacio-temporelle . On note que les observations en Algérie , ont été limitées à quelques stations où les méthodes traditionnelles (prélèvements manuels) se sont avérées insuffisantes .

Pour améliorer ces évaluations , les méthodes modernes, telles que les techniques nucléaires sont avérées les plus efficaces grâce à leurs avantages qui sont :

- La continuité de mesure est possible surtout pendant les crues .
- Méthodes non destructives du milieu (sans perturbation)
- Grand volume jaugé .
- Une large gamme de concentration (1 - 300) g/l
- Une température 0° à 50° c
- La possibilité d'avoir des résultats par télétransmission
- Possibilité d'utiliser des jauges portatives .
- Application dans différentes conditions hydrodynamiques très critiques .

Pour mieux conclure sur l'efficacité de ces techniques plusieurs stations seront équipées par les jauges nucléaires , nous citons: Souagui , Oued el Mellah , Bad Lands , Oued Zeroua , Beni Slimane.

En fin pour un meilleur suivi , du processus d'envasement des retenues artificielles dans notre pays , nous proposons d'élargir l'application de ces techniques au niveau de tous les cours d'eau alimentants ces retenues , dans le but de connaître et localiser les zones les plus érodables et entreprendre les moyens de lutte qu'il faut au bon endroit .

En Algérie les moyens qu'il faut utiliser selon les conditions citées ci-dessus .

— dans le domaine de l'agriculture :

- sélection de cultures appropriées
- rotation des cultures
- réalisation des labours selon les courbes de niveau
- construction de réseaux de banquettes destinées à freiner

le ruissellement :

- Utiles à 3%
- recommandable à 5%
- indispensable au dessus de 8 % .

ANNEXE I

- Les formules du transport solide en suspension :
Il y a trois formules qui sont applicables en Algérie .
Les formules sont les suivantes :

1- Formule de TIXERONT

$$t = K \cdot R^a$$

t : valeur moyenne annuelle de la turbidité (en kg / m³)
R : ruissellement annuel (mm d'eau)
K, a : constantes
Pour l'Algérie K : 3,5 à 3200 , a = 0,15

La formule de SOGETHA - SOGREAH est inspirée de cette
formule (TIXERONT) elle s'écrit :

$$ta = a \cdot R^{0,15} \quad T / Km^2 / an .$$

avec a : coefficient de perméabilité .
R : l'eau ruissellée annuelle (mm) .

Elle donne le taux d'abrasion ta , ou dégradation spécifique exprimée en tonnes / Km² / an .

Formule de FOURNIER :

$$ta = 91,8 \frac{P^2}{\bar{P}} - 737,6 \quad T / Km^2 / an .$$

P : pluie du mois le plus arrosé . (mm) .
 \bar{P} : pluie moyenne annuelle . (mm) .

Elle donne le taux d'abrasion (ta) d'un bassin versant
situé dans une zone semi aride .

Formule de l'I.N.R.H :

$$T_a = 44,9 C_t + 73,2 \frac{P^2}{\bar{P}} - 1442,8 \quad T/Km^2/an$$

C_t : Coefficient de torrentialité

$\frac{P^2}{\bar{P}}$: Indice climatique de FOURNIER.

Cette formule a été établies pour les bassins versants du nord de l'Algérie. Elle lie l'érosion spécifique au C_t et à $\frac{P}{\bar{P}}$.

D'autres formules sont établies pour le calcul de la dégradation spécifique et le taux d'envasement.

- Dégradation spécifique:

$$\log \frac{D_g}{S} = -\frac{P^2}{\bar{P}} + 0,46 \log \frac{H^2}{S} - 1,56 \quad T/Km^2/an$$

H: Hauteur moyenne de relief (m)

S: Superficie du bassin (Km^2)

- Taux d'envasement: Du futur d'un barrage, on tient compte du poids spécifique des vases qui se déposent au fond du réservoir, de la superficie du B.V., jusqu'au site du barrage et l'apport solide prévu.

- Apport solide: $AP = AS.S$

AS: Erosion spécifique (Tonnes/ Km^2/an)

S : Superficie du bassin (Km^2)

Taux d'envasement: E ,

$$E = \frac{AP}{\bar{P}S} \quad (Mm^3/an)$$

AP: Apports solides (T/an)

PS: Poids spécifique des apports solides en T/m^3 .

Le tableau comparatif suivant est un exemple d'utilisation des formules citées:

Récapitulation des différentes formules de transport solide en suspension utilisées en Algérie:

Formules	Station Lakhdaria sur l'Isser	Station Point la Traille sur l'Isser
Fournier Ta (T/Km/an)	1439,44	1159,9
I.N.R.H Ta (T/Km/an)	1623,52	1133,5
Sogetha-Sogreah Ta (T/Km/an)	933	522,3
Dégradation spécifique Dg (T/Km/an)	2187	1084,8
Taux d'envasement E (Mm/an)	5,55	4,76

Commentaire du tableau:

L'examen du tableau précédent montre des différences sensibles dans les valeurs du taux d'abrasion obtenues par application des formules de FOURNIER, de l'I.N.R.H, et de la SOGREAH.

A N N E X E II

Etudes des transports solides et l'érosion effectués en Algérie
citée par: BENKHALED /4/

1-MEDINGER (Mars 1960)

En 1960, il regroupe ses travaux effectués sur les méthodes de mesure et présente les données de mesure recueillies sur une trentaine de bassins durant la période 1946-1957.

Ses essais ont porté sur la mise en forme d'une relation entre débits et concentrations instantanées. Les résultats qu'il obtenait n'étaient pas satisfaisants.

2-TIXERONT (Août 1960)

Les travaux de TIXERONT sont basés sur les données de 32 bassins d'Algérie et 9 bassins de Tunisie, dont les superficies s'échelonnent de 50 à 22.300 Km².

L'auteur a procédé à la correction et l'homogénéisation des séries qui figurent dans les annuaires hydrologiques de l'Algérie.

Les principales conclusions des travaux de TIXERONT sont résumés comme suit:

- Les teneurs en suspension des 3 groupes de bassins augmentent d'une façon générale, quand le ruissellement diminue.
- Les terrains des régions fortement plissés, fournissent des taux d'abrasion et des teneurs en suspension particulièrement élevées.
- La distribution régulière des précipitations avec un maximum en pleine saison végétative est favorable aux faibles teneurs. La distribution la plus favorable est celle qui emporte au maximum en automne .
- La répartition pluviométrique permet la différenciation de 3 zones :

+ Une zone où la pluviométrie inférieure à 300 mm est insuffisante pour causer une érosion appréciable .

+ Une zone de 300 à 700 mm où l'érosion est très active (1200T/Km²/an).

+ Une zone où la pluviométrie est supérieure à 700 mm, mais qui bénéficie d'un couvert végétal protecteur(350T/Km²/an).

3-CAPOLINI (1965-1969)

L'auteur a entrepris une étude géomorphologique régionale sur le bassin du Cheliff (Physiographie, Pluviométrie, Pente, Formation lithologique superficielle, Couvert végétal).

Les résultats ont permis à CAPOLINI de :

- Proposer une quantification des débits solides en associant à chaque formation lithologique un débit solide spécifique.

- D'établir ou d'ébaucher une relation statistique entre l'érosion spécifique des bassins et les coefficients de torrentialité. Ce dernier paramètre est utilisé dans les nombreuses études hydrologiques faites comme outil de comparaison entre bassins.

Cependant, il ne peut être utilisé seul pour la prévision des apports solides car il est inadéquat pour déterminer les zones d'érodabilité, sachant qu'il est difficile à calculer avec précision.

Enfin, CAPOLINI suggère une méthode de cartographie de la susceptibilité à l'érosion à partir de la cartographie du coefficient de torrentialité, en partant de l'hypothèse vérifiée sur les bassins du Fodda et du Rhiou, que les zones fortement érodées coïncident avec les zones à coefficient de torrentialité élevé.

4-SOGREAH (1969)

L'étude est basée sur les données d'observations recueillies au niveau de 9 barrages et 18 stations hydrométriques, totalisant 282 années stations. Les durées d'observation sont

tres variables.

L'importance des transports solides des oueds est définie en fonction du ruissellement annuel des crues R et de la perméabilité des bassins versants, en admettant que le degré de perméabilité est un facteur qui intègre en 1^{ère} approximation les paramètres géomorphologiques.

Sur un bassin de nature géomorphologique donnée, le transport solide apporté par les crues croît avec le volume ruisselé.

5-DEMMAK (1982) /26/

DEMMAK a mis en relief l'importance de cette érosion et toutes ses conséquences, et propose une méthodologie d'étude et de lutte.

A cet effet, il a procédé à la sélection de 30 bassins versants de l'Algérie du nord représentatifs de différentes conditions physiques, géomorphologiques, climatiques et hydrologiques. Il a défini une corrélation multiple très significative incluant plusieurs paramètres physiques pour un bassin versant côtier à très forte érosion, qui ne s'est avérée valable que pour les bassins versants telliens ayant un pourcentage marneux érodable supérieur à 10%, et une pluviométrie supérieure à 300 mm.

Dans le même cadre, il a prédit que l'apport de sédiments pour une période de 50 ans serait de 6 millions de m³ pour le barrage El Ibtissam sur l'oued Deurdeur, avec une densité sèche des matériaux égale à 1,3 Tonnes/an, et en ajoutant 30% du charriage. Il a aussi conclu que la concentration moyenne inter-annuelle en suspension serait de 3,2 g/l, une érosion spécifique de 273,4 T/Km²/an. Les résultats ont été calculés sur une période de 7 ans (1972-1979).

B I B L I O G R A P H I E

- 1-AKE, SUNDBORG (1983) - LES PROBLEMES DE SEDIMENTATION DANS LES BASSINS FLUVIAUX.
Nature et ressources, Vol., 818, N°2, PP10-21.
- 2-BAYER L.D. - SOIL PHYSICS.
- 3-BECCHI I., TAZIOLI G.S. - ON THE RIVER PROCESSES METHODOLOGICAL APPROACH: EXPERIENCE WITH THE RIVER MUSONE, ITALY.
- 4-BENKHALED A. (1983) - TECHNOLOGIE DE MESURE DES TRANSPORTS SOLIDES EN SUSPENSION.,
I.N.A
- 5-CLARK G.L. (1963) - ENCYCLOPEDIA OF X-RAYS AND GAMMA-RAYS.
Reinhold Publishing., New York.
- 6-COURTOIS G., (1970) - TURBIDIMETRE: ABSORPTIOMETRIE X-Y OU RADIOACTIVITE NATURELLE.,
MAGLOIRE C. ISOTOPE HYDROLOGY A.I.E.A, Vienne, PP555-576.
- 7-COURTOIS C. (1970) - JAUGES RADIOACTIVES EN SEDIMENTOLOGIE, APPLICATION FAISANT APPEL A L'INSTRUMENTATION NUCLEAIRE HOUILLE BLANCHE,
N°8, PP715-723.
- 8-DJILALI S. (1973) - L'HOMME ET L'EROSION DANS L'OUASAMIS.,
S.N.E.D, Alger.
- 9-DEMMAK A. (1984) - RECHERCHE D'UNE RELATION EMPIRIQUE ENTRE APPORTS SOLIDES SPECIFIQUES ET PARAMETRES PHYSICO-CLIMATIQUES DES BASSINS: AUX APPLICATIONS EN CAS ALGERIEN,
I.N.R.H, PP403-414.
- 10-DEMMAK A. (1982) - CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'EROSION ET DES TRANSPORTS EN ALGERIE SEPTENTRIONALE,
PP403-413.

- 11-FLORKOWSKI T.(1970)-PORTABLE RADIOISOTOPE JAUGES FOR SUSPENDED SEDIMENTS.
ISOTOPE HYDROLOGY A.I.E.A,Vienne,PP545-553.
- 12-HENRY J.R.,(1966) -PERFORMANCE OF NUCLEAR SEDIMENT CONCENTRATION GAUGES.
et al.
ISOTOPE HYDROLOGY A.I.E.A, Vienne,PP208-227.
- 13-KADIK B.(1985) -L'EROSION,LA CONSERVATION ET LA RESTAURATION DES SOLS EN ALGERIE.
I.N.R.F. Dans la Journée Technique duProjet Alger 17-8, Projet P.N.U.D.R.A.B 80/011 PP10-31.
- 14-LEBRETON J.C.(1974)-DYNAMIQUE FLUVIALE.
Ed. Eyrolles, P 209.
- 15-LELIAVSKY S.(1961) -PRECIS D'HYDRAULIQUE FLUVIALE.
Dunod, Paris, P256.
- 16-MICHEL HUG. (1975) -MECANIQUE DES FLUIDES APPLIQUEES:COURS DE L'ECOLE NATIONALE DE PONTS ET CHAUSSEES.
Ed. Eyrolles, P1195.
- 17-MARTIN J.M.(1970) -LES JAUGES RADIOACTIVES DE TURBIDIMETRIE.
Houille Blanche, N°8, PP745-755.
- 18-OUAAR M.,SEDDIKI A.-RAPPORT DE STAGE SUR L'APPLICATION DES TECHNIQUES DANS LA MESURE DE LA DENSITE DES ROCHES ET DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION DANS LES BARRAGES ET OUEDS.
- 19-QUESNEL B. -TRAITE D'HYDRAULIQUE FLUVIALE ET TORRENTIELLE APPLIQUEES.
Tome 2, Ed. Eyrolles, Paris, P325.
- 20-SEDDIKI A.(1984) -APPLICATION DES TECHNIQUES NUCLEAIRE A LA MESURE DE LA DENSITE DES ROCHES ET DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION DANS LES OUEDS.
Thèse de Magister en Génie Nucléaire au

C.D.T.N, Commissariat aux Énergies Nouvelles,
(Alger).

- 21-SELLEY R.C. -AN INTRODUCTION TO SEDIMENTOLOGY
- 22-SUNDBORG A. -PROBLEMES D'EROSION, TRANSPORT SOLIDE ET
SEDIMENTATION DANS LES BASSINS VERSANTS.
Projet 5,3 du Programme Hydrologique Inter-
national., U.N.E.S.C.O
- 23-TAZIOLI G.S.(1982)-NUCLEAR GAUGES FOR MESURING SEDIMENT TRANSP-
ORT IN TORRENTIAL WATER COURSES.
REPORT OF A CONSULTANT'S GROUPEMETING ON
RADIO ISOTOPES IN SEDIMENT STUDIES,ORGANIZED
BY THE I.A.E.A AND HEL IN VIENNA.,13-17.
PP 51-69.
- 24-TAZIOLI G.S.(1986)-L'ETUDE DE L'EROSION EVALUEE PAR DES MESURES
DE TRANSPORT SOLIDE.
Séminaire Régional en Hydrologie.,MAROC.15-20.
P 34.
- 25-TAZIOLI G.S.(1963)-SUSPENDED SEDIMENT.
CAILLOT A. GUIDEBOOK ON NUCLEAR TECHNIQUES IN HYDROLOGY
TECHNICAL REPORTS SOUES N°91,A.I.E.A,VIENNA
PP93-101.
- 26-TOUAIBIA B.(1986) -QUANTIFICATION DE LA SALINITE ET DU TRANSPORT
SOLIDE, CAS DU BASSIN VERSANT DE L'OUED
DEURDEUR.
Thèse de Magister, I.N.A
- 27-TOUA M.(1985) -ETUDE N°3/M.H.E/I.N.R.H/D.H.Y.L.

