



INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION

**CONTRIBUTION A LA MESURE DES ECOULEMENTS
TRES CHARGES**

**UTILISATION DES CAPTEURS DE PRESSION POUR
LA DETERMINATION EN CONTINU DES TRANSPORTS
EN SUSPENSION**

SOMMAIRE

Pages

INTRODUCTION

1. ETUDE DES RELATIONS ENTRE PRESSION STATIQUE, DENSITE ET CHARGE SOLIDE	
1.1. Augmentation de la pression statique en fonction de la charge solide	3
1.2. Relation entre densité réelle et densité manométrique	5
1.3. Variation de la densité du mélange eau + sol avec la charge solide	7
1.4. Relation entre augmentation de pression statique et charge solide	13
1.5. Premières conclusions sur la précision des mesures limnimétriques réalisées avec des capteurs de pression	14
2. SIMULATION DES MESURES AVEC UTILISATION DES CAPTEURS DE PRESSION. LE TUBE DE MESURE DE MONTPELLIER	
2.1. Description du dispositif	16
2.2. Etalonnage des capteurs	20
2.3. Emploi de l'eau de mer	24
2.4. Mesures avec un mélange sol + eau	25
2.5. Corrélation entre densité réelle et densité manométrique. Vérification des premiers résultats de laboratoire	28
2.6. Utilisation des capteurs de pression	29
2.7. Précision de la méthode des capteurs de pression pour la mesure des charges solides	35
3. EXPERIMENTATION SUR LE TERRAIN	
3.1. L'infrastructure mécanique	37
3.2. L'électronique de traitement	37
3.3. L'enregistreur	41
4. CONCLUSIONS	42
5. BIBLIOGRAPHIE	43

LISTE DES FIGURES

	Pages
1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE LABORATOIRE	4
2. CORRELATION ENTRE DENSITE REELLE ET DENSITE MANOMETRIQUE	6
3. CORRELATION ENTRE CHARGE SOLIDE ET DENSITE DU MELANGE	11
4. CORRELATION ENTRE LA SURPRESSION DUE A L'AUGMENTATION DE LA DENSITE ET LA CHARGE SOLIDE	15
5. TUBE DE MESURE - PRINCIPE D'INSTALLATION	17
6. et 6 BIS TUBE DE MESURE - PHOTOGRAPHIES	18-19
7. ETALONNAGE DES CAPTEURS - ERREURS ACCIDENTELLES RESIDUELLES	23
8. VARIATION DE LA DIFFERENCE DES PRESSIONS MESUREES AUX DEUX CAPTEURS AVEC LA TENEUR EN SEL	26
9. CORRELATION ENTRE LA DENSITE MESUREE ET LA DENSITE PIEZOMETRIQUE	30
10. CORRELATION ENTRE LA CHARGE SOLIDE ET LA DENSITE DU MELANGE SOL + EAU	31
11. CORRELATION ENTRE LA DENSITE DETERMINEE PAR PESEE ET CELLE CALCULEE AVEC LES CAPTEURS DE PRESSION	32
12. CORRELATION ENTRE LA CHARGE SOLIDE ET LA DIFFERENCE DE PRESSION ENTRE LES CAPTEURS	33
13. CORRELATION ENTRE LA CHARGE SOLIDE ET LA DIFFERENCE DE HAUTEUR D'EAU DES MANOMETRES	34
14. INSTALLATION DU TURBIDIMETRE A CAPTEURS DE PRESSION. SCHEMA DE PRINCIPE	38
15. INSTALLATION DU TURBIDIMETRE A CAPTEURS DE PRESSION - DETAILS	39
16. TRAITEMENT DU SIGNAL	40

INTRODUCTION

Au début de l'actuelle décennie, Jacques COLOMBANI, Directeur de Recherches de l'ORSTOM, a proposé d'utiliser un ensemble de deux capteurs de pression, situés sur une même verticale, pour améliorer la mesure des hauteurs d'eau des rivières en corrigeant l'erreur de densité du mélange eau/sol. De là est venue l'idée d'utiliser la mesure différentielle de pression pour déterminer la densité du mélange et d'en déduire la charge solide en suspension.

C'est dans le cadre d'une étude portant sur la mise au point d'appareils et de méthodes de limnigraphie adaptée aux écoulements très chargés, financée par la Ministère de la Recherche, que l'ORSTOM s'est associé au CEMAGREF, Maître d'Oeuvre Principal pour prendre en charge l'un des volets de cette étude : la réalisation d'un appareillage constitué d'un capteur de pression différentiel.

Une convention particulière CEMAGREF/ORSTOM a été signée le 8 juin 1988. Cet accord prévoit, dans une première phase, une recherche préliminaire en laboratoire devant conduire à la mise en évidence de l'influence -si elle existe- des matières en suspension sur la mesure des niveaux avec des capteurs de pression et la construction d'un prototype de terrain, installé sur le seuil de mesure du bassin de Laval dans le BVRE de DRAIX, exploité par le CEMAGREF. Cette recherche a été confiée au Laboratoire d'Hydrologie de MONTPELLIER et a été menée par Jacques CALLEDE, Ingénieur de Recherches, avec le concours de R. CHARTIER, Ingénieur d'Etudes, Responsable de l'Unité de Technologie, pour le montage de l'appareillage et la phase de mesures, et de G. JACCON, Responsable du Laboratoire, pour la mise au point définitive de ce rapport.

Le présent rapport met un terme à la première phase de cette étude : les expériences en laboratoire et le schéma du prototype qui sera installé à DRAIX pour les essais sur le terrain réalisés lors des crues du printemps 1990. Cette première phase, fondamentale et très intéressante par les résultats obtenus, a été faite en statique car il était très difficile -voire impossible- de travailler en dynamique. Il n'est pas certain - comme l'a souligné M. MEUNIER du CEMAGREF- que les résultats en dynamique, c'est-à-dire dans un écoulement, soient identiques. La seconde phase, menée à DRAIX, sera donc très importante et fera l'objet d'un second rapport qui sera publié en juillet/août 1990.

Ce rapport comprend trois parties :

1. l'étude en laboratoire, avec un dispositif expérimental très simple, des relations existantes entre la pression statique, la densité d'un mélange eau + sol et la charge solide en suspension ;
2. l'étude, avec un tube de mesure spécialement construit pour cela, du comportement en eaux chargées de deux capteurs de pression distants de 50 cm ;
3. des propositions pour l'installation d'un prototype à DRAIX.

Les principaux résultats obtenus dans cette première phase mettent clairement en évidence que la mesure de la densité peut être utilisée pour déterminer la charge solide en suspension d'un cours d'eau. Les variations de densité se traduisent par des variations de pression, mesurables avec des capteurs. Dans l'état actuel des matériels disponibles sur la marché, la charge solide peut être déterminée avec une précision de $\pm 2,5$ g/l, avec des capteurs distants de 100 cm. L'apparition récente de nouveaux capteurs, admettant des surpressions de l'ordre de 100 fois l'étendue de la plage de mesure, permettra d'utiliser des manomètres différentiels dans des fleuves à forte charge solide et à fort marnage, comme le Fleuve Jaune (concentrations de 400 à plus de 1 000 g/l durant les crues).

1. ETUDE EN LABORATOIRE DES RELATIONS ENTRE PRESSION STATIQUE, DENSITE ET CHARGE SOLIDE

Des mesures en laboratoire ont permis de mieux définir la variation de la densité du mélange eau + sol en fonction du poids et de la nature du sol. Un dispositif manométrique a constaté cette variation de densité.

1.1. Augmentation de la pression statique en fonction de la charge solide

1.1.1. Description du dispositif

Une éprouvette à pied contient un litre de mélange eau/sol. Le poids de sol en suspension est connu, ainsi que le volume et le poids du mélange : ceci permet de déterminer la charge solide (en g/l) et la densité du mélange.

Dans cette éprouvette, nous introduisons un tube transparent, rigide, de façon à ce que son extrémité inférieure soit à 30 cm au dessous de la surface du mélange. Ce tube contient de l'eau pure dont nous empêchons l'écoulement en bouchant l'extrémité supérieure avec le doigt (comme avec une pipette). Nous enlevons le doigt et l'eau pure s'écoule dans l'éprouvette. Le fait que l'eau pure du tube commence d'abord à s'écouler du haut vers le bas provoque une "chasse" empêchant le mélange eau/sol de pénétrer dans le tube.

Nous avons réalisé un manomètre différentiel : si la densité du mélange eau/sol est supérieure à 1, le niveau de l'eau dans le tube devra être au-dessus du niveau du mélange eau/sol dans l'éprouvette. Soit A la distance entre la surface du mélange et l'extrémité inférieure du tube (figure 1), B la distance entre la surface et le niveau de l'eau dans le tube. Par définition, la densité de l'eau est égale à 1. En utilisant le manomètre différentiel, la densité du mélange eau + sol est donnée par la relation :

$$D_m = (A + B) / A \quad (1)$$

Dans tout ce qui va suivre, D_m sera la "**densité manométrique**", par opposition à la "**densité réelle**" D_r , rapport entre le poids du mélange P_t et le volume du mélange V_t :

$$D_r = P_t / V_t$$

Comme la densité du sol est supérieure à celle de l'eau, on a $D_r > 1$. On a aussi $D_m > 1$. On a donc $D_m > D_r$. On a aussi $D_m > 1$. On a donc $D_m > D_r$.

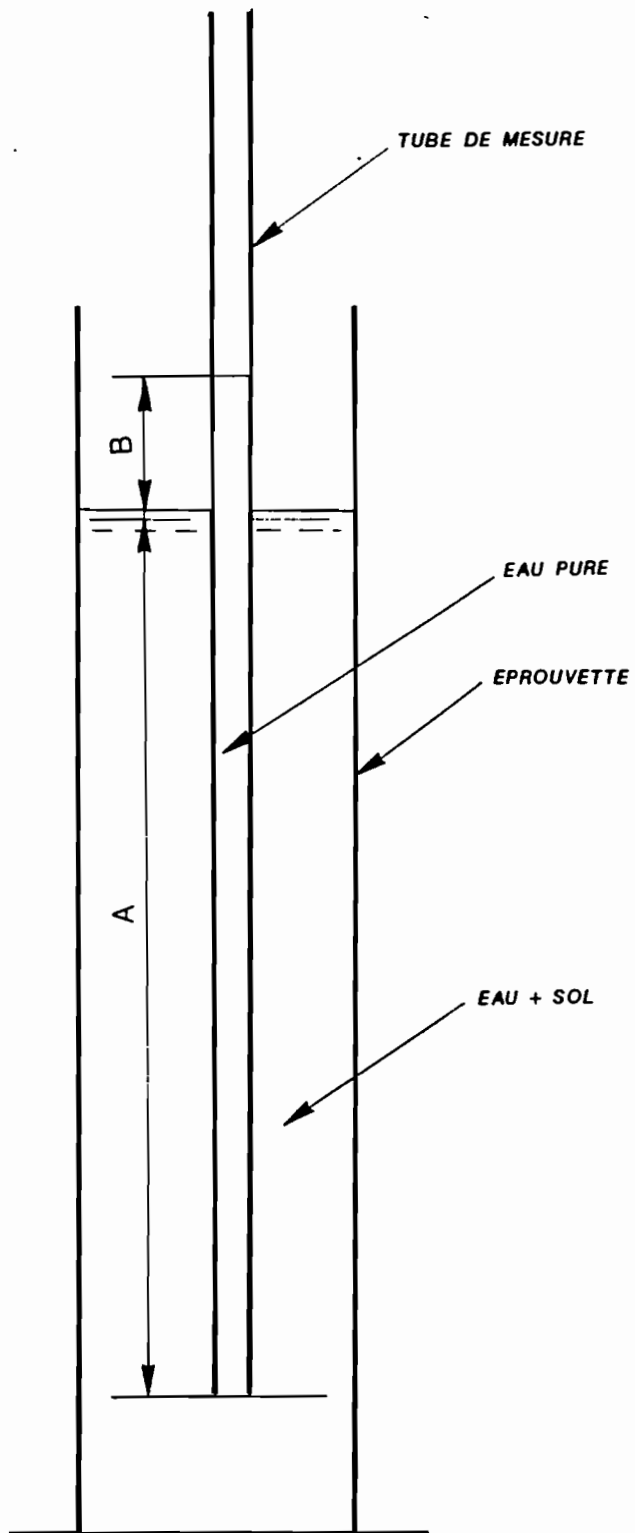


FIG. 1 - DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE LABORATOIRE

Dessiné par J.P. DEBUCHE - Dessin N° 00149

1.1.2. Déroulement de l'expérimentation. Premières constatations :

Le sol est une argile très fine (argile à foulon, dite "terre de Sommières") qui reste longtemps en suspension. Le mélange est réalisé dans un bécher avec emploi d'un agitateur magnétique. L'emploi d'un autre type de sol n'a pas été possible, la sédimentation des sables étant de l'ordre de quelques secondes seulement sans agitation. L'agitateur magnétique provoque une cavitation rendant illusoire la précision des mesures, et il n'a pas été possible de concilier, à cause de l'encombrement, agitateur mécanique à hélice et tube manométrique. Nous avons dû nous contenter de travailler avec de l'argile : le mélange avec l'eau s'est avéré très visqueux à partir de 100 g/l. Aussi les mesures effectuées avec des charges supérieures à 120g/l sont-elles sujettes à caution.

Au fur et à mesure que la charge solide augmentait, nous avons observé que le niveau de l'eau dans le tube manométrique montait de plus en plus haut par rapport à la surface du mélange eau + sol : la densité manométrique augmente tout comme la densité réelle.

1.2. Relation entre densité réelle et densité manométrique

Densité réelle et densité manométrique sont en parfaite corrélation, comme le montre le graphique de la figure 2 et le tableau ci-après :

Numéro	Densité réelle	Densité manométrique
1	1,004	1,007
2	1,010	1,005
3	1,018	1,008
4	1,022	1,022
5	1,026	1,031
6	1,028	1,033
7	1,031	1,030
8	1,033	1,046
9	1,046	1,032
10	1,050	1,059
11	1,056	1,060
12	1,062	1,068
13	1,058	1,060
14	1,058	1,061
15	1,062	1,056
16	1,061	1,056
17	1,062	1,069
18	1,070	1,074

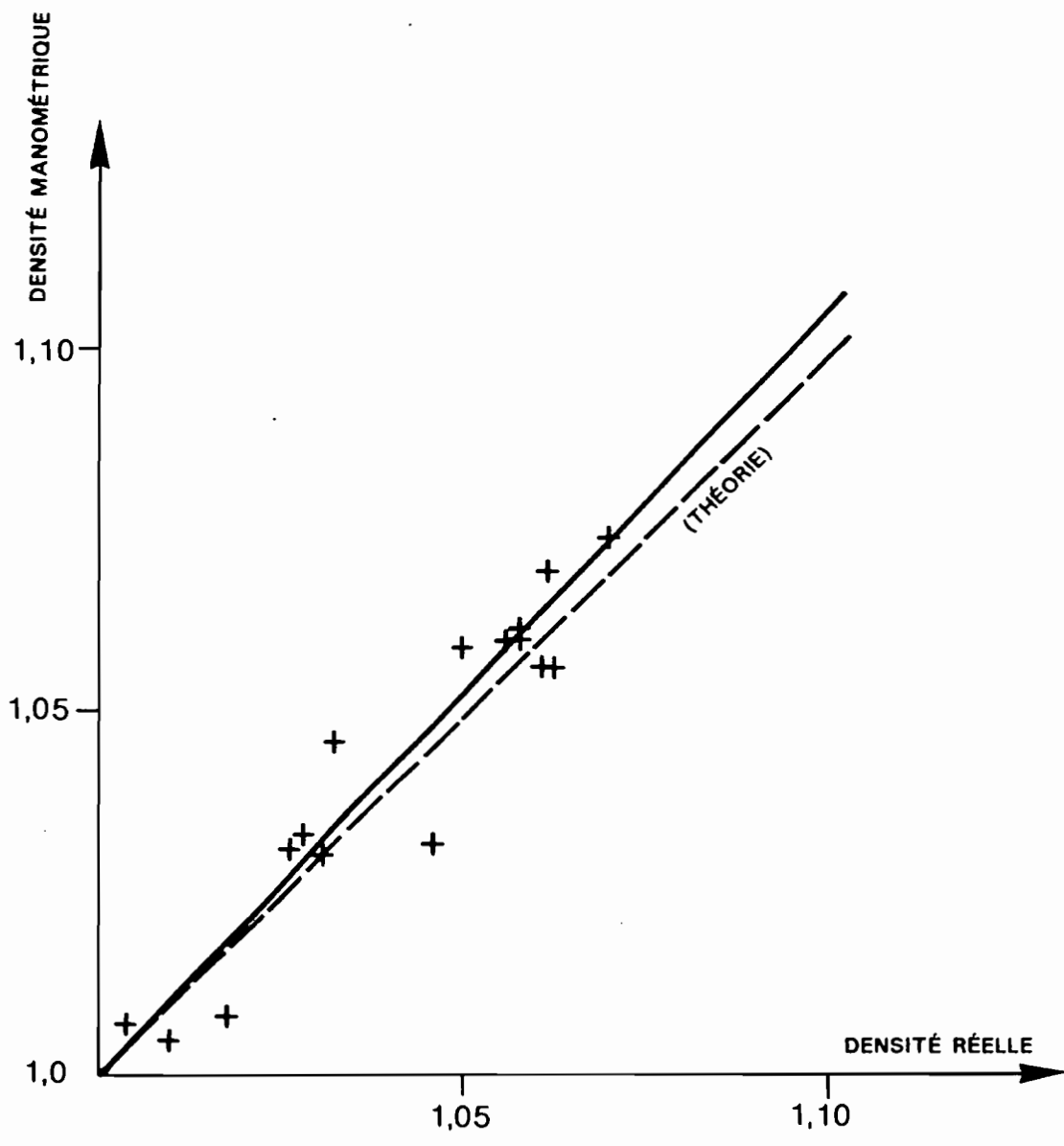


FIG. 2 - CORRELATION ENTRE DENSITE REELLE ET DENSITE MANOMETRIQUE

Dessiné par J.C MARCOUREL - Dessin N° 00181 - 1989

Sable

Numéro	Charge (g/l)	Densité réelle	Densité du sol
19	76	1,037	1,9
20	158	1,079	2,0
21	237	1,120	2,0

Alluvions sableuses

Numéro	Charge (g/l)	Densité réelle	Densité du sol
22	65	1,022	1,5
23	119	1,056	1,9
24	174	1,094	2,2

Alluvions argileuses

Numéro	Charge (g/l)	Densité	Densité du sol
25	63	1,025	1,7
26	113	1,066	2,4
27	162	1,084	2,1

Ces résultats ont été reportés sur le graphique de la figure 3. Il apparaît alors que la nature du sol n'a guère d'influence et que la régression est bien linéaire. Le coefficient de corrélation est élevé : $r = 0,97$. La relation entre charge et densité réelle du mélange est :

$$c = 1\,883 (D_r - 1) \quad (3)$$

ce qui indiquerait une densité du sol égale à 2,1. Cette valeur paraît bien faible.

1.3.2. Emploi d'un agitateur mécanique

Ceci amène à penser que des micro-bulles d'air sont toujours contenues dans le sol : le mélange serait loin d'être parfait. Aussi avons-nous repris l'expérience en utilisant un agitateur mécanique à hélice, plongeant dans le mélange et l'agitant de manière bien plus énergique qu'avec un système magnétique. Les nouveaux résultats indiquent une nette augmentation de la densité du sol :

Terre de Sommières

Numéro	Charge (g/l)	Densité réelle	Densité du sol
28	60	1,030	2,0
29	102	1,057	2,3

Sable

Numéro	Charge (g/l)	Densité réelle	Densité du sol
30	151	1,093	2,6
31	223	1,139	2,6
32	273	1,170	2,7

Alluvions sableuses

Numéro	Charge (g/l)	Densité réelle	Densité du sol
33	74	1,044	2,5
34	142	1,086	2,5
35	197	1,121	2,6

Alluvions argileuses

Numéro	Charge (g/l)	Densité réelle	Densité du sol
36	56	1,035	2,7
37	115	1,070	2,6
38	166	1,109	2,9

Ces résultats ont été reportés sur le même graphique de la figure 3.

La corrélation est pratiquement parfaite, le coefficient étant de 0,998.

La relation entre charge et densité devient : $c = 1\,584 (D_r - 1)$ (4)

La densité réelle moyenne des sols est 2,7. Ceci est beaucoup plus plausible.

En conclusion, il apparaît que la présence d'air dans les sols transportés occasionne une variation de la densité du mélange aussi importante (sinon plus) que la nature du sol. Seul le brassage intervient pour diminuer cette quantité d'air. Il sera nécessaire de déterminer "in situ" la relation densité/charge solide afin d'étalonner le dispositif manométrique de mesure des charges solides : ceci pour obtenir des résultats avec la plus grande précision possible.

1.4. Relation entre augmentation de pression statique et charge solide

Cette relation se déduit des analyses ci-dessus.

L'équation (2) nous donne la relation entre la densité réelle et la densité manométrique :

$$D_r = 0,95 D_m + 0,05 \quad (2)$$

D'autre part, l'équation (1) donne la valeur de la densité manométrique en fonction des caractéristiques hydrauliques du manomètre :

$$D_m = (A + B) / A \quad (1)$$

Installons la prise de pression à 100 cm en dessous de la surface du mélange ($A = 100$). La surélévation (B) du niveau est exprimée en cm.

$$\begin{aligned} D_m &= (100 + B) / 100 \\ &= 1 + B/100 \end{aligned}$$

L'équation (2) devient :

$$\begin{aligned} D_r &= 0,95 (1 + B/100) + 0,05 \\ &= 1 + 0,0095 B \end{aligned}$$

En utilisant l'équation (3) liant densité réelle et charge solide :

$$c = 1883 (D_r - 1) \quad (3)$$

nous obtenons :

$$\begin{aligned} c &= 1883 ((1 + 0,0095 B) - 1) \\ &= 17,9 B \quad (c \text{ en g/l} \quad B \text{ en cm}) \end{aligned} \quad (5)$$

L'équation (4) donne, de la même façon :

$$\begin{aligned} c &= 1584 ((1 + 0,0095 B) - 1) \\ c &= 15,0 B \quad (c \text{ en g/l} \quad B \text{ en cm}) \end{aligned} \quad (6)$$

Les mesures manométriques effectuées avec l'argile de Sommières ont permis de vérifier ces équations : le graphique de la figure 4 représente la distribution de ces mesures. Le coefficient de corrélation est de 0,95. La droite de régression a une pente de 18, valeur en accord avec les équations (5) et (6).

1.5. Premières conclusions sur la précision des mesures limnimétriques réalisées avec des capteurs de pression

Les équations (5) et (6) sont intéressantes pour évaluer l'erreur à craindre sur la mesure des hauteurs d'eau des rivières, avec un capteur de pression, lorsque les transports solides sont importants. Les hauteurs d'eau seront surestimées (erreur typiquement systématique).

Une erreur de 1 pour cent est atteinte avec une charge de seulement 15 g/l,

Une erreur de 1 pour mille est atteinte pour une charge de 1,5 g/l.

Autrement dit, si nous voulons obtenir la classique précision de 1 cm, la charge solide à ne pas dépasser sera :

- pour une hauteur d'eau de 1 m : 15 g/l
- pour une hauteur d'eau de 2 m : 8 g/l
- pour une hauteur d'eau de 5 m : 3 g/l
- pour une hauteur d'eau de 10 m : 2 g/l

La même erreur se produit avec les eaux saumâtres. Avec 35 g de sel par litre, l'eau de mer a une densité de 1,025. L'erreur systématique sera de 2,5 % avec un limnimètre à pression étalonné pour l'eau douce.

La variation de la température de l'eau douce peut, elle aussi, occasionner une erreur :

Densité de l'eau douce :

- à 4°C : 1,0000
- à 20°C : 0,9982
- à 30°C : 0,9957

Considérons un limnigraphe à pression dont l'étalonnage a été effectué avec de l'eau douce dont la température était 20°. Cet instrument travaille sur une rivière dont l'eau est à 30°. L'écart de densité est 0,0025. L'erreur (par défaut) de 1 cm sera atteinte pour une hauteur d'eau de 4 m.

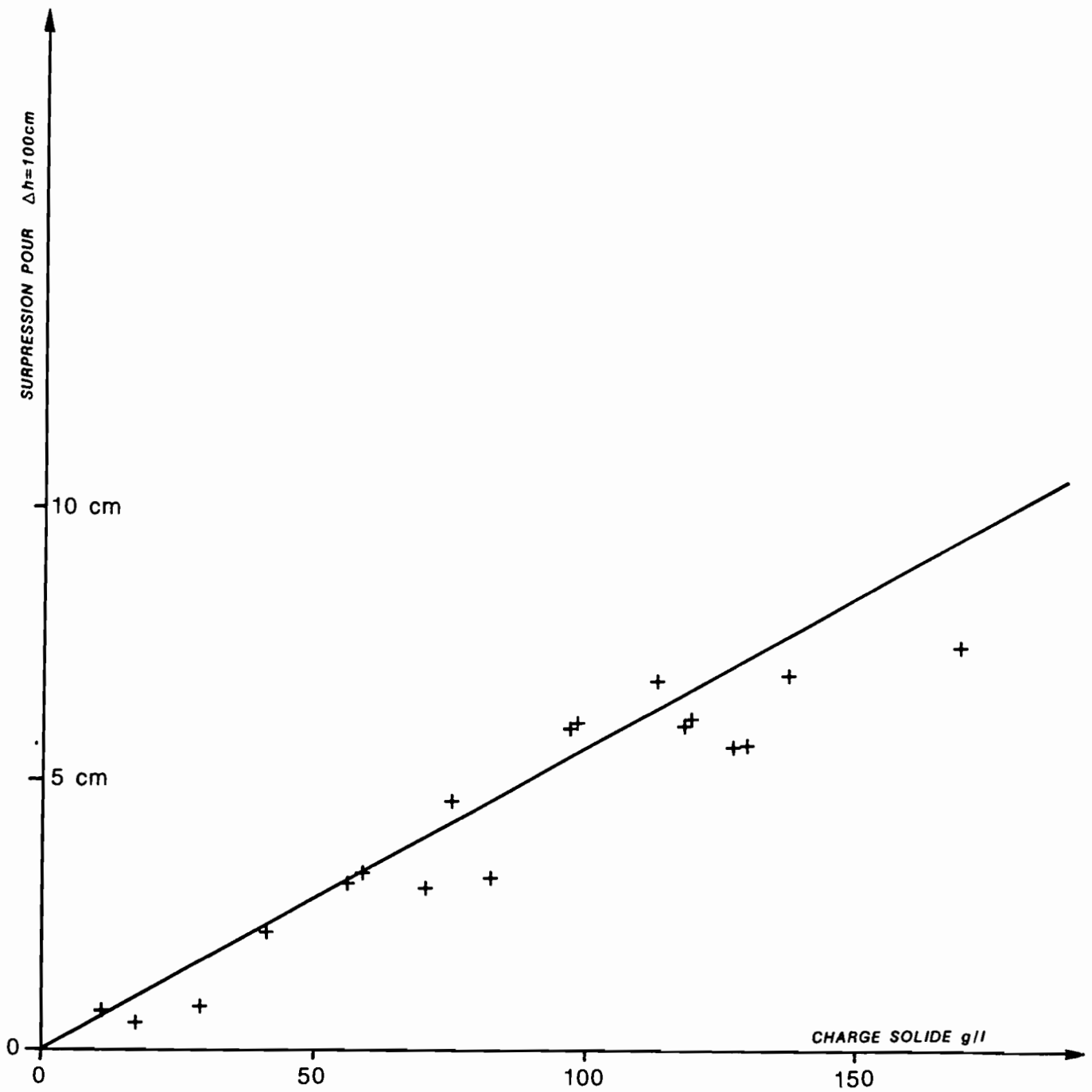


FIG. 4 - CORRELATION ENTRE LA SURPRESSION DUE A L'AUGMENTATION DE LA DENSITE ET LA CHARGE SOLIDE

Dessiné par J.P. DEBUICHE - Dessin N° 00148

2. SIMULATION DES MESURES AVEC UTILISATION DE CAPTEURS DE PRESSION, LE TUBE DE MESURE DE MONTPELLIER

Un dispositif expérimental, avec mesure des hauteurs d'eau par capteurs de pression, a été construit au Laboratoire d'Hydrologie. Ce dispositif permet de reprendre, sur des quantités plus importantes d'eau et de sol, les mesures de laboratoire, avec un brassage assez énergique. Il permet de vérifier si les capteurs de pression sont utilisables pour la mesure des transports solides.

2.1. Description du dispositif (voir figure 5 et photographies des figures 6 et 6 bis)

Un tube vertical en plexiglas, de 1,8 m de hauteur et 0,20 m de diamètre, contient le mélange eau + sol. Des prises latérales, avec raccords encliquetables et robinets, sont disposées à divers niveaux :

- trois (dont une pour la vidange) à la base du tube
- une à 0,50 m
- une à 1,00 m
- une à 1,50 m
- une à 1,75 m

Une pompe électrique immergée assure une circulation du mélange eau + sol de façon à réaliser un brassage énergique et à rendre le mélange le plus homogène possible.

Les capteurs de pression, fabriqués par la Société suisse KELLER, présentent les caractéristiques suivantes :

- étendue de mesure : 0 à 100 mb (soit 0 à 1,02 m)
- erreur à craindre (suivant le constructeur) :
 - . linéarité : 0,2 %
 - . hystérésis : 0,05 %
- plage de température : 0 à 30° C

Chaque capteur est relié à un bloc électronique, fabriqué aussi par KELLER. Ce bloc comprend un circuit amplificateur, un convertisseur analogique/digital et un afficheur 4 digits. L'alimentation en énergie électrique s'effectue en courant continu 12 volts.

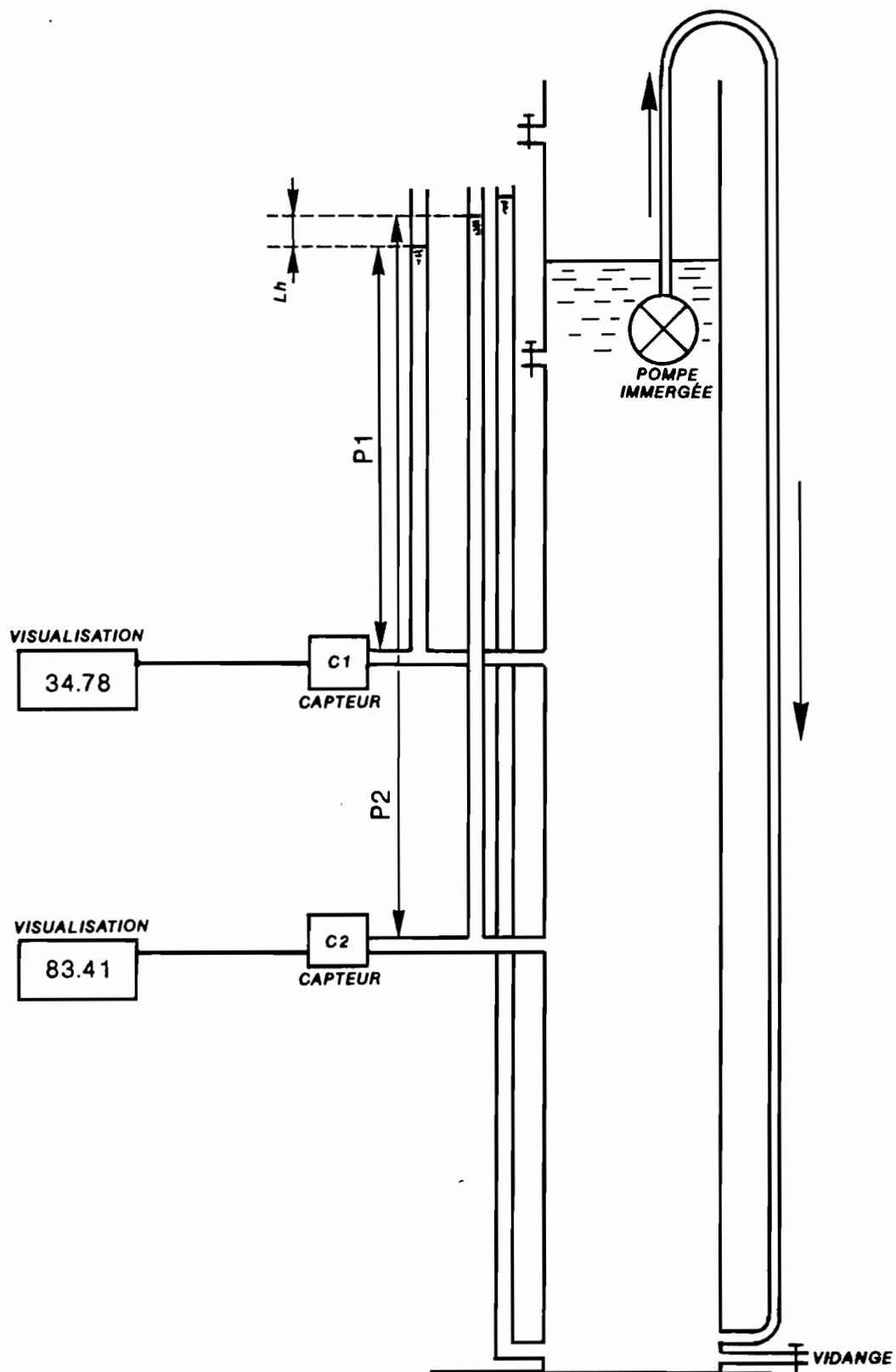
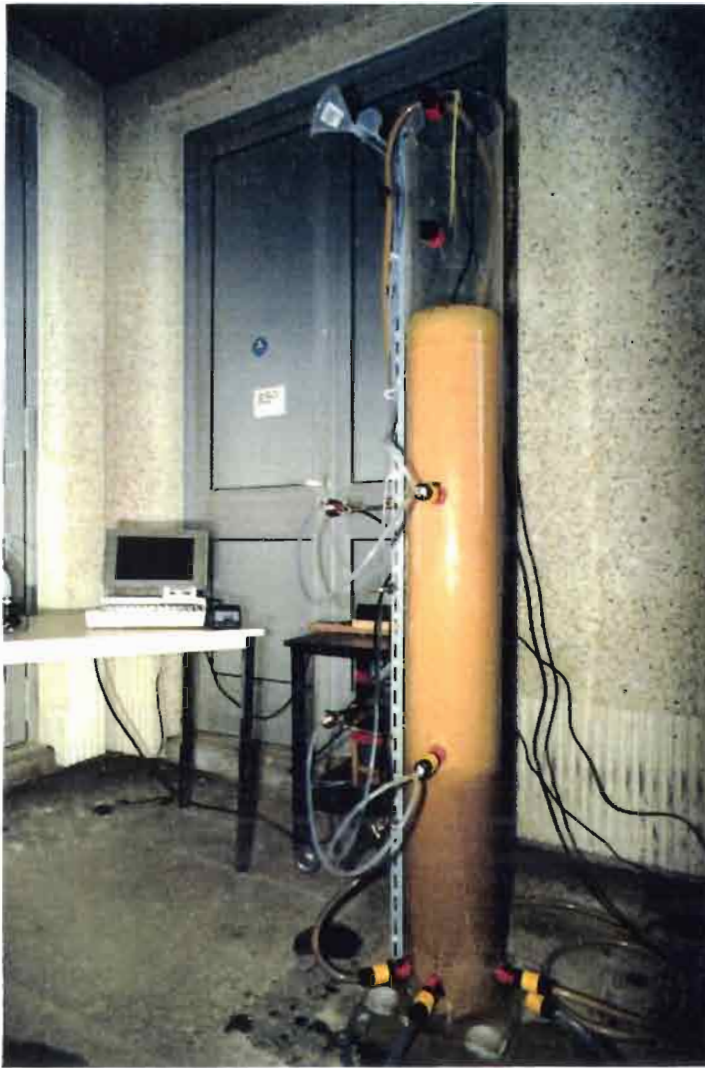


FIG. 5 - TUBE DE MESURE - PRINCIPE D'INSTALLATION

Dessiné par J.C. MARCOUREL - Dessin N° 00178 - 1989

FIG. 6

LE TUBE DE MESURE DE MONTPELLIER



Dispositif Général
Aspect du mélange pendant l'expérience

Afficheurs
et électronique des capteurs

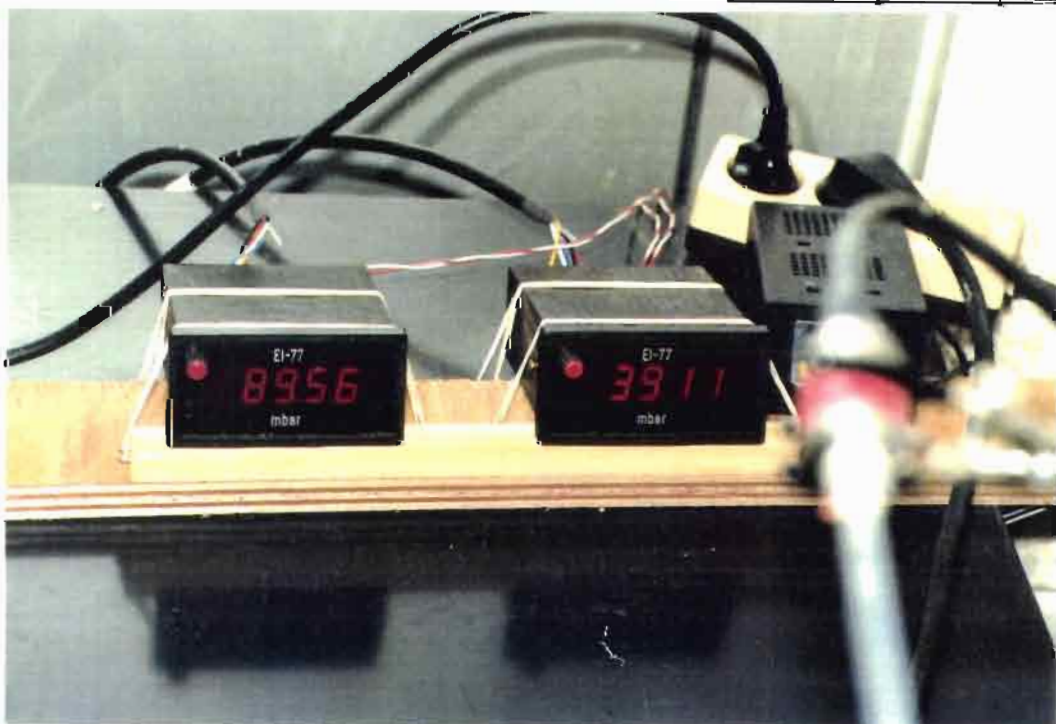
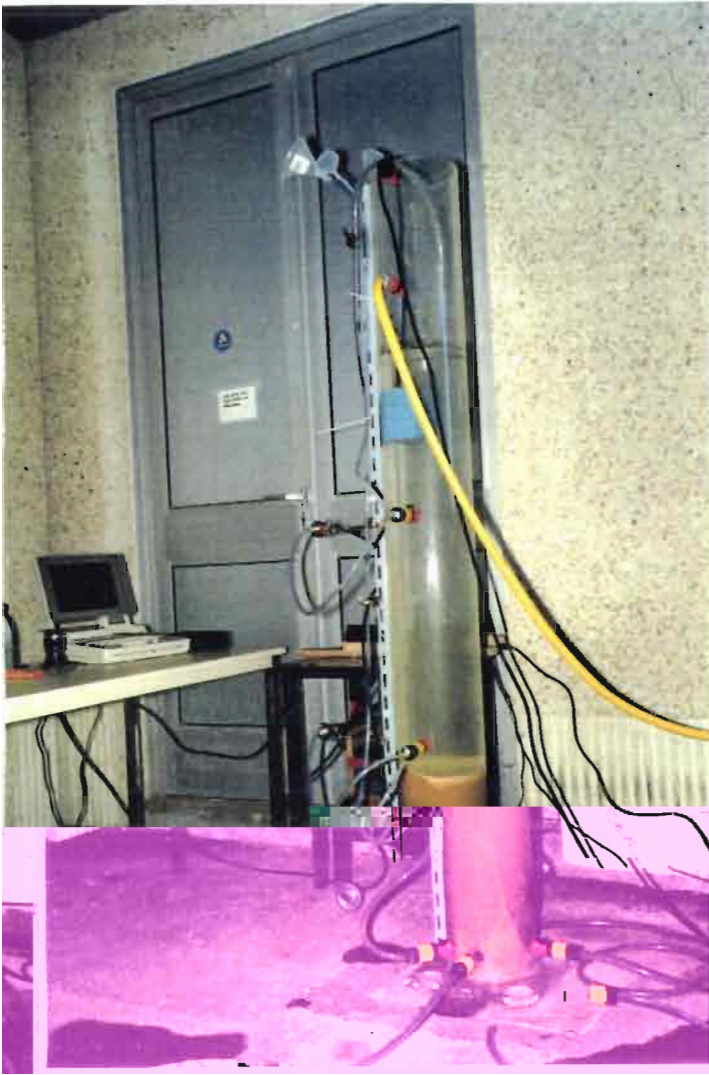
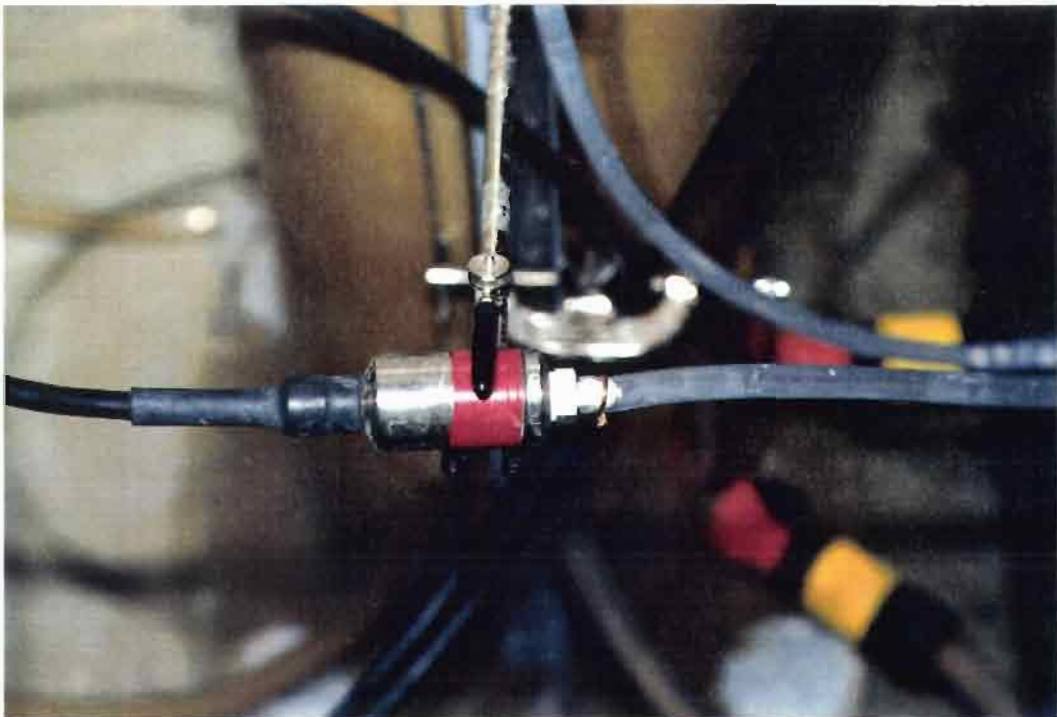


FIG. 6 bis LE TUBE DE MESURE DE MONTPELLIER



Après l'expérience,
le sol a déposé

Capteur de pression KELLER



en descente de pression

Hauteur manométrique (mm)	Pression brute (mm)	Pression corrigée (mm)	Ecart (mm)
979	991	978	+1
934	948	935	+1
888	905	892	+4
849	862	849	0
796	810	797	+1
731	746	733	+2
690	703	690	0
649	663	650	+1
603	617	604	+1
553	568	555	+2
516	529	516	0
488	501	488	0
446	458	445	-1
396	410	397	+1
350	362	349	-1
290	302	289	-1
233	247	234	+1
186	199	186	0
140	157	144	+4
80	93	80	0
25	37	24	+1

soit un écart-type d'erreur résiduelle de $\pm 1,2$ mm

Le capteur n° HOW22 n'a été corrigé que d'une erreur de décalage de + 13 mm. Sa linéarité est excellente.

Le capteur n° HUQ83 a dû être corrigé d'une petite erreur de linéarité. La fonction de correction est :

$$C = -0,008 P + 50 \quad \text{avec} \quad C \text{ et } P \text{ en } 1/100 \text{ de mb}$$

L'élément de référence est une règle métrique graduée en mm, fixée sur le long du tube de mesure. La hauteur de la surface de l'eau, dans le tube, est lue avec une précision de l'ordre du mm, de même ordre de grandeur que celle des écart-types des capteurs.

Il est donc fort possible que les capteurs donnent mieux que le mm et nous sommes obligés de conclure au respect des précisions indiquées par le constructeur. D'autre part, l'erreur d'hystérésis est pratiquement nulle.

- essais de température

Aucun essai n'a été effectué. Les capteurs seront, dans la pratique, tous les deux à même température. Nous avons supposé, dans un premier temps, que la déviation due à la température devait être identique et dans le même sens pour les deux capteurs. Ceci demandera à être vérifié, puis à être corrigé dans le programme de traitement informatique si besoin est.

- dérive à long terme sur le zéro

En fin d'essai, les deux capteurs ont été placés dans 40 cm d'eau. La charge d'eau sur les capteurs est toujours restée constante. Ceci afin de vérifier si, la charge étant la même, les pressions indiquées ne variaient pas dans le temps. Hélas nous avons décelé des dérives inacceptables, de l'ordre de 0,10 mb/heure. Lors de nos essais, une telle dérive est sans conséquence puisque le calage des capteurs est souvent vérifié. Par contre c'est un vice rédhibitoire pour une station devant fonctionner automatiquement et avec le minimum d'interventions. Il a été impossible de vérifier si cette erreur était imputable au capteur ou à son électronique. Aussi avons-nous renvoyé l'ensemble du matériel chez le constructeur pour qu'il annule ces dérives de zéro avant toute installation sur le terrain.

- dérive à la mise en route

A cause de l'existence de la dérive à long terme, nous n'avons pas pu vérifier si, lors de chaque mise sous tension de l'ensemble capteur + électronique, l'indication de la valeur de la pression était toujours la même ou s'il fallait un certain temps pour obtenir une stabilisation. Ceci reste donc à vérifier.

2.3. Emploi de l'eau de mer

Monsieur LOYER, Chimiste à l'ORSTOM, s'intéresse aux mesures de salinité des eaux saumâtres. Aussi nous avons fait des tests avec de l'eau de mer (Méditerranée), qui a été progressivement diluée avec de l'eau douce. Les résultats sont significatifs :

Teneur en sel (g/l)	Densité réelle	Ecart de pression brute (mb)
35,5	1,028	52,08
26,4	1,024	51,65
19,4	1,022	51,35
9,7	1,007*	50,99
4,3	1,005*	50,37
2,2	1,005*	49,98

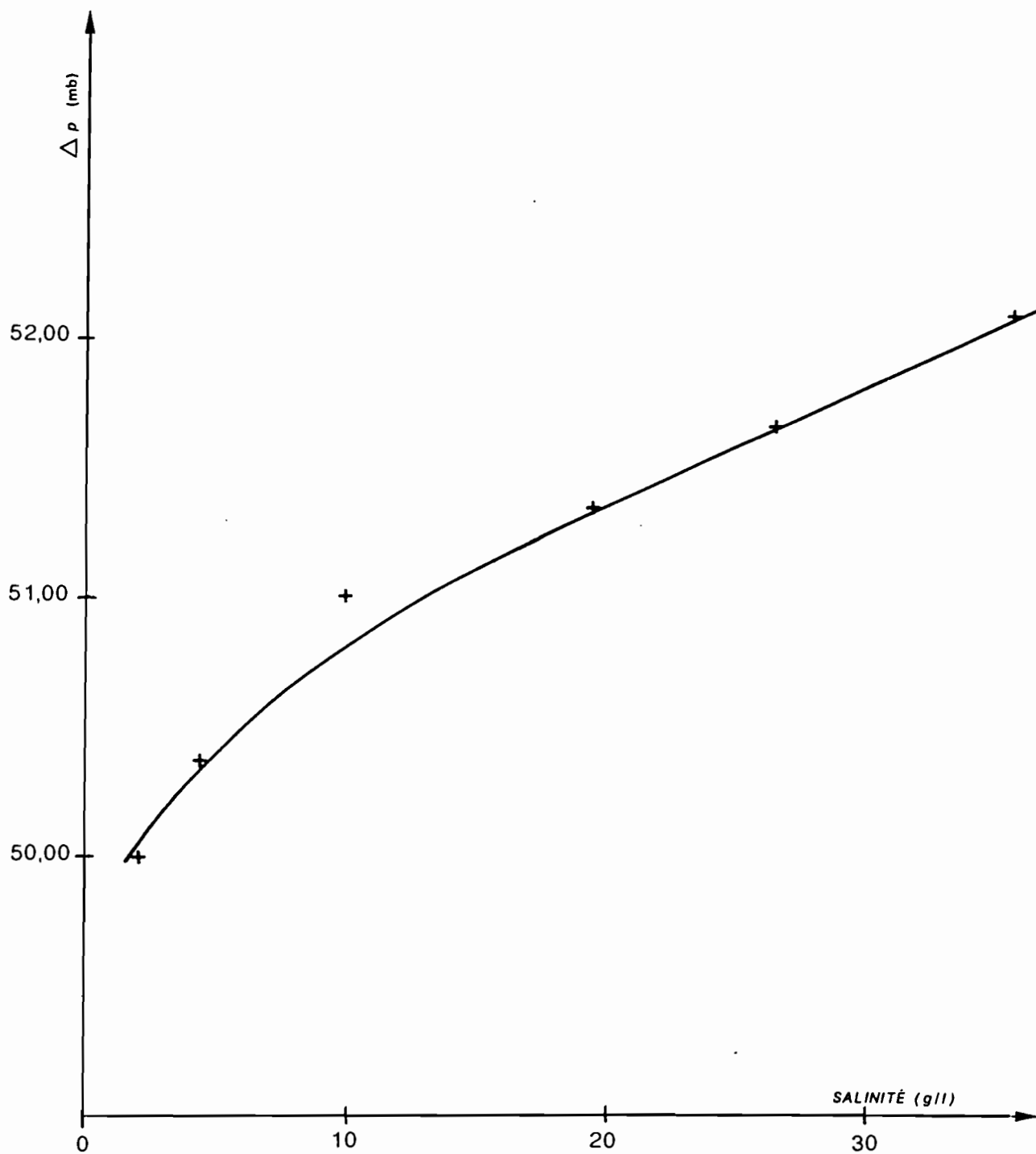


FIG. 8 - VARIATION DE LA DIFFERENCE DES PRESSIONS MESUREES
AUX DEUX CAPTEURS AVEC LA TENEUR EN SEL

Dessiné par J.P. DEBUICHE - Dessin N° 00168 - 1989

Les mêmes formules que celles utilisées en page n° 3 ont été employées pour calculer les densités et la charge solide.

La "densité manométrique" (6ème colonne) s'obtient par la formule :

$$D_m = \frac{496 + dh}{496}$$

où 496 est la distance verticale (en mm) entre les deux capteurs
et dh la différence de niveau lue sur les manomètres.

La "hauteur piézométrique" (H piézo) des capteurs s'obtient par la relation :

$$H \text{ (mm)} = 10,197 \times P \text{ (mb)}$$

avec 10,197 : constante de transformation des mb en mm d'eau, c'est-à-dire : 100/9,807
et P : différence de pression entre les deux capteurs.

La "densité capteur" est : $D_c = H / 496$

2.5. Corrélation entre densité réelle et densité manométrique. Vérification des premiers résultats de laboratoire

Le graphique de la figure 9 montre que la densité déterminée par la différence de hauteur d'eau dans les manomètres est exactement la même que celle obtenue par mesure du poids et du volume. C'est très net avec les sols de DRAIX, pour lesquels le coefficient de corrélation est très élevé : 0,994 pour 9 échantillons. Ceci confirme les premiers résultats sur les mesures en laboratoire.

Le graphique de la figure 10 montre l'excellente corrélation qui existe entre la densité du mélange et la charge solide. Le coefficient de corrélation est : 0,999. La densité réelle du sol (2,86) est à rapprocher de celle déterminée avec l'agitateur mécanique (voir 1.3.), tandis que les mesures de densité réelle, effectuées par la CIRAD, indiquent :

- Sol de DRAIX : 2,7
- Sable : 3,2 (en accord avec l'unique prélèvement)
- Alluvions de la Jasse : 2,6

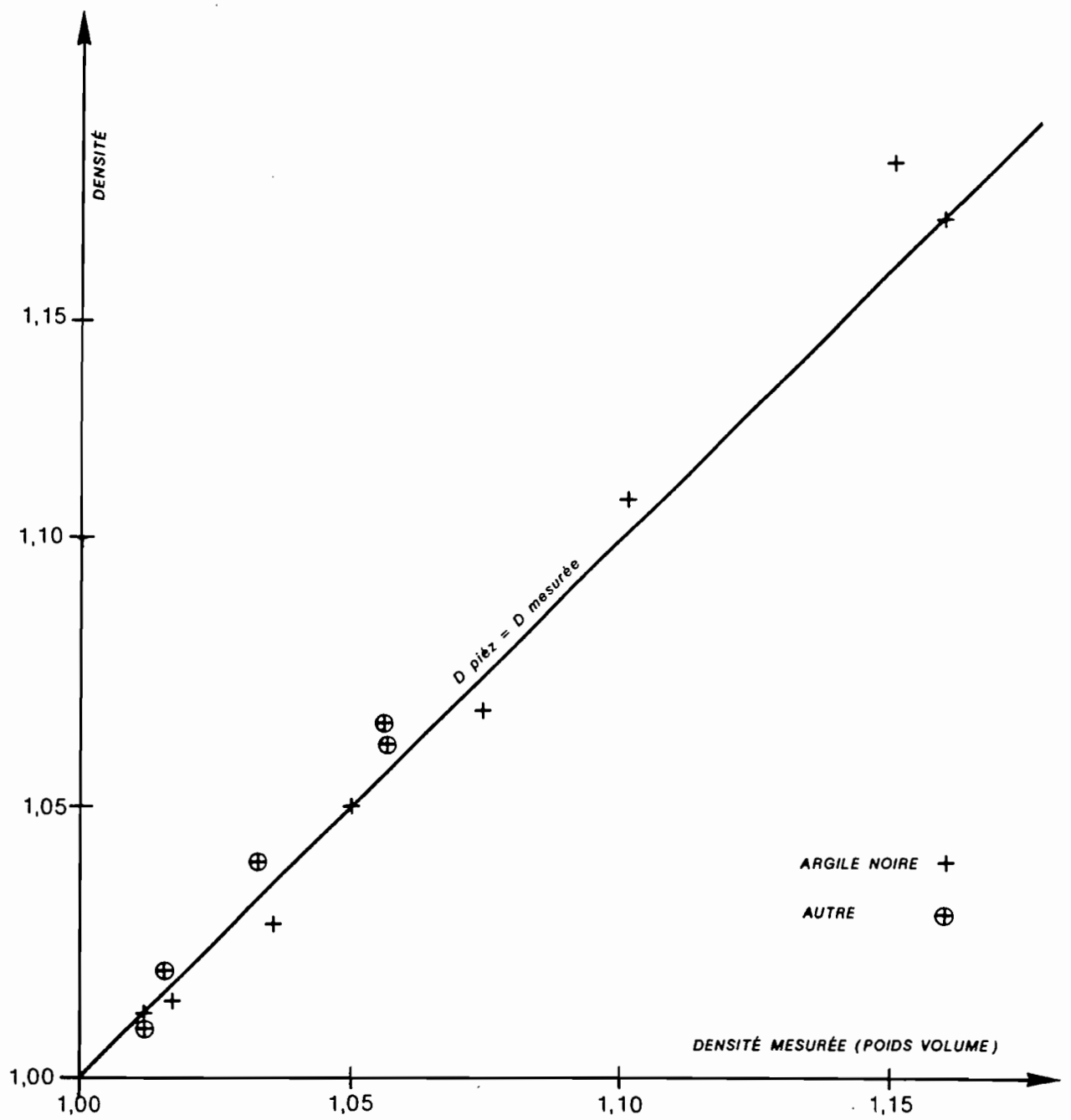


FIG. 9 - CORRELATION ENTRE LA DENSITE MESUREE ET LA DENSITE "PIEZOMETRIQUE"

Dessiné par J.P. DEBUICHE - Dessin N° 00169 - 1989

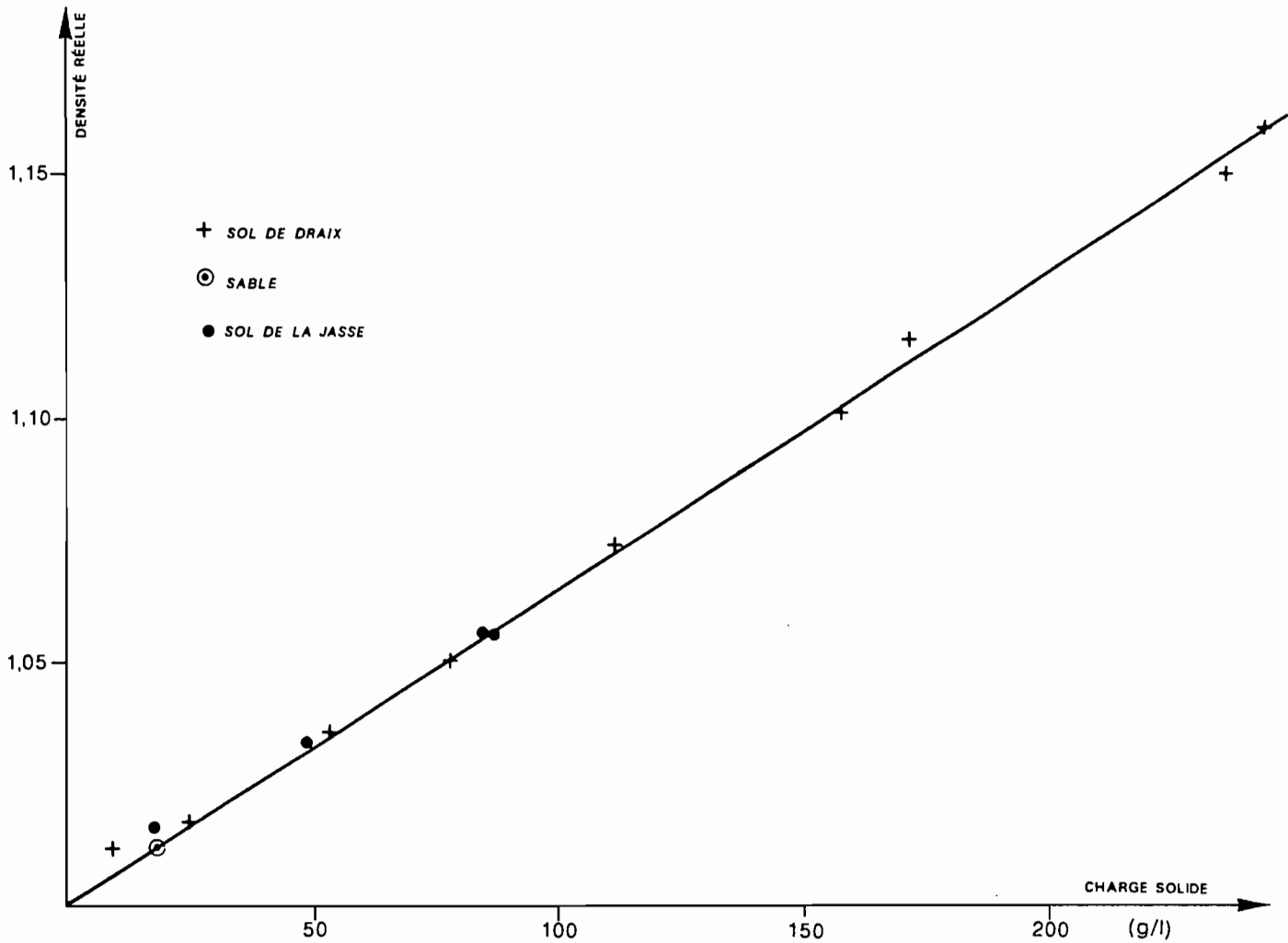


FIG. 10 - CORRELATION ENTRE CHARGE SOLIDE ET DENSITE DU MELANGE SOL + EAU

Dessiné par P.C. MARCOUREL - Dessin N° 00182 - 1989

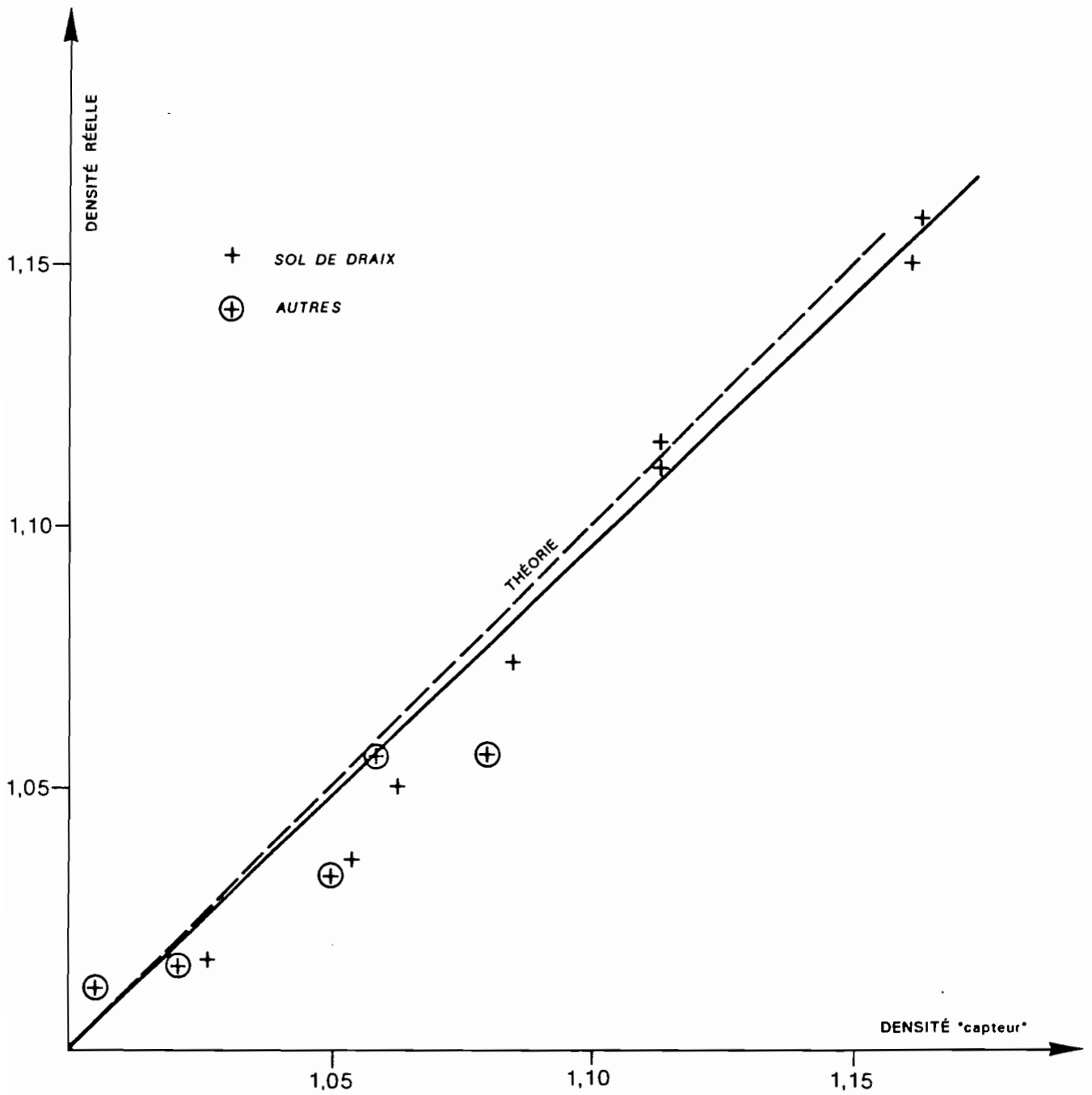


FIG. 11 - CORRELATION ENTRE LA DENSITE DETERMINEE PAR PESEE ET CELLE CALCULEE AVEC LES CAPTEURS DE PRESSION

Dessiné par J.C. MARCOUREL - Dessin N° 00183 - 1989

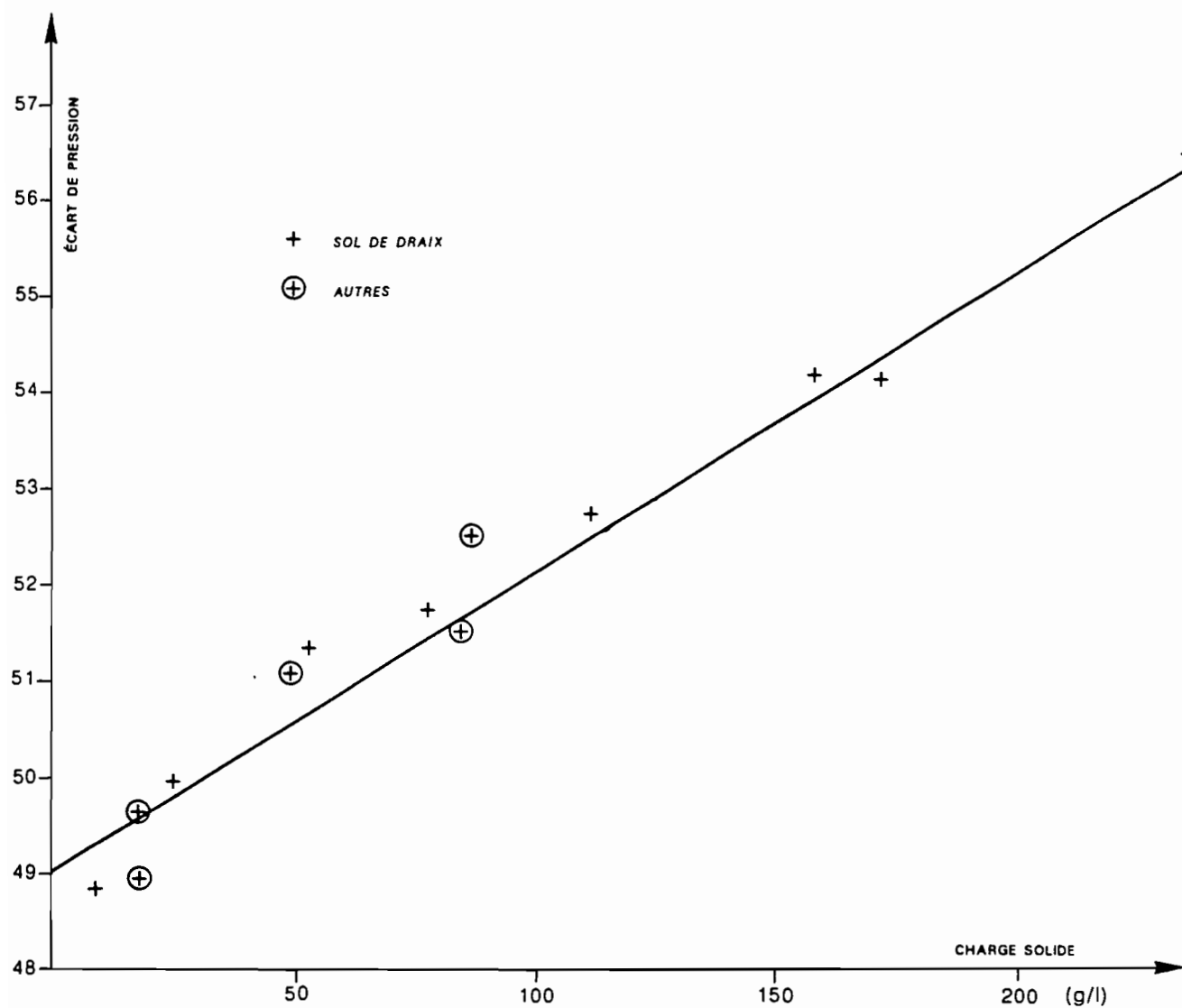


FIG. 12 - CORRELATION ENTRE LA CHARGE SOLIDE (g/l)
 ET LA DIFFERENCE DE PRESSION
 ENTRE LES CAPTEURS (distance entre les capteurs : 496 mm)

Dessiné par J.C. MARCOUREL - Dessin N° 00184 - 1989

2.7. Précision de la méthode des capteurs de pression pour la mesure des charges solides

Les relations ci-dessus permettent d'avoir une idée sur la précision de la mesure des charges solides avec des capteurs de pression. Pour cela, nous avons, à partir des différences de pression mesurées par les capteurs, recalculé les charges solides théoriques. L'écart (en g) avec ce qui a été mesuré sur l'échantillon a été ramené en pourcentage du poids de sol.

Nous avons également recalculé les charges solides en fonction des hauteurs manométriques.

Les résultats sont les suivants:

- Sols de DRAIX

SOL		CAPTEUR DE PRESSION				MANOMETRE			
N°	Charge (g/l)	Press. (mb)	Charge théorique (g/l)	Ecart (g) (%)		h (mm)	Charge théorique g/l	Ecart (g) (%)	
1	237	56,49	235	- 2	0,8	84	249	+ 12	5,1
2	245	56,61	239	- 6	2,5	79	234	- 11	4,7
3	172	54,15	161	-11	6,4				
4	158	54,18	161	+ 3	1,9	53	157	- 1	0,6
5	112	52,73	115	+ 3	2,7	34	101	+11	9,8
6	78	51,72	83	+ 5	6,4	25	74	- 4	5,1
7	53	51,34	71	+18	34,0	14	42	- 11	20,8
8	25	49,92	26	+ 1	4,0	7	21	- 4	16,0

- Sols de la JASSE

SOL		CAPTEUR DE PRESSION				MANOMETRE			
N°	Charge (g/l)	Press. (mb)	Charge théorique (g/l)	Ecart (g) (%)		h (mm)	Charge théorique g/l	Ecart (g) (%)	
11	85	51,51	76	- 9	10,6	33	98	+13	15,3
12	87	52,53	109	+22	25,3	31	92	+ 5	5,7
13	49	51,07	63	- 14	28,6	20	59	+10	20,4
14	18	49,67	18	0	0,0	10	30	+12	66,7

Les échantillons n° 9 et 10 n'ont pas été traités, les charges théoriques calculées par la relation donnant des résultats de signe négatif.

2.7.1. Détermination de la charge solide par les capteurs

A l'exception de l'échantillon n° 7, il ressort de ce tableau que les résultats concernant les sols de DRAIX peuvent être considérés comme satisfaisants.

Par contre les sols de la Jasse présentent des écarts de l'ordre de 25 %. Il y a, là, probablement un défaut d'homogénéité lié à un brassage insuffisant.

Bien sûr, ce mode de calcul en pourcentage minimise l'erreur sur les forts transports solides, supérieurs à 50 g/l. Mais cette méthode n'est-elle pas destinée justement aux eaux très chargées ?

2.7.2. Détermination par les différences manométriques

Les résultats ne sont pas meilleurs. Ceci montre que les capteurs sont aussi précis qu'un manomètre observé avec la précision du mm.

2.7.3. Conclusion

Que ce soit avec les capteurs de pression ou les manomètres, les équations de régression entre pression et charge solide indiquent une variation de charge solide de l'ordre de 3 g lorsque la pression (ou la variation de niveau du manomètre) varie de 1 mm.

La précision des capteurs de pression est de ± 1 mm. En conséquence (et l'expérimentation vient de le prouver) il sera difficile d'obtenir une détermination de la charge solide meilleure que ± 5 g/l (application de la théorie des erreurs sur deux capteurs). Mais rappelons qu'ici les capteurs sont distants de 50 cm.

Cette précision sera normalement doublée ($\pm 2,5$ g/l) si les capteurs sont situés à 100 cm l'un au dessus de l'autre.

IL N'EST PAS ENVISAGEABLE D'ESPERER UN MEILLEUR RESULTAT DANS L'ETAT ACTUEL DE LA TECHNOLOGIE DES CAPTEURS DE PRESSION.

3. EXPERIMENTATION SUR LE TERRAIN

Le dernier volet de ce travail consistera en l'installation du dispositif sur un bassin versant représentatif, de façon à tester en "dynamique" sur un site, les résultats obtenus en "statique" dans un laboratoire.

Le bassin versant de DRAIX paraît bien convenir à ce travail, où le CEMAGREF procède à un ensemble de tests avec différents appareillages, dont les résultats de mesure constitueront la référence de comparaison, à défaut d'une exacte "vérité terrain".

3.1. L'infrastructure mécanique

Les capteurs seront installés dans une gaine métallique qui les protégera des chocs. On peut imaginer un système constitué par un fer U en aluminium qui contiendra les berceaux des capteurs. Ce fer U sera amovible, de façon à pouvoir effectuer les opérations d'étalonnage et de nettoyage. Les figures 14 et 15 donnent une idée de ce que pourrait être cette installation, qui serait scellée sur le piédroit du canal, en amont du mesureur PARSHALL.

Les capteurs pourront être espacés de 30, 50, ou 80 cm.

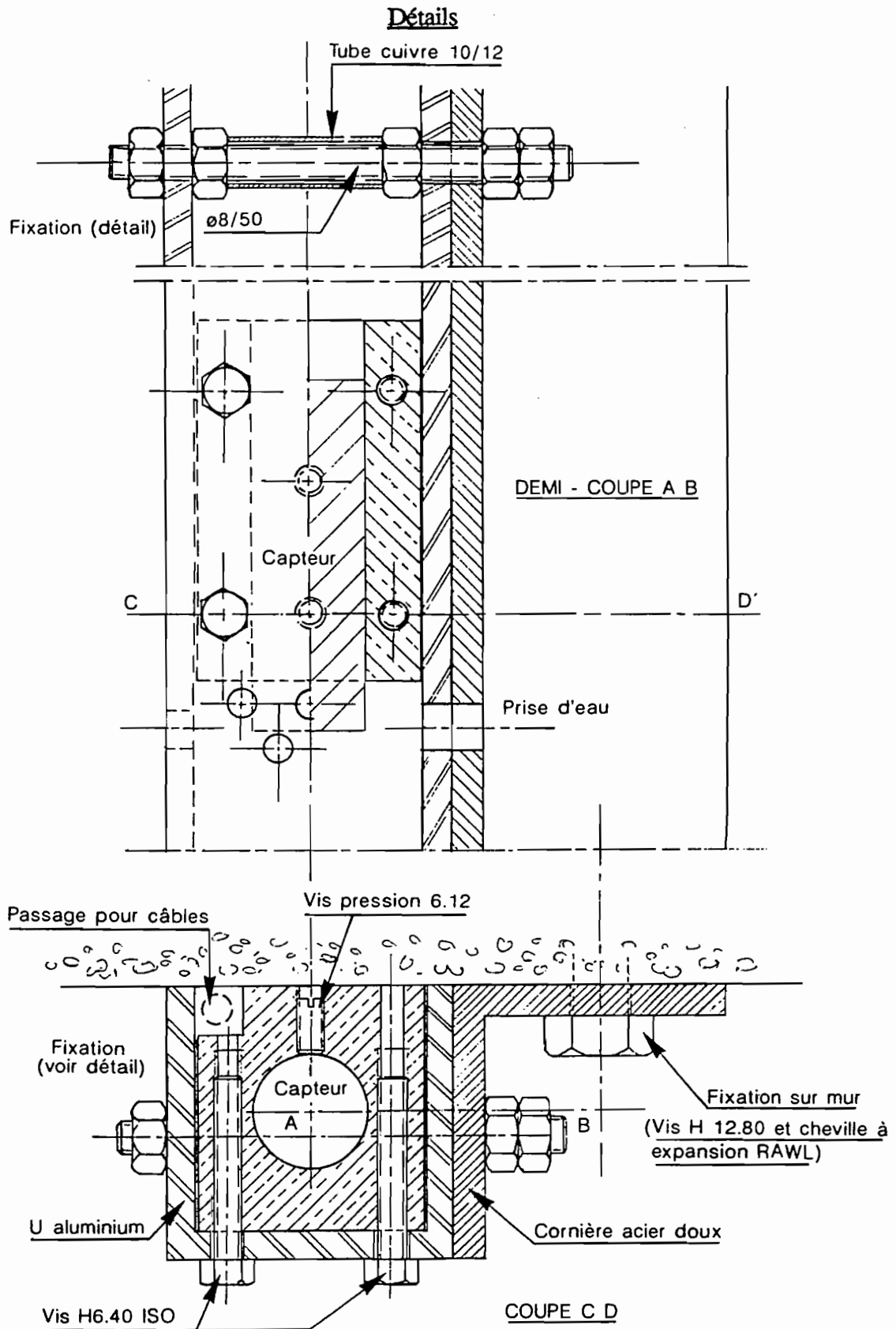
3.2. L'électronique de traitement

La figure n° 16 représente l'organigramme de cette partie.

Chaque ensemble électronique que nous a fourni la Société KELLER comporte une sortie analogique 0/2 volts. Entre les "+" des sorties de ces deux ensembles électroniques, la différence de potentiel est proportionnelle à la différence de pression sur les capteurs (quand ils sont tous les deux immergés). Un amplificateur opérationnel type "instrumentation" permet d'ajuster cette tension en une fonction simple de la différence de pression. Un convertisseur analogique/digital (10 bits minimum) transformera ce signal en un message binaire.

Il est nécessaire d'employer ensuite un microprocesseur pour rendre le message cohérent : en effet la très grande sensibilité des capteurs vont les faire réagir au moindre batillage. Nous devons obligatoirement lisser les valeurs des pressions capteurs. Une méthode consiste à interroger les capteurs une centaine de fois (en deux ou trois secondes) et à prendre la valeur moyenne de cette centaine de valeurs recueillies. Chaque valeur mesurée étant indépendante de

FIG. 15 - INSTALLATION DU TURBIDIMETRE A CAPTEURS DE PRESSION



Dessiné par J.C. MARCOUREL - Dessin N° 00177 - 1989

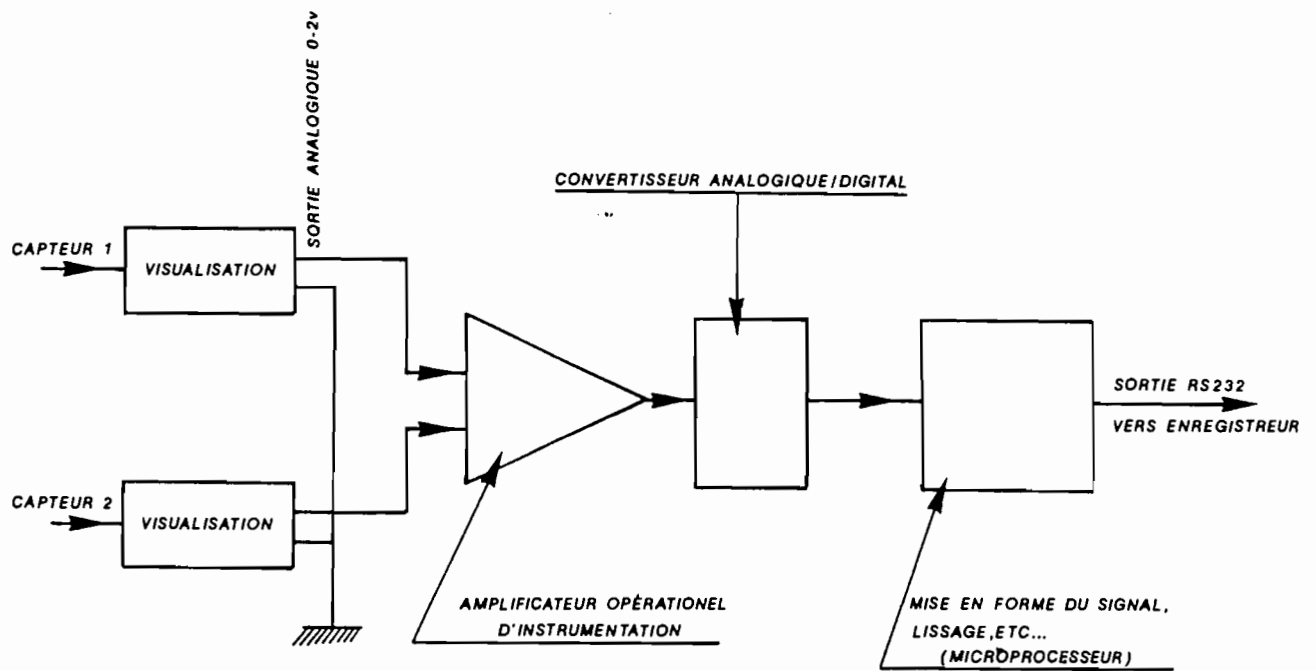


FIG. 16 - TRAITEMENT DU SIGNAL

Dessiné par J.C. MARCOUREL - Dessin N° 00178 - 1989

la précédente, la théorie des erreurs voudrait que la précision de la moyenne ainsi obtenue soit dix fois plus grande que celle propre à chaque mesure de différence de pression. C'est également pour cette raison que cette méthode paraît meilleure que toute autre méthode physique de filtrage.

Une carte électronique type SCALP, avec microprocesseur INTEL 8052AH-BASIC peut certainement convenir et ce d'autant mieux qu'elle possède une sortie RS232, nécessaire à l'emploi d'un enregistreur moderne.

3.3. L'enregistreur

Son choix n'est pas encore fixé : il existe actuellement bon nombre de constructeurs français ou de la CEE qui fournissent un excellent matériel.

La Société CIMEL fabrique des enregistreurs que l'ORSTOM utilise pour des applications météorologiques. L'INRA utilise, pour sa part, des enregistreurs CAMPBELL, robustes et bon marché.

Il faudra arrêter le choix en accord avec le CEMAGREF.

4. CONCLUSIONS

Les manipulations réalisées en laboratoire tendent à prouver que la mesure directe ou indirecte de la densité d'un mélange eau + sol peut être employée pour connaître la quantité de terre transportée en suspension.

Les difficultés rencontrées ont surtout concerné le brassage du mélange: il ne semble guère possible de mesurer autre chose que les argiles ou les limons fins.

Malgré leur dérive à long terme, les capteurs KELLER ont donné satisfaction, tout au moins en laboratoire. Le gros problème réside dans l'impossibilité de leur faire admettre plus de 50 % de surpression : il sera possible d'employer un capteur ayant une plage de mesure plus importante, mais la précision diminuera.

Mais de nouveaux capteurs ont fait leur apparition ces derniers mois. Ces capteurs admettent des suppressions de l'ordre de 100 fois l'étendue de la plage de mesure.

Les mesures en laboratoire ont permis de vérifier que la surélévation de hauteur manométrique était strictement égale à l'augmentation de la densité du mélange sol + eau, comme la théorie le laissait supposer. Par conséquent toute variation dans les transports solides se traduira par une variation proportionnelle de la densité. Nous avons montré que cette variation se traduisait par une augmentation de pression qu'il était possible de mesurer soit avec un manomètre à liquide, soit avec un capteur de pression.

Nous nous sommes aussi rendu compte que la nature du sol n'avait qu'une très faible influence sur l'augmentation de la densité: seule la charge solide (grammes par litre) est à prendre en ligne de compte. Ceci va simplifier considérablement les étalonnages car il est probable que la nature physique des transports en suspension varie dans l'espace et dans le temps.

Il reste à souhaiter que l'expérimentation sur le terrain, donc en dynamique, fonctionne aussi bien que celle réalisée en laboratoire et que nous puissions déterminer la charge solide avec une précision pouvant atteindre 5 g/l, comme nous l'avons mis en évidence. Cette précision peut être augmentée en écartant davantage les capteurs.

Enfin, terminons en mettant en garde les hydrologues sur l'emploi des limnigraphes à pression avec des eaux chargées. Une concentration de l'ordre de 20 grammes au litre entraîne une erreur de 1 % sur la hauteur d'eau.

5. BIBLIOGRAPHIE

- AISH/IAHS, 1977. Erosion et Transports Solides dans les Eaux Continentales.
Actes du Colloque de PARIS (juillet 1977).
IAHS-AISH. Publication n° 122.
- AISH/IAHS, 1981. Mesure de l'Erosion et du Transport des Sédiments.
Actes du Colloque de FLORENCE (22-26 juin 1981).
IAHS-IASH. Publication n° 133.
- AISH/IAHS, 1988. Sédiment Budgets.
Actes du Colloque de PORTO ALEGRE (décembre 1988).
IAHS-IASH. Publication n° 174.
- OMM/WMO, 1982. Operational Methods for Measurement of Sediment Transport.
- CAMAGREF/ONF-RTM. Bassins Versants Expérimentaux de DRAIX.
Compte-Rendu de Recherche n° 1 en Erosion et Hydraulique
Torrentielle. Septembre 1987.
- COLOMBANI J. Transferts de Matières Solides dans le Cycle de l'eau.
Mesures et Evaluations - ORSTOM, 1987.