



BRGM

**BUREAU DE RECHERCHES
GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES**

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
B.P. 6009 - 45 Orléans (02)
Tél.: (38) 66.06.60

SOCIÉTÉ DES EAUX DE MARSEILLE
25, rue Edouard-Delaunay, 13 Marseille (6^e)

**SYNDICAT DE RECHERCHES D'EAU DE PORT-MIOU
(Bouches-du-Rhône)**

**LA SOURCE SOUS-MARINE KARSTIQUE DE PORT-MIOU
(COMMUNE DE MARSEILLE)**

**BILAN DES ÉTUDES AU 31/12/71
EXAMEN DES PROBLÈMES DE CAPTAGE**

par

J. AURIOL et M. BONNET

R E S U M E

Le présent rapport fait le point des travaux, observations et études réalisées au 31 décembre 1971, sur le site de Port-Miou, par le B.R.G.M. et la Société des Eaux de Marseille, réunis en un Syndicat de Recherches pour l'étude des problèmes que posent des résurgences particulières tant sur le plan méthodologique que dans la perspective d'une éventuelle exploitation.

Dans un premier chapitre, nous avons rassemblé l'ensemble des résultats acquis au cours des campagnes précédant l'année 1970.

Dans un deuxième chapitre, les plus récentes données et interprétations sont présentées.

Dans un troisième chapitre, on a présenté deux modèles simulant de façon qualitative, le phénomène naturel de Port-Miou, ainsi que quelques perspectives d'avenir dans le cadre d'une exploitation de cette ressource d'eau douce.

o

o

o

S O M M A I R E

INTRODUCTION

1. - RAPPEL DES DONNEES EXISTANTES

- 1.1. - Situation géographique - Géologie générale
- 1.2. - Hydrogéologie
- 1.3. - Historique de l'Exploration des conduits karstiques
 - 1.3.1. - Port-Miou
 - 1.3.2. - Bestouan

2. - DONNEES QUANTITATIVES CONCERNANT LA SOURCE DE PORT-MIOU

- 2.1. - Géométrie du système
- 2.2. - Phénomènes hydrauliques dans la galerie de Port-Miou
 - 2.2.1. - Généralités
 - 2.2.2. - Mesures de vitesse de niveau et de salinité
 - . Mesures de vitesse
 - . Mesures de niveau
 - . Mesures de salinité
- 2.3. - Interprétation des mesures
 - 2.3.1. - Forme et évolution du biseau salé
 - 2.3.2. - Relations entre pluies, débit à Port-Miou et débit au Bestouan

3. - PROBLEMES D'EXPLOITATION (Modèle)

- 3.1. - Généralités
- 3.2. - Rôle d'un barrage
- 3.3. - Poursuite d'un programme de mesures dans la galerie

BIBLIOGRAPHIE

LISTE DES FIGURES, PLANCHES, ANNEXES ET TABLEAUX

- FIGURE 1 - Echantillons prélevés au droit de la cloche
(Diagramme SCHOELLER - BERKALOFF)
- 2 - Evolution de la teneur en chlorure dans la partie
supérieure de la galerie
- 3 - Allure des courbes de teneur en chlorure en fonc-
tion de la profondeur (au droit de la cloche)
- PLANCHE 1 - Carte géographique régionale
- 1 Bis - Carte topographique
- 2 - Fracturations
- 2 Bis - Relevés pluviométriques
- 3 - Schéma du profil en long de la galerie (Port-Miou)
- 4 - Coupe de la galerie explorée en amont de la cloche
- 5-1, 5-2, 5-3, 5-4 - Coupes transversales de la galerie
(Port-Miou, Bestouan)
- 6 - Photographie de l'interface
- 7-1, 7-2, 7-3 - Enregistrements des courantographes
- 8 - Reports graphiques des variations de niveaux
- 9 - Reports graphiques des analyses chimiques
- 10 - Photographie aérienne infra-rouge
- ANNEXE 1 - Photographies aériennes
- 2 - Courantographe CEMA
- 3 - Description du S.O.I.F.
- 4 - Etude statistique
- 5 - Etude schématique à l'aide d'un modèle analogique
- TABLEAU 1 - Analyses chimiques
- 2 - Prélèvements d'eau (appareil TAMAM)
- 3 - Mesures de résistivités (S.O.I.F.)

I N T R O D U C T I O N

HISTORIQUE

Dans le massif des Calanques qui constitue le littoral entre Marseille et Cassis, des sorties d'eau douce importantes ont été observées depuis fort longtemps. Deux d'entre elles, les résurgences de Port-Miou et du Bestouan sont pénétrables.

Le Comte de MARSILI, en 1706, a été l'un des premiers à tenter d'expliquer ce phénomène naturel. Par la suite, d'autres célébrités dont MARTEL, s'y sont intéressées et RIMBAUD lui-même a chanté la "Rivière sous-marine de Port-Miou". Cependant, l'analyse du phénomène est demeurée superficielle jusqu'à ce que l'exploration sous-marine ait connu son développement, grâce au scaphandre autonome et la première tentative sérieuse de pénétration a été faite en 1955 par l'O.F.R.S. Sur cette lancée, les deux organismes qui constituent le Syndicat de Recherches de Port-Miou (le Bureau de Recherches Géologiques et Minières, d'une part, et la Société des Eaux de Marseille, d'autre part) se sont penchés sur le problème, à partir de 1964, l'un parce qu'il est dans sa vocation de participer aux recherches d'eaux souterraines, l'autre parce que son rôle est d'assurer l'alimentation en eau dans cette région peuplée. En effet, il n'était pas concevable de laisser se gaspiller des quantités d'eau, peut-être importantes, à proximité d'une agglomération aussi développée que Marseille, à un moment où tout est mis en œuvre pour faire l'inventaire des ressources en eau.

Il apparaissait donc nécessaire de faire l'étude de ces résurgences sous-marines et d'envisager la possibilité de les capter si leur importance le justifiait. Par ailleurs, la présence de telles résurgences d'eaux douces en mer se rencontrant fréquemment dans le monde, particulièrement dans les pays méditerranéens, il est également apparu très souhaitable d'étudier le problème sous son aspect méthodologique et de mettre au point des techniques et un savoir-faire susceptibles de s'appliquer de façon systématique à l'étude de phénomènes de ce type.

1. - RAPPEL DES DONNEES EXISTANTES

1.1. - Situation géographique et géologique (Pl. 1) Bibl. 1-2-13

Les sources sous-marines de Port-Miou et du Bestouan qui nous intéressent, se situent, comme on l'a dit, sur le littoral méditerranéen à proximité de Cassis (Bouches du Rhône). Ces cavités immergées se développent dans les calcaires urgoniens qui constituent en partie l'ossature des massifs avoisinants. Ces calcaires sont largement fissurés, fracturés, et siège d'une

circulation karstique importante qui s'est développée durant tout le quaternaire. Les fluctuations du niveau des mers, à la suite des transgressions ou régressions expliquent qu'à l'heure actuelle ces résurgences se situent au-dessous du niveau de la mer. On admet que la karstification peut descendre jusqu'à moins 100 mètres actuellement.

Les formations qui intéressent cette étude se situent en bordure occidentale du Bassin du Beausset. Ce bassin correspond à une auréole de massifs montagneux s'étendant de Marseille (ou tout au moins Luminy) à l'Ouest, jusqu'à la Vallée du Gapeau au Nord-Est de Toulon. L'ensemble se présente comme une série d'assises emboîtées les unes dans les autres et ployées en un vaste synclinal dont l'axe orienté sensiblement Est-Ouest, passe par la Ciotat et le Beausset (Pl. 1 Bis) (Bibliographie 4-5-13-14). Ces assises sont, pour la plupart, constituées par des calcaires et des dolomies jurassiques et crétacées de 700 m d'épaisseur en moyenne, abondamment fissurés selon un réseau de fractures mis en évidence par l'analyse des photographies aériennes (Voir Pl. 2) (Biblio. 13).

1.2. - Hydrogéologie générale du bassin

L'ensemble du Bassin du Beausset a fait l'objet depuis quelques dix ans, d'importantes études géologiques et hydrogéologiques. En particulier, des expériences de coloration et une campagne de jaugeage poursuivies sur deux années, ont permis de délimiter dans la structure géologique constituant le réservoir aquifère, deux bassins principaux : un bassin oriental dont les exutoires sont situés aux environs de Toulon (le Ragas, Evenos, etc ...), un bassin occidental dont l'exutoire principal est la Source de Port-Miou.

La ligne de partage des eaux entre ces deux bassins peut être située approximativement selon un axe Nord-Sud passant par le Beausset.

Les expériences de coloration réalisées en 1964, 1965 et 1966, avec injection dans l'Embut de Coulin (au Sud de la Plaine de Gèmenos - 1° et 2° expériences) et dans le tunnel du Mussuguet au Nord de Cassis (3° expérience) ont montré que la quasi-totalité du Massif urgonien de Carpiagne Puget est drainé vers les Sources sous-marines de Port-Miou et Cassis (Bibliographie 6). Et probablement l'impluvium s'étend-t-il vers l'Est, jusqu'au delà du Polje de Cuges. (Une expérience de coloration resterait à faire sur les embuts de Cuges (Voir Carte Pl. 1 Bis

Au total, l'impluvium ainsi défini, représente une surface de 100 Km² dans l'hypothèse la plus pessimiste (massifs de Carpiagne et Puget seulement) mais plus probablement 150 Km².

La vitesse d'écoulement dans le réseau karstique a été trouvée de l'ordre de 15 à 30 m/heure. Ce réseau a, sans doute, au voisinage de la côte, de nombreuses ramifications et outre la Source de Port-Miou, de nombreuses résurgences sous-marines ont été repérées dans la zone des calanques de Cassis et en baie de la Ciotat. Ces résurgences ont été repérées soit directement et d'assez longue date, soit par le moyen de campagnes de mesures systématiques en mer (thermographie, infra-rouge). On trouvera en Annexe 1 la description et les résultats Pl. 10, de cette dernière campagne.

Le bassin hydrogéologique ainsi défini (ou bassin oriental du Beausset) est donc un bassin "ouvert" et toute tentative de bilan hydrologique par jaugeages et mesures directes est quasi impossible.

On a donc tenté de l'établir par une méthode indirecte faisant appel aux formules classiques d'évaluation de l'évapotranspiration.

Si on se réfère aux plus récentes tables de données climatologiques établies par la Météorologie Nationale (Pl. 2 Bis) et par le Département Hydrogéologique du B.R.G.M., on obtient pour le bassin considéré, les résultats moyens suivants :

- Pluviométrie moyenne : 650 mm
- Evapotranspiration réelle : 500 à 550 mm
(selon la formule utilisée)
- Soit un surplus disponible de : 100 à 150 mm

ce qui représente un débit fictif continu (module d'écoulement) de l'ordre de 500 à 750 l/s.

Soit pour un bassin versant de 150 Km², un volume global annuel moyen, de l'ordre de 75 à 112.106 m³.

Il y a lieu d'ajouter à ces apports provenant directement de cet impluvium préalablement défini, l'alimentation assurée par le drainage partiel de la plaine alluviale d'Aubagne-Gemenos située entre les Massifs de l'Etoile au Nord-Ouest de la Ste-Baume au Nord-Est et de Carpiagne au Sud. Cette cuvette a été étudiée par la Société des Eaux de Marseille qui a mis en évidence un matériel alluvial important et la présence de nappes dont l'écoulement naturel se fait, en partie tout au moins, dans les formations calcaires du massif de Carpiagne. Le rôle régulateur joué par cet apport dont la principale qualité est la constance, pourrait être primordial pour une exploitation éventuelle dans un pays où le régime des sources purement karstique varie considérablement en fonction de la pluviométrie. Il faudrait donc préciser par des études hydrogéologiques de détail de la zone de contact, quelle est la part de cet aquifère adjacent dans l'alimentation du Bassin karstique.

1.3. - Historique de l'exploration des conduits karstiques

1.3.1. - Port-Miou

1955 - 56 : Premières reconnaissances directes par les plongeurs de l'Office Français de Recherches Sous-Marines (O.F.R.S.) : le conduit est remonté sur 240 m.

1964 - 68 : Essai de détermination du tracé du conduit à partir de la surface, par diverses méthodes géophysiques (Biblio. 3-9).

1968 : Reprise des plongées directes par un groupe de plongeurs agissant pour le compte du Syndicat et appartenant au G.E.P.S., à la Société Hippocampe et à la S.E.M. ; découverte d'une poche d'air appelée "Cloche" à 500 m de la sortie en mer. Poursuite de l'exploration jusqu'à la côte 870 m (juin, juillet, août, septembre).

1969 : Localisation exacte de la "Cloche" par méthode géophysique magnétique (Bilio. 10 et 12). Mise en place de courantographes à 130 m de l'exutoire (mai, septembre).

1970 : Construction d'un puits et d'une galerie d'accès à la cloche par l'entreprise CAPAG-CETRA (Biblio.8).

1971 : Poursuite des explorations par plongées à partir de la cloche. Exécution de levés topographiques précis en amont de la cloche sur 400 m environ.

1.3.2. - Bestouan

1955 - 56 : Premières reconnaissances par plongées (O.F.R.S.) sur 40 m de longueur.

1967 - 68 : Reconnaissance par les plongeurs du groupe du Syndicat sur 450 m environ en direction Nord-Ouest. Mise en place de courantographes. L'exploration a été provisoirement arrêtée.

2. - DONNEES QUANTITATIVES CONCERNANT LA SOURCE DE PORT-MIOU

2.1. - Géométrie du système

Des documents ont été établis reportant le tracé des galeries sur un fond topographique au 1/1 000 (Pl. 3). Des levés topographiques de détails (échelle 1/600) ont été effectués dans la galerie de Port-Miou particulièrement dans la partie amont entre la cloche et

l'extrémité reconnue (Pl. 4). Ce document présente la coupe de la galerie en plan, la coupe verticale et une série de sections en des points déterminés. D'autres exemples de coupes sont représentés (PL. 5-1, 5-2, 5-3, et 5-4).

On remarque que le toit de cette galerie, entièrement noyée, évolue entre - 10 et - 20 m, jusqu'à 800 m de la résurgence où l'on constate un approfondissement assez brutal avec un toit ne remontant pas au-dessus de - 35 m.

Les sections de la galerie sont assez variables comme nous pouvons le constater, en forme et importance, rappelons que les sections minimum sont de l'ordre de 100 m². On les trouve à 130 m de l'entrée (section des enregistrements) (Pl. 5-3) et près de la cloche (Pl. 5-1)

2.2. - Phénomènes hydrauliques dans la galerie de Port-Miou

2.2.1. - Généralités

L'observation directe permet de se faire une idée des phénomènes qui se manifestent dans la galerie et qui sont liés aux différences de densité entre l'eau douce sortant du conduit et l'eau de mer qui tend à l'envahir : on observe en effet, généralement, un interface assez net, séparant l'eau plus douce s'écoulant du toit de la galerie de l'eau plus salée stagnant au fond. La zone de transition entre les deux fluides est en général suffisamment précise pour que le phénomène soit directement observable par les plongeurs (Pl. 6). On distinguera d'ailleurs plusieurs manifestations de cette stratification de liquides, de salinité, donc de densité différente :

- près des sorties en mer ou dans les rétrécissements, on observera des zones de densité différente marquées de plus, par des vitesses d'écoulement plus importantes (30 cm/s). C'est le phénomène de "Jet" visible aussi bien à Port-Miou qu'au Bestouan où l'eau douce s'écoule collée au toit de la galerie pour venir s'étaler à la surface de la mer en nappe superficielle de faible épaisseur (de l'ordre du décimètre). Ce phénomène peut facilement être visualisé par coloration. L'importance de ce biseau et de ce jet, apparait bien sûr, fonction directement du débit d'eau douce sortant, donc de la pluviométrie.
- dans les endroits où la galerie prend des dimensions plus importantes, où les eaux sont moins perturbées du fait de vitesse

d'écoulement très faible (de l'ordre du cm/s), on peut observer quelquefois plusieurs strates de liquides de salinités différentes qui apparaissent comme autant de miroirs.

2.2.2. - Mesures de vitesse, de niveau et de salinité

Pour analyser ces phénomènes avec plus de précision, les mesures de vitesse et de salinité ont été effectuées en divers points de la galerie.

- Mesures de vitesse

Elles ont, jusqu'à présent, été faites au moyen de courantographes, appareils utilisés, en général, pour des mesures de courant en mer et qui permettent la détermination simultanée de la direction d'écoulement et de la vitesse (photo jointe). La description précise de ces appareils est donnée en annexe 2.

A l'heure actuelle, six courantographes sont en place : quatre à Port-Miou, deux au Bestouan.

Ces appareils permettent un enregistrement continu du vecteur vitesse (direction et intensité), mais leur sensibilité semble trop faible, essentiellement en période d'étiage.

Les résultats de tous les enregistrements relevés depuis 1968 sont reportés planches 7-1, 7-2 et 7-3. Ils ont donné lieu à un premier essai d'étude statistique. Malheureusement jusqu'à présent, nous n'avons pas trouvé de matériel permettant d'accéder à des vitesses d'écoulement faibles (de l'ordre du cm/s) fonctionnant en eau salée et indiquant la direction de l'écoulement. Du moins, il aurait fallu s'orienter vers du matériel très élaboré et très cher.

Cet aspect du problème est malgré tout important puisqu'il est nécessaire de disposer d'un nombre maximum d'appareils de mesures qui marchent dans n'importe quel milieu et d'un prix de revient normal pour que la méthode soit utilisable dans d'autres cas. Il semblerait que nous ayons trouvé la solution avec de l'appareillage récent qui répond à ces différents critères (prix, sensibilité, etc ...) mais nous en sommes seulement aux premières expérimentations.

- Mesures de niveau (Pl. 8)

Il était intéressant et nécessaire de suivre l'évolution des niveaux en des points différents de la galerie de Port-Miou et si possible du Bestouan.

Dans un premier temps, nous nous sommes préoccupés des mesures dans la galerie de Port-Miou.

Ce premier travail a consisté à exécuter un nivellement très précis rattaché au N.G.F. entre la mer, le puits dit "des boues rouges" et la cloche. A partir de ces points nivelés, nous avons effectué des mesures instantanées et synchronisées, des niveaux de l'eau au puits "des boues rouges" et à la cloche. Ceci a permis de mettre en évidence des pertes de charge variables entre ces deux points éloignés d'environ 500 m. Cette perte de charge confirme s'il en était besoin, la présence d'un écoulement. De plus, des limnigraphes ont été installés, permettant de suivre l'influence des marées, de la houle et également des phénomènes impulsionnels liés aux crues. Ces documents, cependant, sont trop récents pour que l'on en fasse état dans ce rapport.

- Mesures de salinité

Des analyses ont été effectuées sur des échantillons d'eau prélevés in situ de deux manières différentes :

- soit à l'aide de bouteilles manipulées par des plongeurs, dans ce cas, on a pris généralement un échantillon de fond et un échantillon au toit de la galerie sur une même section. Pour quatre de ces couples, on a fait des analyses complètes dont les résultats sont représentés fig. 1, sur un diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF. Pour les autres, on ne dispose que des teneurs en Cl et SO₄ récapitulées Tableau 1.
- soit à l'aide d'un hydrocapteur de marque TALAN (appareil conçu par les Israéliens pour des études de ce genre) et qui était manipulé à partir de la cloche. Le Tableau 2 représente la position exacte des points de prélèvement et les résultats d'analyses obtenus pour différentes dates (dans ce cas, seuls les chlorures ont été dosés).

On a également reporté ces résultats sous une forme graphique (Fig. 1 et 3) afin de mieux visualiser l'évolution des salinités dans le temps. De même, la Fig. 2 représente l'évolution de la teneur en chlorure dans une zone proche de la surface pour la période Octobre 1970 - Avril 1971.

Par ailleurs, un essai d'enregistrement de résistivité a été mis en oeuvre du 14.1.71 au 27.1.1971 à l'aide d'un appareillage

S.O.I.F.* qui permet l'enregistrement des résistivités selon dix points d'une verticale (résultats : Tableau 3) (Voir description plus détaillée, annexe 3). La correspondance entre résistivité et teneur en Cl peut être ensuite faite à l'aide d'abaques tenant compte en particulier de la température.

Toutefois, pour les faibles salinités (c'est-à-dire les plus fortes résistivités), les résultats de cette transformation sont assez imprécis du fait de la présence simultanée d'autres sels (ici principalement SO₄) qui affectent également la résistivité. En revanche, pour les fortes salinités (~ faibles résistivités), il est certain que c'est la teneur en NaCl qui a une influence prépondérante.

Ainsi, cet appareil permet très bien de localiser les zones franchement envahies par de l'eau salée, mais ne rend qu'imparfaitement compte de la "salinité" (au sens teneur en NaCl) des eaux douces ou même saumâtres.

Pour notre part, nous avons admis que l'évaluation de la teneur en Cl à partir de la résistivité est sans doute très bonne tant que celle-là est supérieure à 10 g/l. C'est cette limite que nous avons figurée en trait fort sur le Tableau 3 qui donne les résultats de l'enregistrement des résistivités.

Un premier essai de regroupement de ces différentes mesures en un tableau synoptique a été fait (Pl. 9). Sans insister davantage sur les commentaires que l'on peut en tirer, il ressort de l'examen de ces divers résultats que les mesures de salinité ont été assez disparates et n'ont intéressé que des périodes assez courtes. Toutefois, il faut considérer les campagnes effectuées comme un banc d'essai des techniques utilisables dans un site de source sous-marine karstique.

On peut en conclure provisoirement que la meilleure méthode, en pareil cas, pour suivre en continu l'évolution de la salinité est l'installation d'un appareil S.O.I.F. complété par des prélèvements périodiques par hydrocapteur au droit des cellules afin de pouvoir étalonner l'appareil avec précision, et en différentes sections accessibles seulement par plongeur.

* S.O.I.F. = Station pour l'Observation des Interfaces dans les Forages (rapports B.R.G.M. : 69 SGL 189 GPN et 70 SGN 103 GPH)

2.3. - Interprétation des mesures

2.3.1. - Forme et évolution du biseau salé

Il est certain que pour caractériser précisément la structure et l'évolution du phénomène d'écoulement diphasique mettant en jeu l'eau douce provenant du bassin hydrogéologique (soumise à des variations de charges épisodiques liées à la pluviométrie) et l'eau de mer qui tend à envahir le réservoir (sous une charge assez constante comprise dans les limites d'amplitudes des marées), il faudrait disposer, si possible en plusieurs sections de la galerie, de mesures simultanées et en continu, de piézométrie, des vitesses et de la salinité en plusieurs points de chaque section.

Nous venons de voir que du fait des grosses difficultés de mise en oeuvre des techniques de mesures dans les conditions du site, il n'a pas encore été possible d'atteindre cet idéal. On ne peut donc fournir que des renseignements fragmentaires confirmés, toutefois, par les précieuses observations directes faites in-situ par les plongeurs.

Nous les résumerons ainsi en nous limitant au seul site de Port-Miou.:

- La plupart du temps, la partie inférieure de la galerie karstique est envahie par de l'eau très salée quasi immobile (voir graphiques de courantographes et résultats d'analyses).
- Ce n'est que lors de crues importantes que cette eau se met en mouvement vers l'exutoire, chassée par l'eau douce arrivant de l'amont : ce phénomène est attesté par le fait qu'aux pointes de vitesse du courantographe situé au niveau supérieur correspond également une pointe (de plus faible amplitude toutefois) de celui situé au niveau inférieur. On notera malgré tout que les vitesses enregistrées et constatées par les plongeurs en période de crue ne sont pas considérables. Elles restent probablement inférieures à 1 m/s. Ce phénomène s'explique aisément par la possibilité qu'à l'eau douce d'utiliser une section plus ou moins grande de la galerie, suivant la charge en amont, sans qu'il soit nécessaire de faire intervenir une augmentation importante des vitesses pour assurer l'évacuation des crues.
- Lors du phénomène de chasse, il y a dilution assez rapide de l'eau plus salée qui occupe la partie inférieure de la galerie. Un très bel exemple de la rapidité de cette

évolution est fourni par les relevés et mesures effectués à l'aide du S.O.I.F. pendant la période du 14.1.1971 au 27.1.71 (Voir Tableau 3). Au cours de cette période est survenue une crue (le 21.1) qui se marque nettement sur les graphiques de vitesse (Pl. 7) et a entraîné une baisse de la salinité sur toute la hauteur de la section en un laps de temps inférieur à 6 heures (période de mise en marche de l'appareil). On remarque, en effet, que le 21.1, en matinée et jusqu'au relevé de 13 heures, la salinité au-dessous de la profondeur 7 m est, comme les jours précédents, supérieure à 10 g/l ; puis entre 13 et 19 heures, elle s'abaisse brusquement au-dessous de cette valeur. Une salinité minimale est atteinte le 23.1 avec une teneur inférieure à 8 g/l sur toute la hauteur, ensuite la salinité augmente progressivement mais reste inférieure à 10 g/l pendant plusieurs jours sans doute (malheureusement notre enregistrement a cessé le 27).

- L'eau qui s'écoule à la partie inférieure de la galerie présente également des variations de salinité quoique à un degré moindre semble-t-il. Toutefois, si l'on se réfère au graphique Fig. 3 qui décrit l'évolution de la salinité dans cette section pour une période de plusieurs mois, on voit qu'exceptionnellement la teneur en NaCl peut dépasser 10 g/l à l'occasion d'étiages qui se marquent nettement par un minimum du graphique des vitesses. Réciproquement, elle ne descend au-dessous de 5 g/l (minimum observé 2 g/l) que lors des périodes où les vitesses enregistrées au courantographe sont maximales. Accessoirement, on remarquera qu'il y a un très léger déphasage entre les points de débits et celle de salinité.

En conclusion, les quelques enregistrements simultanés de vitesse et de teneur montrent qu'il y a une très étroite relation entre ces deux paramètres à tous les niveaux de la section de galerie mais particulièrement dans la partie supérieure.

Pour préciser la nature de cette relation et si possible en donner un modèle représentatif, il faudra disposer de séries de données plus complètes.

Mais d'ores et déjà se confirme le schéma d'un processus de "chasses" successives d'eau douce, correspondant à des crues, alternant avec des phases d'envahissement par l'eau salée en période d'étiage.

On verra plus loin que ce schéma peut être visualisé par un modèle hydraulique.

2.3.2. - Relations entre pluies, débit à Port-Miou et débit au Bestouan

Rappelons tout d'abord que des expériences de coloration effectuées dès 1964 ont permis de définir approximativement les limites de l'impluvium dont Port-Miou et le Bestouan sont les deux principaux exutoires (il y en a d'autres, mais plus diffus).

Autre fait d'observation à signaler : lors de certaines périodes de hautes eaux, on a pu vérifier directement (colorations) que la Bestouan absorbait au profit de Port-Miou.

Il y a donc à l'évidence une relation causale entre la pluie d'une part et les débits à Port-Miou et Bestouan d'autre part et une relation plus épisodique entre les débits des deux sources.

Nous avons voulu déterminer, en faisant appel à des techniques statistiques, si cette relation pouvait être quantifiée avec une certaine approximation sous forme d'une expression algébrique assez simple.

Dans ce but, nous avons procédé à un lissage et une digitalisation des courbes enregistrées au courantographe à Port-Miou et au Bestouan et à une digitalisation des relevés pluviométriques à Cuges-Les-Pins.

Sur ces données, nous avons mis en oeuvre le programme KRONO* qui donne :

- Pour chaque série chronologique :

- . L'auto-corrélogramme qui caractérise la liaison que présentent entre eux les termes successifs de la série.
- . La densité spectrale qui caractérise la mémoire du processus générateur de la série (Voir annexe 4).

- Pour chaque couple de séries :

- . Le corrélogramme croisé qui caractérise la liaison entre les deux séries (pour divers décalages de temps).

* Décrit en détail dans un rapport BRGM à paraître.

Les résultats détaillés de cette analyse sont donnés en annexe 4. Nous ne retiendrons ici que les conclusions :

En ce qui concerne les séries prises séparément :

- . La pluie apparaît comme une série quasi aléatoire : l'interdépendance ne s'étend pas au-delà de trois jours (résultats classiques).
 - . L'analyse de la série de Port-Miou révèle une interdépendance des vitesses pendant une période d'au moins dix jours. En terme hydrologique, on peut interpréter ce résultat en disant qu'à un pic de pluie (durée 3 jours au maximum d'après ce qui précède) correspond un étalement de l'hydrogramme à Port-Miou de 10 jours environ. Ce résultat est à rapprocher du fait que les expériences de traçage permettent d'évaluer à une dizaine de jours le temps nécessaire à un traceur pour parcourir la plus grande distance existant entre la source et la bordure du bassin.
 - . Pour la série du Bestouan, on trouve de la même manière une mémoire légèrement inférieure (5 jours) ; ce qui laisserait supposer que le bassin alimentant cette source est de moins grande étendue ou que les réservoirs karstiques servant de conduite et de "tampons" ont un temps de réponse plus faible (volumes moins importants, seuils de trop plein plus bas par exemple).
- En ce qui concerne les séries croisées, la principale conclusion statistique est qu'il n'y a pas de relation simple entre les trois séries. Ceci tient sans doute à la complexité des relations causales qui lient ces différentes séries, laquelle n'autorise pas comme on avait pu l'espérer (et comme cela se produit parfois) l'établissement d'une relation statistique simple et stable dans le temps.

En conclusion, pour affiner notre analyse du système hydraulique dont les sources de Port-Miou et Bestouan constituent une sortie, il faudrait faire appel à des modèles hydrologiques plus complexes et sans doute de nature conceptuelle (détermination de l'hydrogramme unitaire par déconvolution, modèle de MERO, etc..)

3. - PROBLEMES D'EXPLOITATION

3.1. - Généralités

L'ensemble des campagnes de prospection (hydrogéologie, géophysique, puits et galerie), d'observation directe par plongeurs et mesures conduites jusqu'à ce jour sur le site de la source "Port-Miou" ont permis de se faire une idée assez précise, quoiqu'encore incomplète, des phénomènes hydrauliques dont cette galerie karstique est le siège.

Nous venons de rappeler nos connaissances certaines à ce sujet dans les chapitres précédents. Il est actuellement temps, à ce stade des travaux, d'envisager quelles pourraient être les modalités d'exploitation du site, même s'il nous manque encore des informations que nous nous proposons de recueillir par la suite.

A ce titre, le principal problème qui se pose est celui d'améliorer la séparation entre eau douce et eau salée. En effet, il est certain que dans la galerie en son état naturel, on n'a qu'exceptionnellement de l'eau douce sur toute la section (du moins au droit de la cloche et dans la partie accessible du conduit).

Ensuite, se pose le problème de la détermination plus précise du bilan en eau douce de la source.

La solution du premier, nécessite sans aucun doute la mise en oeuvre de travaux d'aménagement de la section. Celle du second, nécessite l'amélioration des mesures faites dans la galerie et l'utilisation des travaux d'aménagement.

Nous allons envisager successivement ces deux points :

3.2. - Rôle d'un barrage dans l'amélioration des conditions de séparation entre eau douce et eau salée

A priori, une solution pour prévenir le mélange entre l'eau douce et l'eau salée est de créer un barrage dans la galerie. On peut, en effet, penser qu'un tel ouvrage, en créant seulement une légère surcharge de l'eau douce à son amont et en opposant une barrière à un cheminement de l'eau salée à partir de l'aval, pourrait favoriser, d'une part un lessivage de la partie amont de la galerie lors des périodes de chasses consécutives aux crues et d'autre part, de permettre une certaine accumulation d'eau douce exploitable.

Toutefois, avant d'envisager l'étude détaillée d'un tel projet, nous avons voulu essayer, sinon de prévoir très exactement, tout au moins de visualiser assez schématiquement quels pourraient en être les effets.

Dans ce but, deux modèles ont été construits :

- Le premier, par Monsieur DE ROUBAIX, pour les besoins du film : "Eaux douces dans les Calanques de Provence" pour visualiser les phénomènes et expliciter le film. Ce premier modèle, constitué par deux plaques de verre a été ultérieurement repris dans son principe par le B.R.G.M. pour visualiser les effets d'un barrage sur l'intrusion saline et sur son efficacité pour effectuer une chasse complète des eaux saumâtres. Il est présenté dans un rapport cité en référence (Biblio. 19).
- Le second, par le Professeur THIRRIOT à l'Institut de Mécanique des Fluides de l'E.N.S.E.I.H.T.*, sans encore prétendre à la similitude, avait pour objectifs : de mieux tenir compte des conditions de similitude connues (rapport L/ϕ de la galerie ; rapport des salinités pour ces deux rapports une certaine distorsion a toutefois été admise), de simuler les hydrogrammes de débit d'eau douce de caractéristiques imposées et relativement réalistes, de permettre quelques mesures (concentration, bilan), et une visualisation plus rigoureuse des phénomènes (par photos repérées dans le temps essentiellement). Les résultats détaillés de ce modèle sont présentés en annexe 5.

De ces simulations qui confirment les observations des plongeurs, il ressort principalement :

- Les stratifications entre eaux de salinité donc de densité différente sont toujours très nettes, quel que soit le régime.
- La présence d'un barrage est - toutes choses égales d'ailleurs - favorable : pour les forts débits, elle accélère l'évacuation de l'eau salée située à son amont. Pour les faibles débits, son influence est moins nette. Elle peut être considérablement améliorée par la mise en place de vannes de fond.
- La forme du barrage a une certaine importance. En règle générale, il semble qu'il ne doive pas être complet il est préférable qu'il n'occupe pas toute la hauteur de la galerie, afin de faciliter la chasse en période de crue et d'éviter alors une mise en charge trop importante à l'amont, et nous venons de la voir, qu'il soit muni de vannes de fond.

3.3. - Poursuite d'un programme de mesures dans la galerie

La poursuite d'un programme précis de mesures dans la galerie est nécessaire à deux titres :

* Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique et d'Hydraulique de TOULOUSE.

- Il nous permettra de préciser notre connaissance des phénomènes actuels et, en particulier, de mieux connaître le bilan eau douce, l'allure des hydrogrammes.
- Il mettra, le cas échéant, en évidence les effets de la réalisation d'un barrage expérimental.

En nous basant sur l'expérience passée, dont les résultats ont été analysés aux paragraphes 2.2. et 2.3., il nous semble indispensable de poursuivre, sur le site de Port-Miou, le programme minimum suivant :

- Mesures de piézométrie synchronisées en des points éloignés des galeries pour connaître l'évolution du gradient hydraulique et enregistrement des variations du niveau pour suivre l'évolution des crues et des phénomènes annexes. Il y a lieu de trouver un appareillage plus adapté.:
- Mesures en continu de la résistivité selon une verticale par l'appareillage S.O.I.F. et étalonnage périodique par prélèvement d'échantillons à l'hydrocapteur au droit des cellules. Prélèvements d'échantillons systématiques par plongeurs en des endroits fixes.
- Evaluation du débit si possible par une batterie de capteurs de vitesse type B.E.N. ou NEYPIC avec enregistrement.

Le principal problème est de choisir la ou les sections où seront faites ces mesures. Pour les secondes (résistivité, salinité), il est hors de doute que c'est la section sous cloche qui convient le mieux car elle permet aisément la mise en oeuvre des prélèvements.

Pour les troisièmes (mesures de vitesse) il conviendrait de les faire dans une section la plus réduite possible, mais cependant pas trop éloignée de la cloche où seront faites les autres mesures et seul endroit où l'on dispose d'enregistreurs.

A cet égard, la meilleure section est située à quelques dizaines de mètres à l'aval de la cloche ; sa section est de 100 m² environ (Voir planche 5 - 1).

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

1. CORROY G.
Les résurgences sous-marines de la région de CASSIS
Bulletin de l'Institut Océanographique MONACO n° 1131 (1958)
2. CORNET, DUROZOY, GOUVERNET, MUNCK
La source sous-marine de PORT-MIOU. Etude par prospection géophysique.
Rapport BRGM DS 63 A 107.
3. MUNCK F.
Recherche de circulation karstique par méthodes géophysiques électriques dans la région de CASSIS
Rapport BRGM DS 64 A 21.
4. DUROZOY G.
Bassin du Beausset. Données géologiques et hydrogéologiques au 31.12.1966
Rapport BRGM DSGR 67 A 91.
5. DUROZOY G.
Inventaire des ressources hydrauliques dans le bassin du Beausset. Résultats de la campagne de jaugeages 1965-67. Essai de bilan
Rapport BRGM 69 SGL 127 PRC.
6. DUROZOY G.
Bassin du Beausset. Enseignements apportés par les expériences de coloration
Rapport BRGM 69 SGL 212 PRC.
7. CLUSEAU R.
Mission expérimentale à LA CIOTAT et CASSIS. Recherches d'émergences d'eau douce en mer.
Rapport BRGM DS 65 A 73.
8. DELLERY B.
Sondage de PORT-PIN
Rapport BRGM DSGR 67 A 47.
9. BAUDOIN P.
Note sur les essais de localisation des circulations karstiques dans le secteur de PORT-MIOU et PORT-PIN
Rapport BRGM 69 GPH 037.
10. ROUAUD A.
Localisation par la méthode du dipole magnétique oscillant d'une cavité karstique à PORT-PIN et PORT-MIOU.
Rapport BRGM 69 GPH 037.
11. MENARD R.
Recherche d'une circulation d'eau souterraine près de CASSIS
Rapport BEGG de janvier 1969 et complément du 5 mars 1969.
12. SALVI A.
Localisation d'une cavité karstique par des mesures magnétiques statiques.

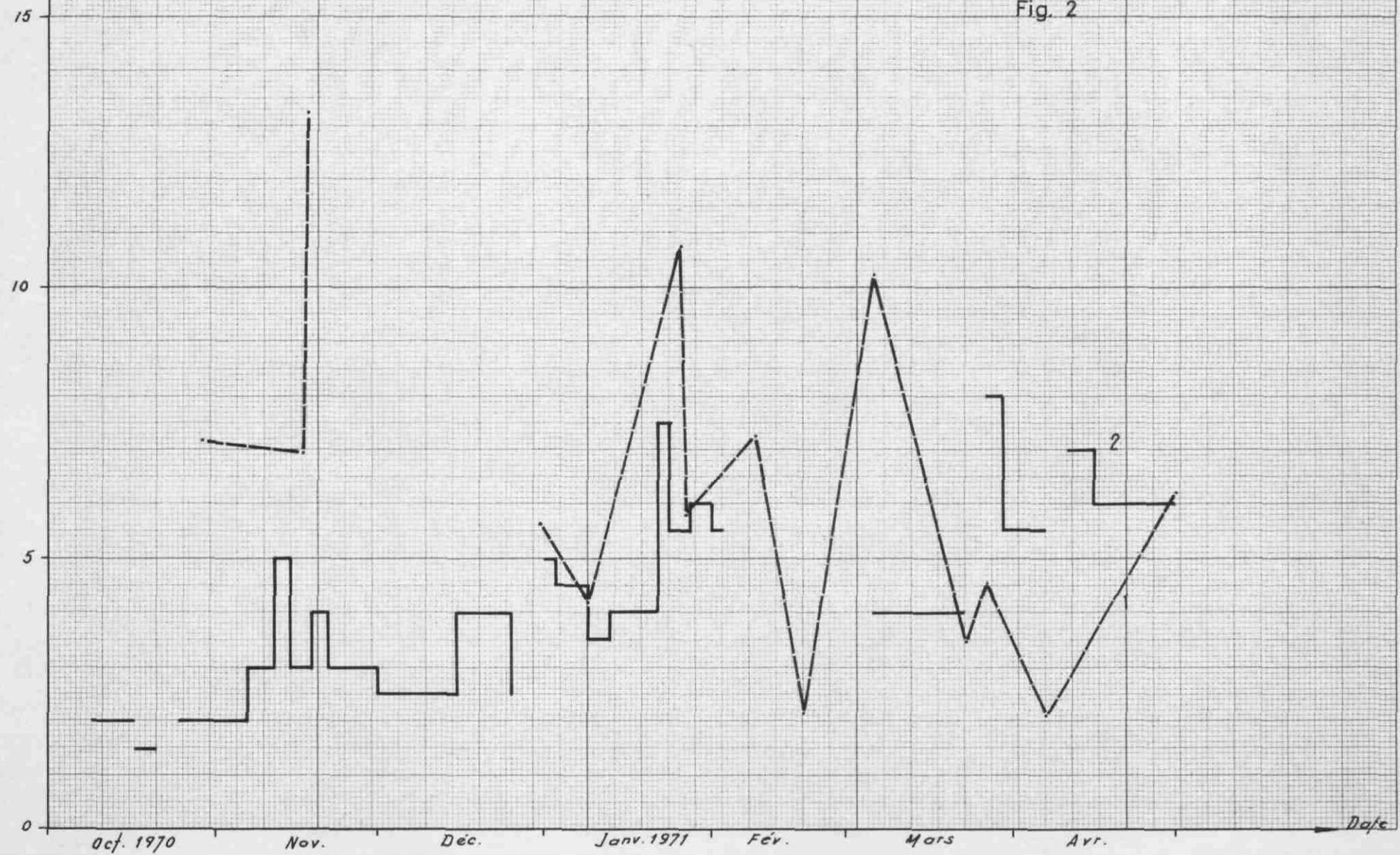
13. MONTAU-POTIE
Etude karstique des formations urgoniennes du massif des Calanques au massif du Douard (B.-du-R.)
14. Thèse MONTAU
15. DEA. NAUD.
Etude hydrogéologique du bassin d'Aubagne à l'est de l'Huveaune.
16. BURGEAP
Nappe de l'Huveaune à l'est d'Aubagne (14 octobre 1948)
17. BRGM - Faculté des Sciences de Marseille
Plaine de Gémenus - Note sur l'état en 1966.
18. SEM (Rapports B.E.G.) ..
Etude de la plaine alluviale de l'Huveaune en amont d'Aubagne.
19. RICOUR J. - Syndicat de recherches d'eau de Port-Miou (B.-du-R.).
Compte-rendu d'un essai sur modèle réduit (Rapport 71 SGN 411).



Teneur en Cl^- (g/l)

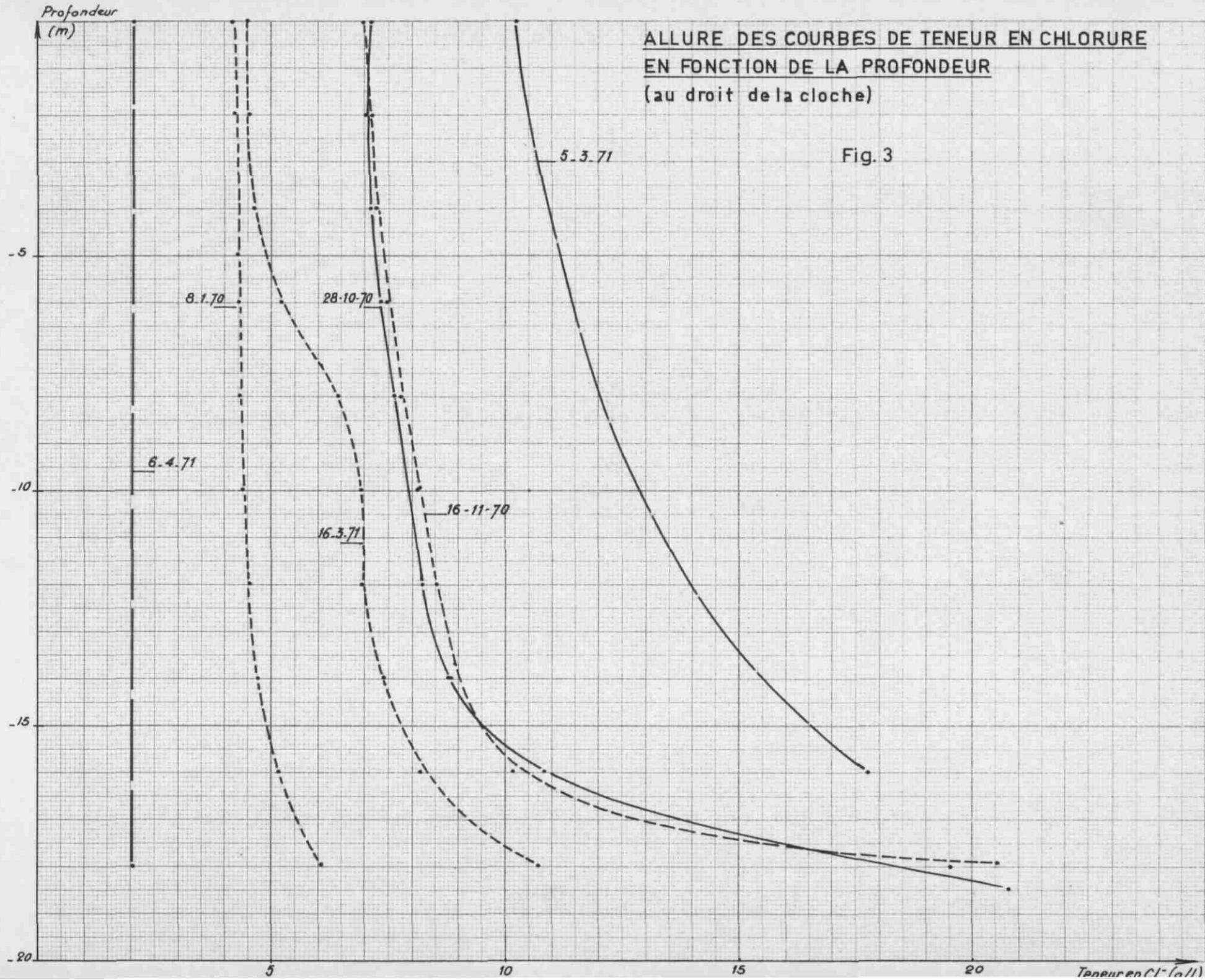
- 1 - EVOLUTION DE LA TENEUR EN CHLORURE DANS LA PARTIE SUPERIEURE DE LA GALERIE (au droit de la cloche)
- 2 - VITESSE DANS LA PARTIE SUPERIEURE DE LA GALERIE (au droit de la cloche)

Fig. 2



ALLURE DES COURBES DE TENEUR EN CHLORURE
EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(au droit de la cloche)

Fig. 3





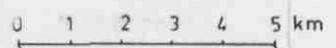
RADE
DE
MARSEILLE

MARSEILLE
PF

C. CROISSETTE

CARTE GEOGRAPHIQUE (PL. 1)

ECHELLE : 1/150 000



INTERPRETATION DE PHOTOGRAPHIES AERIENNES INFRA-ROUGE

L'analyse des photographies aériennes en mer révèle un certain nombre de détails :

- Les zones claires bien délimitées (en couleur et panchromatique) ou violettes (fausse-couleur) et n'apparaissant pas en infra-rouge, correspondent à des plages sableuses visibles jusqu'à environ 10 mètres sous la surface de l'eau.
- En face des cours d'eau et entre les bandes sableuses, les zones sombres correspondent à des herbiers. Ces herbiers, près du port de la Ciotat, prennent une teinte brune visible sur l'émulsion couleur, très atténuée sur la fausse-couleur, qui peut être attribuée à leur destruction par la pollution.

La comparaison entre les différentes émulsions montre que l'on obtient dans ce domaine d'excellents résultats avec la couleur, que la fausse-couleur a une pénétration légèrement inférieure et que l'infra-rouge, comme prévu, n'a aucune pénétration.

Les images thermiques de la baie de la Ciotat et de la région de Port-Miou sont riches d'enseignements de tous ordres :

Images début et fin de nuit - Région de Port-Miou - Le Bestouan (Pl. 10)

Des résurgences sous-marines sont connues dans cette région et l'on voulait par cette expérimentation tester la valeur de la méthode en tant que moyen de détection. L'opération a été menée en collaboration avec la Société des Eaux de Marseille et les mesures de température, à l'aplomb des griffons et en mer ont été faites le 7.2.71, entre 18H 30 et 19H 30, le lendemain du vol.

A Port-Miou, les températures de surface au-dessus des résurgences varient entre 13°5 et 14°5. L'eau environnante, dans la calanque, est 13°5 en moyenne. Près des côtes, hors estuaire, la température est de 13° en moyenne.

Au Bestouan-port de Cassis- on a relevé des températures de 14°7 et 14°8 au niveau des résurgences et 12°5 en mer.

Ces anomalies positives sont bien visibles sur les images thermiques. Une coloration récente, faite au griffon de Port-Miou, a permis de constater que l'effet de la résurgence se faisait sentir sur presque toute la largeur de la calanque, ce que traduit bien l'image thermique.

L'image de début de nuit semble meilleure mais il convient de nuancer cette impression car l'image fin de nuit aurait sans doute été meilleure avec un autre cadrage.

L'image thermique permet donc une bonne détection des résurgences sous-marines mais il est souhaitable de l'obtenir avec la plus grande échelle possible.

Images de début et fin de nuit de la baie de la Ciotat

L'anomalie froide, perpendiculaire au rivage, visible en début de nuit seulement correspond à la sortie d'un grand collecteur, ancien ruisseau canalisé qui ne fonctionne plus en fin de nuit.

L'existence de cette anomalie confirme le rôle que peut jouer la thermographie dans la détection des rejets d'effluents en mer ainsi que dans l'étude de la dynamique de ces effluents.

Sur ces mêmes images, on constate au milieu de la baie l'existence d'un chevelu, d'anomalie négative, très net en début de nuit, bien moins en fin de nuit. Cet effet, peu habituel, pourrait correspondre à une pellicule de mazout.

En conclusion, les images thermiques au larges des côtes, sont très prometteuses mais il convient d'en améliorer la qualité en utilisant la plus grande échelle possible et en améliorant le système de correction de gain qui trop souvent empêche toute observation en mer. Ce n'est que grâce à une amélioration de ce système que l'on pourra espérer détecter des anomalies fines correspondant à des phénomènes non connus.

COURANTOGRAPHE CEMA

DESCRIPTION ET UTILISATION

C E M A

Centre d' Etudes Marines Avancées
1 Quai de la Grande Bigue
13 - MARSEILLE - 2 me.

Téléphone : 62 01 25
62 02 09

CARACTERISTIQUES

- Type : courantographe pendule
- Enregistrement continu direct sur film 35 mm des courbes inclinaison-temps et direction-temps
- Immersion maximum : 1000 m
- Gammes de vitesses prévues : 5-40 cm/s
0,2-1,5 noeud
0,5-5 noeuds
- Autonomie réglable depuis 4 jours jusqu'à plusieurs mois, mais la longueur de l'enregistrement reste de 21 mm : les résultats s'empilent donc dans ces limites.
L'autonomie peut être réduite jusqu'à 8 heures, mais la précision de la base de temps s'en trouve diminuée.
- Précision : - base de temps : 2 %
- direction : $\pm 15^\circ$
- vitesse : 10 % de l'échelle totale
- Longueur de l'ensemble monté : 50 cm
- Dimensions du boîtier étanche : - diamètre : 7,5 cm
- longueur : 15 cm
- Poids total dans l'air de l'ensemble monté : 1,5 kg
- Eclairage par lampe lumineuse au tritium sans consommation
- Mise en marche extérieure
- Alimentation : pile au mercure standard pour cellules photoélectriques
- Film standard Kodak, Plus X ou TriX en cartouches 20 ou 36 vues
- Impression automatique du numéro de l'appareil sur l'enregistrement

I. DESCRIPTION GENERALE

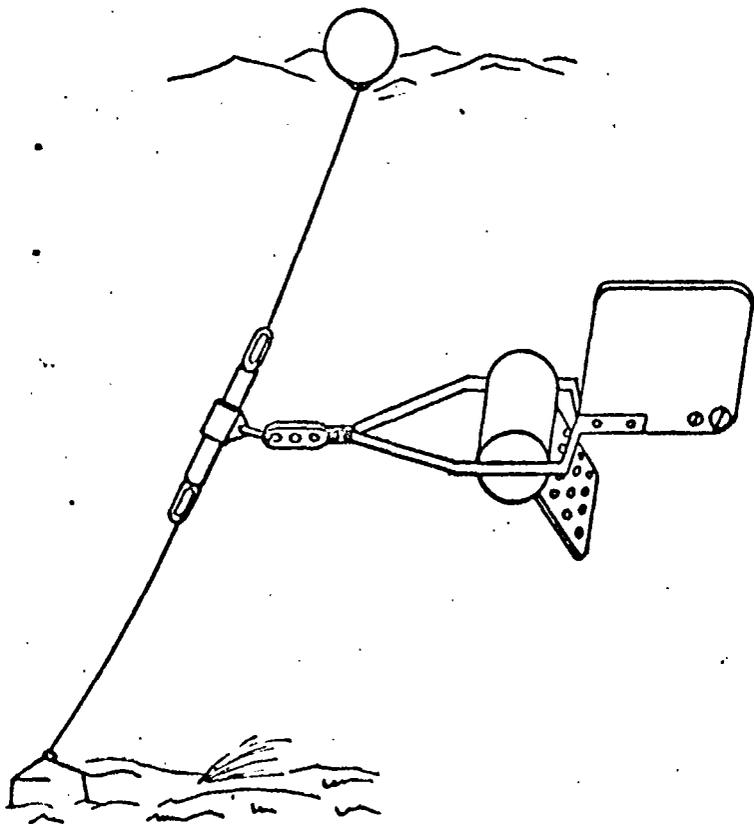
1. Introduction

Cet appareil léger et de petite taille enregistre sur fiche photographique la vitesse et la direction des courants en mer ou en rivières.

Il ne donne pas un enregistrement détaillé, mais des indications générales qui peuvent servir dans beaucoup de cas (travaux sous-marins, études générales de courants, études où les courants interviennent comme une donnée secondaire : géologie, zoologie, etc...).

Ses dimensions et son poids réduits offrent des possibilités de transport et de mise en place particulièrement simples pour un plongeur.

2. Description



Dans son emploi normal, le courantographe est accroché à la profondeur désirée sur un câble muni d'un ancrage et d'une bouée qui le maintient vertical.

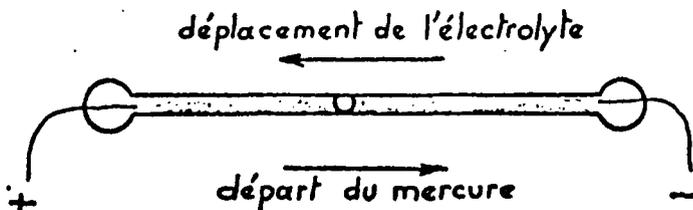
Le courant entraîne l'ensemble en aval du câble et fait basculer écran et boitier d'un angle qui est limité par le poids de l'écran.

La dérive constituée par un morceau de flotteur maintient la suspension à peu près horizontale et permet à l'instrument de travailler normalement sans retomber sur le câble.

A l'intérieur du boitier sont enregistrées les indications d'un inclinomètre et d'un compas. Une grille de comparaison superposée à l'enregistrement traduit ces données en vitesse et direction.

3. Principe de l'enregistrement

L'enregistreur est de type photographique, un peu particulier, puisqu'il ne comporte pas de mécanisme de défilement. Le balayage du film suivant l'axe des temps s'y réalise par un système électrolytique : c'est un tube capillaire comprenant deux colonnes de mercure séparées par une fine bulle d'électrolyte. Lorsqu'un courant traverse le tube, il y a électrolyse ; le mercure passe d'une colonne à l'autre et par suite, la bulle se déplace.



Ici, l'élément est interposé entre la source lumineuse et le film de telle façon que la lumière dirigée par un jeu de fentes le traverse au seul emplacement de la bulle. Le spot ainsi formé se déplace sur le film à une vitesse qui ne dépend que de l'intensité du courant traversant le tube ; il suffit donc d'intercaler une résistance convenable en série avec la source de tension pour obtenir la vitesse désirée.

Une pile pesant moins de trois grammes suffit à alimenter les deux tubes quelle que soit la durée

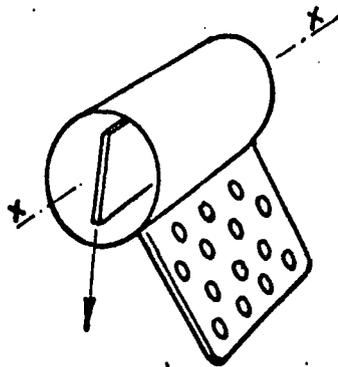
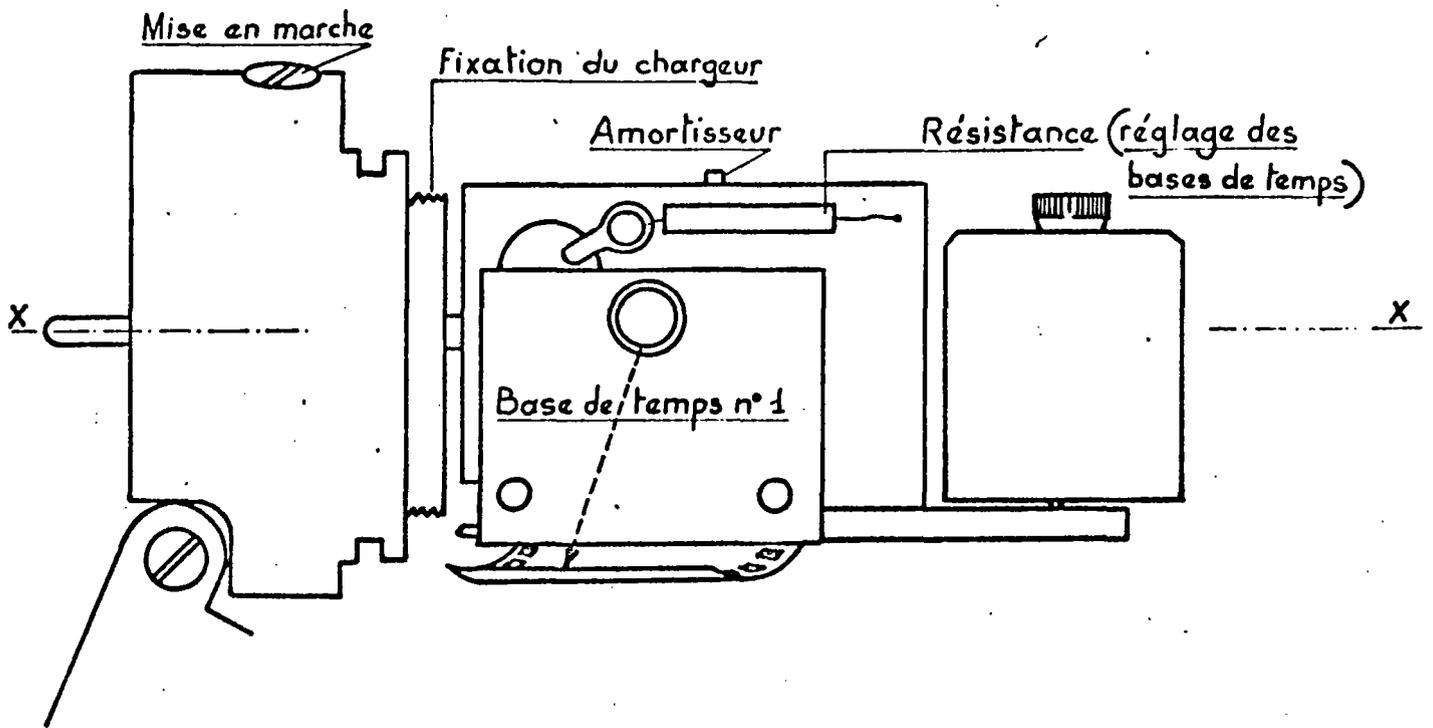
de l'enregistrement.

Les tubes électrolytiques peuvent travailler indéfiniment en inversant les polarités de la pile.

Cependant, lorsque la bulle d'électrolyte atteint l'extrémité du tube, il se forme du gaz et l'élément est hors d'usage.

Il convient donc de régler soigneusement la vitesse de l'enregistreur.

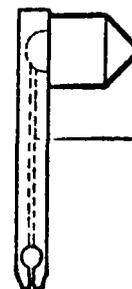
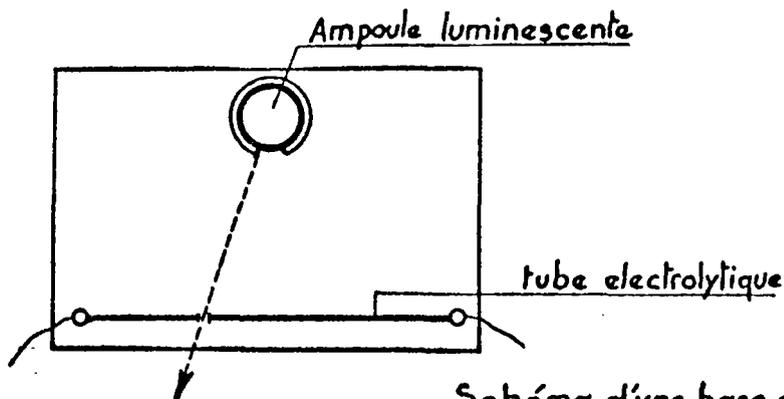
4. Enregistrement de la vitesse et de la direction



La platine, montée sur roulements à billes mais protégée des secousses par l'amortisseur, reste verticale quand le boîtier tourne autour de son axe.

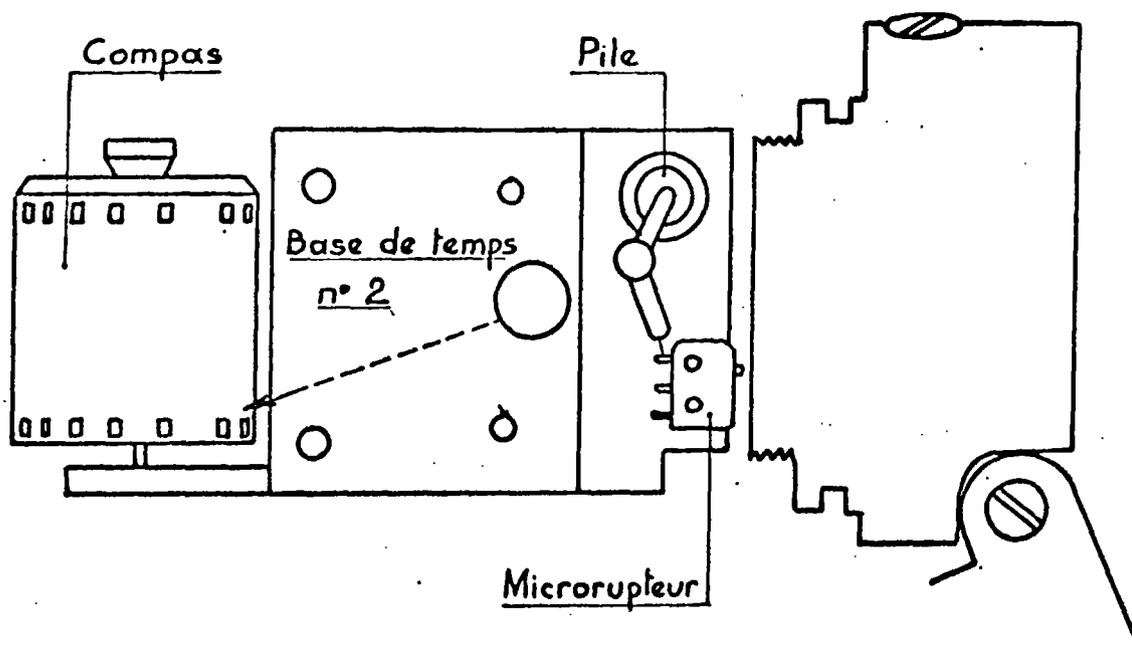
Le rayon lumineux qui tombe de la base de temps n° 1 décrit donc une trace sur le film placé au dessous, dans le chargeur.

Ce sera l'enregistrement inclinasion fonction du temps.



fente limitant un rideau mince de lumière qui tombe sur le tube électrolytique et ne le traverse qu'à l'endroit de la bulle

Schéma d'une base de temps



Par un procédé analogue, la courbe direction fonction du temps s'enregistre sur le film placé derrière le capot transparent du compas.

Voir en annexe : . le plan de montage montrant l'intérieur de l'enregistreur
 . le plan d'ensemble du courantographe

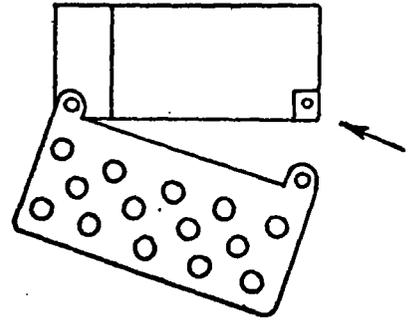
II. NOTICE D'UTILISATION

1. Démontage

- Démontez les deux vis qui tiennent le flotteur. En écartant légèrement la suspension, les pivots sortent de leurs paliers et le boîtier se trouve libéré.

- Sortir la vis en nylon qui sert à fixer l'écran sur le boîtier. Séparer le bouchon du boîtier.

- Dévisser et enlever le chargeur (on suppose que les enregistrements ont été déjà retirés du courantomètre).

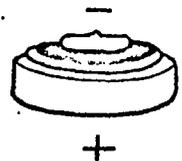


2. Mise en place de la pile

- S'assurer que le bouton de mise en marche se trouve sur la position A (arrêt).

- Placer une pile Mallory type PX 675* dans son logement en faisant attention aux polarités.

- Pour la mettre en place, on écarte la cosse de façon à laisser le passage libre.



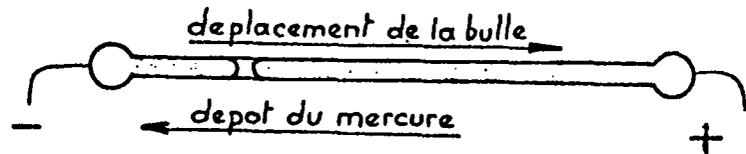
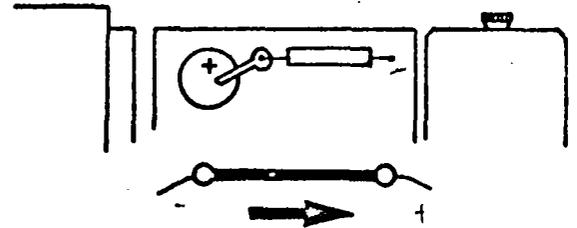
* La pile PX 675 est conçue spécialement pour les équipements photographiques : elle présente en particulier une tension constante durant la décharge et une étanchéité particulièrement poussée : on la reconnaît à son joint jaune. Il existe d'autres éléments Mallory 675 (joint bleu) de même dimension, mais ces qualités leur font défaut. Leur emploi risquerait de dérégler la base de temps.

On glisse la pile sur le bord de la platine pour qu'elle tombe d'aplomb dans son logement. On replace la cosse bien au milieu. La pile, de même, doit pouvoir sortir par son propre poids sans forcer, lorsque la cosse est écartée.

- Le schéma ci-contre indique la correspondance entre position de la pile et sens de déplacement de la bulle qui est celui de la flèche grasse (→).

En retournant la pile, la bulle se déplace en sens inverse (flèche fine ←).

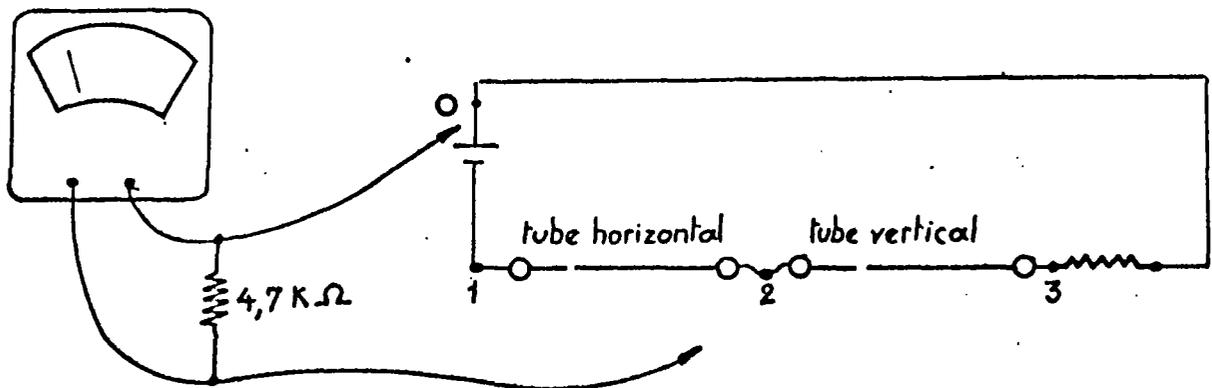
Pour se souvenir de la bonne position de la pile, il suffit de se rappeler que le mercure part du + et se dépose sur le -.



3. Contrôle des tubes

Le bouton de mise en marche est sur la position M. Ayant placé en parallèle sur les bornes du contrôleur une résistance de $4,7\text{ K}$, on mesure successivement les tensions en 1, 2, 3 :

- le premier tube est normal si $V_1 - V_2 = 0,1$ volt
- le second tube est normal si $V_3 - V_2 = 0,1$ volt



4. Mise à zéro des tubes

Cette opération consiste à placer la bulle d'électrolyte en position de départ à l'alignement de l'un des repères. On lira les indications du tube le plus visible (vitesse) ; l'autre, placé en série suit automatiquement : il est donc inutile de démonter les plaquettes.

Une loupe lumineuse peut faciliter le repérage de la bulle.

- L'enregistreur est donc laissé en marche le temps nécessaire pour que la bulle arrive à la position voulue. Cette durée sera calculée d'après l'autonomie prévue.

- Si l'on désire accélérer la mise à zéro, il faut remplacer la résistance à l'intérieur de l'enregistreur par une résistance de faible valeur (jusqu'à 1 K Ω).

- A titre indicatif, le déplacement de la bulle est de 3,96 mm par milliampère heure.

De ce nombre, ont été déduites les valeurs suivantes :

Résistance série K Ω	Vitesse mm/heure
1	4,15 \pm 0,6
2,2	2,15 \pm 0,25
4,7	1,1 \pm 0,1

LES TUBES SONT DETRUIITS PAR DES COURANTS SUPERIEURS A 2 mA.

5. Chargement

5.1. Opérations préliminaires

Préparer : . le boîtier
 . le bouchon
 . le chargeur séparé en ses deux composants
 . le capot transparent du compas que l'on aura démonté sans appuyer sur le pivot

- et à côté :
- des ciseaux
 - le gabarit qui servira à couper le film destiné au compas à la bonne dimension
 - un cartridge de film Kodak (TriX : autonomie jusqu'à 8 jours - Plus X au-delà).

TRES IMPORTANT

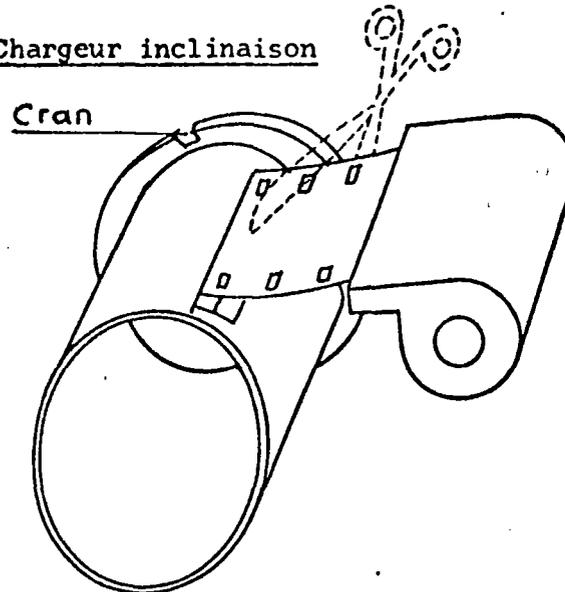
Eclairer en lumière normale (1 mètre d'une lampe de 100 w par exemple) les numéros sur le chargeur et le compas afin d'activer la peinture lumineuse : le numéro du courantographe se reportera automatiquement sur les enregistreurs.

Il a été prévu comme accessoire pour faciliter les opérations de chargement en série et assurer une bonne régularité d'éclairage, une boîte étanche à la lumière munie d'un éclairage intérieur.

5.2. Travail en chambre noire

Les opérations suivantes auront lieu dans l'obscurité complète.

- Chargeur inclinaison



Sur la face interne du chargeur, se trouvent deux rainures dont le rôle est de guider le film. Glisser le film par la fente jusqu'à ce qu'il se bloque et couper la partie qui dépasse au ras du chargeur.

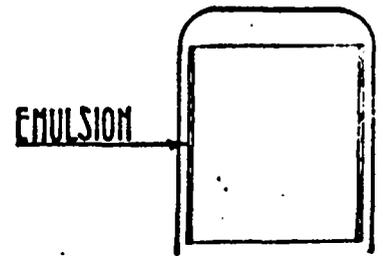
Assembler les deux parties du chargeur.

Visser l'ensemble sur le bouchon.

Faire tourner la couronne à l'extrémité du chargeur en la maintenant appuyée contre l'écran. Pour une position déterminée, celui-ci vient s'engager dans un cran : le chargeur est alors en place. Cette opération garantit à l'opérateur que le film sera impressionné dans la zone assignée à l'enregistrement.

- Chargeur du compas

- . Couper un morceau de film vierge en se servant du gabarit.
- . Le placer émulsion contre le plexiglas dans le capot du compas.
- . Bloquer les deux pièces à l'aide de l'écrou supérieur.



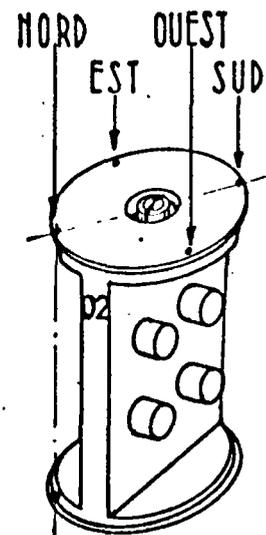
5.3. Remarque sur le cadrage de l'enregistrement des directions

On peut souhaiter que l'enregistrement n'ait pas lieu à l'inter-
ruption même du film. En effet, une fois le cylindre déroulé, le
tracé dans cette zone se trouve fractionné en deux parties.

Pour cela, il faut être capable de repérer la position de cette
coupure par rapport au compas : la coupure, elle, est perceptible
au toucher sur le film enroulé dans le capot de plexiglas. Quant au
support d'aimants, il porte une marque bien visible : son numéro
lumineux.

L'ENREGISTREMENT A LIEU A LA HAUTEUR DU NUMERO LUMINEUX QUAND
LES COURANTS SE DIRIGENT VERS LE NORD.

Lorsque le courant est
dirigé vers l'une des
orientations ci-contre
la flèche indique la
partie impressionnée
sur le film.



Les indications N, W, E, S n'ont pas été gravées sur le compas
parce qu'elles pourraient prêter à confusion avec le Nord vrai indiqué
par la direction des barreaux magnétiques.

- Fermeture du boîtier

- . Fermer le boîtier.
- . Le bloquer avec l'écran et la vis en nylon.

6. Position des masses d'équilibrage

Il existe deux masses d'équilibrage que l'on peut placer sur l'attache ou sur le flotteur.

La plus grande sert à maintenir l'équilibre de la suspension lorsqu'on change d'écran pour modifier la sensibilité du courantomètre.

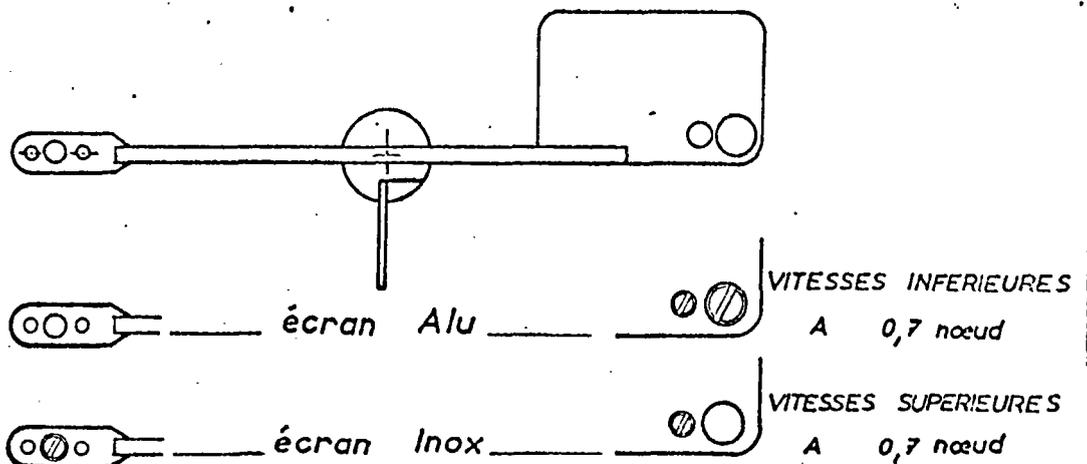
La plus petite sert à compenser les variations de poussée si le courantomètre travaille en eau douce ou salée.

Aucun réglage n'a été prévu pour des densités intermédiaires étant donné que l'enregistrement reste valable pour des inclinaisons notables de la suspension. A titre indicatif, cette inclinaison est de l'ordre de 10° pour une variation de 1 % sur la densité prévue.

L'équilibrage en eau salée a été calculé pour une eau de densité 1,027.

POSITION DES MASSES D'EQUILIBRAGE UTILISATION

EN MER



— En eau douce ou peu salée placer la plus petite masse à l'avant sur l'attache

7. Montage final du courantographe

En écartant légèrement la suspension, on engage les axes du boîtier dans leurs paliers respectifs, puis on monte le flotteur entre les deux bras de la fourche ; l'ensemble sera bloqué par les deux écrous en nylon (voir plan d'ensemble en annexe).

8. Mouillage du courantographe

Dans la caisse du courantographe, se trouve également un pivotage (voir plan d'ensemble) qui doit être inséré dans la ligne de mouillage. Il faudra, évidemment, prendre un maximum de précautions pour qu'il ne risque pas de se détacher lors du travail à la mer.

L'attache du courantographe est accrochée à celle du pivotage par une manille à fixation rapide ; cette opération peut être effectuée soit par un plongeur, soit à bord avant la mise en place du mouillage.

III. ENTRETIEN - CHANGEMENT D'AUTONOMIE - REMPLACEMENT DES TUBES

1. Entretien

NE JAMAIS EMPLOYER DE SOLVANTS DU TYPE TRICHLOROETHYLENE OU TETRACHLORURE DE CARBONE POUR NETTOYER LES BOITIERS.

Les boitiers sont, en effet, en Makrolon, matière plastique particulièrement sensible à ces solvants.

Ne pas huiler les axes, roulements, pivots.

Par contre, le joint torique du boitier doit être maintenu légèrement gras par de la graisse siliconée.

Vérifier de temps à autre le bon fonctionnement du microrupteur.

2. Joint torique du boitier

Il est prévu deux qualités de joints toriques :

- pour des profondeurs inférieures à 200 mètres, on utilisera les joints dont la dureté est la plus faible (qualité PD 501 du Joint Français)
- au-delà de 200 m, il conviendra d'utiliser des joints plus durs (qualité PB 701).

Seul le joint torique du boitier (bague R 32) est à changer.

3. Changement d'autonomie

La vitesse de défilement du spot dépend uniquement du courant qui traverse les tubes : c'est donc la résistance série qui fixe l'autonomie. Cette résistance se trouve au voisinage de la pile.

Dans le tableau ci-dessous, on appelle "autonomie réelle" le temps mis par la bulle d'électrolyte pour parcourir l'espace compris entre les 2 index. C'est le temps normal d'immersion.

S'il est impossible de récupérer à temps les courantomètres on dispose d'une marge égale à 20 % environ de cette autonomie avant que les tubes soient détériorés.

Autonomie réelle (jours)	4	8	16	32	64	96
Résistance (K Ω)	28,0	56,2	114	229	459	690
Emulsion à utiliser (Kodak-35 mm)	TRI X		PLUS X		PANATOMIC X	

Des résistances plus faibles permettent un défilement plus rapide, mais la précision de la base de temps diminue rapidement : elle est divisée par 2 pour 16 heures d'autonomie, par 3 pour 8 heures.

Autonomie réelle (heures)	48	32	16	8
Résistance Ω	13700	8980	4259	1930
Emulsion à utiliser	TRI X			

Toutes ces résistances doivent avoir une précision de 0,5 à 1 %.

4. Remplacement des tubes

PLACER LE BOUTON DE MISE EN MARCHE SUR LA POSITION ARRET ET ENLEVER LA PILE avant toute intervention sur le circuit électrique.

En effet, lorsque l'enregistreur est en marche, si l'électrode du tube horizontal, côté compas, vient en contact avec la semelle celui-ci se trouve directement en série avec la pile et sera détruit à coup sûr.

Pour éviter de tels incidents, ce fil est muni d'une petite gaine de téflon et la semelle plastifiée localement.

Ces précautions étant prises, pour changer un tube, il suffit d'en dessouder les extrémités avec un fer à panne fine, puis d'enlever le couvercle de la plaquette correspondante pour le remplacer.

Si les deux tubes sont à changer, il faut tenir compte, lors de la mise en place, du sens de défilement prévu (flèche grasse ou flèche fine).

5. Note technique sur les ampoules lumineuses

Dans cet enregistreur, les sources lumineuses sont constituées par deux ampoules scellées renfermant du sulfure de zinc activé par du tritium (repère 12 sur le plan de montage en annexe). Le sulfure de zinc est un sel jaune qui devient luminescent lorsqu'on l'expose à la lumière, mais il ne conserve pas longtemps cette luminescence : c'est une peinture contenant ce sel en suspension qui sert à marquer les numéros sur les enregistrements.

Pour qu'il garde une brillance permanente, on l'active par un élément radioactif : le tritium.

L'activité du tritium gazeux est telle qu'il ne sort absolument aucun rayonnement de l'ampoule, sinon le film serait impressionné. Le tritium fait d'ailleurs partie du groupe le plus faible dans l'échelle des radioactivités.

Cependant, au cas où une ampoule serait brisée, il convient de ventiler la pièce où l'incident a eu lieu. A titre indicatif, la quantité de tritium que l'on peut respirer sans inconvénient correspond à une demi-heure passée dans une pièce de 45 m³ sans aucune ventilation avec une ampoule cassée.

L'élément radioactif étant gazeux, les débris de verre ne présentent pas de danger.

A signaler également que la "période" du tritium est de 12,5 ans, ce qui sur le plan pratique signifie que la luminosité des lampes baisse de moitié après ces douze années, puis de moitié encore après douze autres années, etc...

IV. TRAITEMENT ET MONTAGE DES ENREGISTREMENTS

1. Traitement des films

Employer une cuve de développement pour format 35 mm à spirale.

Le révélateur à utiliser est du type "universel". NE PAS EMPLOYER DE REVELATEUR GRAIN FIN.

Immédiatement après séchage, classer et marquer les films.

2. Montage des enregistrements

2.1. Indications générales

Les films sont montés avec du scotch transparent sur les échelles. Pour chaque courantographe, les enregistrements de vitesse et direction sont juxtaposés sur une même échelle. On coupe la partie inutile sur l'enregistrement des vitesses.

Si le défilement a lieu dans le sens de la flèche grasse (→) les films sont montés émulsions dessus.

Si le défilement a lieu dans le sens de la flèche fine (←) les films sont montés émulsions dessous.

Pour situer chacun des enregistrements par rapport à l'échelle des temps (lignes verticales), on en fait coïncider les extrémités le mieux possible avec les horaires correspondants.

La graduation en heures et en jours de l'échelle des temps dépend évidemment de l'autonomie choisie. Les indications "0h" (zéro heure) en bas des traits gras verticaux sont valables pour une autonomie de 4 jours. Les traits fins sont alors situés respectivement à 6 heures, 12 heures, 18 heures.

Lorsque l'autonomie passe à 16 jours, l'espacement entre deux traits verticaux successifs représente 24 heures. Chaque trait est alors placé à zéro heure.

On adaptera facilement cette échelle à des autonomies différentes.

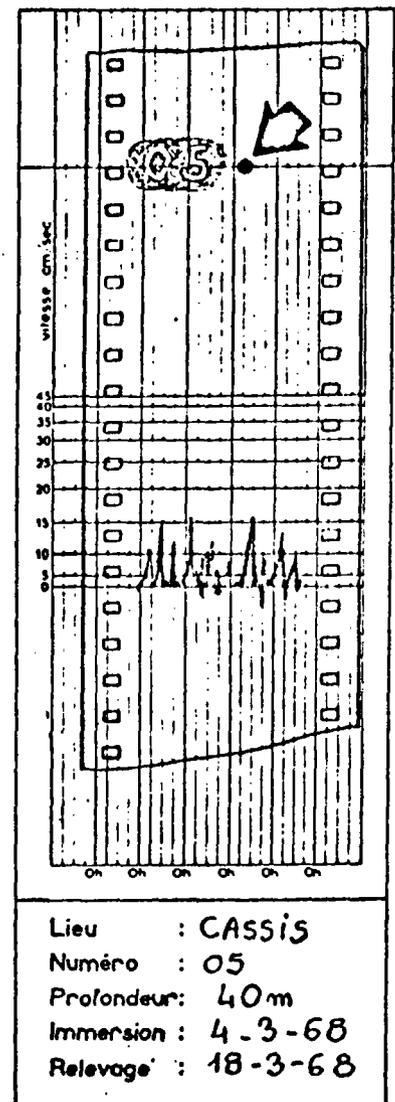
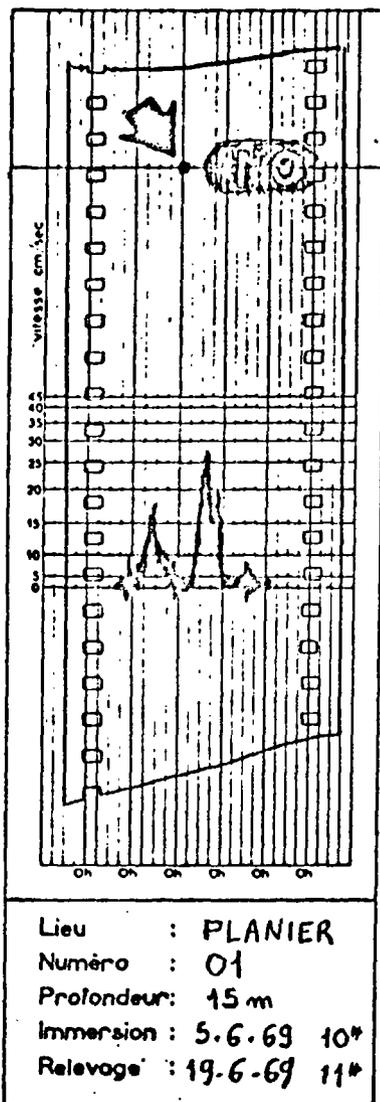
2.3. Montage de l'enregistrement des vitesses

L'enregistrement des vitesses est correctement positionné lorsque le point noir, près du numéro, se trouve sur l'horizontale à la partie supérieure de l'échelle.

Il est utile de confirmer de temps à autre cette indication par un enregistrement dans une cuve d'eau immobile : la trace enregistrée doit se trouver sur l'horizontale de courant nul.

Emulsion dessus

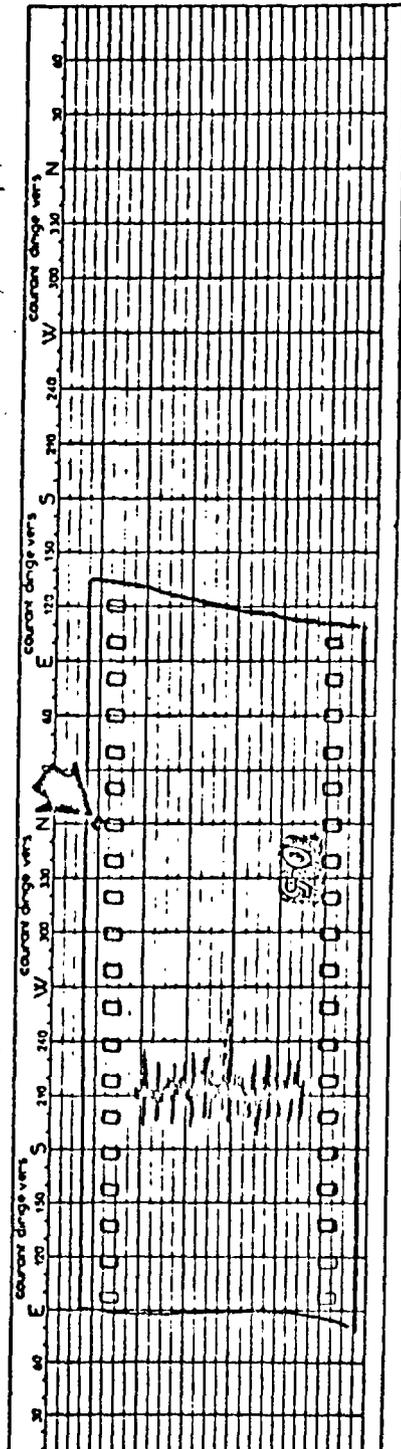
Emulsion dessous



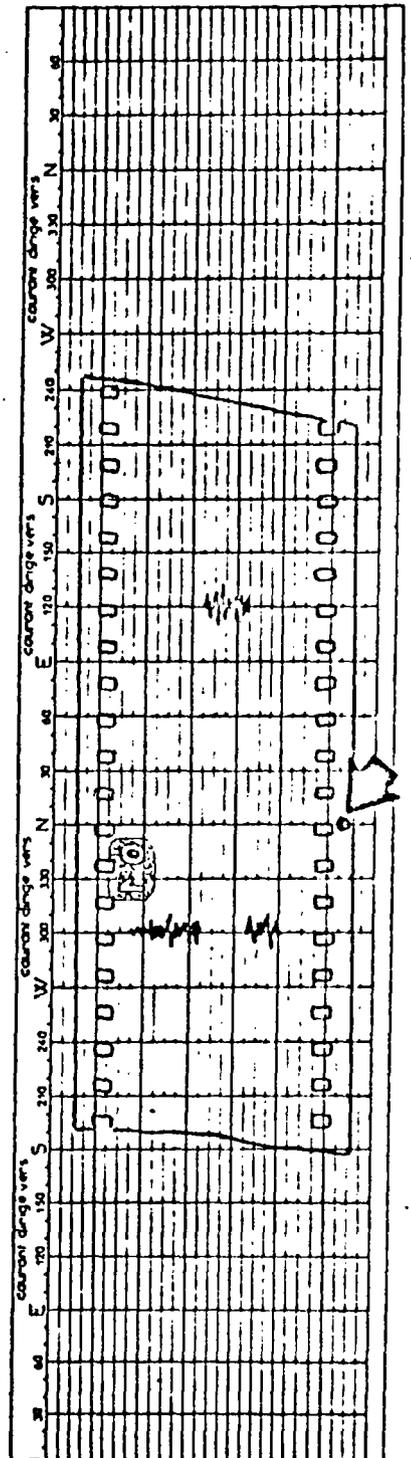
2.2. Montage de l'enregistrement de direction

L'enregistrement des directions est correctement positionné sur son échelle lorsque le point noir du bord du film se trouve sur l'horizontale passant par le nord (N) et le numéro au-dessous de cette droite.

Emulsion dessus
repère à gauche



Emulsion dessous
repère à droite



V. INTERPRETATION DES ENREGISTREMENTS

1. Caractéristiques d'un enregistrement de bonne qualité

(Voir exemple en tête de cette notice).

- Défilement

Le réglage de l'autonomie est satisfaisant lorsque les événements que l'on cherche à mettre en évidence (inversions, maxima du courant, etc...) restent bien distincts sur le film.

Ce réglage a ici une importance particulière puisque les enregistrements s'empilent sur une largeur imposée à l'avance et qui n'est que de 20 mm.

- Vitesse

Le tracé doit être continu et bougé, ce qui indique une légère oscillation permanente du boîtier. Il doit s'inscrire sur l'échelle dans les limites de la partie graduée.

- Direction

Même observation pour la qualité du tracé.

2. Défauts des enregistrements et leurs causes

- Enregistrement des vitesses passant au-dessous de la ligne de courant nul :

Ceci n'est pas un défaut de fonctionnement et peut arriver lorsque le courantographe est mouillé à faible profondeur, ou si le mouillage manque de stabilité. Les mouvements de la houle ou du câble font osciller le boîtier sans que la suspension ait le temps de tourner autour du pivotage.

- Enregistrement des directions discontinu ; le tracé comporte des points isolés ou des parties très nettes presque droites.

Causes : Pivotage défectueux

Capot mal serré

Vérifier si la bague qui maintient le compas sur son pivot ne s'est pas décollée

- Même défaut observé sur l'enregistrement des vitesses.

Causes : Amortisseur trop dur
Roulements défectueux
Le film est mal placé dans le chargeur et gêne la platine dans ses mouvements

- L'enregistrement est nettement plus long qu'il n'est prévu.

Cause : mauvais fonctionnement du microrupteur. Le contrôler pour plusieurs positions de la platine

- L'enregistrement est nettement plus court qu'il n'est prévu.

Cause : mauvais fonctionnement de l'un au moins des tubes

- Le tracé devient faible, presque invisible en début ou fin d'enregistrement.

Cause : tube mal centré dans les plaquettes

- Voile léger à certains endroits.

Causes : Plaquettes mal serrées
Défaut de développement
Entrée de lumière

- Le numéro du courantographe n'apparaît pas sur les enregistrements.

Cause : la peinture lumineuse n'a pas été activée par une exposition à la lumière blanche avant chargement ou est restée trop longtemps à l'obscurité

- Bande noire à l'extrémité d'un enregistrement.

Cause : l'amorce du film n'a pas été complètement enlevée

ANNEXE

- Plan d'ensemble
- Plan de montage
- Nomenclature des pièces
- Nomenclature des fournitures

TABLE DES MATIERES

CARACTERISTIQUES

I. DESCRIPTION GENERALE

1. Introduction
2. Description
3. Principe d'enregistrement
4. Enregistrement de la vitesse et de la direction

II. NOTICE D'UTILISATION

1. Démontage
2. Mise en place de la pile
3. Contrôle des tubes
4. Mise à zéro des tubes
5. Chargement
 - 5.1. Opérations préliminaires
 - 5.2. Travail en chambre noire
 - 5.3. Remarque sur le cadrage de l'enregistrement des directions
 - 5.4. Fermeture du boîtier
6. Position des masses d'équilibrage
7. Montage final du courantographe
8. Mouillage du courantographe

III. ENTRETIEN - CHANGEMENT D'AUTONOMIE - REMPLACEMENT DES TUBES

1. Entretien
2. Joint torique du boîtier
3. Changement d'autonomie
4. Remplacement des tubes
5. Note technique sur les ampoules lumineuses

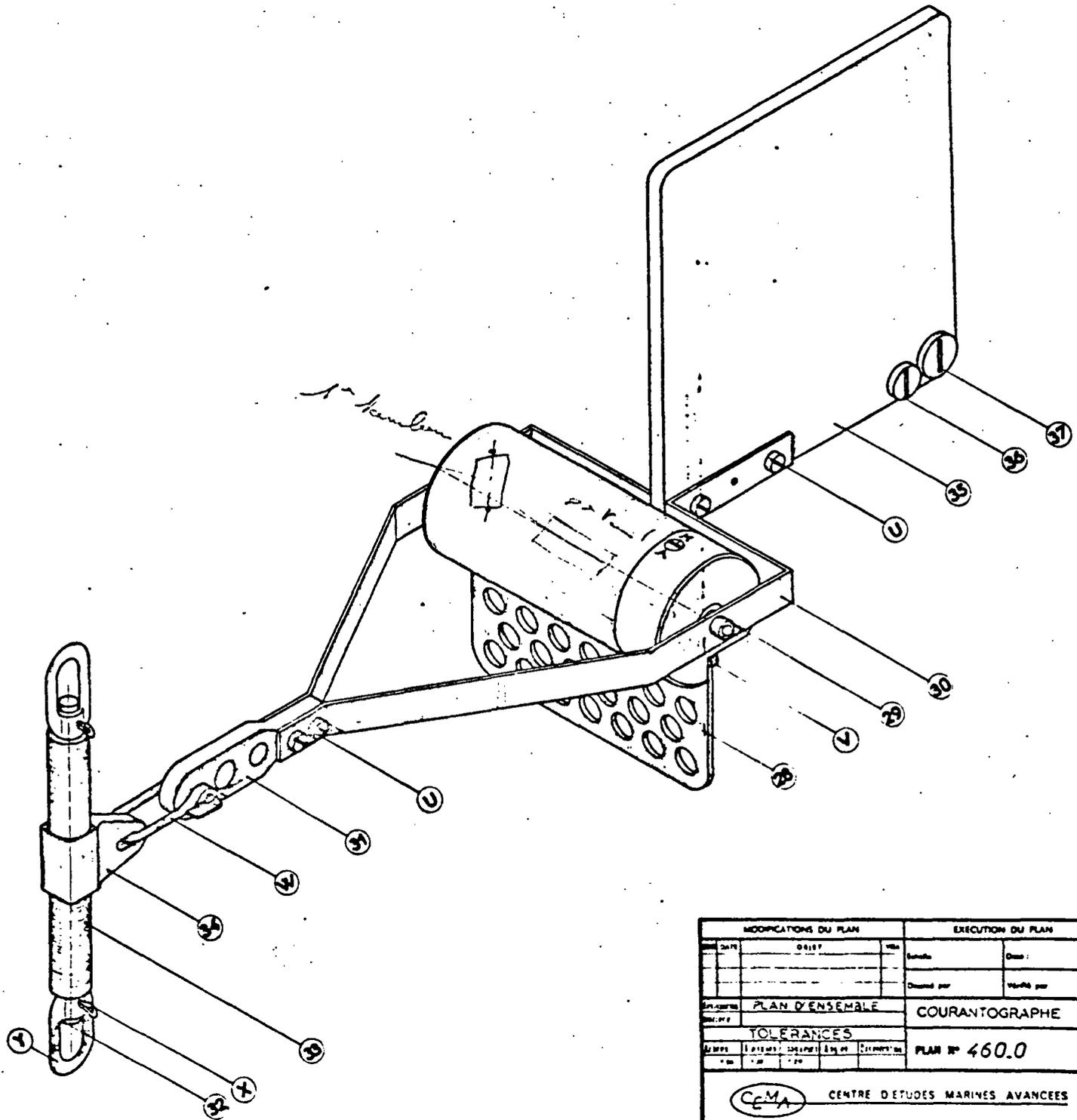
IV. TRAITEMENT ET MONTAGE DES ENREGISTREMENTS

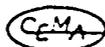
1. Traitement des films
2. Montage des enregistrements
 - 2.1. Indications générales
 - 2.2. Montage de l'enregistrement de direction
 - 2.3. Montage de l'enregistrement de vitesse

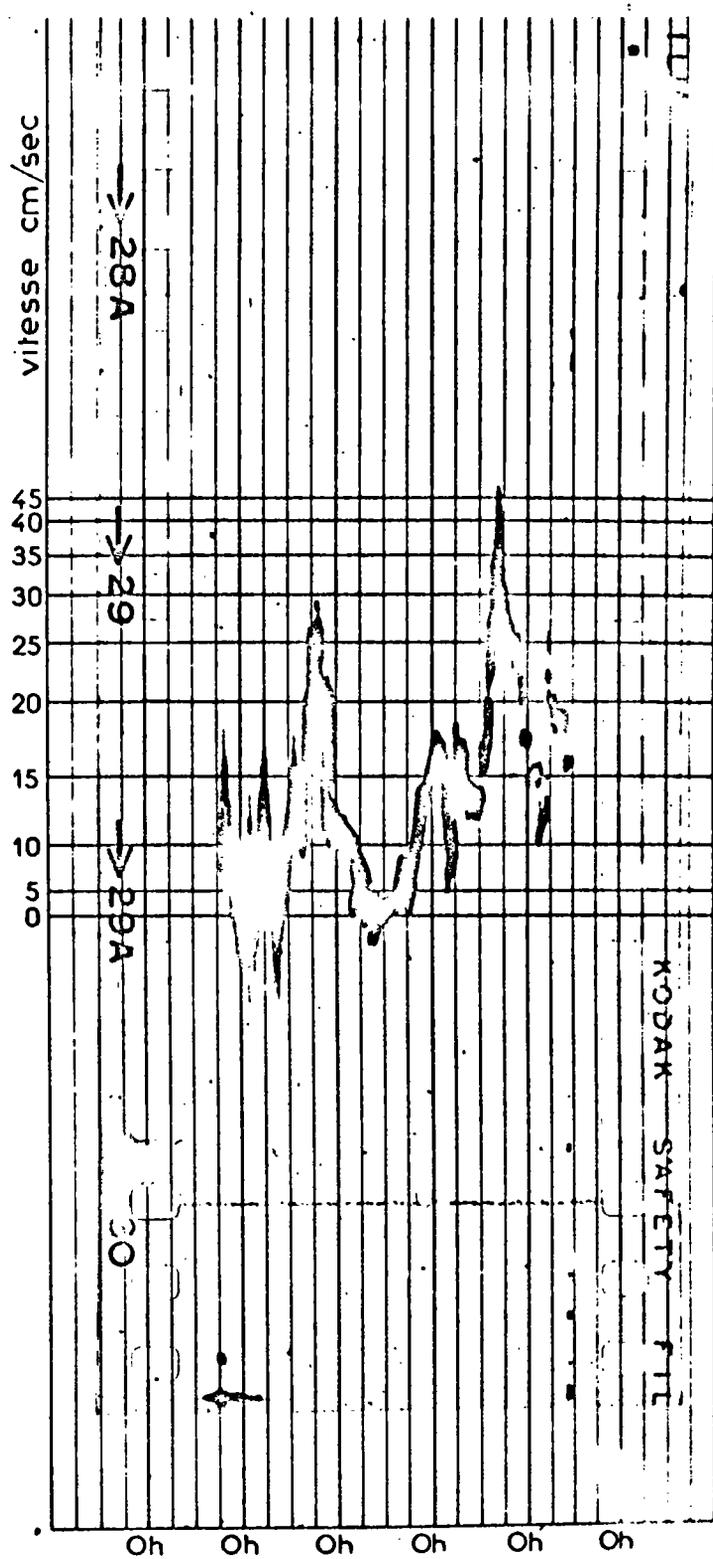
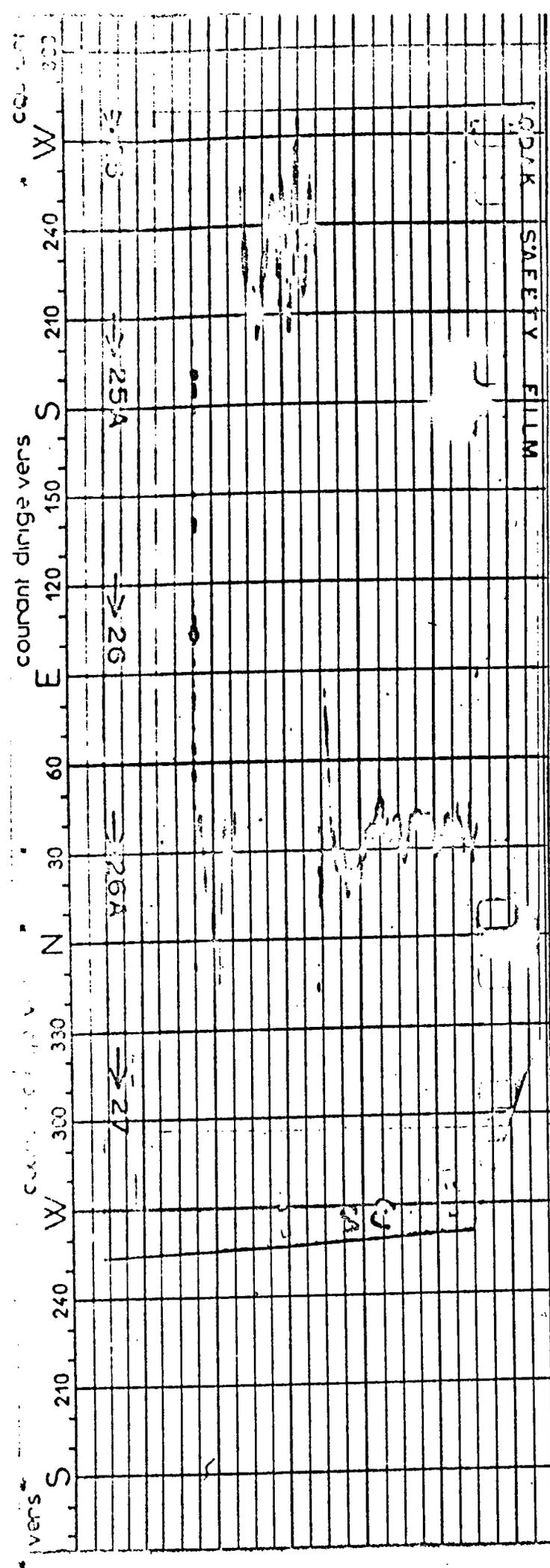
V. INTERPRETATION DES ENREGISTREMENTS (

1. Caractéristiques d'un enregistrement de bonne qualité
2. Défauts des enregistrements et leurs causes

ANNEXE



MODIFICATIONS DU PLAN				EXECUTION DU PLAN	
Date:	0517	Scale:		Drawn by:	
Author:		Checked by:		Revised by:	
PLAN D'ENSEMBLE				COURANTOGRAPHE	
TOLERANCES				PLAN N° 460.0	
<small> Dimensions en mm 0.10 0.20 0.50 1.00 2.00 5.00 10.00 20.00 50.00 100.00 200.00 500.00 1000.00 </small>				<small> 0.10 0.20 0.50 1.00 2.00 5.00 10.00 20.00 50.00 100.00 200.00 500.00 1000.00 </small>	
 CENTRE D'ETUDES MARINES AVANCEES					



Lieu : VANDELÒS
 Numéro : 5
 Profondeur : 5m
 Immersion : 4.9.68
 Relevage : 8.9.68

37.1	1	masse d'équilibrage vis	Arcap		
362	1	masse d'équilibrage écrou	Arcap		
361	1	masse d'équilibrage vis	Arcap		
35	1	finisseur	Eccofloat XP 241.36		densité: 0,575 épaisseur: 10mm
34	1	pivotalge: rotor	Ertalon		
33	2	pivotalge: palier	Ertalon		
32	1	pivotalge: axe	Acier inox Z8 CNDT 18/10		les trous de Ø 35 seront percés avec les écrous à vent (Rep Y) vissés à fond de file
31	1	attache	Ertalon		épaisseur = 10mm
30	2	Demi support	AG5	Anodisé couche dure 50µs couche large au bichromate de potassium	deuxième demi support identique mais sans l'ergat
29	2	palier de support	Laiton verre		1 palier trou Ø 5,7 1 palier trou Ø 6,7
28	1	écran	Inox Z8 CNDT 18/10 ou AG5	Anodisé couche dure 50µ	Inox épaisseur = 2mm ou AG5 épaisseur = 3mm
27	1	commande de mise en marche	Acier inox Z8 CNDT 18/10		
26	4	goujon	Laiton		
25	1	axe	Acier inox Z8 CNDT 18/10		
24	1	bague de commande	Alcodur		longueur 28,2 cote nominale à régler au montage
23	1	axe fixe	Acier inox Z8 CNDT 18/10		
22	1	axe	Acier inox Z8 CNDT 18/10		
21	1	piston	Laiton		
20	1	bouchon	Laiton		
19	1	ressort	Inox amagnétique		
18	1	palier	Laiton		
17	1	bague d'arrêt	Laiton		
16	1	écrou	Nylon		
15	1	tambour	Plaxiglas	poli	
14	1	support d'aimants	Alcodur		
13	1	pivot	Acier rapide		
12S		porte lampe ensemble			
12	2	porte lampe	AG5	aluminite noir mat	collé à l'araldite sur la demi coquille supérieure (Rep 9)
11	4	écrou	Laiton		
10	2	demi coquille inférieure	AG5	aluminite noir mat	la perçage des trous Ø 3 sera effectué à même temps sur les deux demi coquille pour qu'à l'assemblage de celles-ci les bords des mors (1-98) coïncident très exactement
9	2	demi coquille supérieure	AG5	aluminite noir mat	
8	1	cage de roulement	AG5	aluminite noir mat	
7	1	semelle	Inormat C		
6	1	platine	AG5	anodisé en couche dure 50µ	tous les angles seront arrondis, surtout les 4 du trou Ø 11,8 - filetages libres
5	1	ergat (chargeur)	Alcodur		
4	1	chargeur	Alcodur		le tambour est amené à Ø 59,9 avec l'ergat en place (Rep 6)
3	1	chargeur	Alcodur opaque		
2	1	bouchon	Makrolon GV noir		
1	1	bouchon	Makrolon GV noir		
0		COUSSIN TOURNANT plan d'assemblage			
100		COUSSIN TOURNANT plan d'assemblage			

no	libre	DESIGNATION	MATIERE	TRAITEMENT	OBSERVATIONS
----	-------	-------------	---------	------------	--------------

Z	1	Casse Ref. 517/47	F. Chaume 76 rue René Boulanger Paris 10 ^e	trou ϕ 4,2 longueur hors tout 23 mm
Z	1	Casse Ref. 515/45	F. Chaume 76 rue René Boulanger Paris 10 ^e	trou ϕ 4,2 longueur 15 mm
Z	2	Casse Ref. 514/44	F. Chaume 76 rue René Boulanger Paris 10 ^e	trou ϕ 3,2 longueur 15 mm
	2	Ecrous à œil réf. EC. 010 inox.	Société Française de produits en acier inox. 69 rue Gauthier 92 Courbevoie	ϕ 10
	2	Goupille Pendue V inox.	Société Française de produits en acier inox. 69 rue Gauthier 92 Courbevoie	k=3 L=30
✓	1	Manille rapide ref. MR-6 inox	Société Française de produits en acier inox. 69 rue Gauthier 92 Courbevoie	
I	2	Vis tête cylindrique "UNITEC"	SATEP 22 rue Ducouédic Paris 14 ^e	M6 x 10
J	4	Vis tête cylindrique	SATEP	M6 x 20
J	4	Ecrous borgnes "UNITEC"	22 rue Ducouédic Paris 14 ^e	M6
T	4	Barreaux cylindriques aimantés	Allevard Uginé 7 rue Lesdiquières Grenoble	ϕ 6 mm longueur 15 mm
S	2	Ampoule lumineuse	Laboratoires Lumina 19 rue Henri Martin 75 Colombes	jaune TLM avec fenêtre peinture blanche 2x 10 mm activité 0,4 Cie / Az ϕ 6 x 15 mm hors tout
R	2	Vis tête fraisée F/90 inox		M3 pas 0,5 longueur 10 mm
O	1	Roulement RMB UL 409X inox	William Baehni 147 rue Armand Silvestre 75 Courbevoie	ϕ 4 x 9 mm largeur 2,5 mm
D	1	Joint torique "R" n° 4	Le Joint Français 65 Avenue du Prado Marseille	ϕ 8,7 x 4,9 x 1,9 qualité PC 851
D	1	Joint torique "R" n° 1	Le Joint Français 65 Avenue du Prado Marseille	ϕ 6,4 x 2,6 x 1,9 qualité PC 851
V	3	Vis tête fraisée F/90 inox	Société Française des produits en acier inox. 69 rue Gauthier 92 Courbevoie	M2 longueur 8 mm
M	1	Vis six pans creux sans tête inox	Société Française des produits en acier inox. 69 rue Gauthier 92 Courbevoie	M3 longueur 5 mm
L	1	Roulement RMB UL 154X inox	William Baehni 147 rue Armand Silvestre 75 Courbevoie	ϕ 1,5 x 4 mm largeur 1,2 mm
K	1	Palier "Parag" LV Saitz 69 077/53-837	Georges Zühr 63 rue de Gerçovie Paris 14 ^e	M4 pas 0,5 L=10 F=1,8 ϕ T=1 Pierre type Vanilz 90° r=60/w... ressort en acier F=100g/mm PS=100g \pm 25%
J	2	Vis tête cylindrique six pans creux - inox	Société Française des produits en acier inox. 69 rue Gauthier 92 Courbevoie	M2 longueur 10 mm
I	1	Ecrou bas inox	Société Française des produits en acier inox. 69 rue Gauthier 92 Courbevoie	11m ϕ 8
H	1	Microrupteur réf. 1S x 1T	Honeywell. département Microrupteur 18 rue Averlès 92 Malakof	
G	1	Vis tête cylindrique bombée	SATEP 22 rue Ducouédic Paris 14 ^e	M4 longueur 6 mm
F	1	Pile PX 675	Mallory Batteries S.A. 5 rue Vauthier 75 Boulogne sur Seine	
E	5	Vis tête cylindrique bombée	SATEP 22 rue Ducouédic Paris 14 ^e	M4 longueur 5 mm + 2 rondelles isolantes
D	2	Intégrateur Curtis modèle 120 modifié	Technique et Produits - 92. Sèvres Cité des Bruyères rue Carle Vernet	longueur 36 mm scelllements compris electrolyte solution 4G
C		Résistance modèle MAX 1 type S	SABIE. Précis 8 Bd. de Méditerranée Paris 20 ^e	Pn 1/8W tolérance 0,5% coefficient de température k ₂
BL	1	traverse de courant	G. Doloy	type plot Ref 126
BL	1	traverse de courant	115 quai de Jemmapes Paris 18 ^e	type micropartic Ref 12L
A	1	Joint torique "R" n° 52	Le Joint Français 65 Avenue du Prado Marseille	ϕ 60,83 x 50,17 x 5,33 qualité PC 851

STATION AUTOMATIQUE POUR L'ETUDE DES FRONTS SALES

Cet appareil, conçu en vue de l'observation et de l'étude des contacts eau douce - eau salée, et en particulier des déplacements et des déformations des interfaces, est une station qui effectue de façon automatique les opérations suivantes :

- mise en route toutes les 12 heures (autres cadences possibles sur les modèles futurs)
- mesure et enregistrement graphique de la résistivité de l'eau en 18 points de mesure successivement. Pour chaque point de mesure, l'enregistrement est fait sur deux échelles ayant entre elles un rapport 10 (2 et 20 ohm/mètres par exemple).
- enregistrement de la position de la surface libre de l'eau à partir de la détection de la présence ou absence d'eau face à 18 points régulièrement espacés.

Une commande de mise en route manuelle est prévue.

- Caractéristiques générales -

L'ensemble est constitué par :

- un appareil qui assure les fonctions de commande, mesure et enregistrement (boîtier de 490 x 380 x 240 mm)
- un boîtier d'alimentation (310 x 210 x 140 mm)
- une sonde de résistivité constituée d'un câble portant 18 cellules (à 3 électrodes) qui sont les points de mesure
- une sonde de niveau d'eau.

Les sondes étant en place dans un sondage, l'appareil inscrit automatiquement (en principe toutes les 12 heures) un profil de la résistivité de l'eau du sondage, défini par 18 points. Il inscrit également la position de la surface libre. La précision absolue des mesures de résistivité de l'eau est de l'ordre de 5 %. Les variations de résistivité dans le temps en chaque point sont décelées avec une précision de 2 à 3 % (1).

(1) Variation qui peut correspondre à une variation relative de 2 - 3 % de la salinité ou à un changement de température de 1°C.

Toutes les mesures sont effectuées sans qu'il y ait mouvement d'aucune des parties de l'appareil placées dans le sondage.

L'appareil peut être utilisé sur tout sondage de diamètre supérieur ou égal à 50 mm.

Température de fonctionnement : 0 à 50°C.

L'appareil est alimenté par des batteries rechargeables qui lui confèrent une autonomie de marche importante (supérieure à un mois pour le prototype en service).

- Caractéristiques particulières du prototype déjà en service

L'écartement des points de mesure sur la sonde de résistivité est de 50 cm. L'appareil enregistre donc la résistivité de l'eau tous les 50 cm sur une hauteur de 10 mètres.

Les électrodes de la sonde de niveau d'eau sont distantes de 5 cm. On détecte donc les variations de niveau d'eau par sauts de 5 cm sur une hauteur de 1 mètre.

Echelles de l'enregistrement :

- profondeurs : 8 points (soit 4 mètres) par pouce pour la résistivité de l'eau, 8 points (soit 40 cm) par pouce pour le niveau de la surface libre de l'eau. Le papier gradué en pouces et quarts de pouces.

- distance entre deux enregistrements successifs : 1 pouce.

- résistivité : trois échelles au choix, commutables à la main : 1 et 10 ohm.mètres, 2 et 20 ohm.mètres, 5 et 50 ohm.mètres. Largeur de l'échelle (le papier porte 50 divisions) : 5 centimètres (2 pouces).

La sonde de résistivité a une longueur de 50 mètres. Elle permet donc de surveiller tout tronçon de 9 mètres d'un sondage entre 0 et 50 mètres de profondeur.

- Options

1 - Les caractéristiques suivantes sont susceptibles d'être modifiées à la demande (nous consulter) sans modification du prix :

- calibres de mesure,

- échelle des longueurs sur l'enregistrement (par modification de la vitesse de déroulement de l'enregistreur ou de la durée de chaque mesure),

- espacement des cellules de mesure sur les sondes.

2) - Les sondes sont réalisées à la demande. On peut prévoir par exemple une sonde de résistivité unique portant 18 cellules de mesure, deux sondes portant 10 cellules de mesure chacune, etc... Il est également possible de réaliser des sondes de 100 ou 200 m de long.

3) - Nous consulter pour toute autre caractéristique particulière :

- mesure en plus de 18 points
- alimentation sur secteur
- enregistreur extérieur ayant une largeur de bande d'enregistrement de 10 ou 12 cm.

Ces modifications n'entraînent qu'une modification légère du prix de l'appareil mais peuvent modifier son autonomie de fonctionnement et ses conditions d'emploi.

P.J. Photo de l'appareil

B.R.G.M.

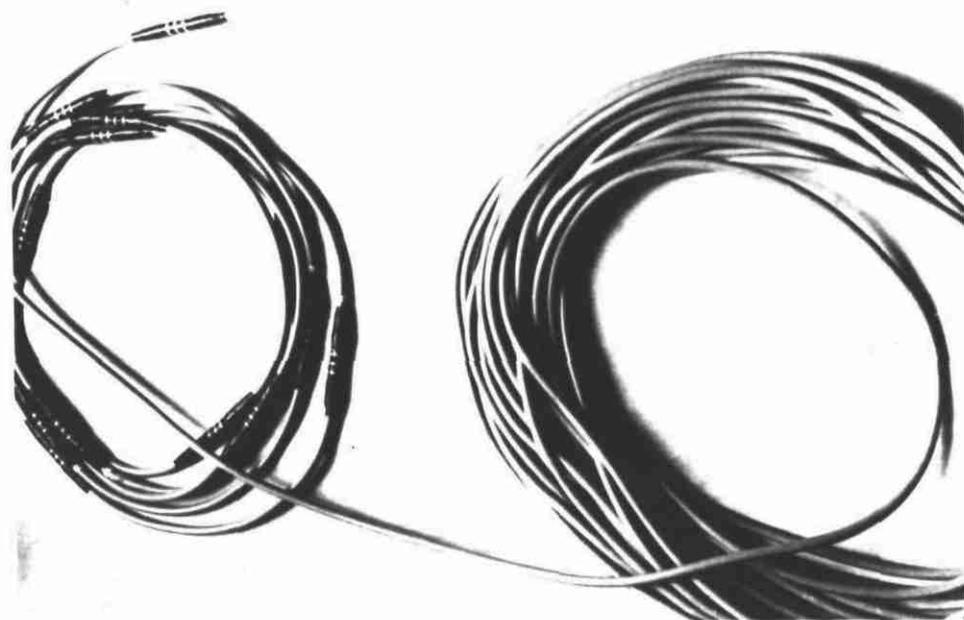
Station S.O.I.F. Pour l'étude des zones de transition

entre eaux douces et eaux salées



Appareil de commande
et enregistrement

Un type de sonde
de résistivité à
20 cellules



ANNEXE N° 4

Etude statistique des sources sous-marines des Calanques

1. Introduction

2. Préparation des données
 - 2.1. Principe
 - 2.2. Mise en oeuvre
 - 2.3. Conclusion

3. Traitement des données
 - 3.1. Coefficient de corrélation et corrélogrammes
 - 3.2. Analyse spectrale
 - 3.3. Auto-corrélogrammes observés
 - 3.4. Densité spectrale
 - 3.5. Corrélogrammes croisés
 - 3.6. Interprétation d'ensemble
 - 3.7. Possibilités d'améliorer l'analyse
 - 3.8. Conclusions

1. INTRODUCTION

Cette note présente les résultats d'un travail statistique préliminaire.

- Travail statistique : on a cherché des liaisons entre les trois séries de chiffres dont on disposait (la pluie à Cuges, les vitesses à Port Miou et à Bestouan) sans le moindre a priori ; on ne s'est que peu aventuré dans le domaine de l'interprétation, se bornant à un travail purement numérique.
- Travail préliminaire : la forme des données, l'imprécision de la mesure, ont fait que cette approche ne peut être considérée que comme une manière de dégrossir le phénomène ; plutôt que la question "quelle est la relation entre pluie et débits, sous sa forme exacte ?", on s'est plutôt posé la question : "Y-a-t-il une relation ?" La réponse devrait permettre d'orienter la poursuite des travaux, tant dans le traitement que dans l'acquisition des données.

2. PREPARATION DES DONNEES

2.1. Principe

Les données de vitesse se présentent sous forme de graphiques (voir pl. 7). On n'a traité que les vitesses supérieures (mesurées dans le haut de la section), considérées comme les plus représentatives du débit d'eau douce ; dans cette première phase, donc, on ne peut mettre en évidence les refoulements éventuels (puisque les vitesses négatives n'apparaissent que dans la partie inférieure de la section).

Ces données se présentent sous forme de graphiques (voir pl. 7), dont on peut remarquer dès l'abord :

- qu'ils sont discontinus (mesures manquantes)
- qu'ils sont "bruités".

On reviendra sur le second point plus bas ; le premier point est, lui, déterminant, car il conditionne le choix de la période

sur laquelle va porter l'analyse. Dans toute étude de série chronologique, en effet, il faut disposer, sur une certaine période, de mesures à une fréquence donnée, régulièrement espacées. Il est, bien entendu, souhaitable que cette fréquence soit la plus élevée possible ; ici, la borne supérieure est fixée par la fréquence des relevés pluviométriques (quotidiens). Ceci étant, il faut chercher une période - la plus longue possible - où l'on dispose, pour les deux séries de vitesses (Bestouan et Port Miou), de mesures quotidiennes régulières qu'on puisse associer à la pluie. La présence de "trous" dans les relevés oblige à choisir une période de référence très courte, ou bien à accepter d'interpoler quelques mesures manquantes (*) ; c'est cette dernière solution qui a été choisie, le plus grand espace entre deux mesures n'excédant pas 10 jours.

Ces contraintes nous amènent à retenir comme période d'étude, celle qui s'étend du 11.10.69 au 23.4.70 (soit 195 jours).

Le problème du "bruit" : les séries observées (voir pl.7) sont hautement erratiques ; un oeil entraîné peut cependant discerner des évolutions générales (à basses fréquences) sous des oscillations rapides.

Nous considérons alors - un peu arbitrairement, il est vrai, mais en accord avec le bon sens - que ces oscillations rapides sont des parasites (ou bruits) inintéressants (dus à la marée, à des courants de convection, aux vents etc...) se surimposant à un débit d'eau douce réel et plus régulier. Cette interprétation est confirmée par le fait suivant : les données de vitesse inférieure concernent, en général (sauf débit supérieur excessif), l'eau salée ; ces vitesses sont affectées, autour d'une valeur centrale nulle, d'oscillations régulières du même type ; de là à supposer que le bruit qui affecte la mesure supérieure (eau douce) est le même que celui de la mesure inférieure (eau salée, débit nul (en théorie)) il n'y a qu'un pas - que nous avons franchi ; cette hypothèse serait à remettre en question si l'on décidait d'approfondir ces résultats préliminaires.

* Il existe, en fait, des techniques statistiques plus raffinées ; ces techniques sont, cependant, assez lourdes, et on a décidé de ne pas les appliquer ici pour l'instant.

La régularité des mesures : même lorsqu'il n'y a pas de "trou" dans le graphique, les mesures ne sont pas reportées sur ce graphique à intervalles réguliers ; si, en moyenne, on a 4 points par jour, cela n'est pas vrai jour par jour.

Il y a donc un double problème pratique : un problème de lissage ou filtrage, pour éliminer le bruit, et un problème de digitalisation, pour affecter à chaque journée une valeur unique.

Il faut procéder au lissage par un filtre linéaire éliminant les oscillations de l'ordre de quelques heures, pour ne laisser subsister que les variations journalières ; le filtre de ce type le plus simple est une moyenne échelonnée d'ordre 4 : l'ordre est suffisamment grand pour éliminer les fréquences inférieures à la journée, et pour ne pas conduire à des calculs trop lourds ; il est suffisamment petit pour laisser subsister des variations supérieures ; l'ordre est pair pour que le bruit puisse s'annuler sur une période aussi courte ; la moyenne échelonnée est préférée à la moyenne mobile en ce qu'elle demande moins de calculs et ne risque pas d'introduire des périodicités parasites.

Ces moyennes échelonnées étant calculées, on obtient deux courbes des vitesses lissées, qu'il suffit de digitaliser au pas de 24 h.

2.2. Mise en oeuvre

L'automatisation complète du procédé décrit ci-dessus était possible, à l'aide d'un lecteur de courbe ; cette éventualité a cependant été écartée, pour trois raisons :

- l'échelle du graphique est telle que la manipulation du lecteur aurait été fort délicate
- le volume des données à traiter, bien que non négligeable, est insuffisant pour justifier la rédaction et la mise au point d'un programme non répétitif.
- le délai de réalisation d'un tel software, bien que relativement faible, est néanmoins supérieur à celui de l'exécution "manuelle" de l'opération.

Cette décision de préparer les données sans l'aide de l'ordinateur devrait, bien sûr, être remise en question en cas de poursuite de l'étude sur un échantillon plus vaste.

On a donc, sur le graphique de départ (planche 7) tracé les valeurs des moyennes échelonnées d'ordre 4. Rappelons-en le principe de calcul : on remplace une série de n points $x_1, x_2 \dots x_n$ par la série de n/4 points :

$$\frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4} ; \quad \frac{x_5 + x_6 + x_7 + x_8}{4} \quad \dots\dots$$

$$\frac{x_{4K+1} + x_{4K+2} + x_{4K+3} + x_{4(K+1)}}{4} \quad \dots\dots \text{etc} \dots$$

(la série des moyennes mobiles comprendrait n - 3 points, et serait, peut-être préférable ; le principe consisterait à calculer :

$$\frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4} , \quad \frac{x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{4} \quad \dots \text{etc}$$

les calculs sont donc beaucoup plus longs, et le report des points plus délicat). Lorsque n n'est pas un multiple de 4, on calcule la dernière moyenne sur l'ensemble des 4 derniers points (recouvrant ainsi partiellement l'ensemble de 4 points qui a servi à l'avant dernière moyenne).

Ces points, tracés au crayon sur le graphique (planche 7) ont été ensuite reportés sur un calque ; les quelques périodes où les données manquent ont été interpolés linéairement ; on a ensuite procédé à la digitalisation sur ce calque, en affectant à chaque jour la valeur moyenne de la fonction des moyennes échelonnées, transformant ainsi une ligne brisée irrégulière en fonction en escalier à pas constant. Ces deux fonctions (moyennes échelonnée et courbe en escalier), correspondant aux deux opérations : lissage et digitalisation, sont représentés figures 4 et 5.

Les valeurs de la courbe digitalisée ont été ensuite lues et reportées sur un bordereau de perforation, produisant ainsi le jeu de cartes perforées sur lequel a porté l'exploitation proprement dite.

2.3. Conclusions

Ce "pré-traitement" manuel est une opération lourde et fastidieuse, source d'erreurs, imposant des vérifications constantes ; il a été, comme on l'a vu, suggéré par la forme des données, Il serait souhaitable, dans des exploitations ultérieures, de se procurer les données sous une forme plus maniable.

Indépendamment de ce détail de forme, un point de fond doit également être noté : les séries obtenues par moyennes échelonnées et interpolation linéaire sont peut-être trop lissées. Une moyenne mobile serait peut-être préférable. Il faut cependant noter que le filtre des moyennes mobiles est parfois dangereux : il peut introduire des périodicités artificielles dans la série lissée, si l'ordre de la moyenne mobile n'a pas été choisi avec soin.

L'incidence du lissage sur les résultats, et le choix éventuel d'un autre type de filtre devront donc être étudiés avec soin en fonction des résultats obtenus.

3 - TRAITEMENT DES DONNEES

.. On dispose donc des données suivantes :

- les vitesses supérieures jissées à Port Miou et à Bestouan (fig. 4 et 5),
- la pluie quotidienne à Cuges-les-Pins (pl. 8).
(on a choisi, après examen de l'ensemble des pluviomètres, celui qui semblait représenter le mieux le bassin ; ce choix est d'ailleurs de peu d'importance, tous les pluviomètres étant hautement corrélés entre eux).

. Les données sont reportées sur cartes perforées.

. La période de référence, rappelons-le, s'étend du 11.10.69 au 23.04.70.

. On cherche à mettre en évidence des liaisons statistiques éventuelles entre ces trois séries. On va commencer par décrire l'outil statistique utilisé.

3.1 - Coefficient de corrélation et corrélogrammes

La première manière -intuitivement évidente- de représenter une liaison entre deux séries x_1, x_2, \dots, x_n et y_1, y_2, \dots, y_n est de reporter sur un graphique plan les points de coordonnées $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_n, y_n)$.

On obtiendra ainsi un "nuage" de points ; la forme générale de ce nuage donne une idée de la liaison (voir schémas 1, 2, 3).

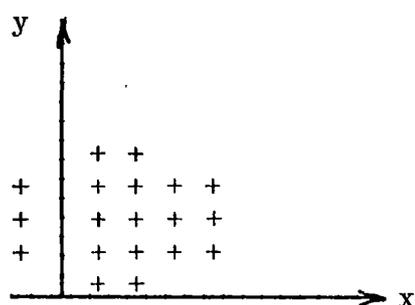


Schéma 1

pas de liaison apparente
(nuage étalé)

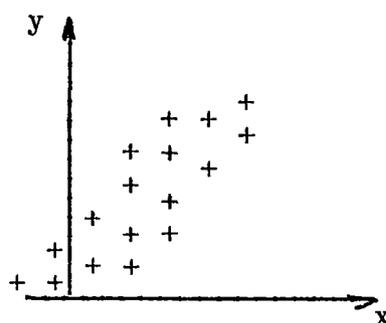


Schéma 2

liaison statistique
(nuage allongé)

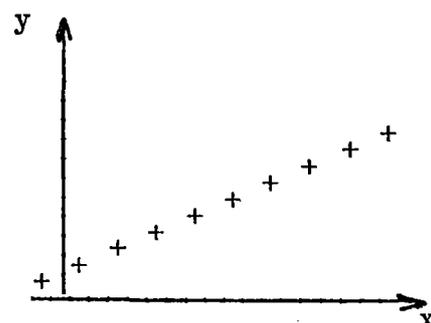


Schéma 3

liaison fonct. rigoureuse
(nuage réduit à une ligne)

On caractérise donc la liaison par l'aplatissement du nuage.

Dans la pratique, on ne fait pas toujours de tels graphiques, et on se contente de calculer un coefficient de corrélation, qui est un indice d'aplatissement du nuage ; il est défini par :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) \left(y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \sum_{i=1}^n \left(y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right)^2}}$$

Il est égal à zéro en cas d'indépendance, et à + 1 ou - 1 en cas de liaison linéaire rigoureuse (le signe indiquant le sens de la liaison, croissante ou décroissante).

Il ne caractérise que des liaisons linéaires ; mais on sait ramener des liaisons différentes (quadratiques, cubiques, exponentielles, trigonométriques) à des liaisons linéaires pour changement de variable (racine carrée ou cubique, logarithme, fonction trigonométrique inverse) ; cette restriction n'est donc pas rédhibitoire.

Lorsque $(x_1 \dots x_n)$ et $(y_1 \dots y_n)$ représentent des séries chronologiques, c'est-à-dire des séries d'observations régulièrement étalées dans le temps, on a souvent de bonnes raisons de penser qu'une liaison éventuelle ne serait pas instantanée, c'est-à-dire qu'il y aurait un retard (correspondant, par exemple à la durée d'un écoulement) entre les séries x et y . Au lieu, alors, d'étudier la corrélation entre (x_1, x_2, \dots, x_n) et (y_1, y_2, \dots, y_n) , on étudiera la corrélation entre : $(x_1, x_2, \dots, x_{n-k})$ et $(y_{k+1}, y_{k+2}, \dots, y_n)$. On procède ainsi à un décalage de k unité de temps. On calcule de cette manière une suite de coefficients de corrélations $r_1, r_2, \dots, r_k, \dots$ appelée corrélogramme.

On distinguera le corrélogramme marginal, ou auto-corrélogramme, calculé entre $(x_1 \dots x_{n-k})$ et $(x_{k+1} \dots x_n)$, représentant la corrélation de la série avec elle-même (un débit à l'instant t dépend, par exemple, de facteurs extérieurs divers, dont la pluie, mais aussi du débit à l'instant $t - 1$, un petit peu moins du débit à l'instant $t - 2$, etc...).

On peut dire qu'on représente ainsi la "mémoire" ou "l'inertie" du processus.

- et le corrélogramme croisé, ou inter corrélogramme, calculé entre $(x_1 \dots x_{n-k})$ et $(y_{k+1} \dots y_n)$.

Dans les deux cas, on tronque les séries de k observations pour avoir autant de valeurs de x que de y dans le calcul du coefficient de corrélation ; il est donc nécessaire que le décalage k ne dépasse pas une certaine valeur, faute de quoi le calcul porterait sur un nombre d'observations trop réduit, et serait entaché d'une erreur d'échantillonnage important.

3.2 - Analyse spectrale

Il est difficile de décrire en peu de mots cette théorie qui, sans être d'une difficulté mathématique exceptionnelle, est cependant assez spécialisée ; disons simplement qu'elle remplace un corrélogramme par sa transformée de FOURIER (ou, plutôt, une fonction déduite de sa transformée de FOURIER...). En pratique, cela revient à remplacer l'étude des variations de la série sur l'axe des temps, par l'étude de ses variations sur l'axe des fréquences. Il se peut, dans certains cas, que cette présentation rende plus facile l'interprétation. On en jugera sur le cas traité.

On va succinctement examiner les résultats.

3.3 - Auto-corrélogrammes observés

On a, dans une première étape, calculé les auto-corrélogrammes de S trois séries, pour tous les décalages compris entre 0 et 70 :

- Port Miou (voir fig. 6.1).

L'auto-corrélation de la série est, bien entendu, égale à +1 pour un décalage nul ; elle décroît ensuite rapidement pour atteindre un minimum (0,1) vers 8 - 9 jours, et osciller ensuite lentement entre 0,0 et 0,3, sans qu'on trouve de période régulière dans ces oscillations. Les valeurs négatives (comprises entre - 0,4 et 0,0) correspondant à un décalage de l'ordre de 65 - 70 jours sont à interpréter avec prudence : elles peuvent être dues à une erreur d'échantillonnage élevée (décalage important, de l'ordre du tiers de l'effectif

total], ou, tout simplement, à l'amorce d'une variation saisonnière

- Bestouan (voir fig. 6.2).

On observe exactement le même type de résultat que Port Miou, en remarquant que la corrélation est dans l'ensemble plus faible, ce qui peut s'interpréter en disant que cette série a moins de "mémoire" que la précédente.

- Pluie (voir fig. 6.3).

On observe ici le corrélogramme typique d'une pluviométrie quotidienne sous ces climats : quasi-annulation dès le troisième jour (en accord avec la durée moyenne de l'épisode pluvieux), oscillation autour de zéro ensuite ; ces oscillations sont, par rapport à celles des précédents corrélogrammes :

- d'amplitude plus faible,
- plus irrégulières
- légèrement en-dessous de zéro.

Ces trois points sont en accord avec l'évidence : il est à peu près universellement admis que les valeurs de la pluie deviennent très vite indépendantes (au bout de 3 à 5 jours, selon les régions) ; seule l'erreur d'échantillonnage, ^{donc} peut expliquer des variations qui sont erratiques et de faible amplitude ; c'est bien le cas ici. Les épisodes pluvieux étant rares et irréguliers, il en résulte que dans le calcul de la corrélation, à une mesure de pluie positive ^{est}, en général, associée une mesure nulle (donc inférieure à la moyenne). D'où la valeur faiblement négative autour de laquelle oscille le corrélogramme.

Ces trois résultats, en conclusion, n'apportent que peu d'informations positives ; les corrélogrammes de vitesse, aussi bien à Bestouan qu'à Port-Miou, ont des valeurs supérieures à celui de la pluie, montrant bien qu'il ne s'agit pas de séries purement aléatoires, sans pour cela que les valeurs de la corrélation soient suffisantes, ni que les variations en soient suffisamment régulières, pour suggérer l'ajustement d'un modèle stochastique paramétrique comme il est courant en hydrologie. On retiendra surtout que la série Port-Miou semble avoir plus d'inertie que celle de Bestouan.

3.4 - Densité spectrale

On peut préciser le dernier point par le calcul des densités spectrales. Disons qu'il s'agit de mettre en évidence les fréquences responsables des variations les plus élevées. On lit par exemple sur la densité spectrale de Port-Miou (fig. 7.1) que 90% des variations de la vitesse sont "expliquées" par des fréquences inférieures à 1 jour sur 10. C'est-à-dire que, si on se satisfait de 90% de l'information contenue dans les mesures, cette information est le fait de mesures espacées d'au moins 10 jours. Ou encore : la "mémoire" du processus est de l'ordre de 10 jours (à 10% près).

En ce qui concerne Bestouan, on constate (fig. 7.2) que le seuil de 90% correspond à une fréquence plus élevée, donc à une période plus faible, (de l'ordre de 4 - 5 jours), ce qui confirme la remarque faite au § précédent : la "mémoire" à Bestouan est inférieure à celle de Port-Miou.

On a calculé également la densité spectrale de la pluviométrie (fig. 7.3) dont le seul intérêt est de permettre la comparaison : la courbe est régulièrement étalée sur l'axe de fréquence, avec une décroissance très faible (ce qui correspond bien à un corrélogramme quasi nul pour les périodes supérieures à 3).

3.5 - Corrélogrammes croisés

On a calculé les corrélogrammes croisés 2 à 2, il y en a donc 3 (fig. 8.1, 8.2, 8.3). Contrairement aux auto-corrélogrammes, où le décalage varie de 0 à 70, le décalage doit théoriquement varier de - 70 à + 70, (le "retard" n'est plus symétrique). Cette différence en fait, ne présente d'intérêt que si l'on a de bonnes raisons de penser que les relations peuvent être à double sens, par exemple entre Port-Miou et Bestouan.

Il serait, au contraire, peu raisonnable de chercher une relation permettant de prévoir la pluie à partir du débit ; c'est pourquoi on a représenté, pour les corrélogrammes croisés pluie-Port Miou et pluie-Bestouan (fig 8.1, 8.2), la moitié positive de la courbe seulement (l'autre partie a cependant été calculée et examinée afin de vérifier que les résultats n'en étaient pas aberrants. Ce qui fut confirmé !).

Le corrélogramme croisé Port-Miou-Bestouan, par contre, est représenté (fig. 8.3) dans sa totalité.

Les résultats de ces calculs sont en général assez décevants : aucune corrélation, en effet, n'est supérieure à 0,4. Cette valeur, bien sûr, diffère significativement de zéro, mais n'est l'indice que d'une liaison bien floue !

On peut ainsi déceler une liaison lâche entre la pluie et la vitesse à Port-Miou, dont le maximum correspond à un décalage de 10 jours, la liaison s'annulant complètement à 15 - 16 jours. L'interprétation d'un tel résultat est cependant délicate (voir § suivant). C'est à peu près tout ce qu'il est possible de tirer du corrélogramme pluie-Port-Miou (fig. 8.1).

Le corrélogramme pluie-Bestouan (fig. 8.2) est encore moins significatif, et il est difficile d'en tirer la moindre conclusion objective, si ce n'est l'absence de liaison...

La relation Port-Miou-Bestouan (cf fig. 8.3) est également peu claire ; on note des valeurs non négligeables, bien que faibles (0,3 - 0,4) de la corrélation pour des retards suivants : - 24 jours, - 8, +3, +25.

Il est enfin possible de pratiquer une analyse spectrale de ces inter-relations ; sans entrer dans le détail de l'analyse spectrale croisée qui a été faite, on se contentera de signaler que les résultats ne sont pas facilement interprétables, et que leur signification statistique peut être mise en doute ; c'est pourquoi on ne cite leur existence que pour mémoire.

3.6 - Interprétation d'ensemble

La conclusion statistique qu'on peut tirer des résultats précédents, est qu'il n'y a pas une relation statistique simple entre les trois séries.

Il faut bien, ici, faire la distinction entre relation statistique et relation Causale : on peut très bien trouver des relations statistiques hautement significatives entre des variables qui ne sont absolument pas liées par des relations de cause à effet ; il suffit simplement qu'il y ait une cause commune ! Il en existe maints exemples célèbres dans bien des domaines ; pour

rester dans celui de l'hydrologie, on peut citer le cas trivial des deux cours d'eau qui ont leur source dans le même massif montagneux : les débits sont bien corrélés parce que dépendants du même régime de pluies ; cela ne prouve en rien une relation de cause à effet - communication par exemple - entre les deux bassins !

Un danger moins apparent et moins connu, mais également catastrophique lors de l'interprétation est celui de "l'effet de masque". C'est l'exagération logique de l'effet précédent, qu'on comprendra mieux d'après l'exemple suivant. Si on assimile un oeuf à un ellipsoïde de révolution, on peut caractériser ses dimensions par son grand axe et son petit axe. On s'attendra alors à mettre en évidence une corrélation négative entre le grand axe et le petit axe, exprimant qu'un oeuf est soit allongé, soit presque sphérique, mais pas les deux ! Eh bien, il suffit de faire le calcul sur un échantillon d'oeufs tirés au hasard d'une basse-cour pour constater le contraire : la corrélation est positive. Il est simple, dans cet exemple, de constater que la liaison négative grand axe-petit axe est "masquée" par la double liaison positive grand axe-poids et petit axe-poids. Il suffira alors de prendre soins de calculer une corrélation à poids constants (qu'on appellera "corrélation partielle") pour retrouver une image correcte de la réalité ; mais qu'on remplace les notions de grand axe, petit axe, et poids, par celles de vitesse à Port-Miou, vitesse à Bestouan, et pluie à Cuges-les-Pins, et cette "image correcte de la réalité" deviendra bien difficile à obtenir !

Il est absolument nécessaire de mettre en évidence le schéma causal dont on désire tester l'existence par des méthodes statistiques. Dans le cas qui nous intéresse, ce schéma pourrait être :

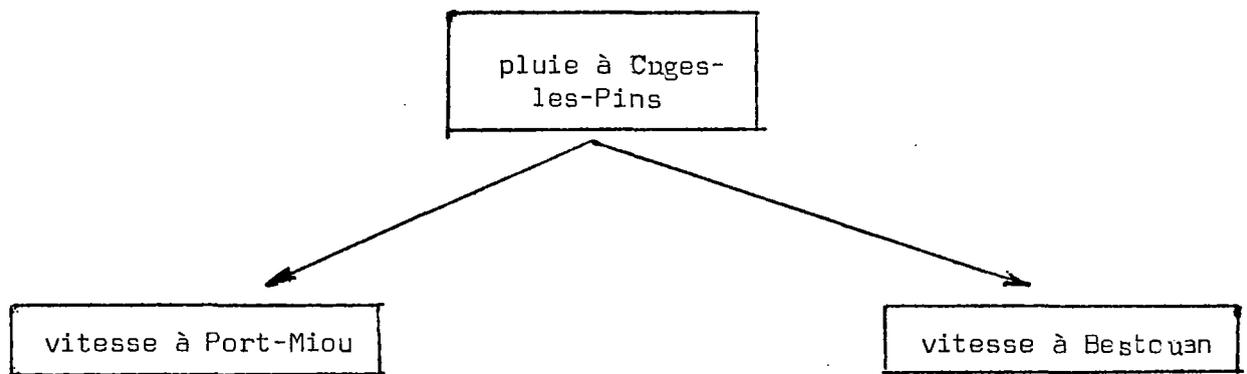


Schéma n° 4

Ce schéma est bien sûr insuffisant, et il faut tenir compte de l'auto-dépendance des débits qu'on a mentionnés plus haut ; on aurait alors :

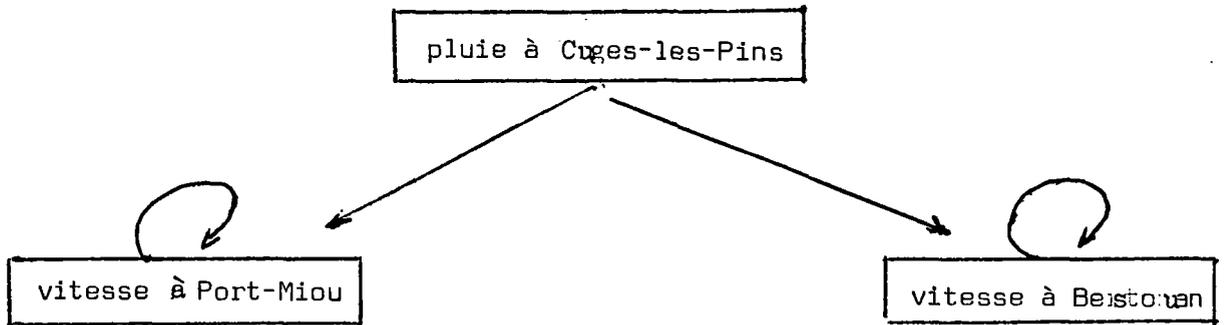


Schéma n° 5

Les boucles de rétro-action ne correspondant pas au sens exact du terme à des relations causales, mais à l'étalement dans le temps de l'écoulement : faute de connaître exactement le réseau karstique, on remplace la notion de causalité par celle de dépendance. Il n'y a pas, en effet de relation de cause à effet stricte entre le débit au jour $j - 1$ et le débit au jour j , mais une dépendance qui schématise l'écoulement d'un réservoir, et qui permet de prédire le débit futur.

Il faut enfin tenir compte de la communication entre les deux sources :

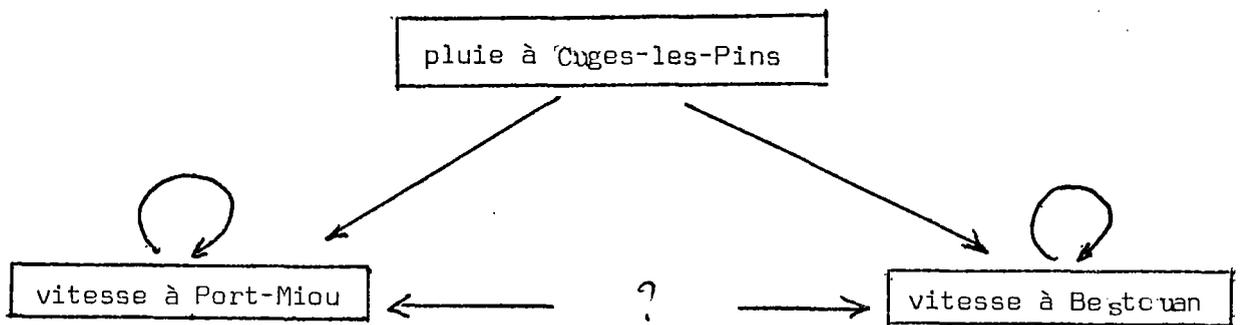


Schéma n° 6

La première difficulté est qu'on ignore le sens de l'écoulement ; peut-être y a-t-il des réservoirs intermédiaires, avec une ou plusieurs boucles de rétro-action, et inversion de sens possible ?

Une autre difficulté réside dans la non-stationnarité éventuelle du système. L'hypothèse de stationnarité consiste à supposer que les lois de probabilité du système sont invariantes dans le temps (on parle aussi d'invariance, particulièrement en ce qui concerne les lois liant entrées et sorties).

Nous avons admis cette hypothèse de stationnarité *a priori*, alors qu'elle était hydrologiquement plausible, mais l'absence de signification des résultats la remet en question ; on ne peut pas en effet conclure à l'inexistence de relations pluie-débits, mais plutôt à leur multiplicité : il n'y a pas une relation, mais bien plusieurs, dépendant de la date, et, éventuellement de facteurs non contrôlés.

On est donc en présence d'un système :

- non complètement spécifié (sens et forme de la relation entre Port-Miou et Bestouan ?).
- Dont on n'est pas certain qu'il soit totalement stationnaire.
- Soumis à un éventuel effet de masque.

Le calcul des corrélogrammes suppose, avant tout, la stationnarité ; on comprend alors que les résultats soient à interpréter avec prudence : des coefficients voisins de 1 auraient prouvé sans doute possible l'existence de liaisons simples, mais des coefficients voisins de zéro ne prouvent pas du tout l'absence de liaison !

Sous l'hypothèse de stationnarité des deux relations pluie-débits (pluie - Port-Miou et pluie - Bestouan), on pourrait tenter de calculer un corrélogramme partiel entre Port-Miou et Bestouan, afin d'éliminer un éventuel effet de masque de la pluie ; il n'est cependant pas certain du tout que le corrélogramme soit significatif : il faudrait pour cela qu'il existe ^{en outre} une relation stationnaire entre Port-Miou et Bestouan.

On n'a pas pu, ici, calculer une telle corrélation partielle, le programme de traitement général utilisé n'étant pas prévu pour de tels calculs (un aménagement dans ce sens est prévu dans un avenir proche).

Il n'y a donc pas une hypothèse de stationnarité, mais plusieurs :

- stationnarité des auto-corrélogrammes, c'est à dire des trois séries prises une à une ;

- stationnarité des corrélogrammes croisés, c'est à une des trois couples de séries ;
 - stationnarité, enfin, du triplet des trois séries ;
- soit sept notions qui, bien que non indépendantes, sont distinctes.

En résumé, l'absence de signification des résultats peut être imputée aux trois raisons suivantes :

- non stationnarité, totale ou partielle,
- effet (s) de masque,
- données insuffisamment critiquées.

3.7 - Possibilités d'améliorer l'analyse

Les difficultés de l'étude ne doivent pas empêcher de poursuivre, dans deux directions, dont les résultats doivent converger :

1ère direction - l'analyse spectrale statistique classique, dont l'objectif essentiel est de remplacer l'étude du corrélogramme croisé, dans le domaine des temps, par l'étude des corrélations dans le domaine des fréquences (fonctions de cohérence et de phase).

Il est en effet difficile, dans le cas présent, d'interpréter la "pointe" du corrélogramme croisé entre la pluie et les vitesses à Port-Miou au retard de 10 jours, cette pointe s'étalant, en fait, de 7 jours à 14 jours ; cela montre que l'analyse de corrélogramme doit se faire globalement, c'est-à-dire qu'on ne peut pas séparer les différentes valeurs du retard. Dans le domaine de fréquences, par contre, il est tout à fait possible de s'intéresser à chaque fréquence isolément, et de séparer, par exemple, la corrélation entre cycles annuels de la corrélation entre cycles hebdomadaires, ou quotidien, etc.

Cette analyse spectrale croisée est malheureusement délicate à mener à bien, pour des raisons numériques ; les quelques essais qui ont été cités plus haut n'ont pas conduit à un résultat facilement interprétable, et on les a interrompus avant d'aboutir. Il faudrait, par ailleurs, que cette analyse tienne compte d'éventuels effets de masque.

2ème direction - l'Analyse des systèmes amènerait à chercher la réponse impulsionnelle (* hydrogramme unitaire) du système, supposé invariant et linéaire. Il serait peut-être alors nécessaire de rendre le système linéaire, d'abord en procédant à des changements de variables pertinents, ensuite en "linéarisant" l'entrée par réduction de la pluie brute à une estimation de la "pluie efficace" (par soustraction de l'ETR, par exemple).

L'expérience a montré que l'emploi de cette technique était en général couronné de succès.

Dans tous les cas, avant de mettre en oeuvre des techniques raffinées et représentant un traitement informatique non négligeable, il est souhaitable d'approfondir la critique des données, sur trois plans :

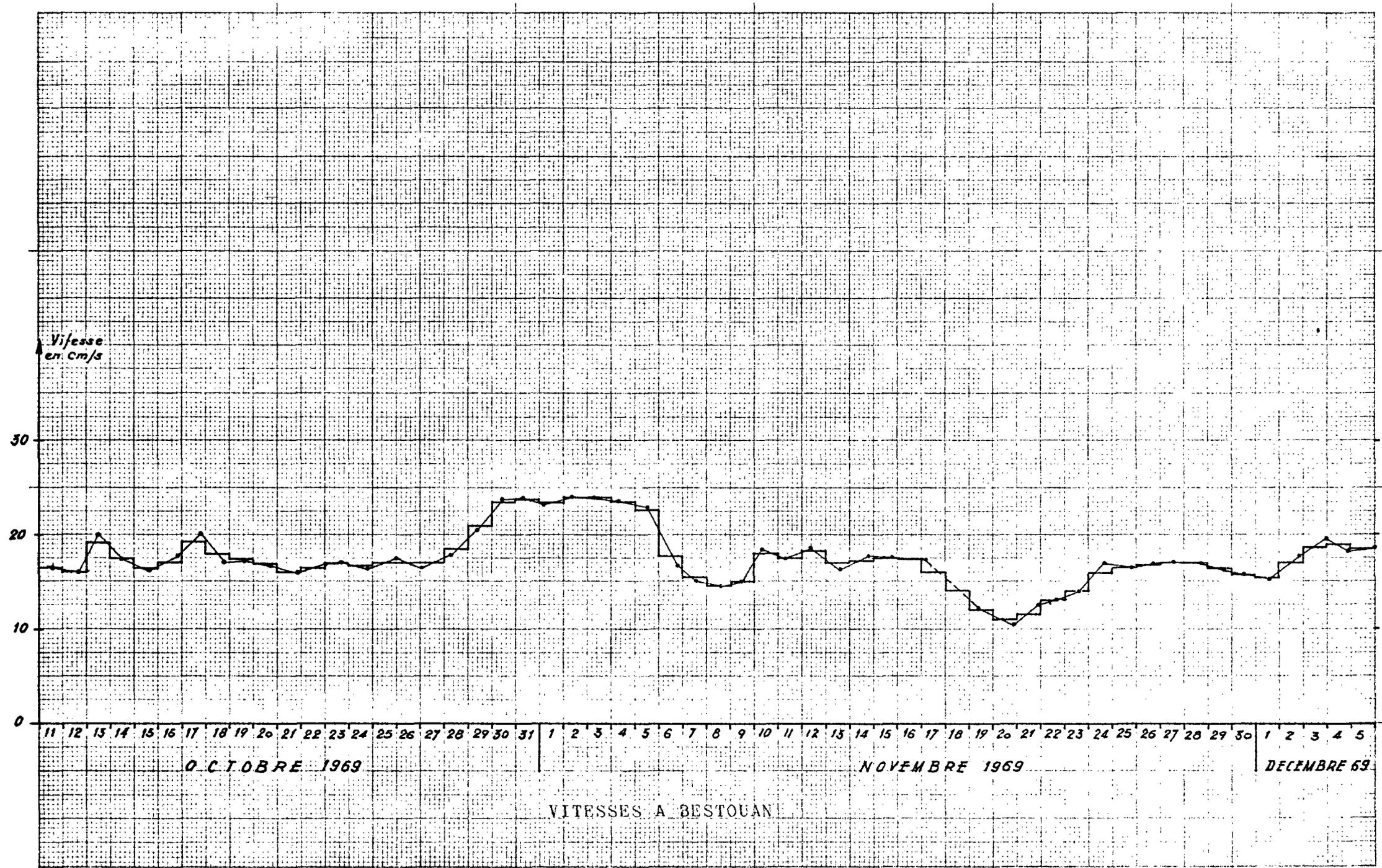
- les mesures de vitesse qu'on a sont-elles tout à fait représentatives du débit ? L'étalonnage par moulinets et l'extension de la mesure à d'autres verticales apporterait une réponse à cette question.
- Les seules données que nous ayons eues entre les mains sont des graphiques ; il est probable qu'une solution plus efficace au problème de la digitalisation serait obtenue en remontant en amont, du graphique le plus près possible de l'appareil : il faut réduire au minimum le nombre de supports d'information intermédiaires entre la mesure elle-même et la carte perforée (ou tout autre support pouvant servir d'entrée à l'ordinateur) ; on résoudre ainsi le problème de la digitalisation.

- Le lissage par moyennes échelonnées ne semble pas être responsable de la non-significativité des résultats, mais n'est pas parfait cependant; deux possibilités se présentent : la première consiste à ne pas lisser du tout ; il faut alors avoir des mesures de pluie à un pas aussi serré que les mesures de vitesses (4 par jour, à des heures qui restent à déterminer). L'autre possibilité réside dans la construction d'un filtre plus sélectif que les moyennes échelonnées ; on en connaît un : celui des moyennes mobiles, mais une étude approfondie pourrait peut être en évidence la nécessité d'un autre type de filtre. Quelque soit la solution apportée au problème du lissage, d'autre part, il ne faut pas oublier que cette question est étroitement liée à celle de la digitalisation.

3.8 - Conclusions

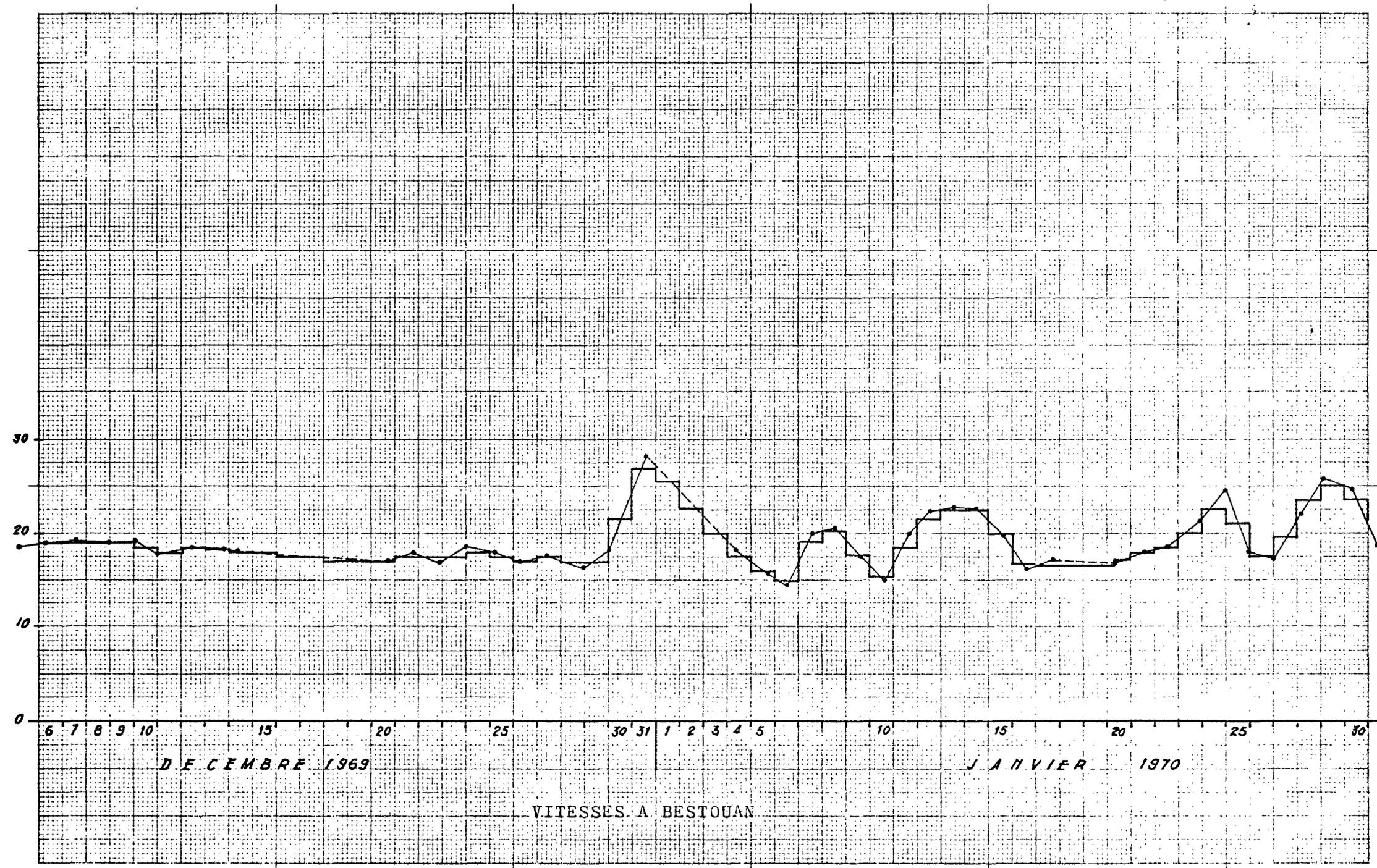
Cette étude statistique préliminaire montre que le problème n'est pas simple, et que aucun résultat définitif ne peut être énoncé ; elle montre bien cependant - ce qui était son objectif initial - dans quelle direction poursuivre la recherche ; compte tenu de la complexité des outils statistiques à mettre en oeuvre, il faudra retenir, dans une poursuite éventuelle :

- que le plus grand soin doit être apporté à la saisie et à la critique des données. En effet celles que nous avons eues à traiter lors de cette première tentative étaient à peine suffisantes en quantité (difficulté de trouver une période sans "trou") et en qualité (graphiques très bruités).
- que la démarche sera séquentielle, par tâtonnements successifs, et donc longue (ce qui ne signifie pas forcément coûteuse).



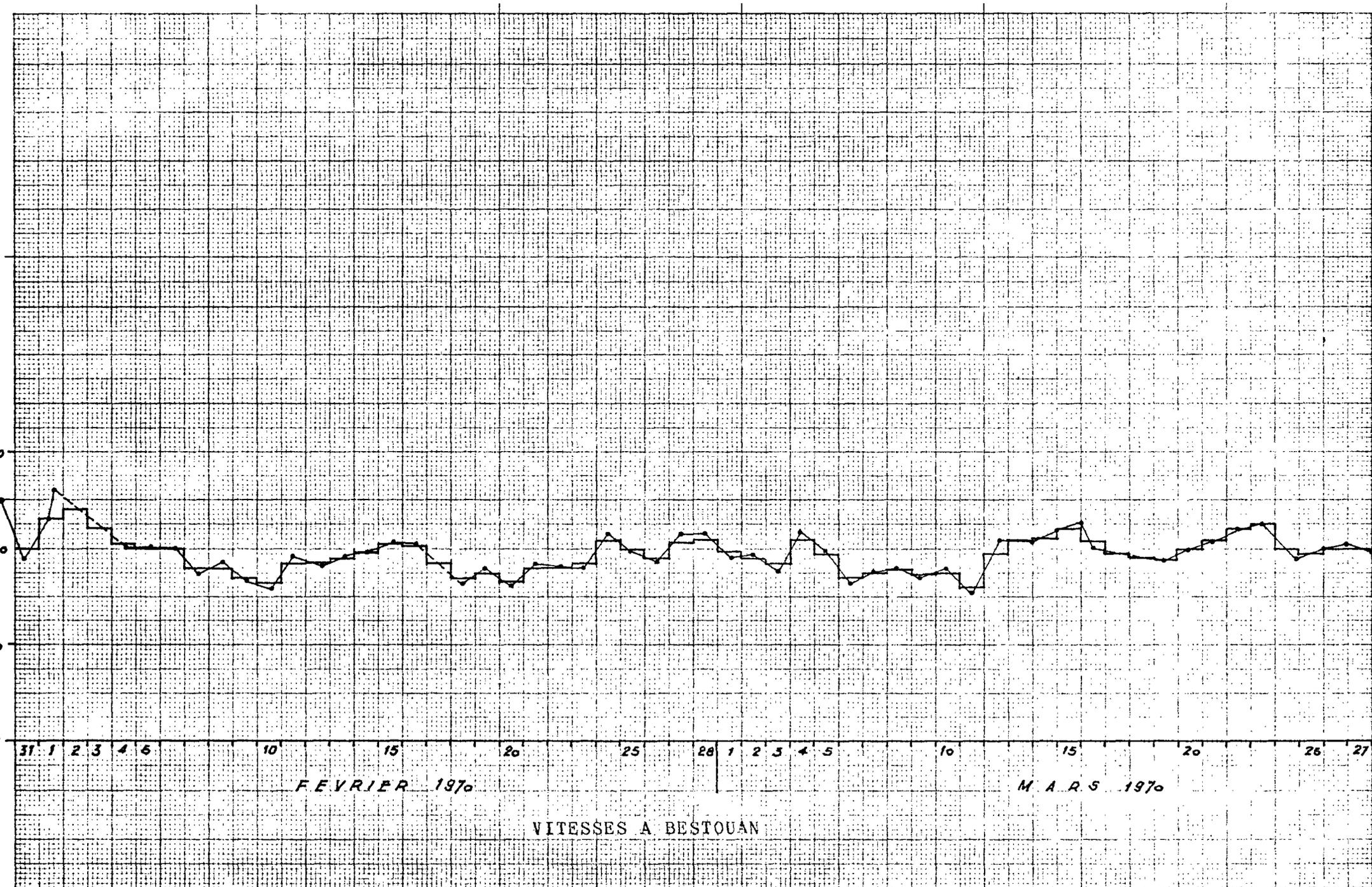
VITESSES A BESTOUAN

fig 4.2



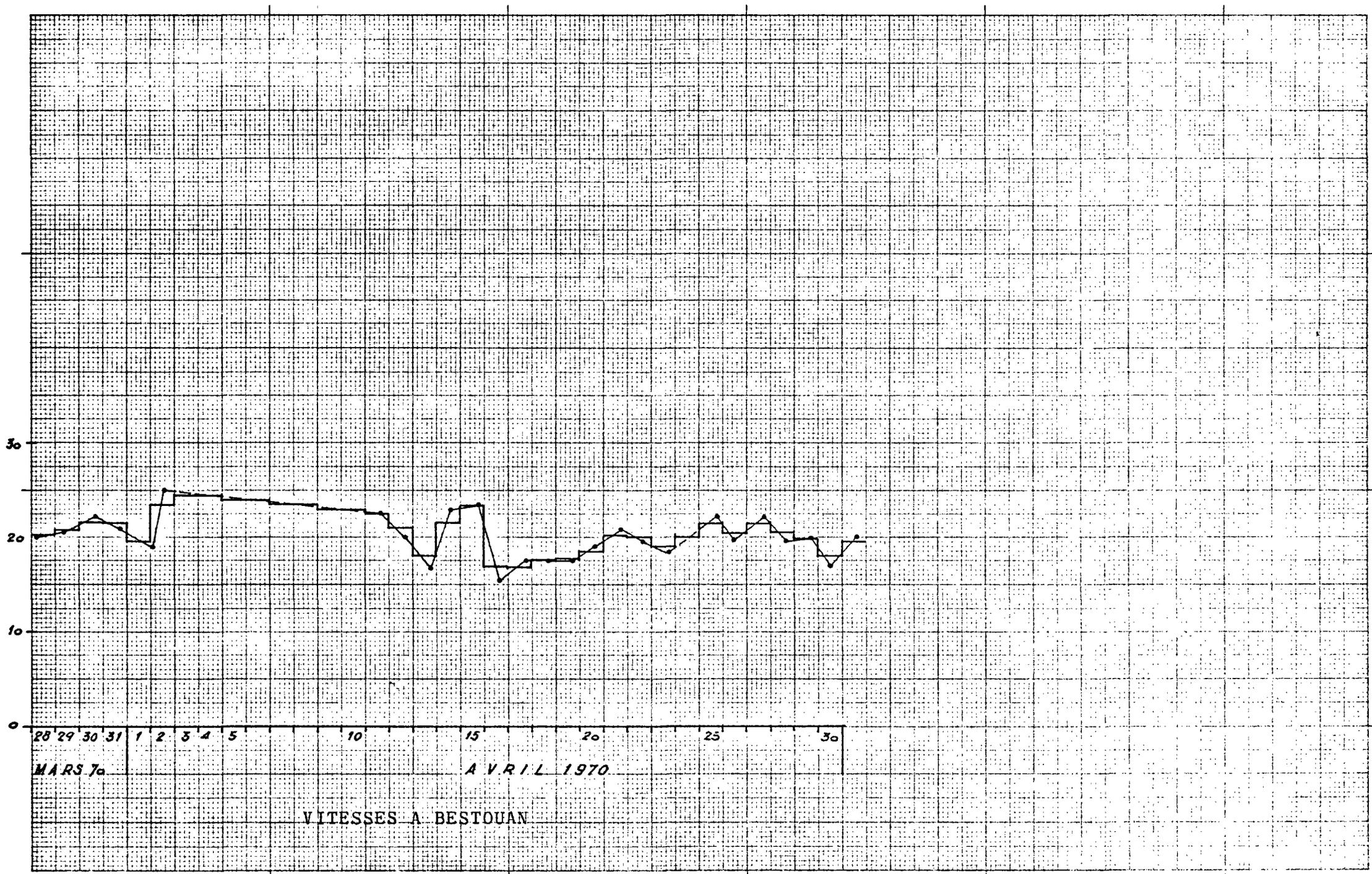
VITESSES A BESTOUAN

fig. 4.3



VITESSES A BESTOUAN

Fig. 4.4.



VITESSES A BESTOUAN

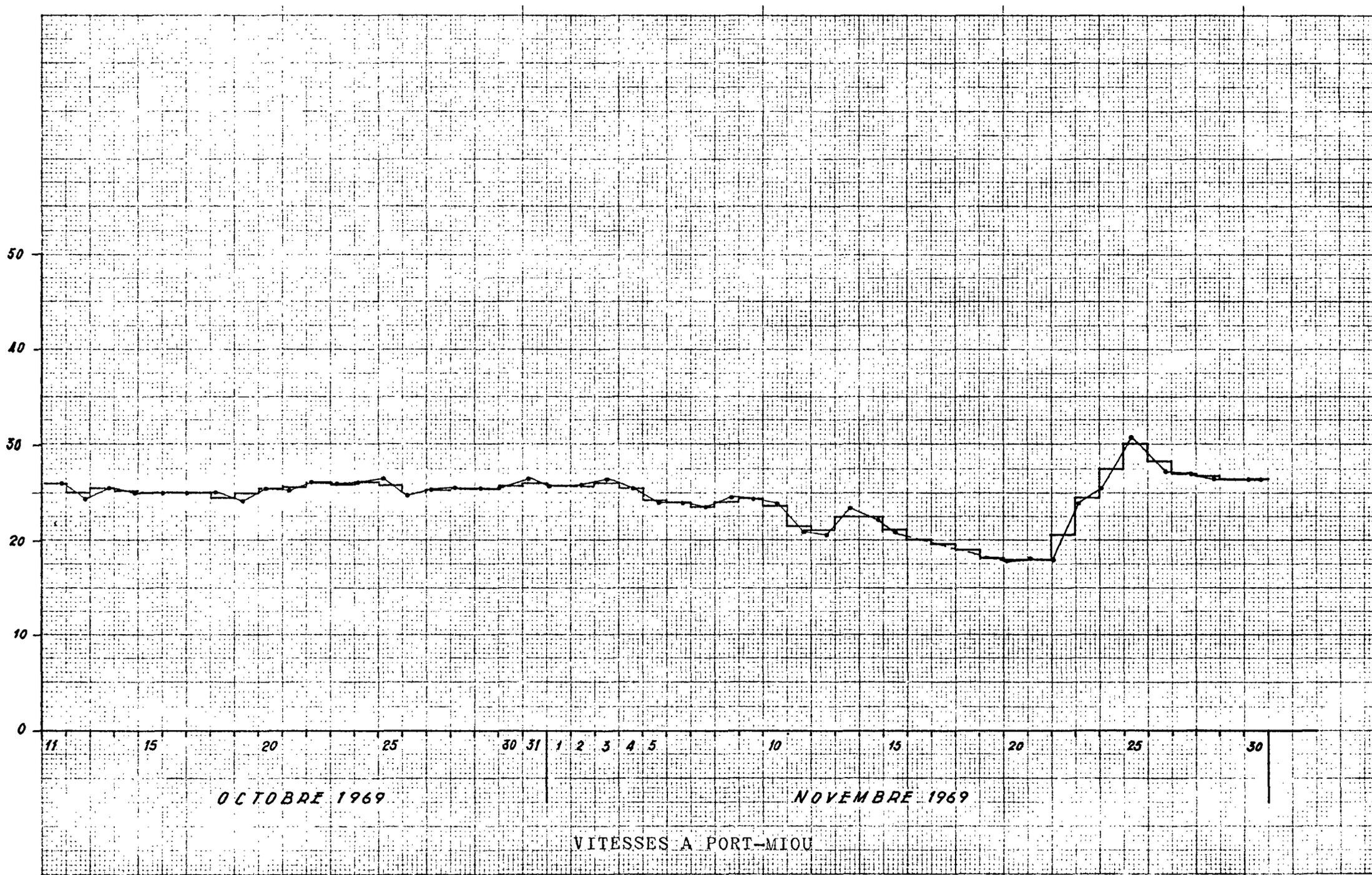
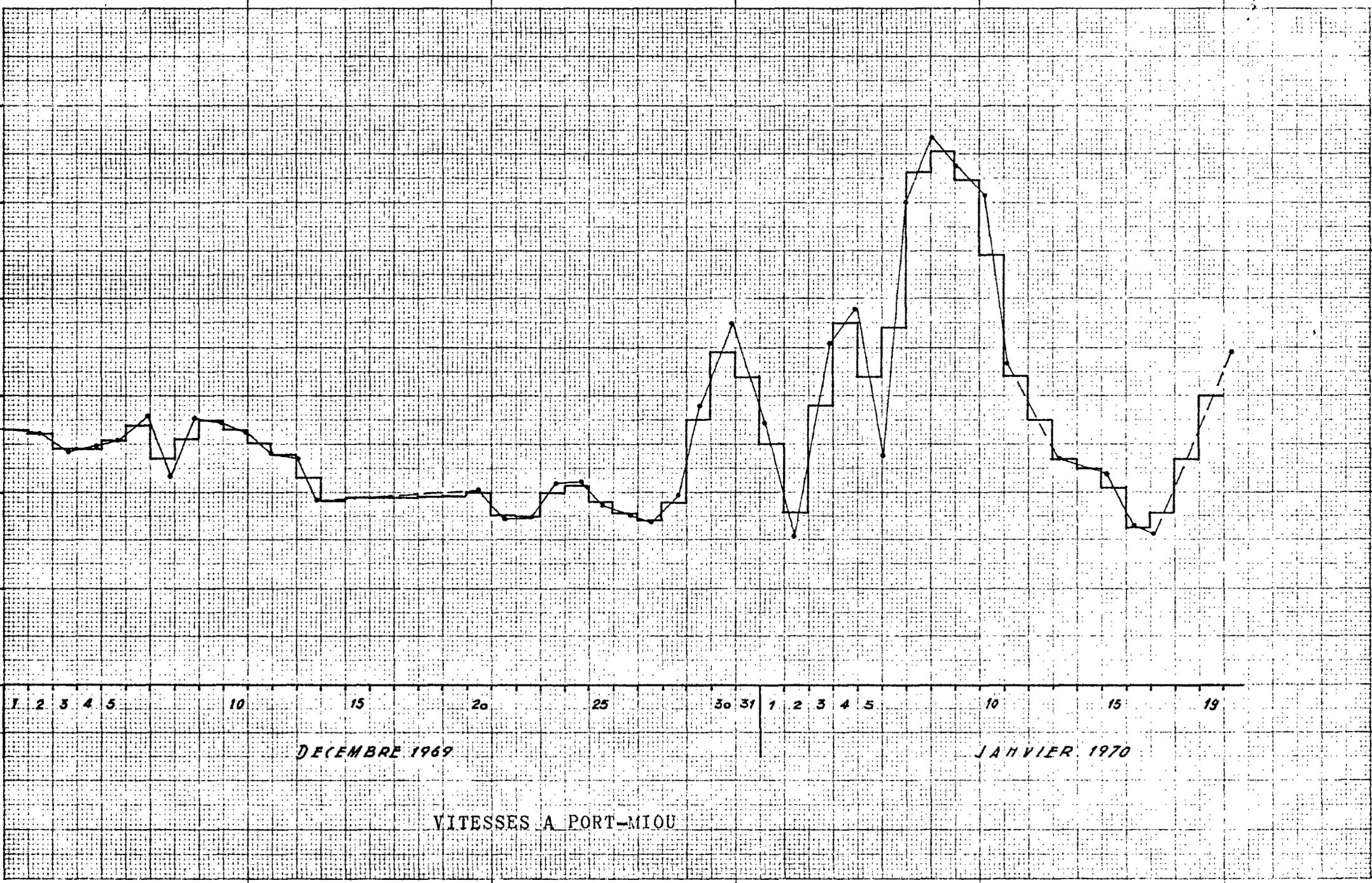
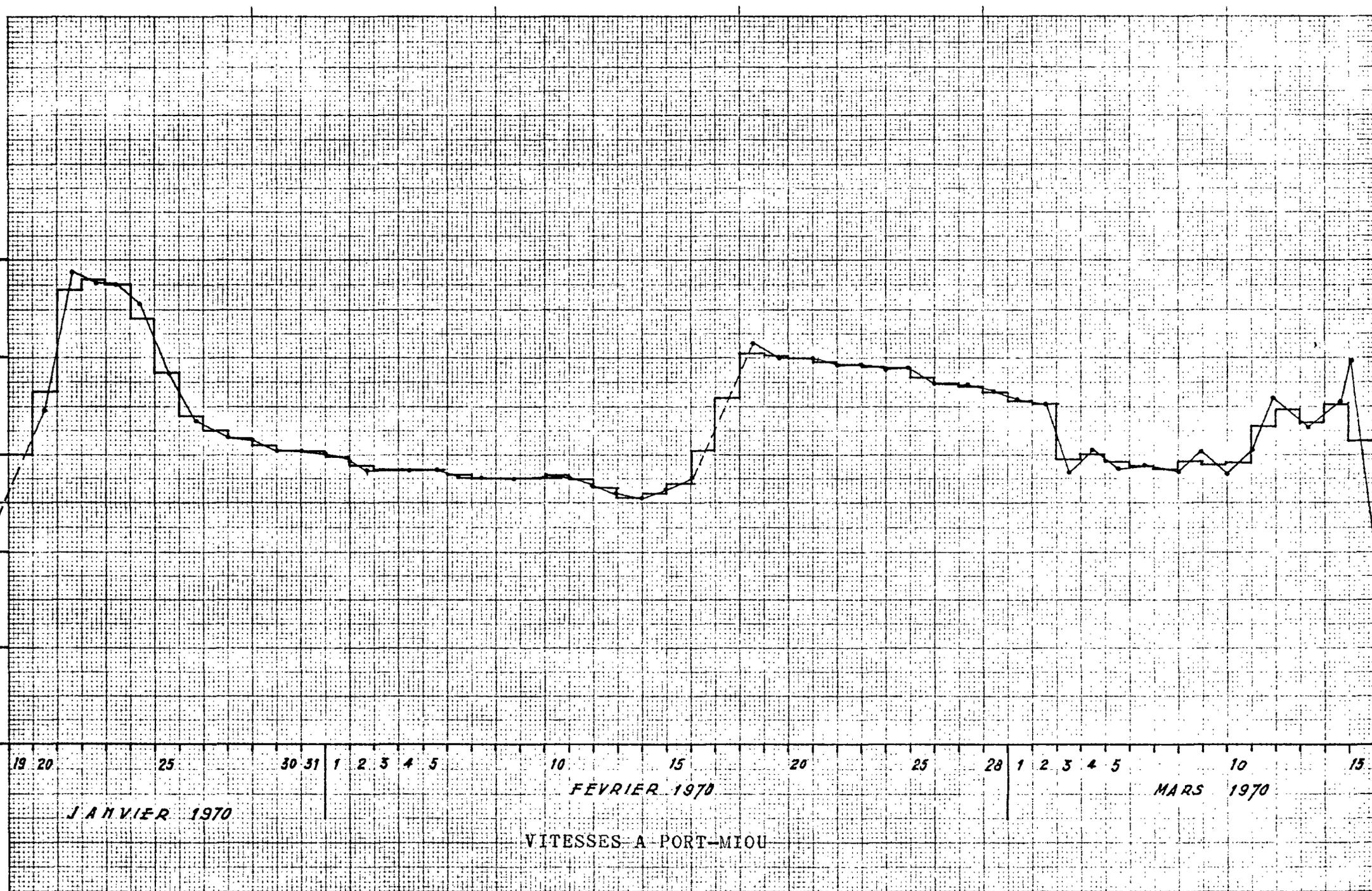
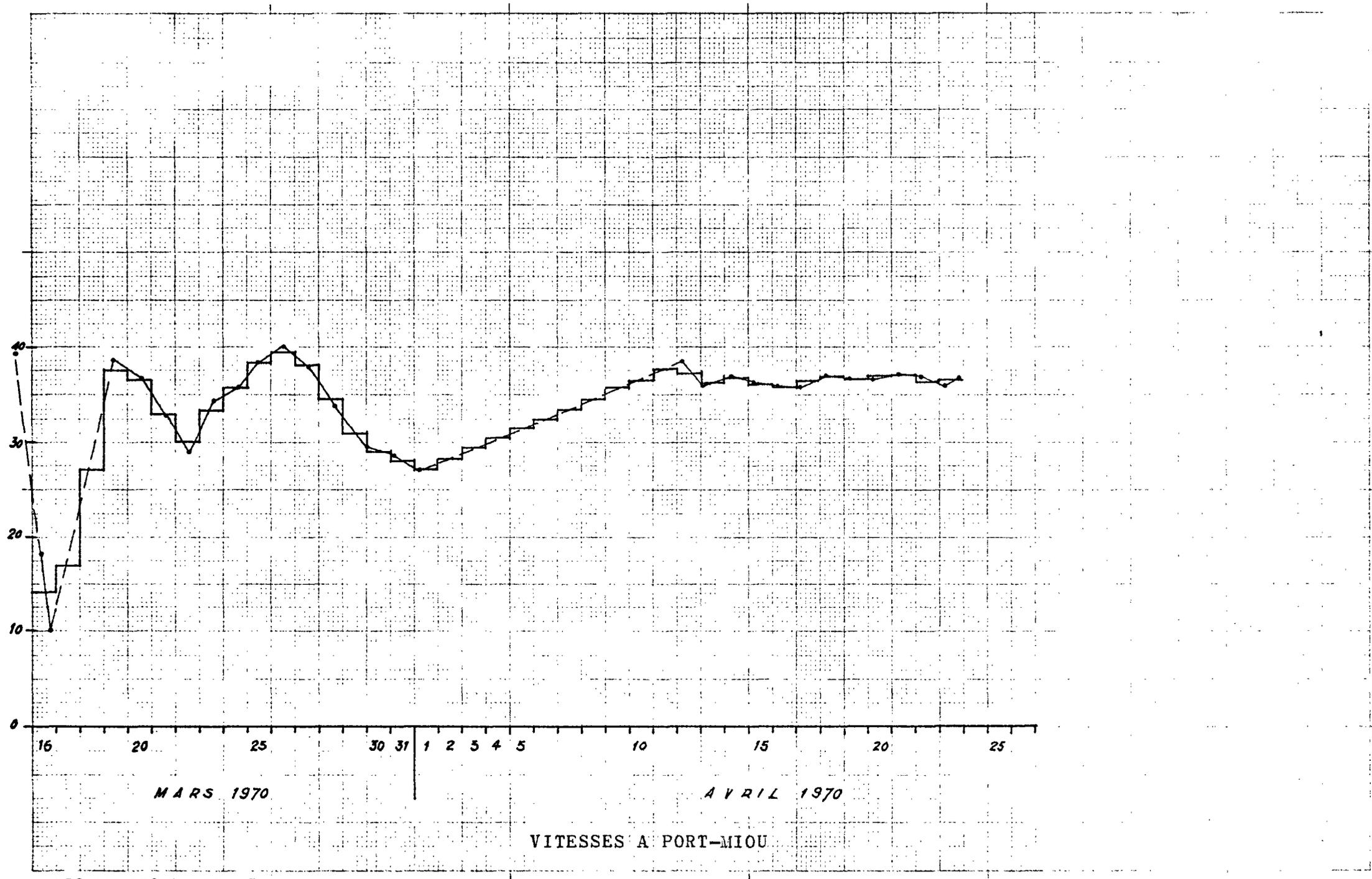


Fig. 5.2

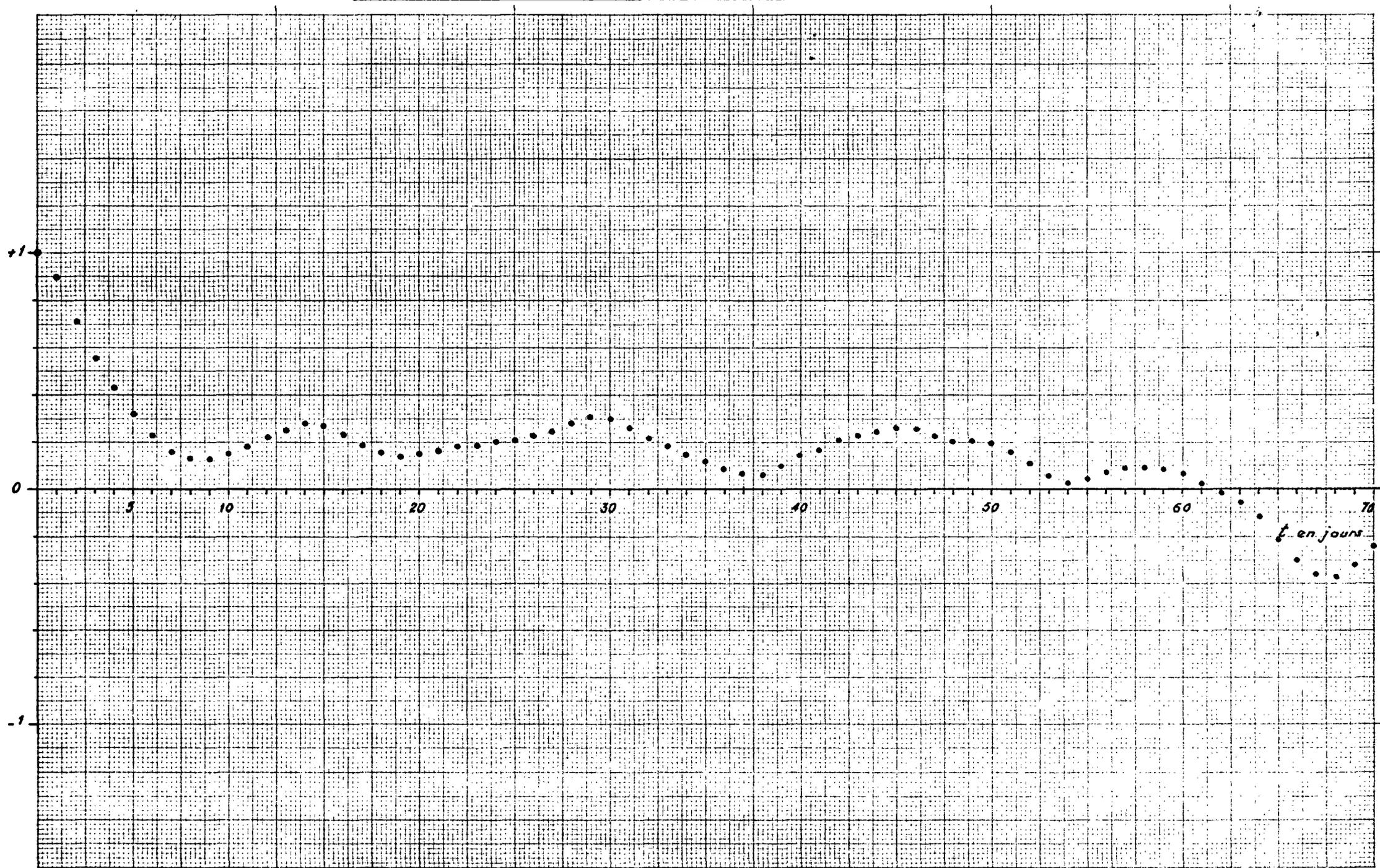


VITESSES A PORT-MIOU



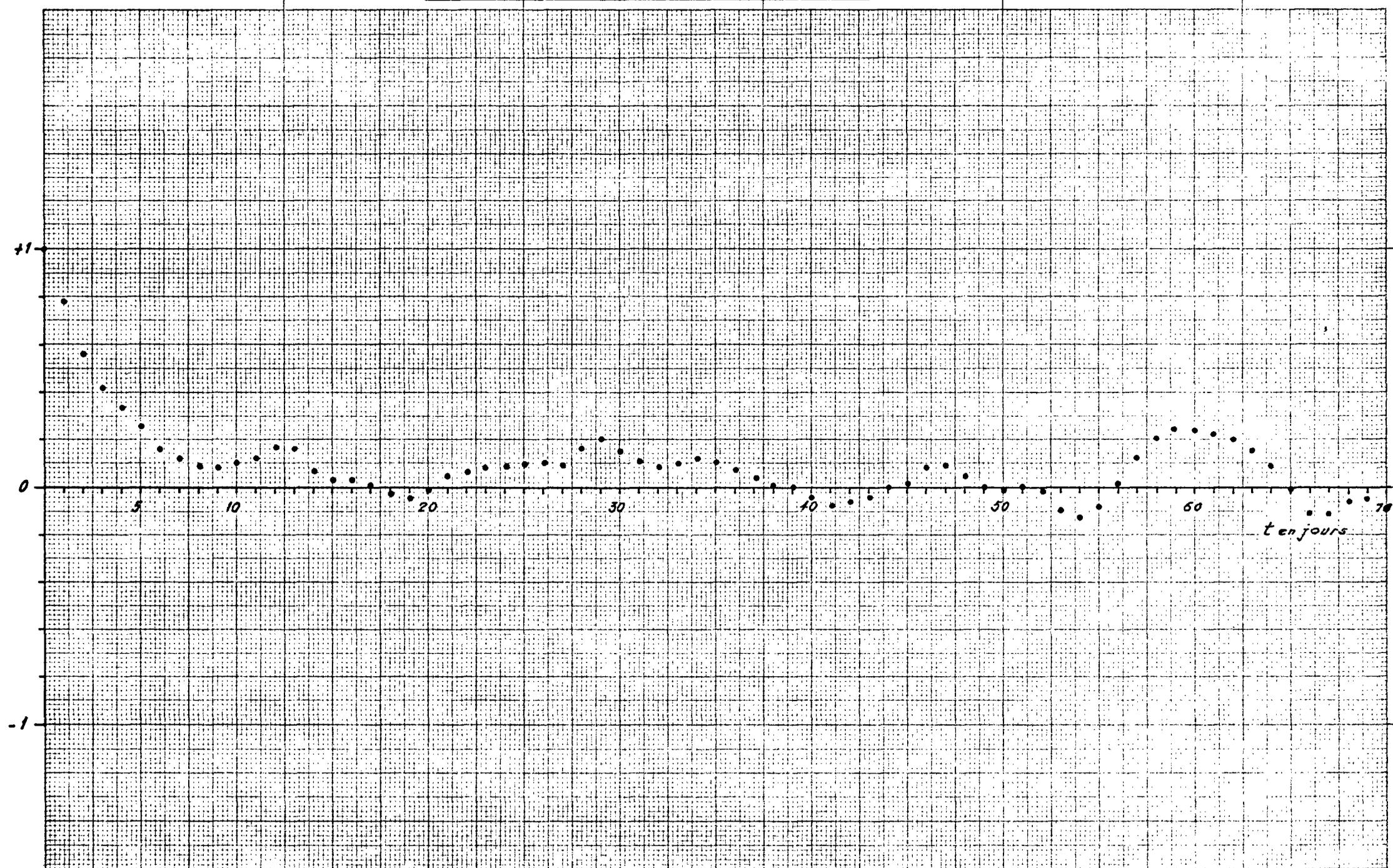


VITESSES A PORT-MIOU



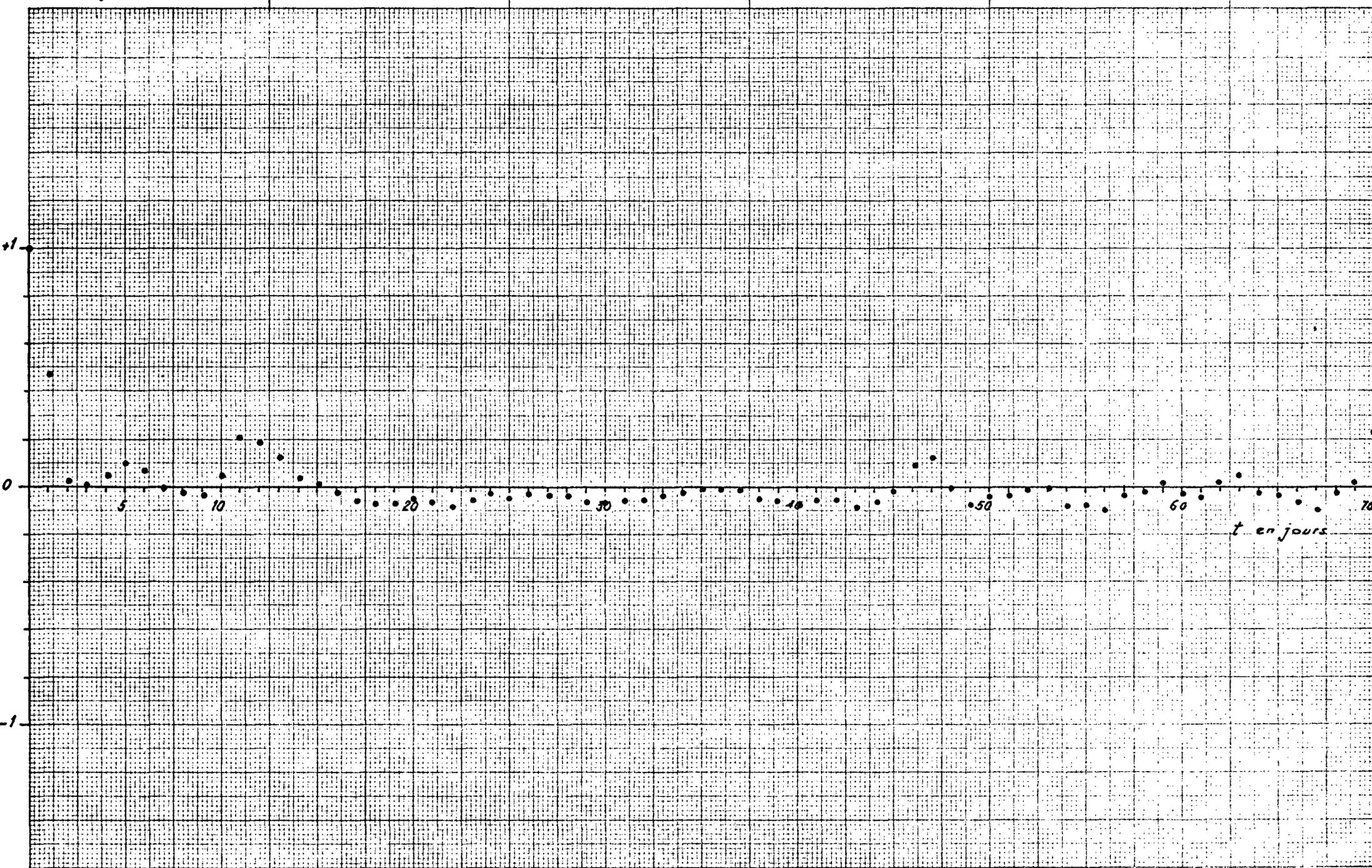
CORRELOGRAMME DES VITESSES A BESTOUAN

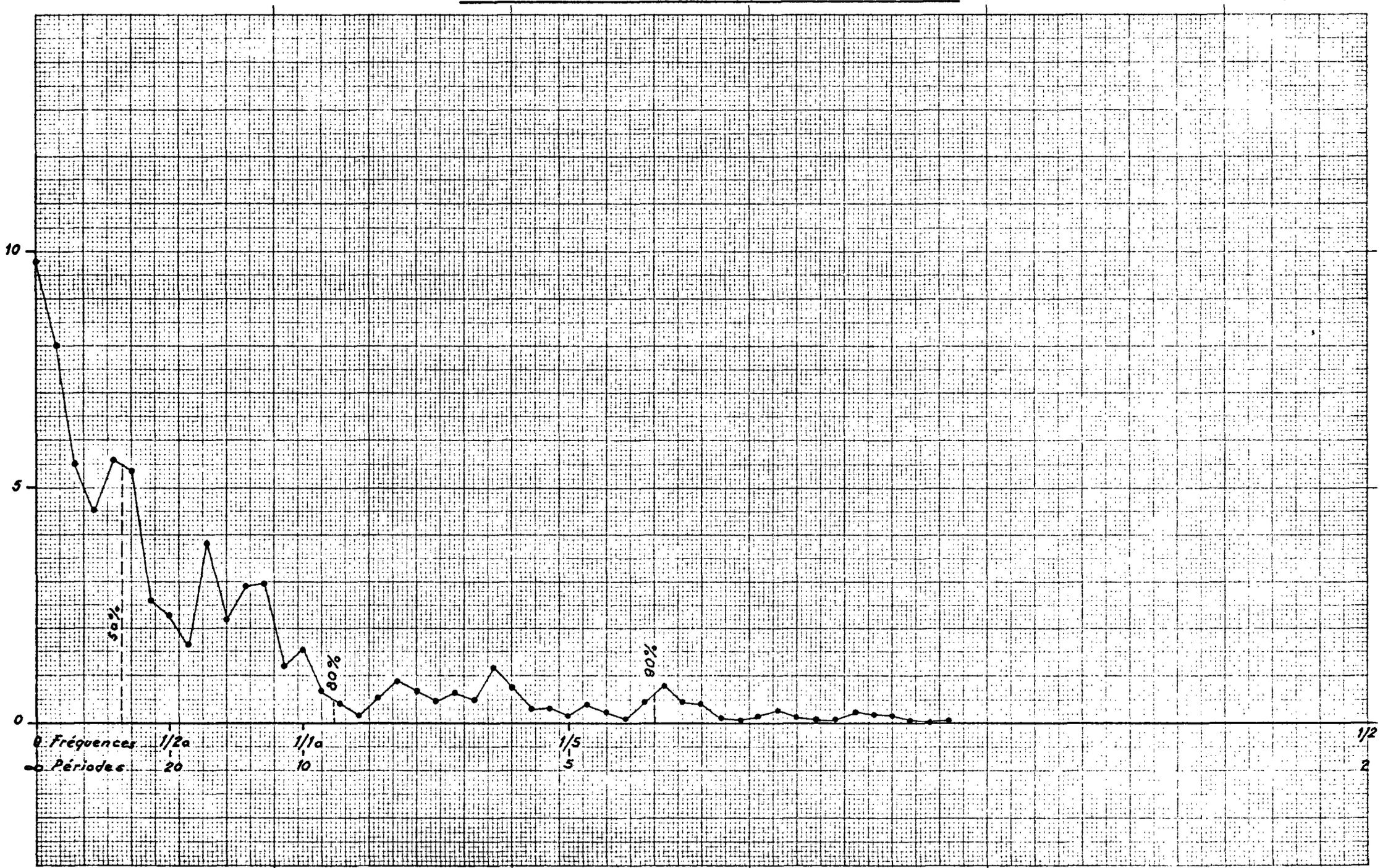
fig.6-2

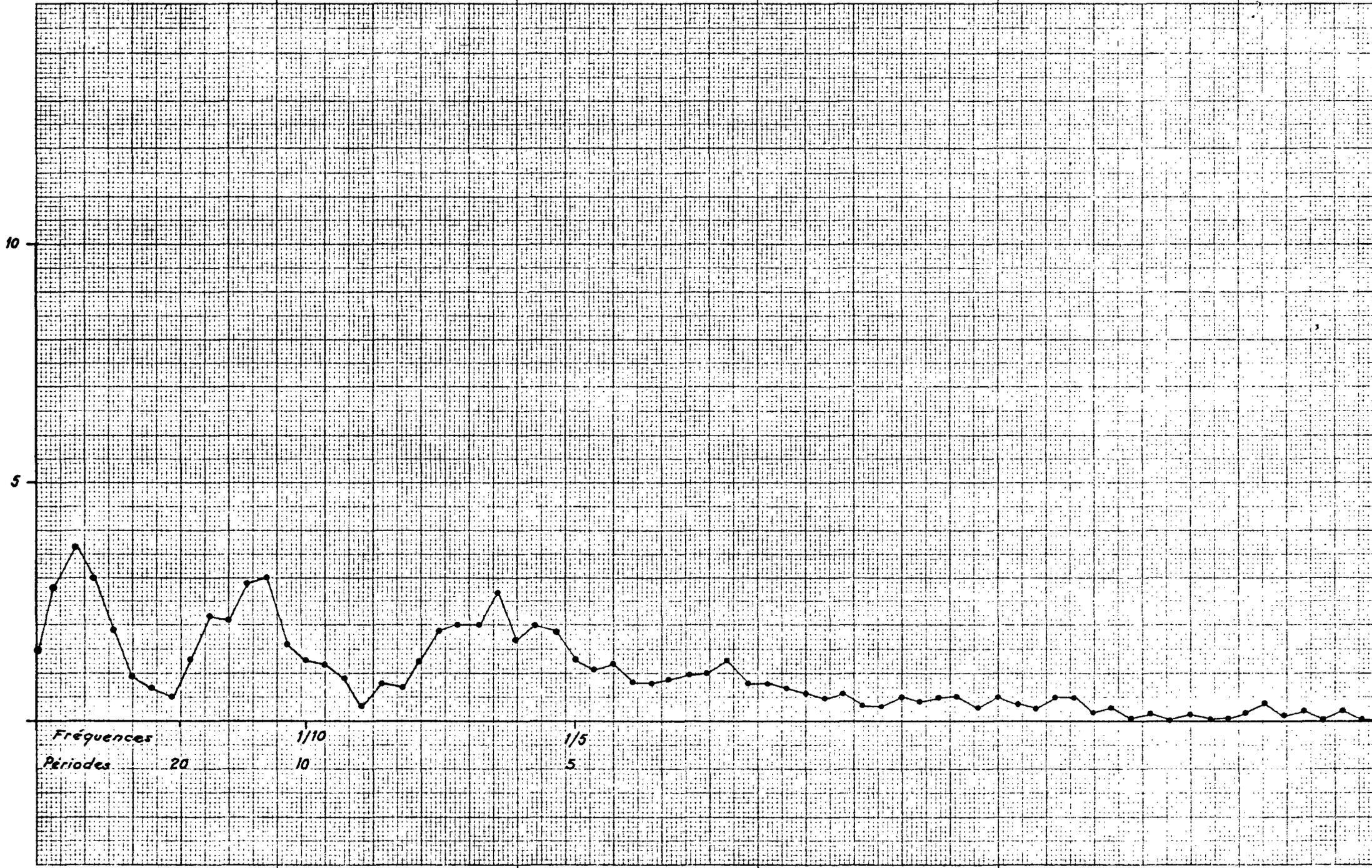


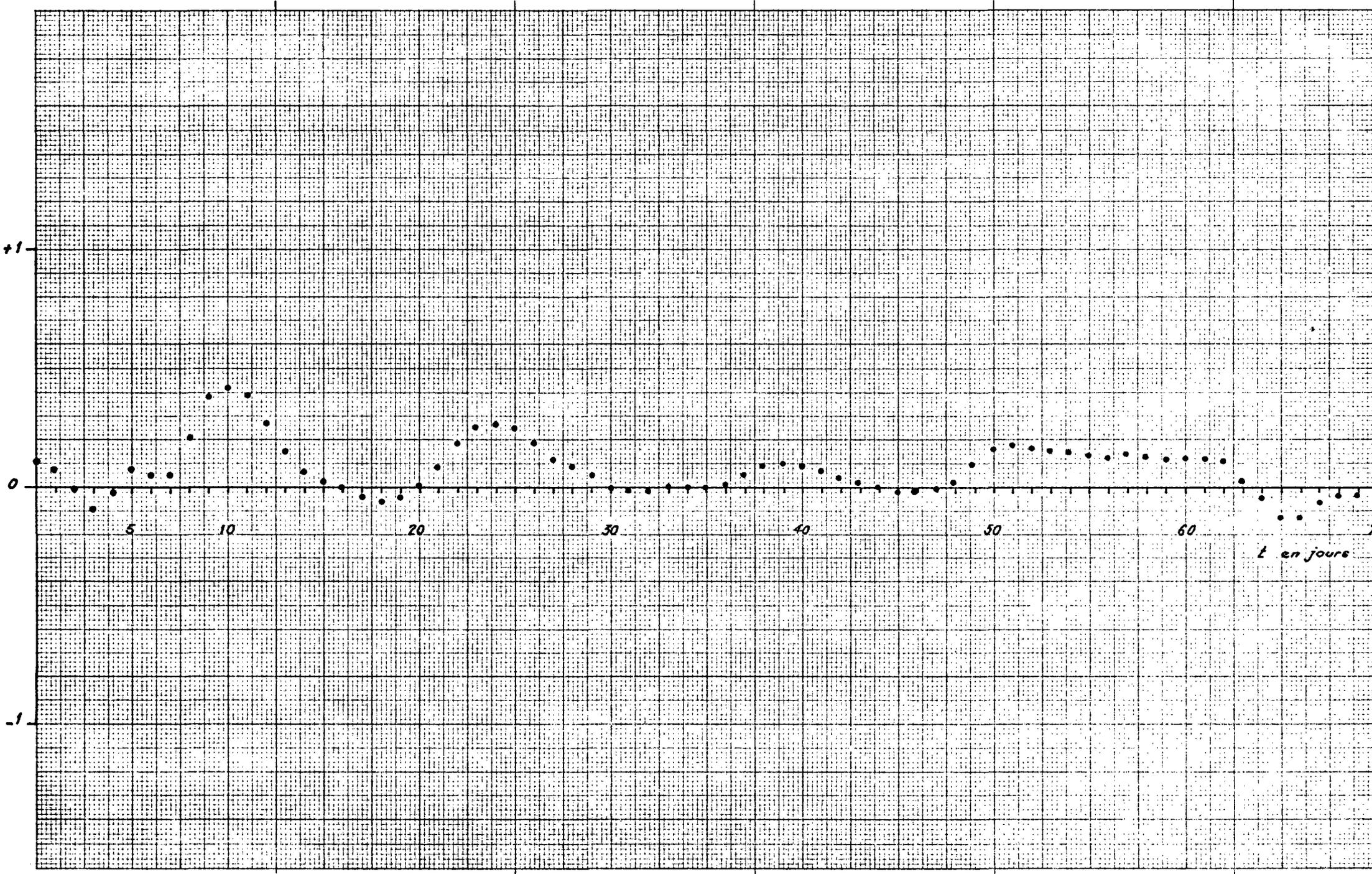
CORRELOGRAMME DE LA PLUIE A CÛGES-LES-PINS

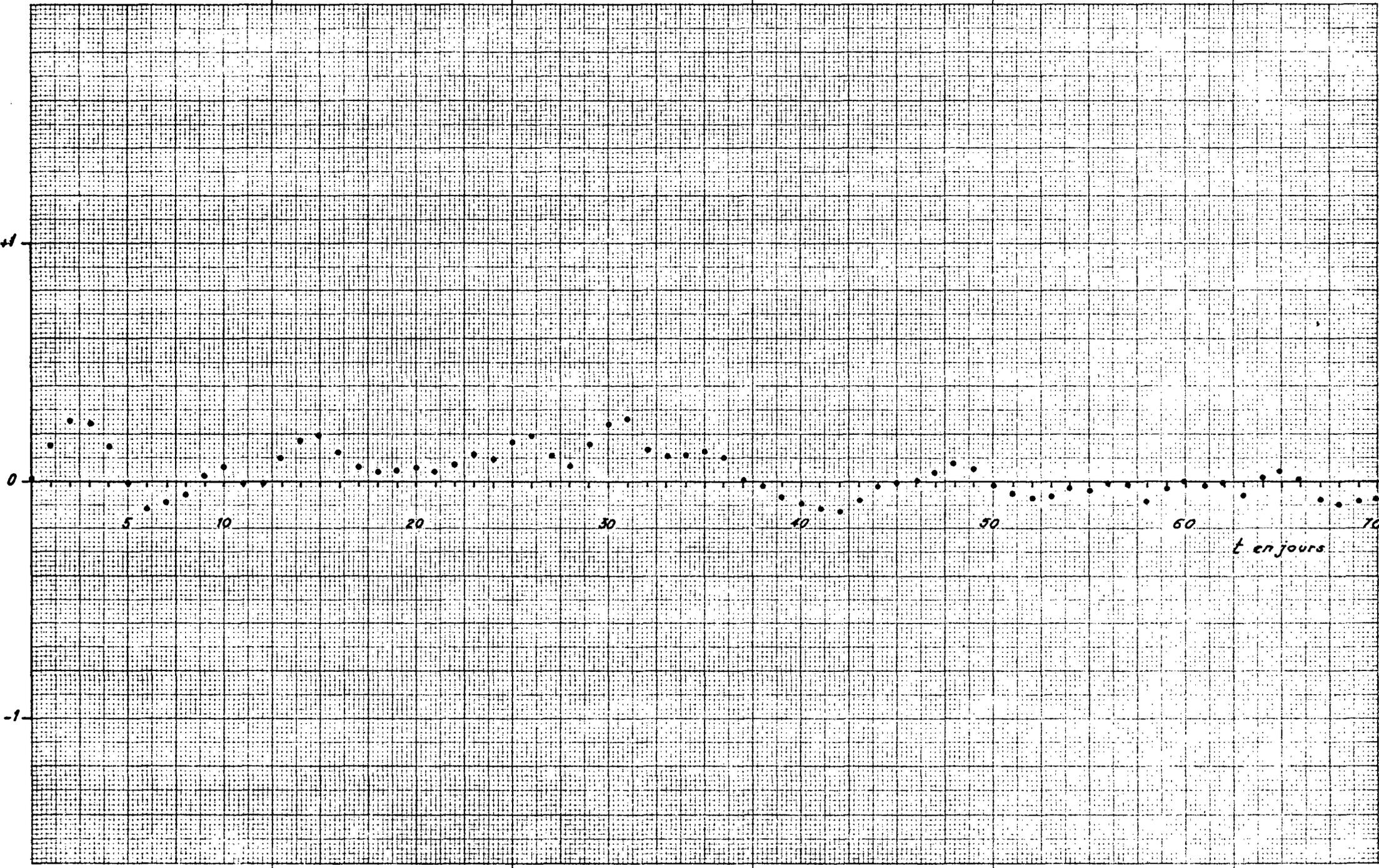
fig.6-3

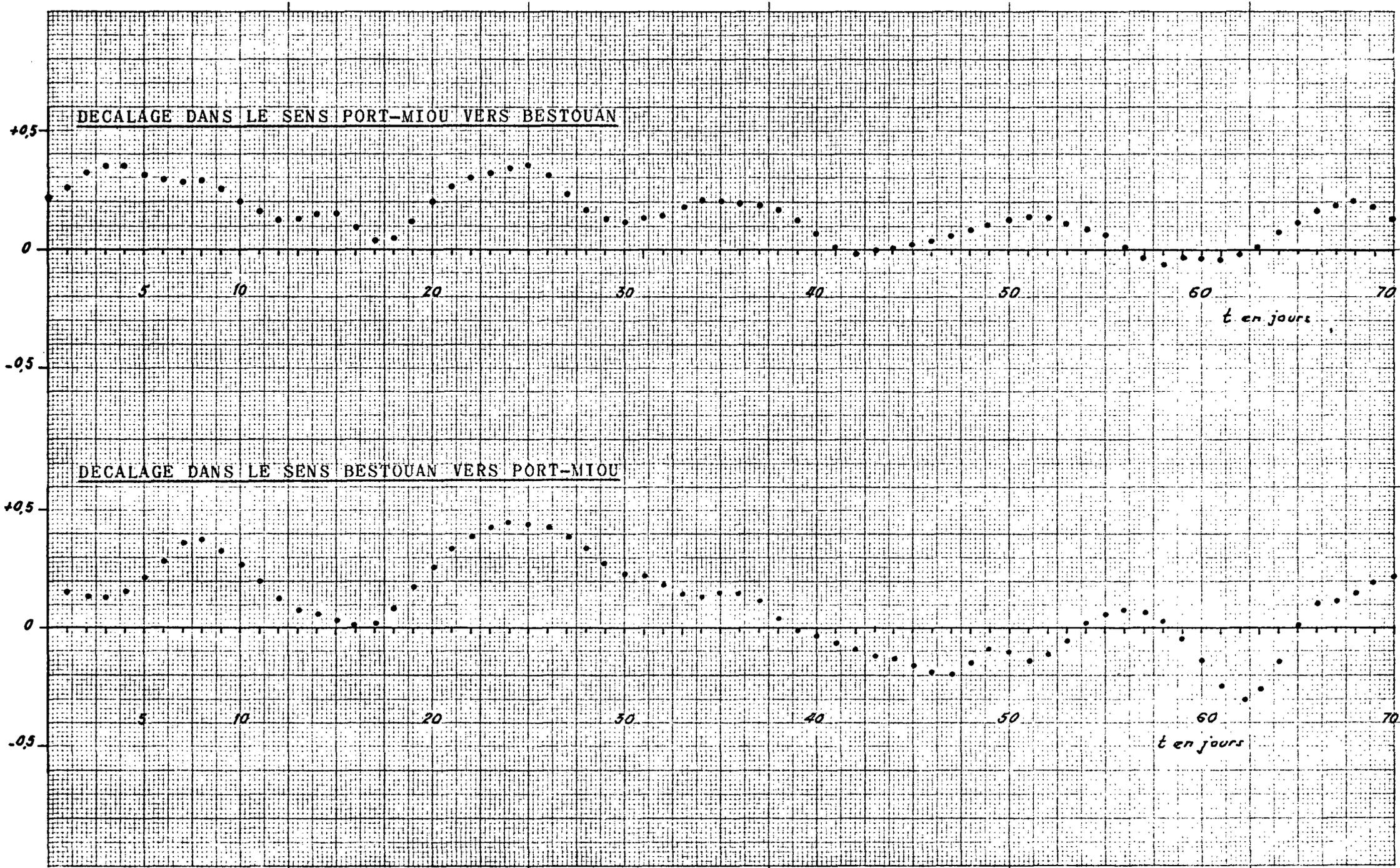












SOCIETE DES EAUX DE MARSEILLE

et

B . R . G . M .

RESURGENCE DE LA RIVIERE DE PORT-MIOU

ETUDE SCHEMATIQUE A L'AIDE D'UN MODELE ANALOGIQUE

DES ECOULLEMENTS EN PERIODE DE CRUE

par

C. THIRRIOT

Octobre 1971

C.T. N° 323

R E S U M E

Pour mieux comprendre les divers types d'écoulements qui apparaissent dans la rivière souterraine de Port-Miou à la suite d'apports importants d'eau douce en amont, il a été décidé d'effectuer une étude sur modèle analogique.

En première étape, le dispositif expérimental utilisé est très simple et ne saurait prétendre à la similitude. Cependant, les visualisations ont permis de remplir l'objectif pédagogique qui était de juger de l'influence d'un barrage éventuel suivant la valeur du débit d'apport d'eau douce. A fort débit, l'évacuation de la couche inférieure d'eau salée est effectuée très rapidement même en présence de barrage.

Après une mise au point assez délicate de la technique expérimentale, les essais ont été menés avec la collaboration fructueuse de Messieurs ESTEBAN, KHROUF et POUJOL.

Des prises de vue cinématographiques ont été réalisées avec la coopération de Monsieur BRUNATO.

I. INTRODUCTION

L'étude proposée conjointement par la Société des Eaux de Marseille et le B.R.G.M. est très intéressante aussi bien au point de vue de l'application pratique qu'au point de vue scientifique. Mais le phénomène à examiner est très complexe et une partie des difficultés de l'étude a tenu dans la définition précise du problème.

De quoi s'agit-il en réalité ? L'objectif est d'utiliser au mieux par pompage, le volume d'eau douce qui provenant d'infiltration amont flotte et circule sur une couche d'eau salée dans la rivière souterraine de Port-Miou (figure 1). Pour améliorer l'efficacité de la récupération de l'eau douce, les maîtres d'oeuvre ont proposé de réaliser un barrage à l'intérieur de la galerie souterraine, barrage qui assurerait une meilleure séparation entre l'eau douce et l'eau salée (figure 2 a) à condition que les crues viennent périodiquement nettoyer la partie à l'amont du barrage, c'est à dire chasser l'eau salée qui aurait pu s'accumuler soit par déversement au-dessus du barrage, soit par contournement du barrage dans le terrain fissuré adjacent (figure 2 b).

Devant la complexité des questions posées, que peut-on demander à un modèle analogique de laboratoire ? La simulation précise de la réalité pour en déduire des règles de gestion ? Certainement pas ! D'une part à cause de la difficulté de réalisation des conditions précises de similitude et d'autre part encore plus à cause de l'incertitude régnant sur la succession des régimes hydrologiques et les conditions d'alimentation (en particulier quelle est l'importance de l'écoulement en milieu poreux fissuré).

Conscients de ces contraintes, les maîtres d'oeuvre et l'expérimentateur ont donc convenu de limiter leurs ambitions à la visualisation des phénomènes hydrauliques sur un modèle analogique très simple mais aux conditions de réalisation et d'emploi économiques. Cette illustration en laboratoire du problème industriel peut être la première étape d'une étude plus approfondie si celle-ci paraît souhaitable après défrichage des problèmes et éclaircissement des hypothèses et des idées.

II. LES DONNEES DE L'EXPERIMENTATION

Compte tenu des réserves faites précédemment, nous nous contenterons de dresser un portrait robot sommaire des données géologiques et hydrologiques. La vision d'un film réalisé sur le site par les maîtres d'oeuvre nous a beaucoup aidé pour mieux saisir la position du problème et en particulier a étapé notre hypothèse d'écoulement stratifié avec interface nettement affirmée.

De l'ensemble des informations communiquées par rapports écrits ou voie orale, que retenir ?

La galerie de Port Miou reconnue sur un peu plus d'un kilomètre de longueur présente une section très irrégulière variant de 100 à 200 m².

Les débits d'apport en période de crue peuvent apparemment dépasser 100 m³/sec. Des vitesses de l'ordre du mètre par seconde ont été détectées dans la couche supérieure d'eau douce.

Dans les comptes-rendus des réunions du 20 Août et du 7 Septembre, nous avons insisté sur certaines hypothèses concernant aussi bien les conditions hydrologiques que la position et le coefficient d'obstruction du barrage. Nous ne reviendrons pas sur ces considérations qui mériteraient à elles seules un long développement critique et nous passerons donc à la présentation brève des conditions d'expériences et à l'examen rapide des résultats obtenus.

1/ Le modèle analogique

Présenté sur la figure 3, il est essentiellement constitué d'un tube cylindrique à section circulaire de 110 mm de diamètre intérieure \emptyset et de 1 mètre de longueur L.

Si pour fixer les idées et ne pas rester dans le cadre trop subjectif d'une analogie uniquement illustrative, le critère de similitude de Froude donnerait pour l'échelle des vitesses un coefficient de réduction de 1/10. L'échelle de temps est plus élastique compte tenu du peu d'information sur les pertes de charge dans le site naturel.

En considérant un modèle sans distorsion, la longueur du tube d'expérimentation serait évidemment bien trop courte puisqu'elle correspondrait à un

bief de galerie de 100 m de long. Mais compte tenu de l'importance de la singularité constituée par le barrage, on peut envisager avec assez d'optimisme une distorsion certaine. Cependant, dans une suite éventuelle des études, il faudra envisager un allongement relatif du modèle L/\varnothing plus important.

En dépit des dimensions modestes du modèle, la réalisation de la circulation de débits convenables a posé de sérieux problèmes. Nous ne reviendrons pas sur le changement radical de technique expérimentale (et en particulier sur le choix du couple de fluide) qui a dû être assuré à la suite d'une meilleure définition du problème. Dans la solution retenue actuellement, les fluides employés sont analogues aux fluides naturels eau de ville pour simuler l'eau douce, eau à concentration de 50 g/l pour simuler l'eau de mer. La concentration a été volontairement un peu forcée pour faciliter le contraste des propriétés et la stratification.

En ce qui concerne la mise en place des deux couches superposées puis la circulation sélective de l'un ou l'autre fluide, disons simplement que ce fut une expérience intéressante pour le laboratoire compte tenu des difficultés nombreuses qui surgirent au cours du faible délai retenu pour la réalisation des essais.

2/ Le programme des expériences

Dans le cadre de cette étude analogique préliminaire, d'un commun accord entre maîtres d'oeuvre et laboratoire, il avait été convenu de réaliser six expériences portant sur deux débits d'eau douce différents, avec ou sans barrage. Sans idée trop préconçue, on avait retenu comme hauteur de barrage une hauteur qui soit les deux tiers du diamètre. Pour faciliter la visualisation on avait aussi décidé de placer le barrage à mi-longueur de la galerie.

Le programme des essais effectivement réalisé est donné dans le tableau 1. Comme on peut en juger, les douze essais recouvrent à peu près correctement le programme prévu.

Nous mettons surtout l'accent sur la distinction entre les essais à faible débit (0,2 l/s) et à fort débit (0,4 l/s). Sans parler de similitude, pour se faire une idée des phénomènes naturels correspondant, on peut admettre la correspondance suivante approximative entre modèle et ouvrage.

Modèle	Ouvrage
0,2 l/s	25 m ³ /s
0,4 l/s	50 m ³ /s

Ceci signifie que nous n'avons pas étudié les hydrogrammes absolument exceptionnels mais la distinction des résultats obtenus suivant les deux débits examinés est assez intéressante comme on va en juger plus loin.

III. LES RESULTATS QUALITATIFS

Comme il a été dit plusieurs fois l'objectif premier était la visualisation des phénomènes. A ce propos, nous pouvons dire que la leçon des choses a été fructueuse. Les enseignements essentiels retirés sont les suivants :

1/ la stratification entre eau douce/eau salée qui est très nette lorsque les fluides sont au repos subsiste bien même pour les écoulements à assez haut débit.

Des particules (par exemple des confettis) introduits dans la couche supérieure marquent un ralentissement brusque pour ne pas dire un arrêt net lorsque dans leur chute elles traversent l'interface.

2/ La présence du barrage n'empêche pas le nettoyage de l'eau salée qui peut être accumulée à l'amont.

Ce balayage se fait d'ailleurs presque à la manière d'un effet piston dans le cas du haut débit. L'évacuation de l'eau salée est alors très rapide à l'amont mais l'effet d'écran provoqué par le barrage rend très lent le nettoyage à l'aval (ce qui ne constitue pas un inconvénient pour le maître d'oeuvre qui envisage évidemment d'effectuer le pompage à l'amont).

3/ En l'absence de barrage, le laminage de la couche d'eau salée pendant la période de crue est beaucoup plus graduelle. En observant de près le phénomène, on aperçoit comme un arrachage de copeaux liquides à l'interface ensuite dilués dans le débit d'eau douce.

Compte tenu des rapports de volumes initiaux d'eau salée accumulés dans la galerie et dans les réservoirs d'extrémités, il ne faut pas perdre de vue que le phénomène de vidange porte autant sur le déplacement des fluides contenus dans les réservoirs que sur l'évacuation de l'eau salée de la galerie.

En ce qui concerne le réservoir amont, il constitue en quelque sorte comme la simulation d'un bief supplémentaire de galerie et donc provoque un allongement artificiel du modèle.

Notons que nous avons par le jeu des vannes et robinets la possibilité de réalimenter en saumure les réservoirs d'extrémité et nous avons usé de ce procédé dans certains essais. Cependant, pour mieux juger de l'effet d'augmentation de volume d'eau salée, il aurait fallu procéder à des bilans plus précis que ceux que nous avons réalisés au cours de ces premières expériences.

IV. ESSAI DE MESURES

Dans ce qui précède, nous avons insisté sur les traits essentiels du phénomène physique. Soucieux de préparer des critères plus objectifs nous avons essayé de faire des mesures sans trop nous faire d'illusion sur la validité de nos premières tentatives.

Certaines mesures sont liées à la visualisation comme par exemple la détermination de la vitesse moyenne et de la dispersion par injection de colorant à l'amont.

D'autres ont pour but d'apprécier l'efficacité de l'élimination de l'eau salée par la crue. Dans ce sens, nous avons procédé en cours d'expérience à de nombreuses mesures de débit qui restait fort heureusement pratiquement constant et à des prélèvements d'eau à la sortie du siphon d'évacuation. Ces prélèvements permirent de déterminer la concentration massique en sel et par le jeu de l'intégration dans le temps de juger de l'élimination du sel en place initialement. Le tableau 2 donne une idée de ces bilans qui font apparaître certes des erreurs relatives non négligeables dans leur vérification

par la comparaison de la masse de sel évacuée par le siphon par rapport à la masse de sel différence entre la masse initiale et la masse résiduelle dans le modèle (réservoirs et tube) à l'instant du bilan. Mais il faut bien insister sur le fait qu'un gradient de concentration a tôt fait d'apparaître et que l'homogénéité de la distribution des concentrations n'est pas garantie en cours d'expérience compte tenu de toutes les injections parasites effectuées à des fins de visualisation. Compte tenu de ces remarques critiques, la fermeture du bilan nous paraît presque convenable. Sans être un résultat scientifique précis, l'évolution de ce bilan est une tendance nettement significative. La planche 4 donne le résultat obtenu pour l'essai 8.

Le relevé de la surface libre est aussi intéressant mais plutôt pour situer la conductivité hydraulique à l'eau douce que comme indice de volume accumulé compte tenu de l'importance des réservoirs. La planche 5 donne un exemple pour l'essai 8.

Evolution des concentrations à la sortie du siphon

Compte tenu de l'allure d'atténuation de la concentration C des prélèvements à la sortie du siphon, nous avons examiné la représentation de $\log p CQ$ en fonction du temps, pour éprouver l'allure apparemment exponentielle du graphe.

Un exemple de graphe concernant l'essai 10 montre que l'hypothèse sans être parfaitement vérifiée n'est pas aberrante tant que la concentration n'est pas trop petite (planche 6). Cette constatation permet de définir une constante de temps sous tangente du graphe au voisinage de l'origine qui peut être une échelle utile de référence des temps à comparer avec celle déduite arbitrairement d'une équation de continuité (telle que $T = \Omega_s / Q$ avec Ω_s volume total d'eau salée, Q débit de l'hydrogramme de crue).

La planche 7 concerne l'essai 12 réalisé sans barrage. La constante de temps est alors un peu plus faible.

Le barrage retarde relativement peu le lessivage pour ce débit faible $Q = 0,2$ l/s.

La planche 8 donne les résultats correspondants à l'essai N° 8 pour un débit plus fort et sans barrage. On obtient à peu près même constante de temps qu'avec le débit moitié.

V. PRESENTATION DE QUELQUES RESULTATS DE VISUALISATION

Dans l'ensemble relativement nombreux des photographies réalisées au cours des essais, nous avons retenu à titre d'illustration, neuf clichés. Les deux premiers clichés donnent une idée du début de vidange à faible débit. D'après la photographie 1, il ne circule encore dans la galerie que l'eau salée. Des bouffées de colorant permettent d'apprécier la vitesse moyenne des molécules. Sur le cliché 2, l'interface est bien apparente et déjà au bout de 5 minutes d'écoulement une grande partie du volume d'eau salée initial a été chassée.

Les deux photographies suivantes concernent un écoulement à fort débit sans barrage. L'interface est assez bien repérable. La troisième photographie est prise dans les tout premiers instants de la vidange et déjà une grande partie du volume d'eau salée initial a été évacué. Ceci inciterait à penser que des crues de faible durée mais à fort débit, auraient un effet très net et autoriseraient l'exploitation de la couche d'eau douce par pompage dans la partie supérieure.

La quatrième photographie est prise après une demi-heure d'écoulement (qui correspond au moins à cinq heures dans la réalité). Le biseau d'eau salée s'est amenuisé mais il est très difficile à faire disparaître. Les dépôts qui apparaissent sur la photographie sont dus à des confettis que nous avons noyés pour obtenir une idée des vitesses locales.

La série des photographies 5 à 8 correspond à des écoulements avec barrage.

La photographie 5 correspond à un écoulement à faible débit ($Q = 0,2 \text{ l/s}$)

Le cliché 5 montre la situation de l'interface environ dix minutes après la mise en écoulement. A l'aval, nous avons procédé à des injections de colorants différents qui montrent un courant de retour vers le barrage et la dispersion du jet derrière l'arête du barrage.

Les photographies 6 et 7 montrent le même phénomène de plus près à des instants différents et pour le débit double. L'usure du volume d'eau salée à l'aval du barrage n'est en fait possible qu'à cause de l'épuisement d'eau salée dans le réservoir aval.

La photographie 8 a pour objectif de matérialiser la géométrie d'écoulement (donc la distribution des vitesses) lorsque tout le modèle ne contient

que de l'eau pure après lessivage à haut débit.

La photographie 9 montre comment se produit l'intrusion d'eau salée lorsqu'on arrête le débit d'eau douce. Un biseau sombre dans la couche inférieure donne une idée du mouvement des molécules, la vitesse dans l'eau salée bien que faible semble maximale à mi-hauteur du biseau.

A partir de l'observation directe, nous avons pu aussi obtenir une idée de la configuration d'écoulement. Les planches et afférentes respectivement aux débits $Q = 0,1$ l/s et $Q = 0,2$ l/s mettent bien en évidence la faible longueur de la zone perturbée à l'amont du barrage et le rouleau très net derrière l'écran assurant le balayage de l'eau salée au pied du barrage avec une vitesse de retour que nous avons pu estimer à 4 cm/s dans le cas du débit de 0,2 l/s.

Nous insistons sur la valeur importante de cette vitesse comparée avec la vitesse à l'amont qui ne dépasse pas 3 cm/s au cours de la même observation.

VI. CONCLUSION

Les dernières expériences réalisées le 30 Septembre en présence de représentants des deux Maîtres d'Oeuvre, semblent montrer que l'objectif modeste mais précis de l'illustration pédagogique du phénomène a été réalisé.

Dans l'état actuel des essais réalisés, l'implantation d'un barrage dans la galerie de Port-Miou semble assez favorable dans le cas des crues à haut débit. Par contre, pour les faibles débits de crue, le laminage de l'eau salée situé en amont du barrage risque de durer fort longtemps (mais en l'absence de barrage, l'élimination de l'eau salée pour un faible débit est aussi de très longue durée).

Les essais précédents bien imparfaits devraient être complétés par des expériences portant sur une plus large gamme de débit. L'examen de l'influence de la hauteur du barrage (qui paraît très importante pour les faibles débits) pourrait vraisemblablement être assuré à l'aide de quelques configurations peu nombreuses (trois au maximum).

L'hypothèse du barrage mobile ou de vanne de vidange à la base du barrage semble présenter un intérêt surtout dans le cas des faibles débits. Malheureusement, nous n'avons pas disposé du temps et crédit pour étudier cette éventualité de manière détaillée. Nous avons cru pouvoir simuler de manière rugueuse le processus en examinant successivement la vidange en l'absence de barrage (l'ouvrage est alors supposé complètement effacé) et la conséquence de la mise en place du barrage avec entrée d'eau salée de l'aval. Alors si le débit d'eau douce a cessé, il y a déversement d'eau salée au-dessus du barrage.

Le niveau initial de l'interface a aussi son importance, mais tout de même limitée, puisque l'effet de chasse le plus net a lieu au début de la crue lorsque le débit d'eau douce se crée un chemin au-dessus de l'eau salée vers l'exutoire en mer. Donc la réalimentation de la couche d'eau salée en amont du barrage a surtout de l'importance jusqu'au moment où l'interface atteint la crête du barrage.

T A B L E A U 1

RECAPITULATION DES ESSAIS

N° Essai	Date	Q l/s	Barrage	Durée de l'essai	Mesure de vitesse cm/s	Relevé de profil	Bilan volume eau salée entraîné	Observations
1	16 Sept.	0,32	Sans	40 mn	4,5	non	non	pas de pendule diapositives
2	17 Sept.	0,38	Sans		5,8	non	non	pas de pendule diapositives
3	22 sept.	0,4	Avec	10 mn	4,3 (t=9mn30)	non	oui	avec pendule diapositives
4	24 sept.	0,2	Avec		2,9 (t=16mn)	non	oui	Désamorçage du siphon - diapositives
5	24 sept.	0,2	Sans		5,7 (t=12mn)	oui	oui	
6	24 sept.	0,2	Avec		6,6 (t=30s)	oui	non	remplissage partiel de la galerie initial
6bis	24 Sept.	0,2	Avec	1h 30	4,5 (t=22mn)	oui	non	avec pendule - reprise de l'expérience 6
7	28 Sept.	0,4	Sans	33 mn	4,6 (t=16mn)	non	non	Avec pendule - Film - Photos noir et blanc
8	28 Sept.	0,4	Avec	12 mn 30	5,5 (t=12mn30)	non	oui	Film - Photos noir et blanc
9	28 Sept.	0,4	Avec		non.	non	non.	Après balayage de toute le sel de l'expérience 8. On réinjecte de l'eau salée par l'aval avec variation du dé- bit d'alimentation en eau de la ville.
10	30 Sept	0,2	Avec	38 mn	10 (t=12mn)	non	non	Film
10bis	30 Sept.		Avec		non.	non	non	Injection d'eau salée à l'a- val à la fin de l'expérience 10
11			Sans		non.	non	non	Après essai 10 bis retrait par l'aval du barrage - photo noir et blanc
12	30 Sept.	0,2	Sans		7 (t=6mn30)	oui	oui	Photo noir et blanc.

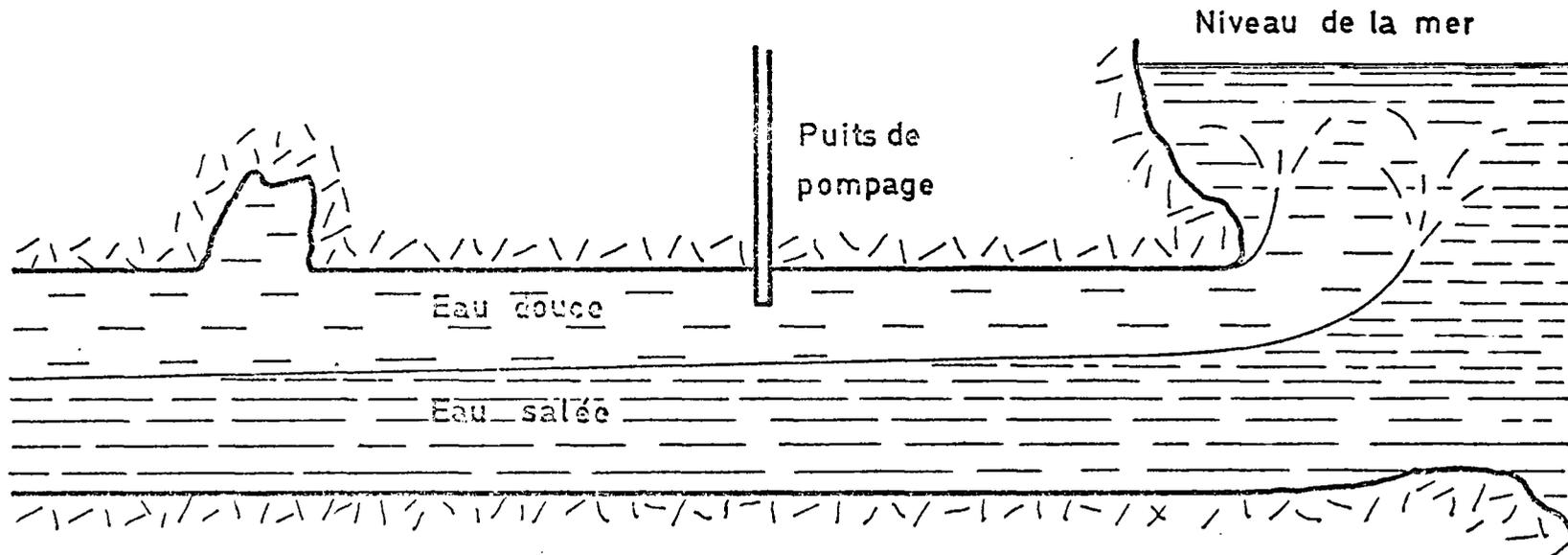


FIG. 1

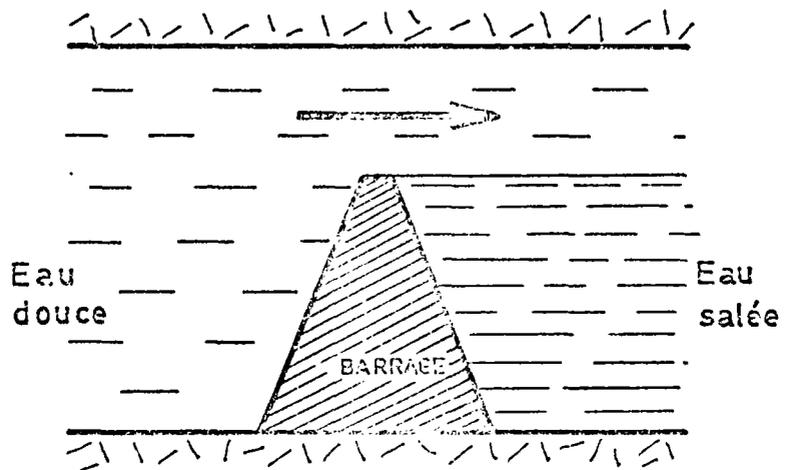


FIG. 2a

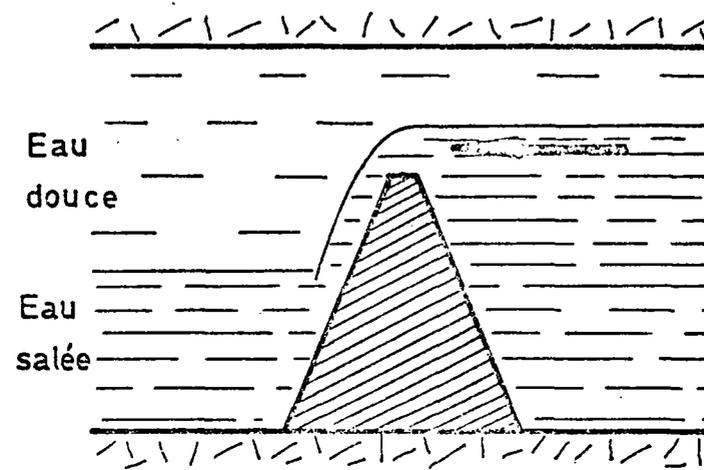
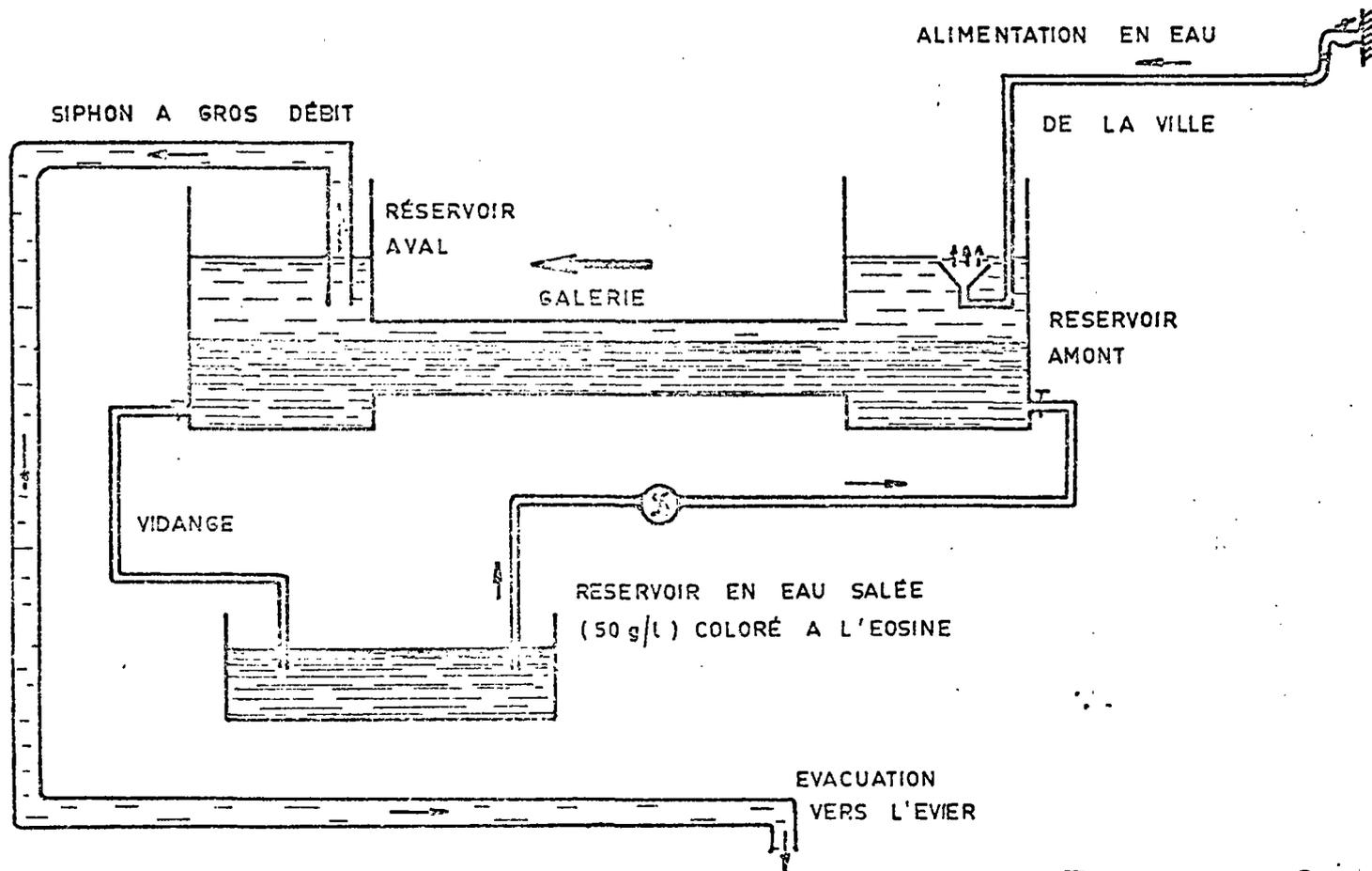
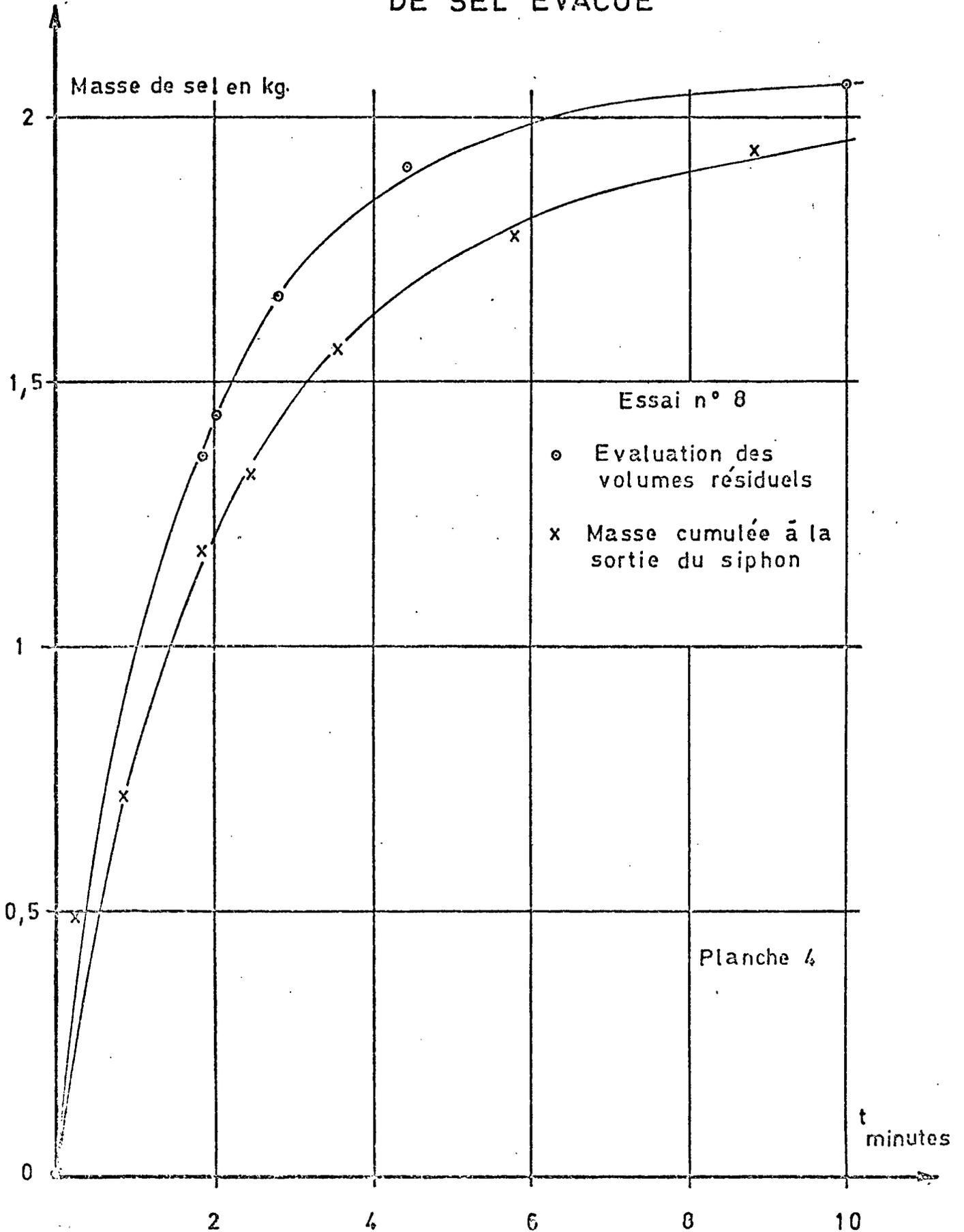


FIG. 2b

SCHEMA DE L'INSTALLATION



BILAN DE MASSE DE SEL EVACUE



A

B

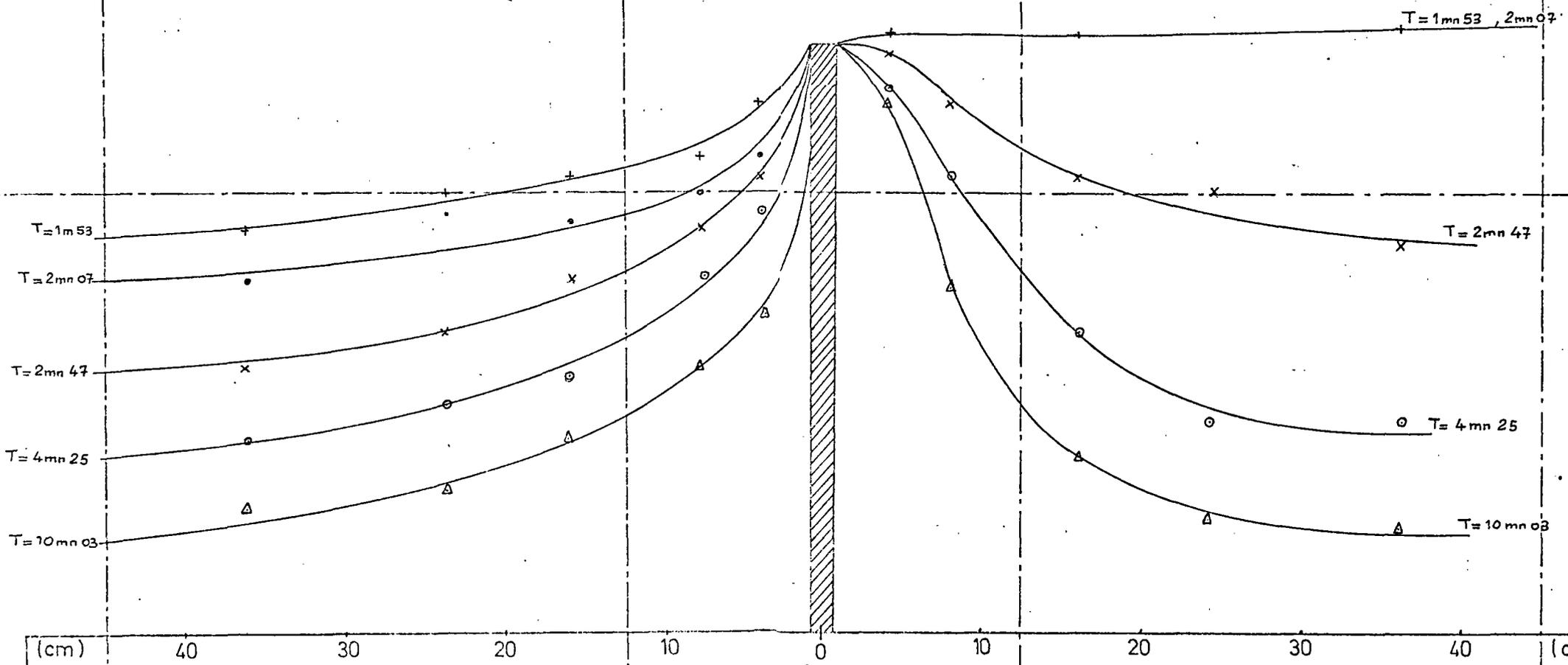
C

D

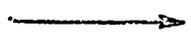
ESSAI N° 8

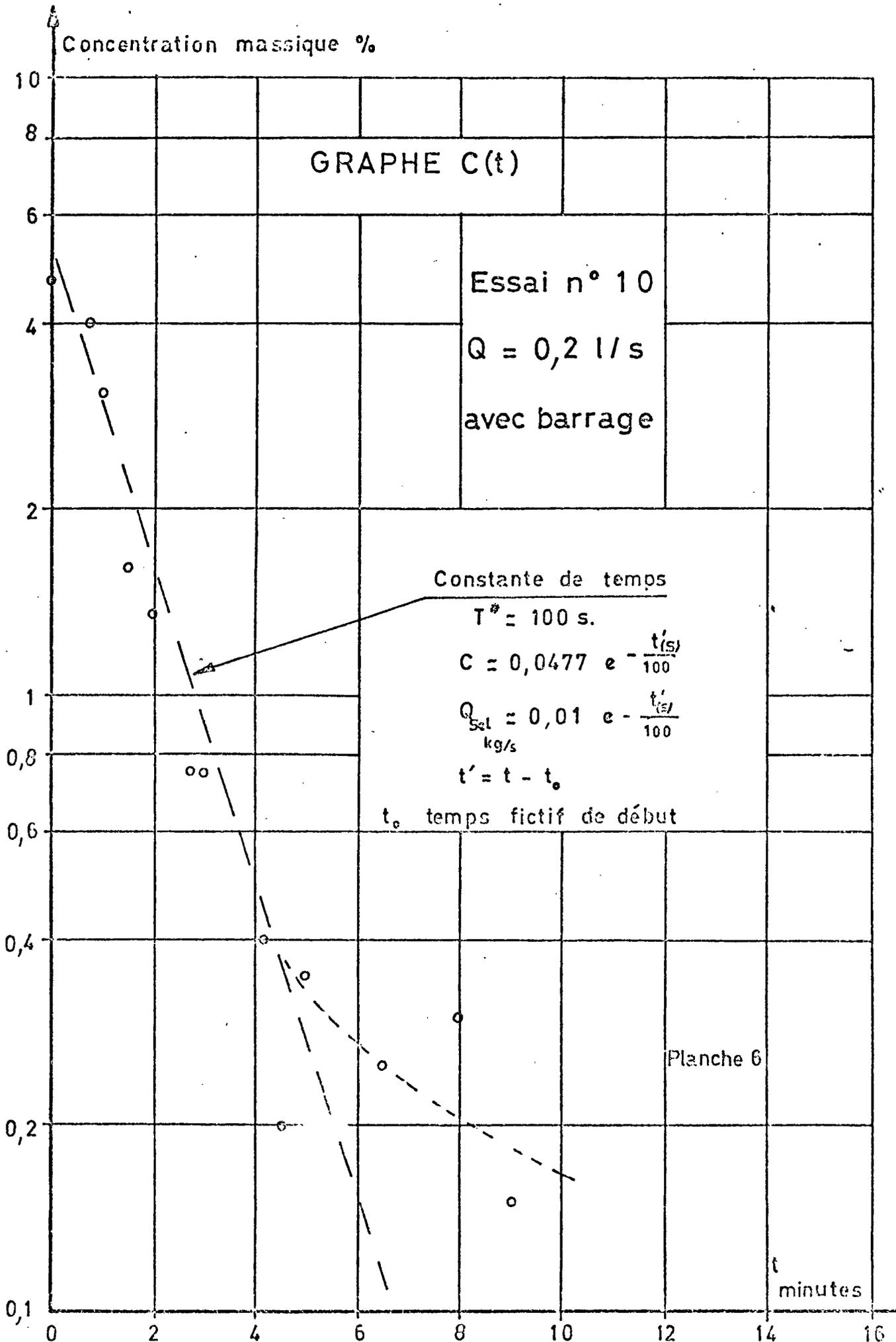
Q = 0,4 l/s
(Relevé de profils)

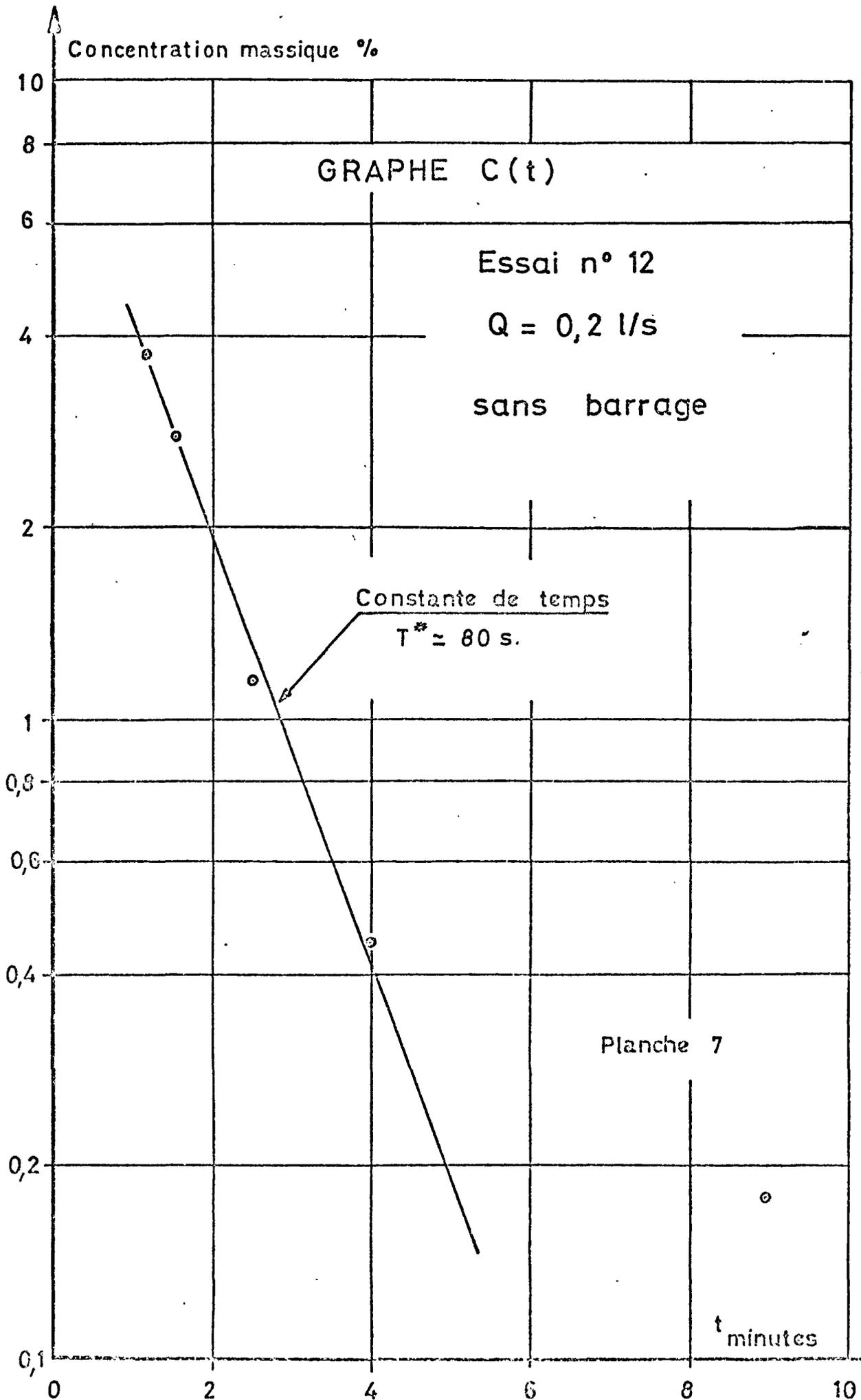
Planche: 5

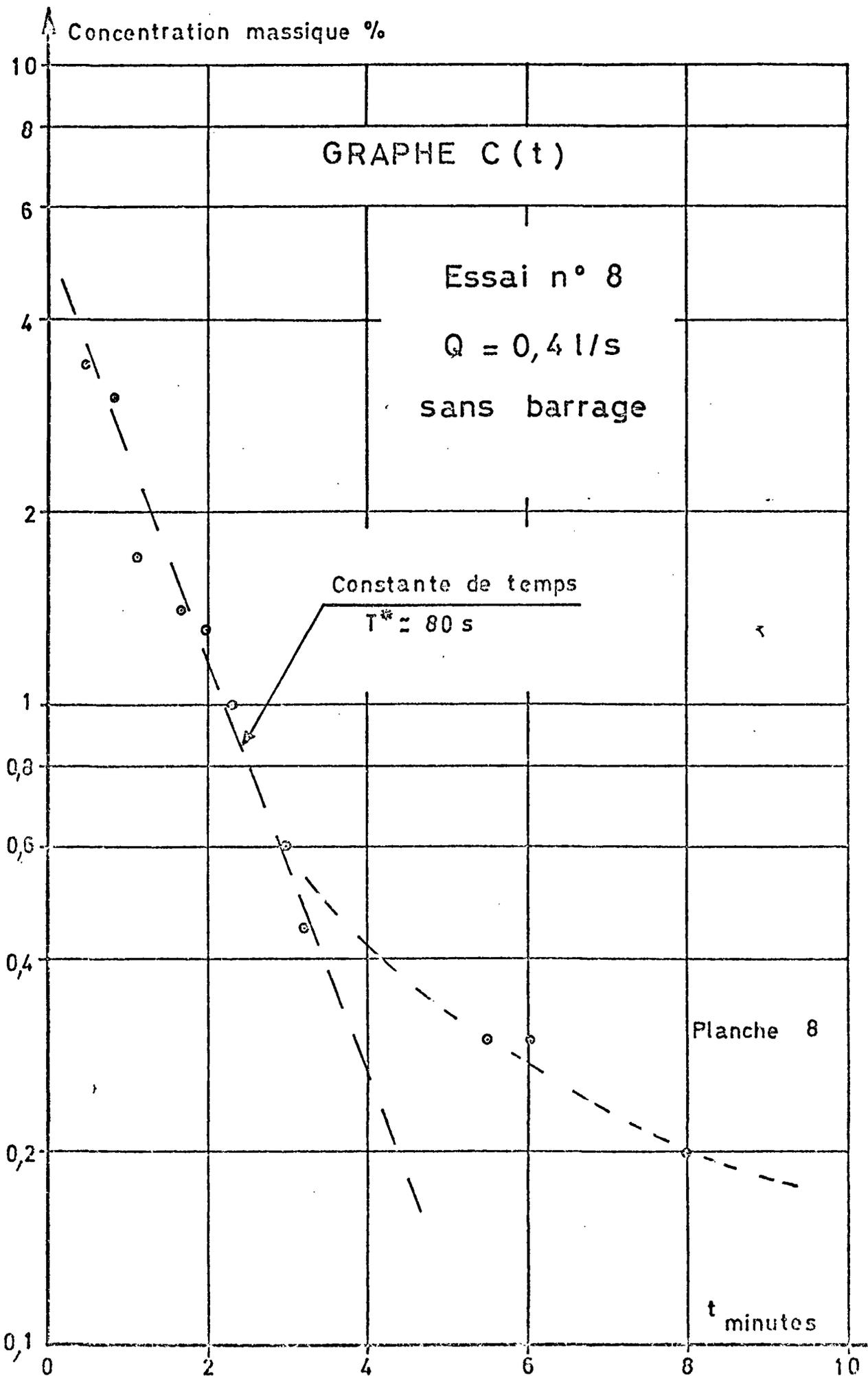


(cm) 40 30 20 10 0 10 20 30 40 (cm)









CONDUITE SIMULANT LA GALERIE DE LA RIVIERE DE PORT MIOU

N° classement essai 3

Débit eau douce = 0,1 l/s

Date : 22 sep. 71

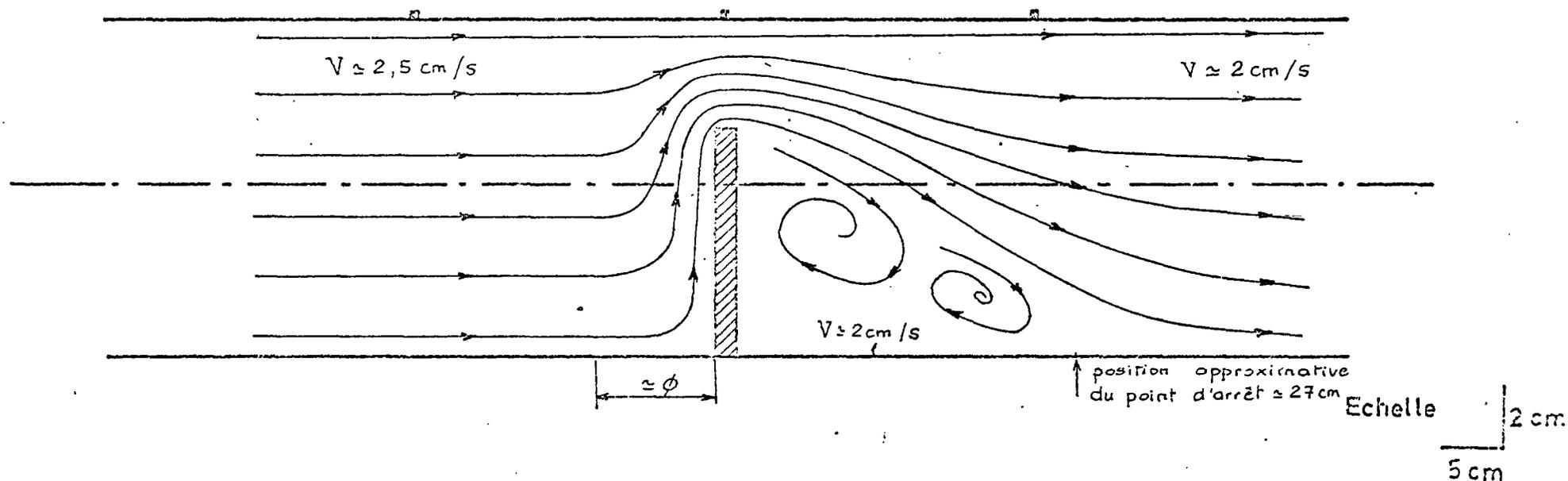
Vitesse en Amont du barrage : 2,5 cm/s

" en Aval du barrage : 2 cm/s

" du contre courant : 2 cm/s

Position point d'arrêt : 25 à 30 cm du barrage

Planche 9



CONDUITE SIMULANT LA GALERIE DE LA RIVIERE DE PORT MIOU

N° classement essai: 3

Débit eau douce = 0,2 l/s

Date : 22 sep.71

Planche 10

Vitesse en Amont du barrage : 3 cm/s

" en Aval du barrage : 10 cm/s

" du contre courant : 4 cm/s

Position point d'arrêt : 40 cm soit 4ϕ

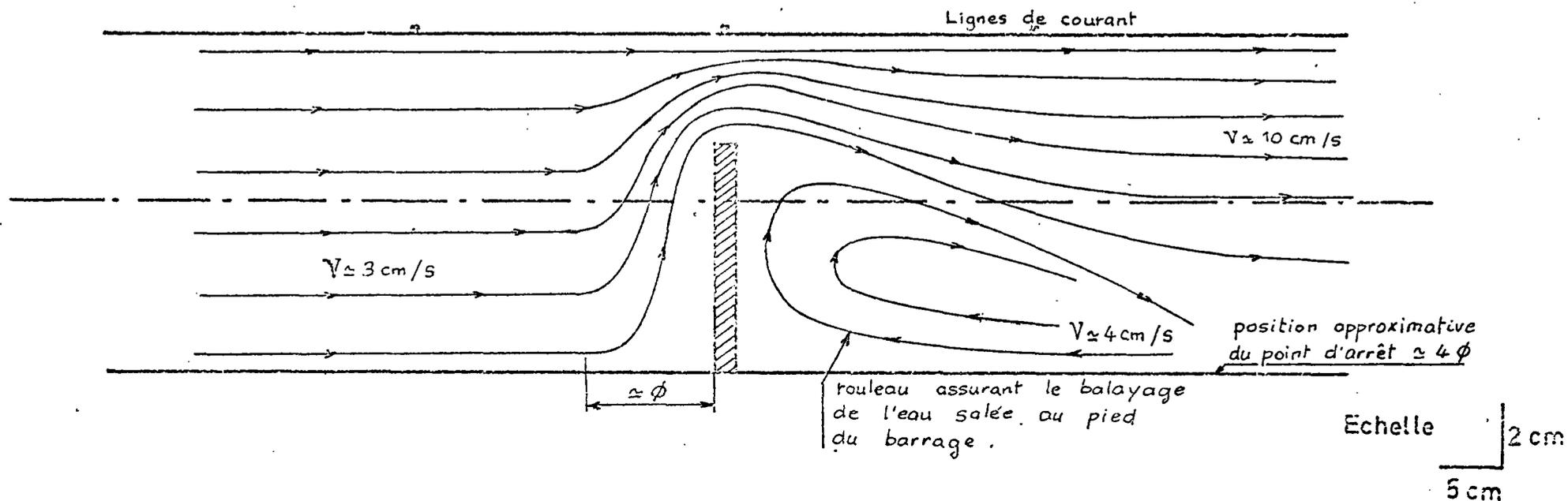




Photo N° 1
Expérience 12.
Débit en eau douce : 0,21/s

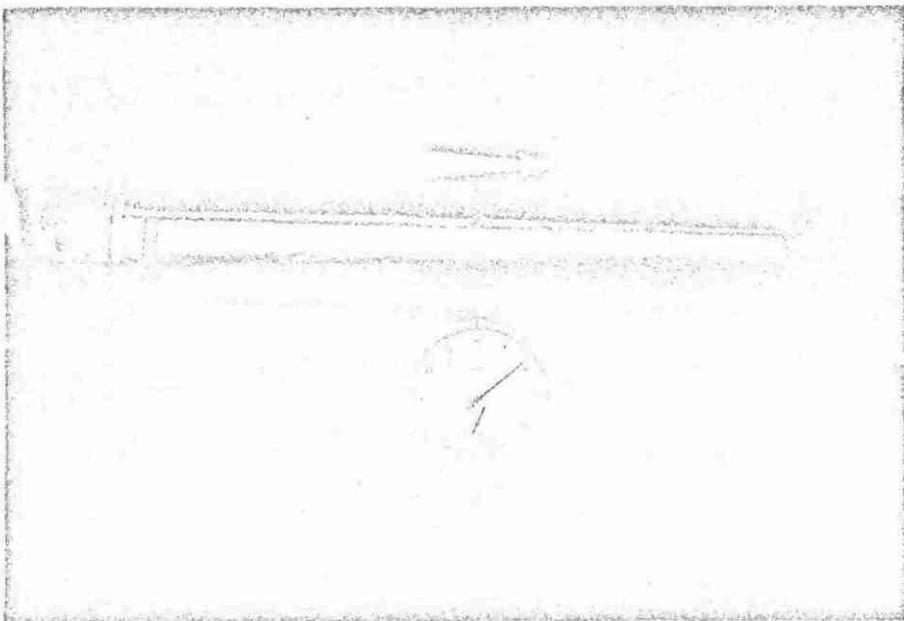


Photo N° 2
Expérience 12
Débit en eau douce : 0,21/s

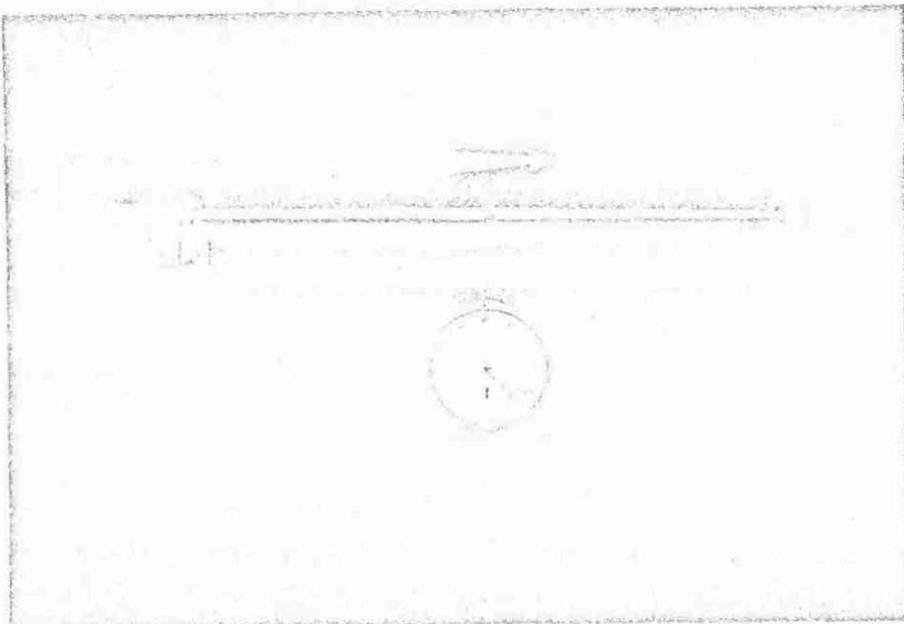


Photo N° 3
Expérience 7
Débit en eau douce : 0,41/s

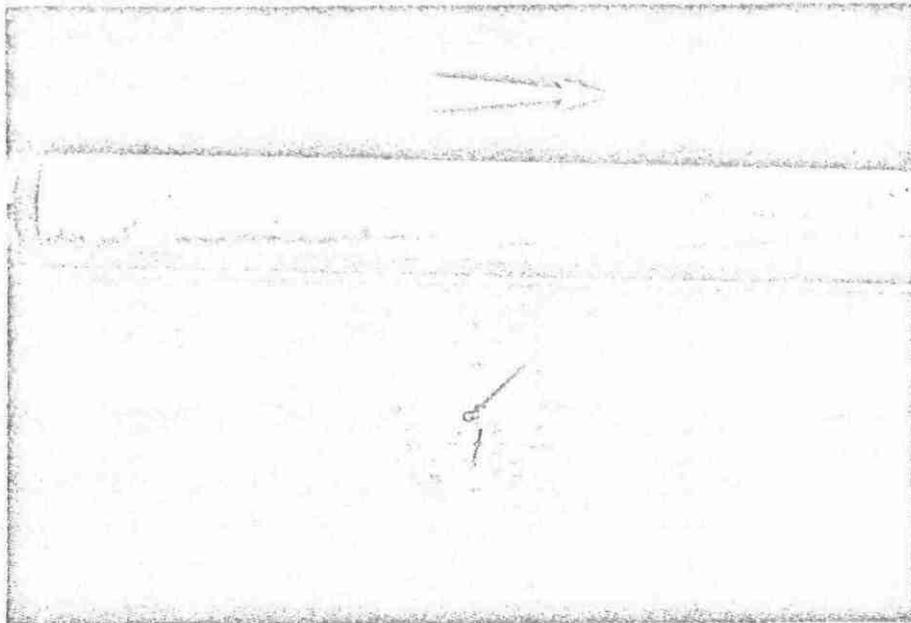


Photo N° 4

Expérience 7.
Débit en eau douce : 0,41/s

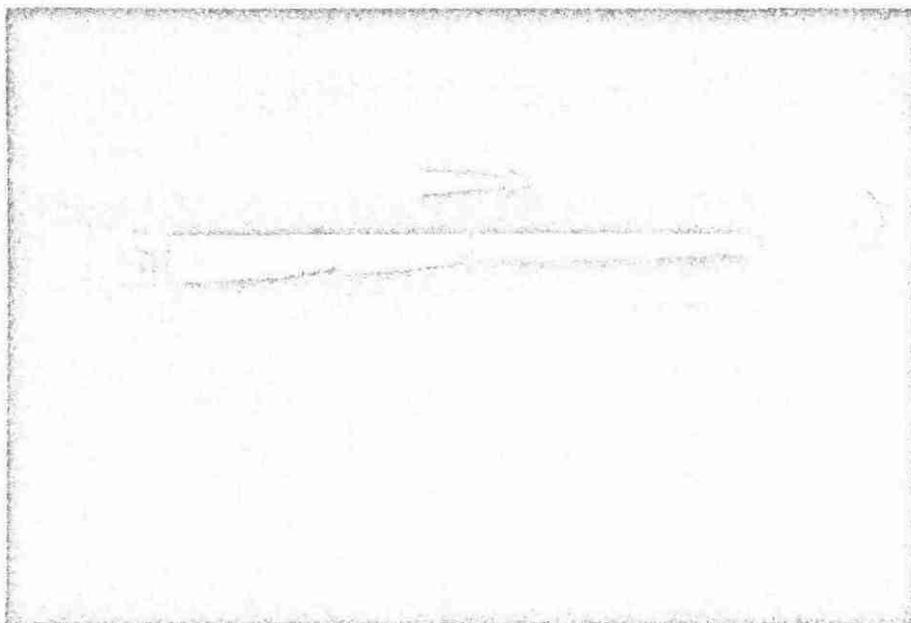


Photo N° 5

Expérience 10.
Débit en eau douce : 0,21/s

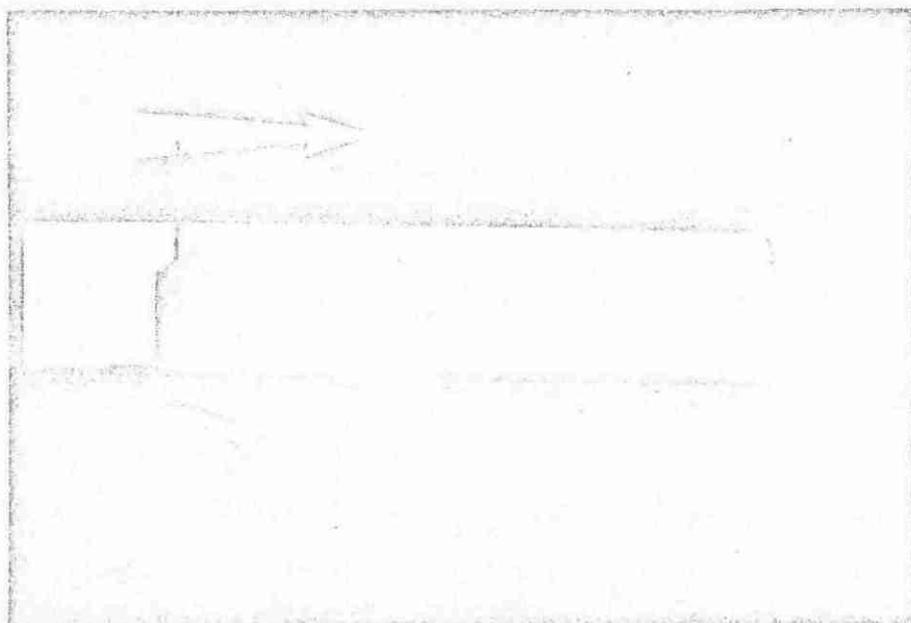


Photo N° 6

Expérience 9.
Débit en eau douce : 0,41/s

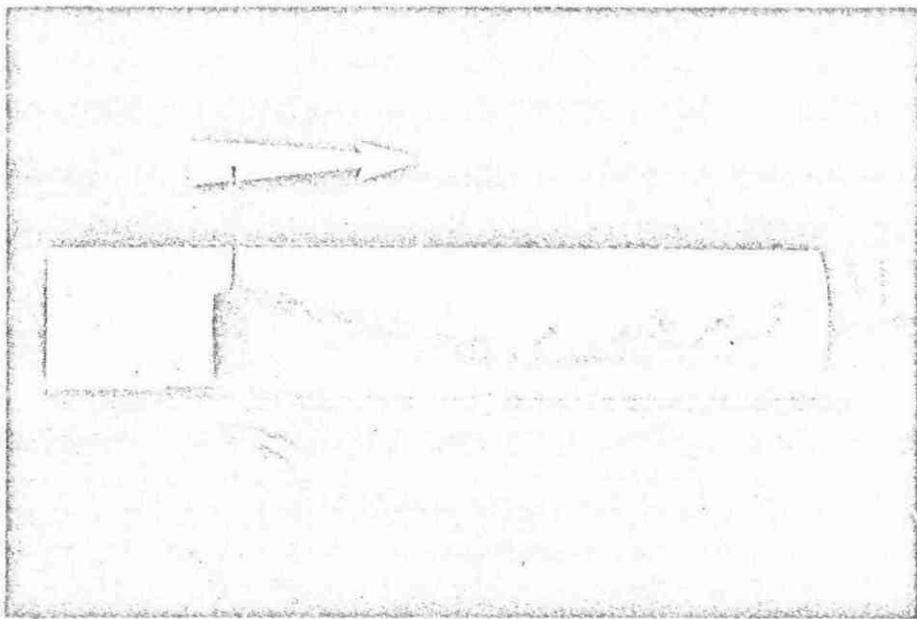


Photo N° 7

Expérience 9.
Débit en eau douce : 0,41/s

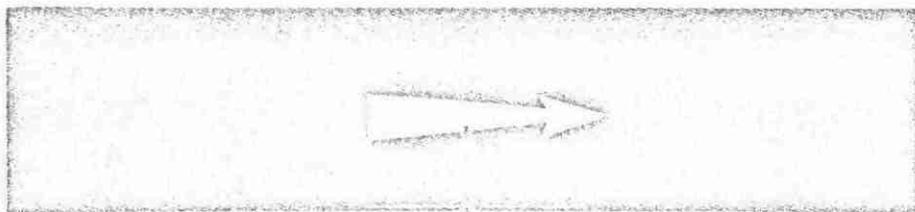


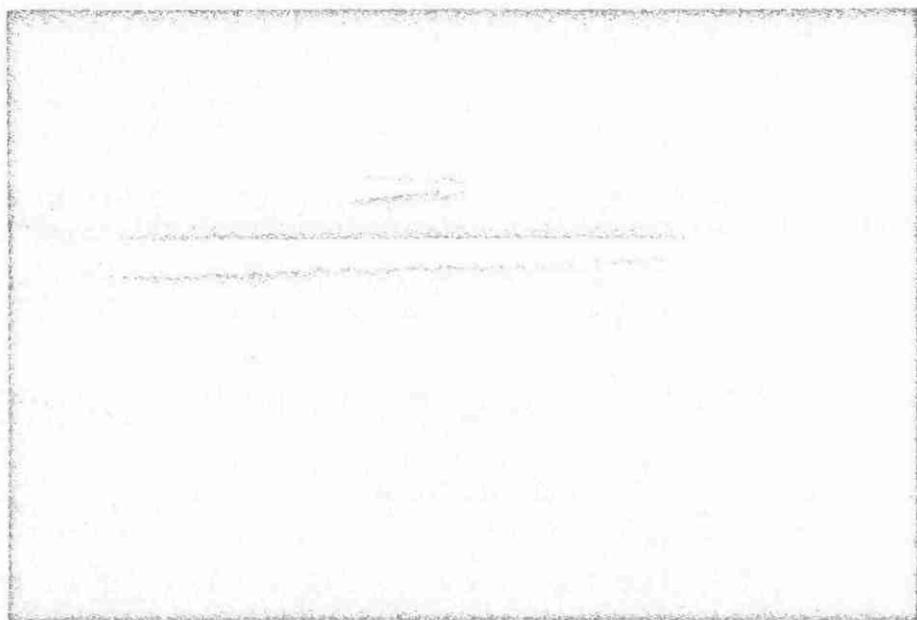
Photo N° 8

Expérience 8.
Débit en eau douce : 0,41/s



Photo N° 9

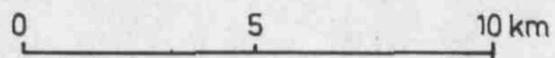
Expérience 12
Débit en eau douce : 0,21/s



SYNDICAT DE RECHERCHES DE PORT MIOU.
 (B.R.G.M - SOCIETE DES EAUX DE MARSEILLE)

CARTE HYDROGEOLOGIQUE DES FORMATIONS CALCAIRES MARSEILLE (FRANCE)

ECHELLE 1/150 000



SOCIETE DES EAUX DE MARSEILLE

LE 29/2/1972

(FIG. 1 bis)

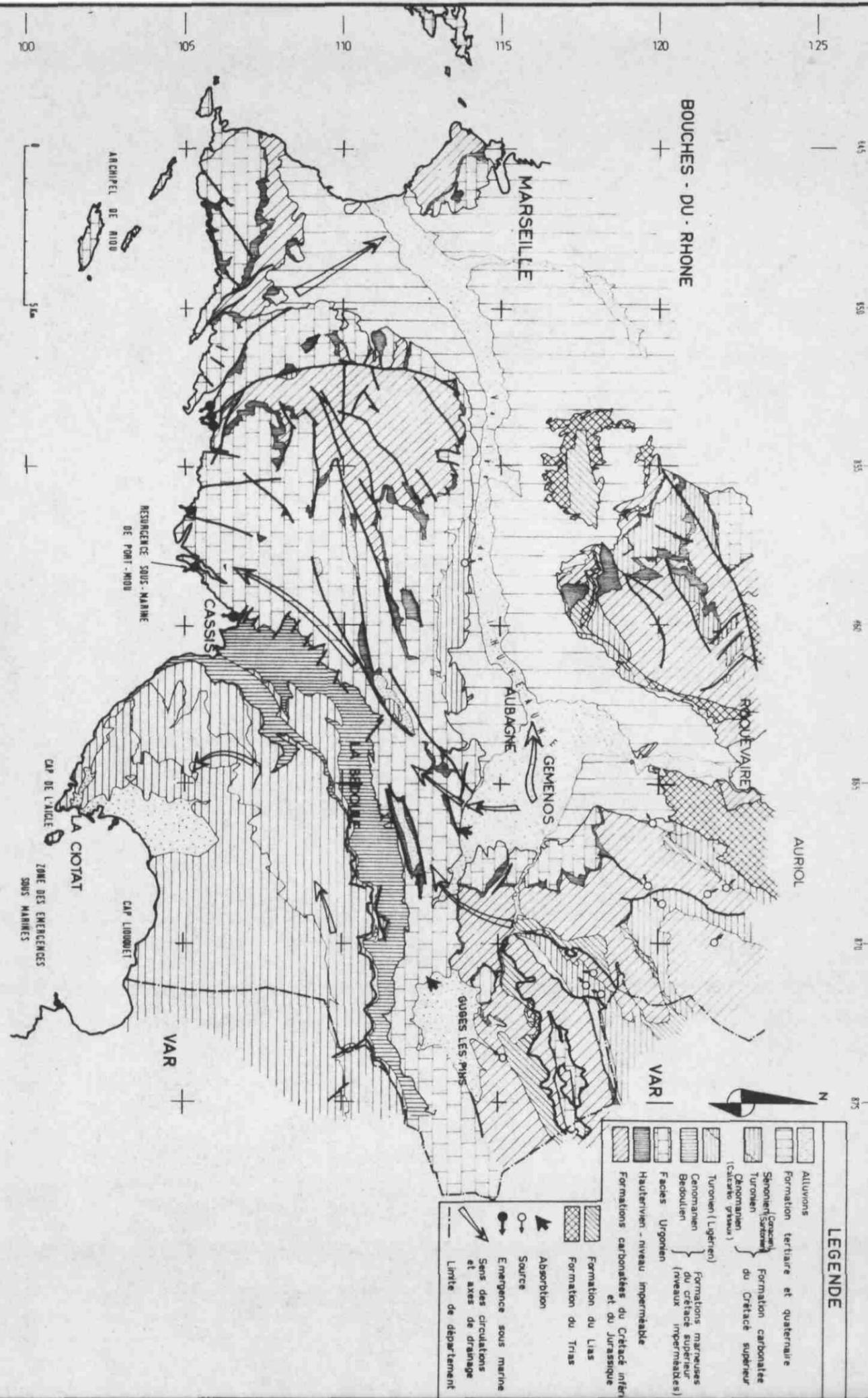
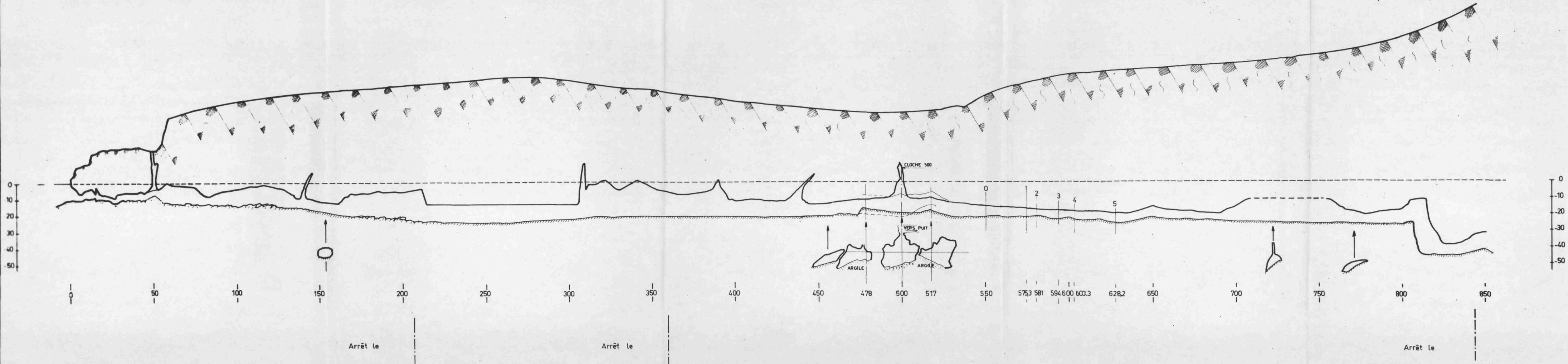




FIGURE 2
FRACTURATIONS

SYNDICAT DE RECHERCHES DE PORT-MIOU
 B. R. G. M. Société des Eaux de Marseille
GALERIE DE PORT-MIOU



SYNDICAT DE RECHERCHES DE PORT MIOU
(B.R.G.M - SOCIETE DES EAUX DE MARSEILLE)

RECONNAISSANCE DE LA GALERIE EN AMONT DE LA CLOCHE

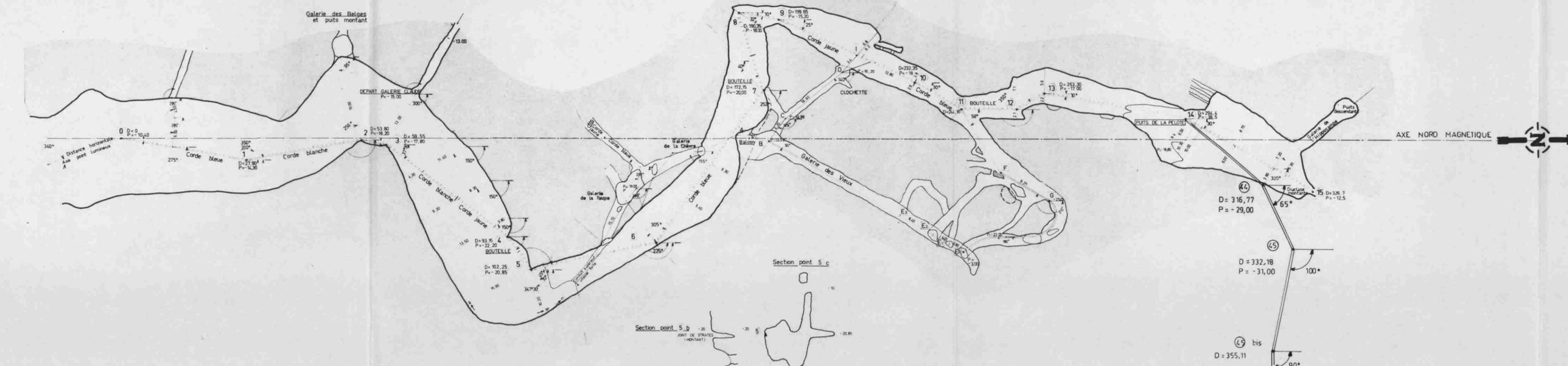
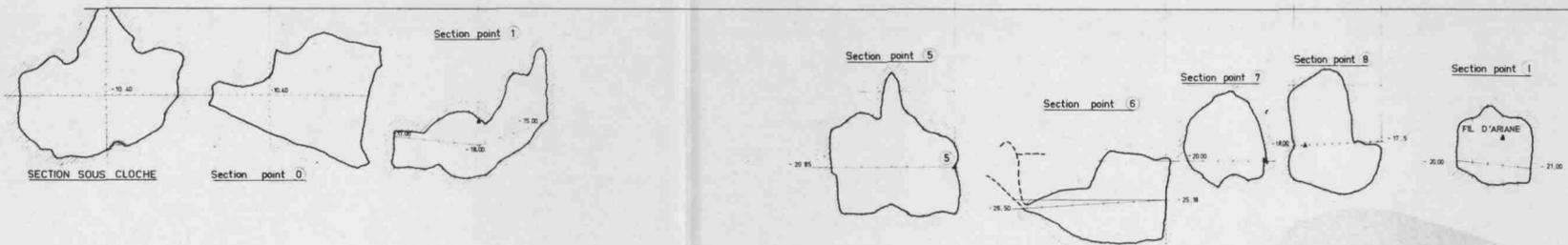
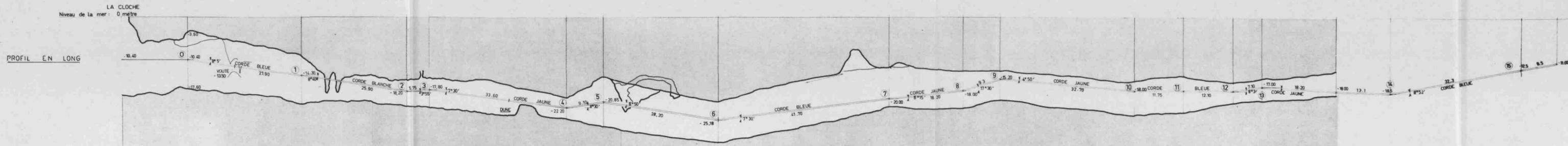
EXPLORATION PAR LE G.E.P.S
(GROUPE D'ETUDES ET DE PLONGEES SOUTERRAINES)
ET LA S.E.M

ECHELLE 1/600



SOCIETE DES EAUX DE MARSEILLE

LE 24/1/1972

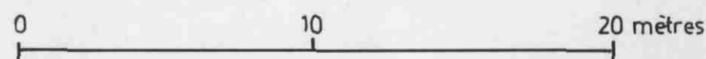


SYNDICAT DE RECHERCHES DE PORT-MIOU
 (B.R.G.M - SOCIETE DES EAUX DE MARSEILLE)

GALERIE DE PORT MIOU

SECTIONS EN AVAL ET AMONT DE LA CLOCHE

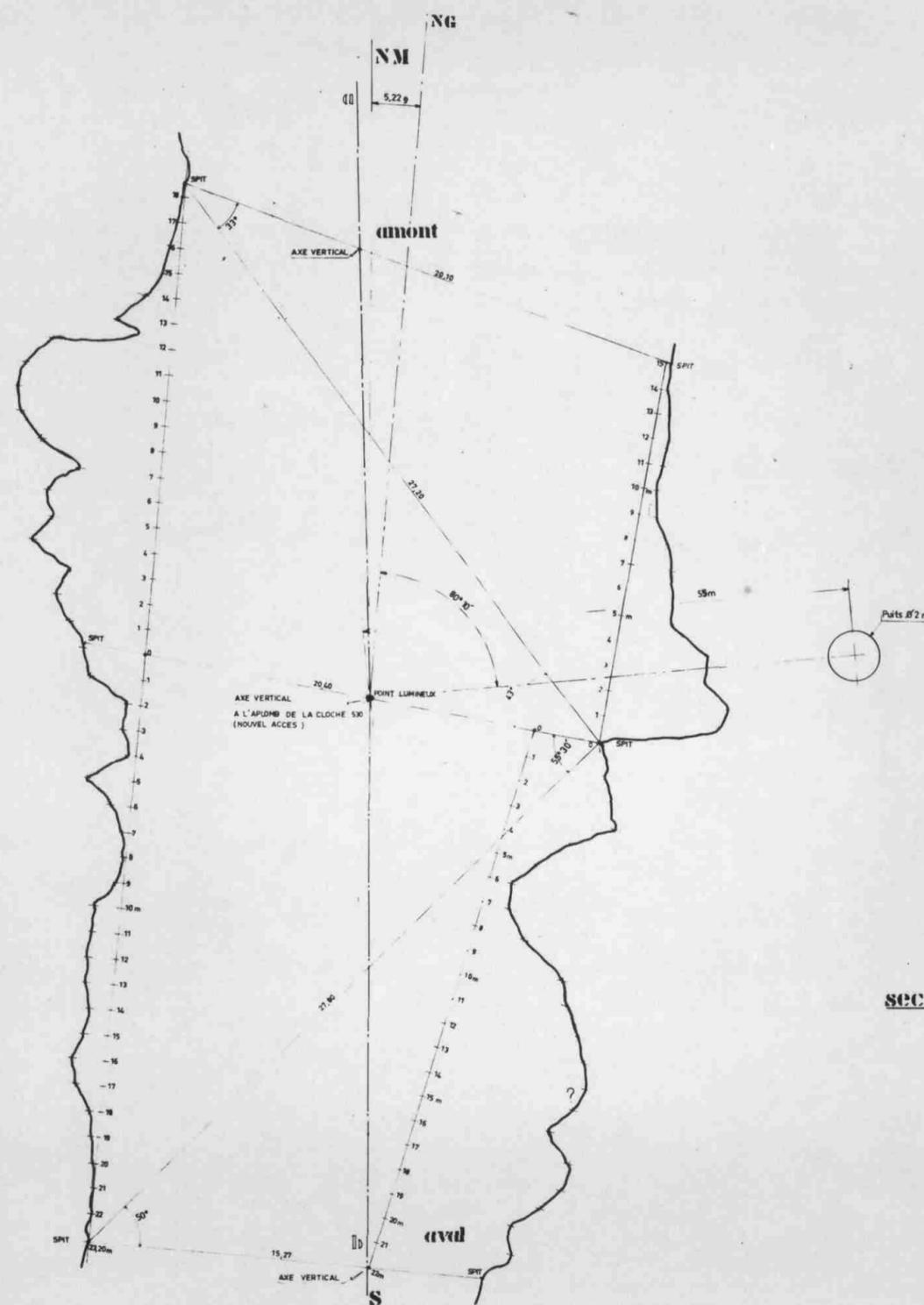
ECHELLE : 1/200



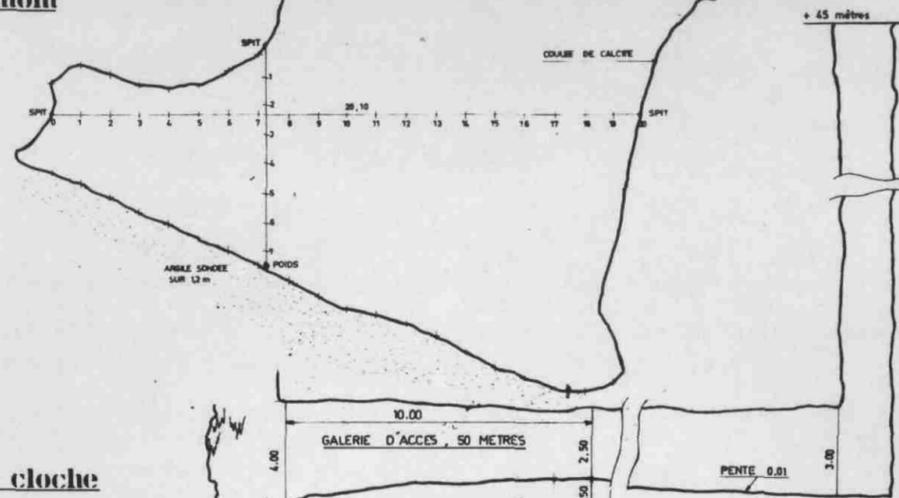
SOCIETE DES EAUX DE MARSEILLE

LE 24/1/1972

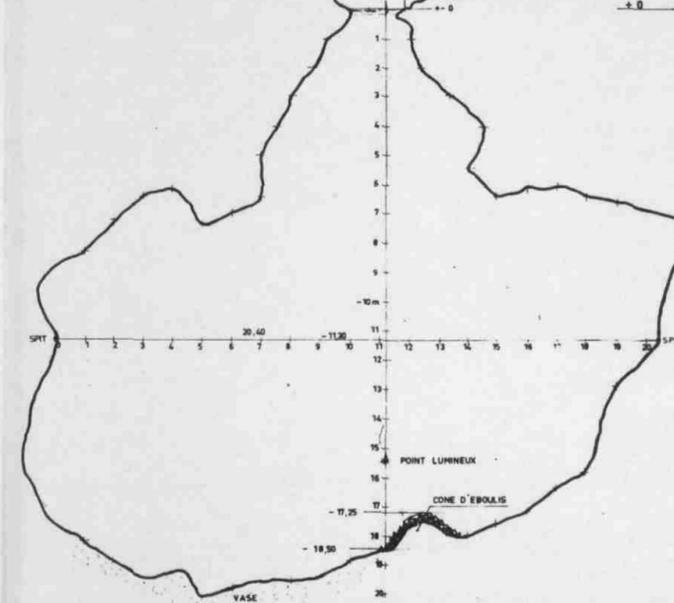
coupe horizontale à 44,50 m sous niveau mer



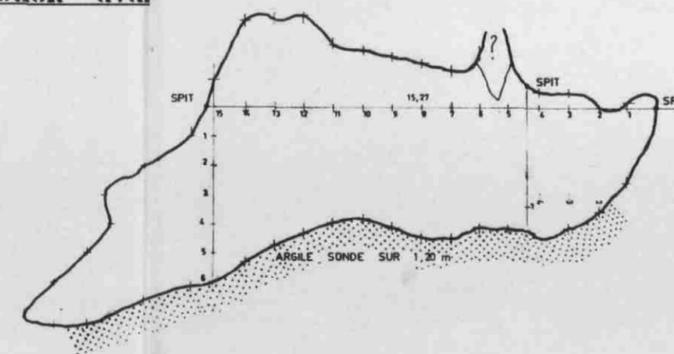
section amont



section sous cloche



section aval

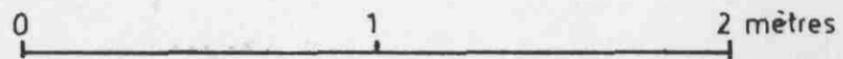


SYNDICAT DE RECHERCHES DE PORT MIOU
(B R G M - SOCIETE DES EAUX DE MARSEILLE)

GALERIE DU BESTOUAN

POSITION DES COURANTOGRAPHERS

ECHELLE : 1/20

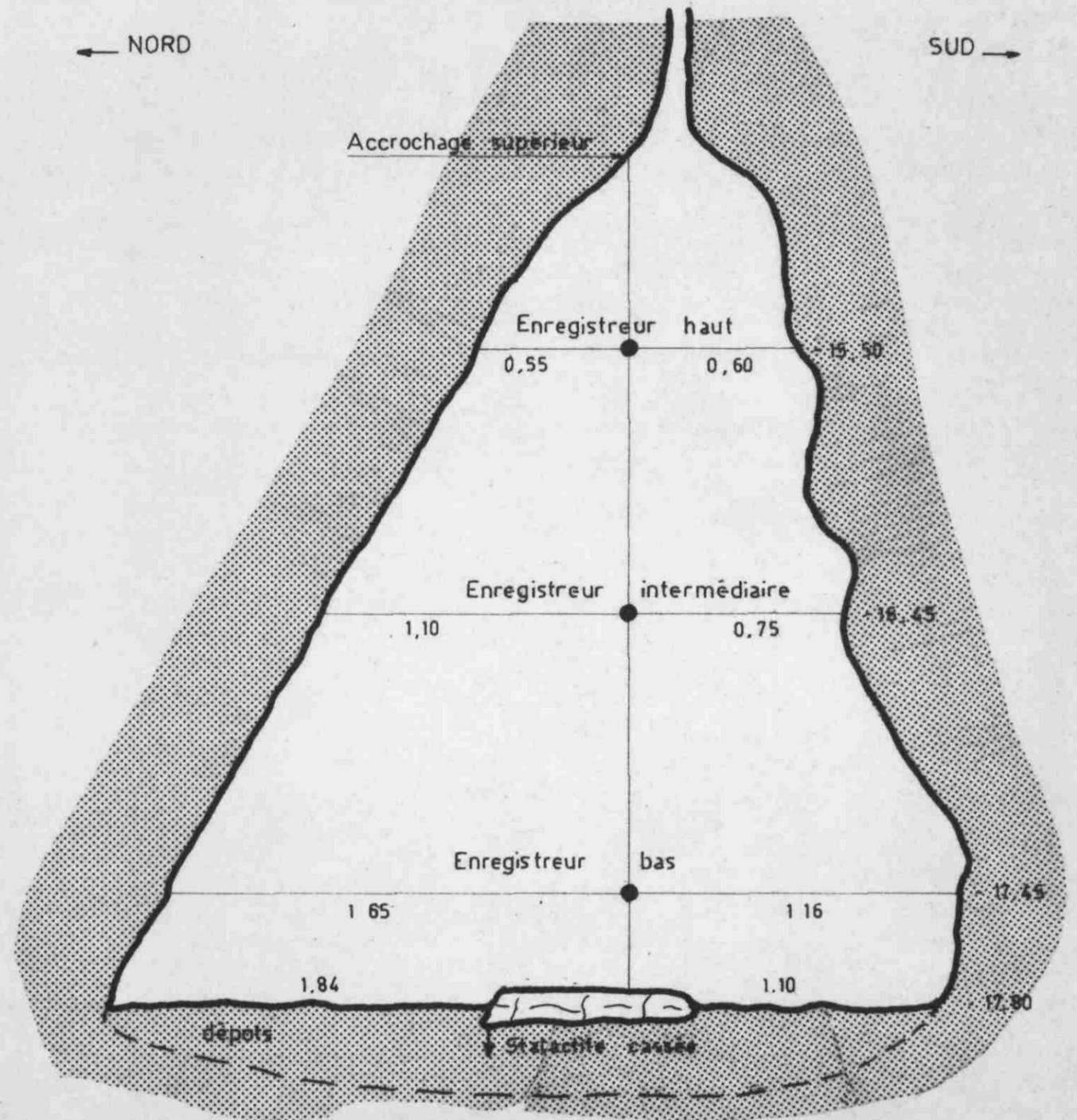


SOCIETE DES EAUX DE MARSEILLE

Fait le 24/1/1972

(PL. 5.2)

SECTION VUE DU COTE EST



GALERIE DE PORT MIOU .
POSITION DES COURANTOGRAPHERS

ECHELLE : 1/40

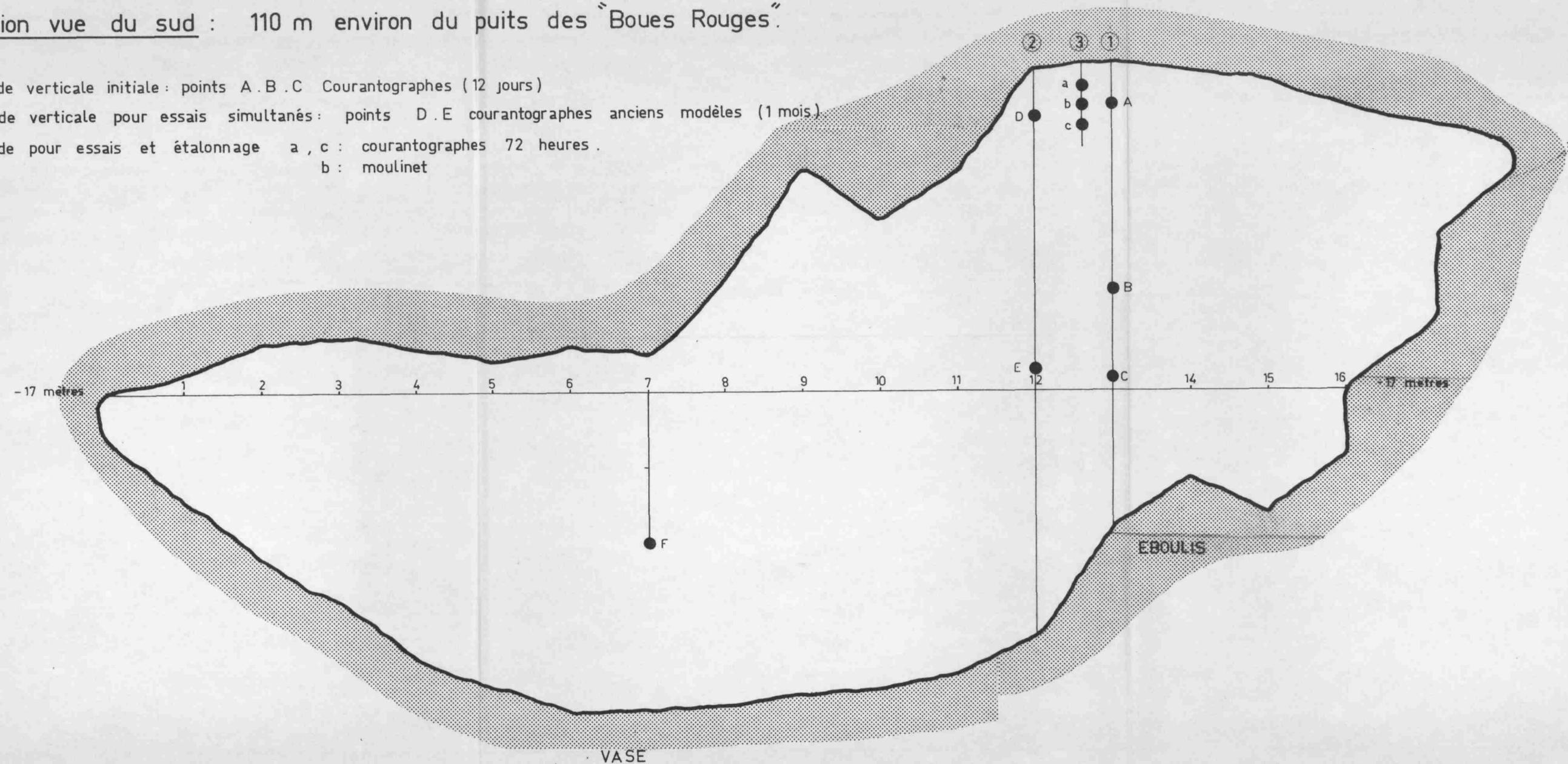
0 1 2 mètres

SOCIETE DES EAUX DE MARSEILLE

Fait le 24/1/1972

Section vue du sud : 110 m environ du puits des "Boues Rouges".

- ① Corde verticale initiale : points A . B . C Courantographes (12 jours)
- ② Corde verticale pour essais simultanés : points D . E courantographes anciens modèles (1 mois)
- ③ Corde pour essais et étalonnage a , c : courantographes 72 heures .
b : moulinet



SYNDICAT DE RECHERCHES DE PORT MIOU
(B.R.G.M - SOCIETE DES EAUX DE MARSEILLE)

GALERIE DE PORT MIOU

COUPE LONGITUDINALE
EN AVAL ET AMONT DE LA CLOCHE

ECHELLE 1/100



SOCIETE DES EAUX DE MARSEILLE

LE 24/1/1972

(PL. 5-4)

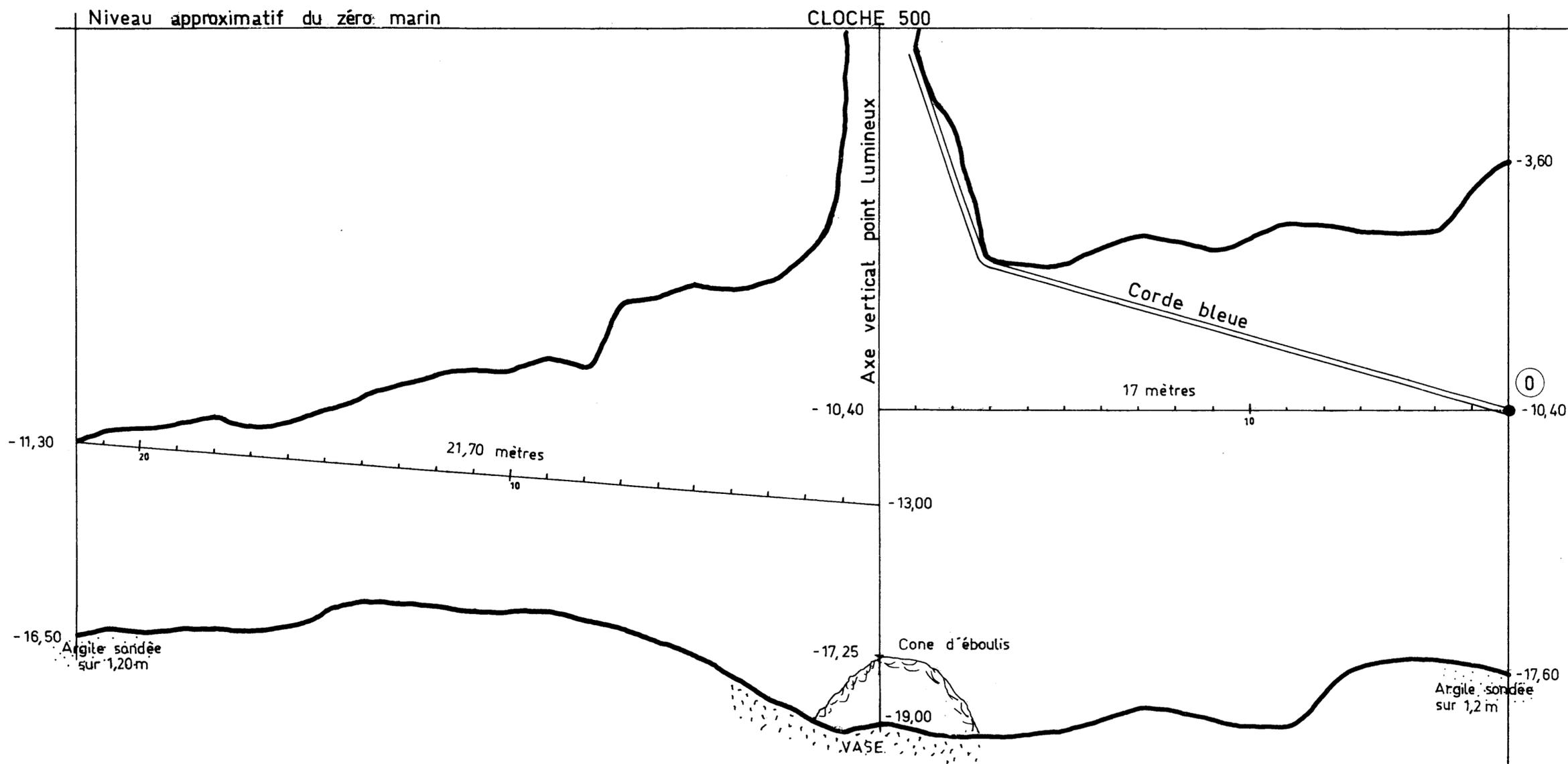
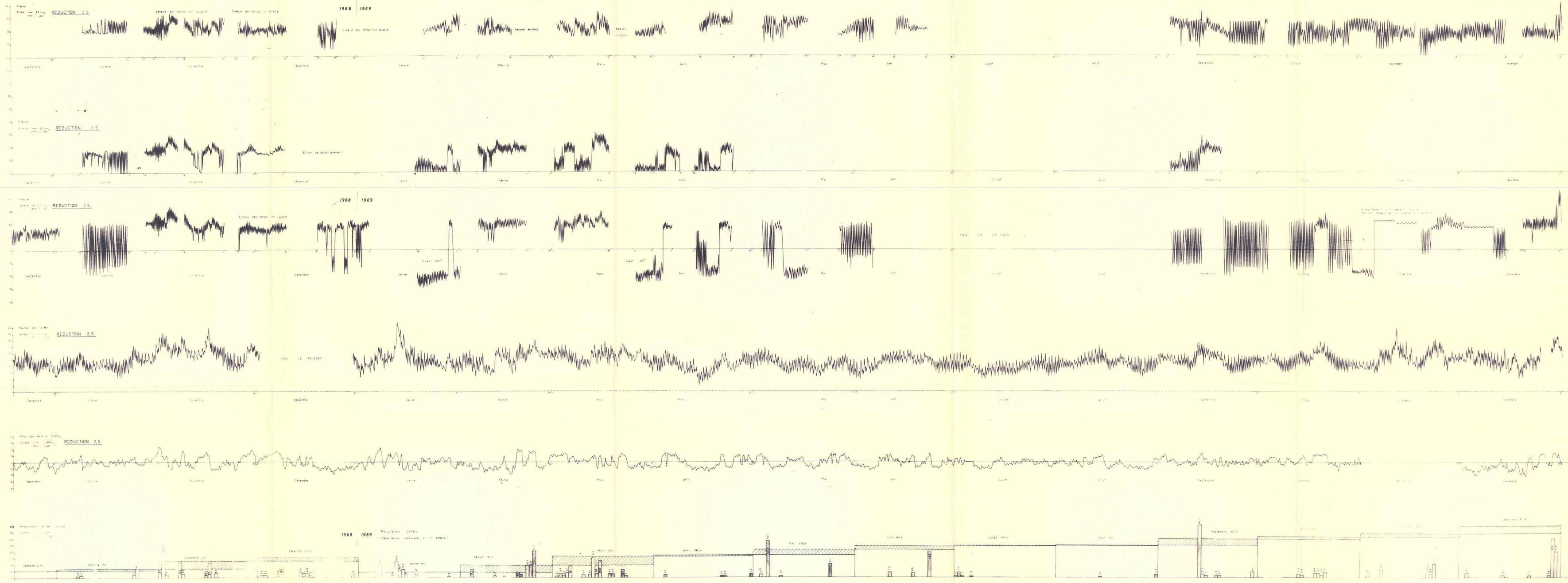




Planche 6 - Photographie de l'interface

SOCIETE DES EAUX DE MARSEILLE
ETUDE DES RESURGENCES SOUS MARINES

PORT-MIOU - BESTOUAN 1968 - 1969 (FIG. 7.1)



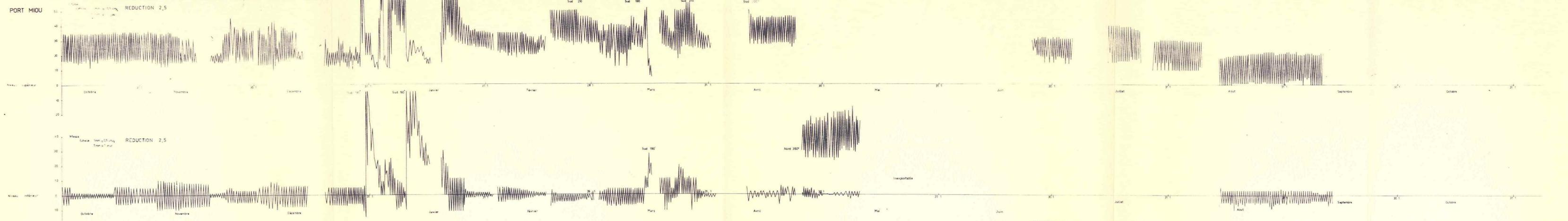
(FIG. 7-2)

SOCIÉTÉ DES EAUX DE MARSEILLE

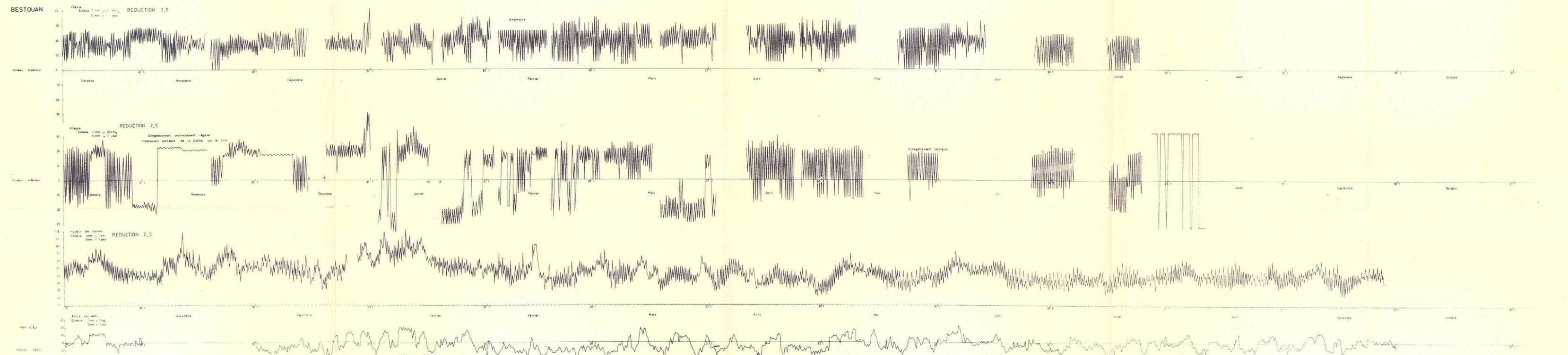
ÉTUDE DES RESURGENCES SOUS MARINES

BESTOUAN - PORT-MIOU 1969-1970

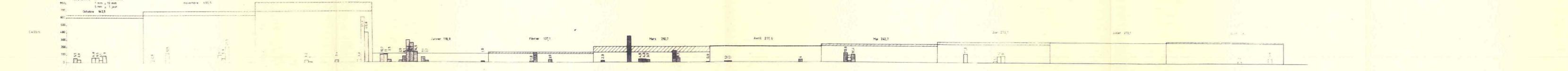
1969 | 1970



1969 | 1970



1969 | 1970



(FIG. 7-3)

SOCIETE DES EAUX DE MARSEILLE ETUDE DES RESURGENCES SOUS MARINES

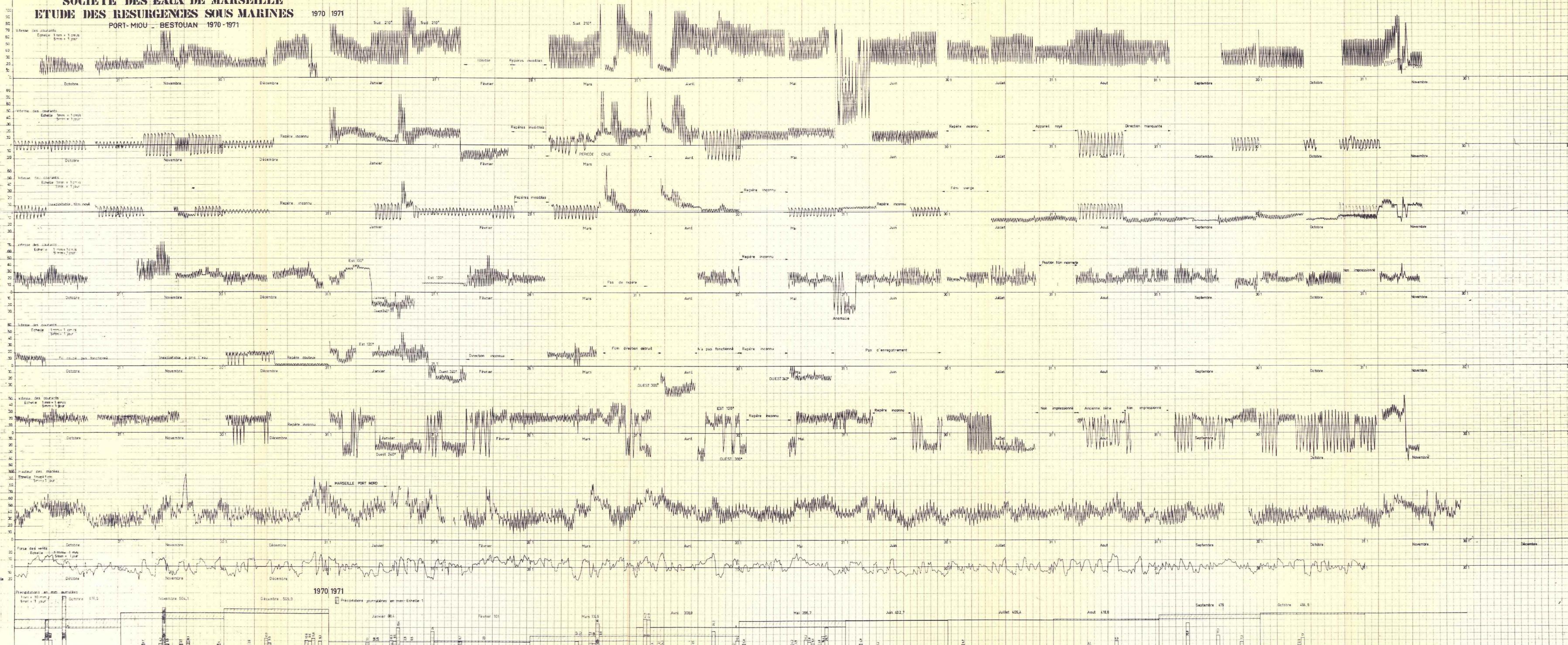
1970 1971

PORT-MIOU - BESTOUAN 1970-1971

PORT MIOU

BESTOUAN

CASSIS

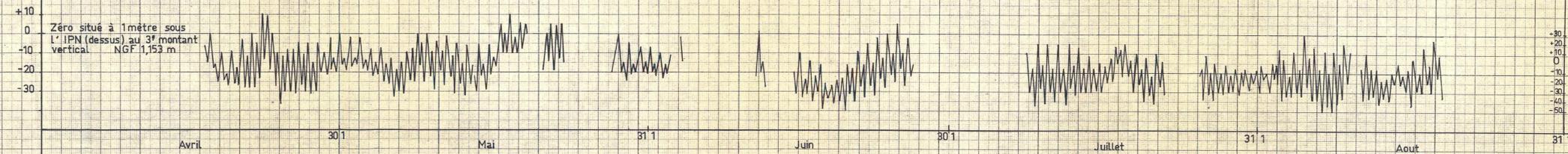


SOCIÉTÉ DES EAUX DE MARSEILLE
ÉTUDE DES NIVEAUX DES EAUX LES BOUES ROUGES LA CLOCHE (PL. 8)
ANNÉE 1971

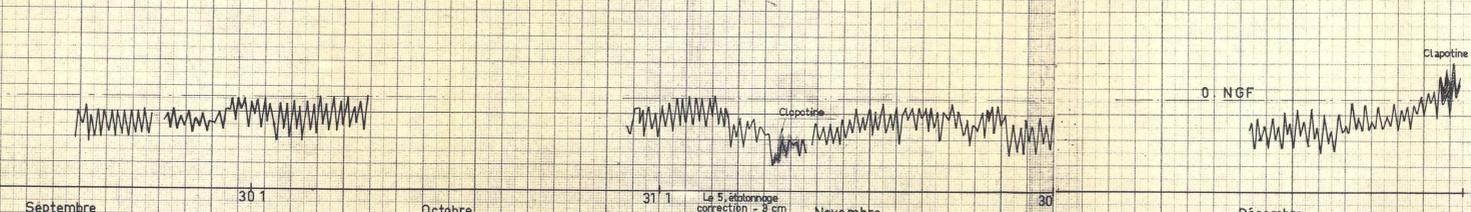
LA CLOCHE 530

Echelle: 5 mm = 1 jour
 1 mm = 1 cm

Zéro situé à 1 mètre sous
 l'IPN (dessus) au 3^e montant
 vertical NGF 1,152 m

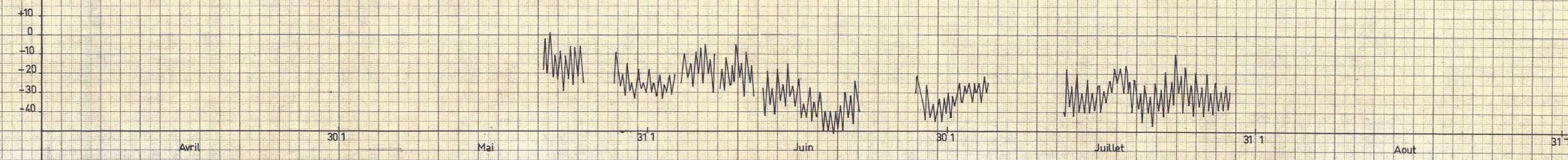


5 mm = 1 jour
 1 mm = 2 cm
 NGF

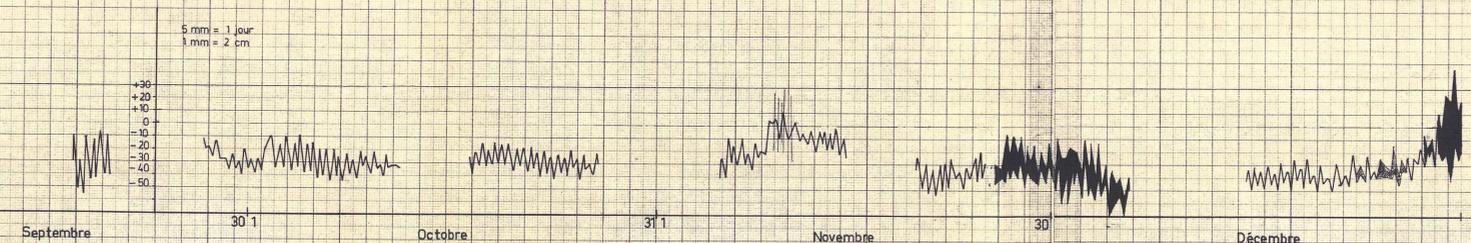


LES BOUES ROUGES

Echelle: 5 mm = 1 jour
 1 mm = 1 cm



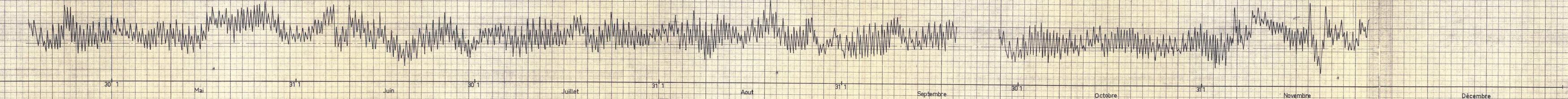
5 mm = 1 jour
 1 mm = 2 cm



MAREGRAPHE MARSEILLE

0,329 0 NGF

Niveau des plus basses eaux

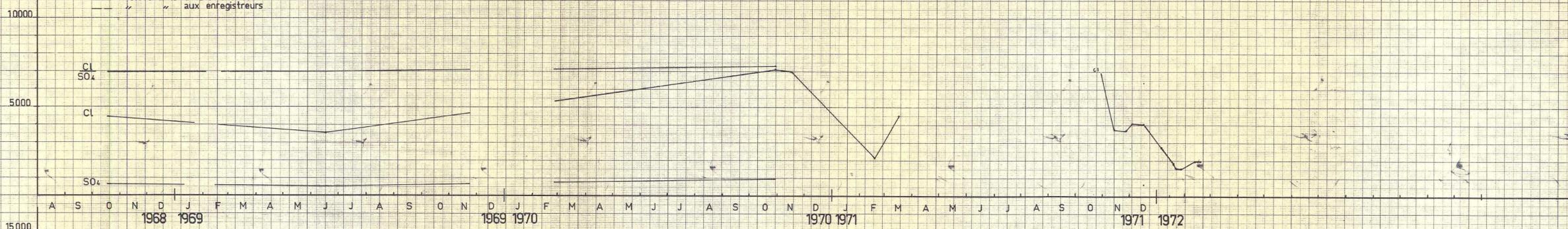


SYNDICAT DE RECHERCHES DE PORT-MIOU
 B.R.G.M. SOCIETE DES EAUX DE MARSEILLE
 PORT MIOU - BESTOUAN

ANALYSE DES EAUX PRELEVEES (PL. 9)

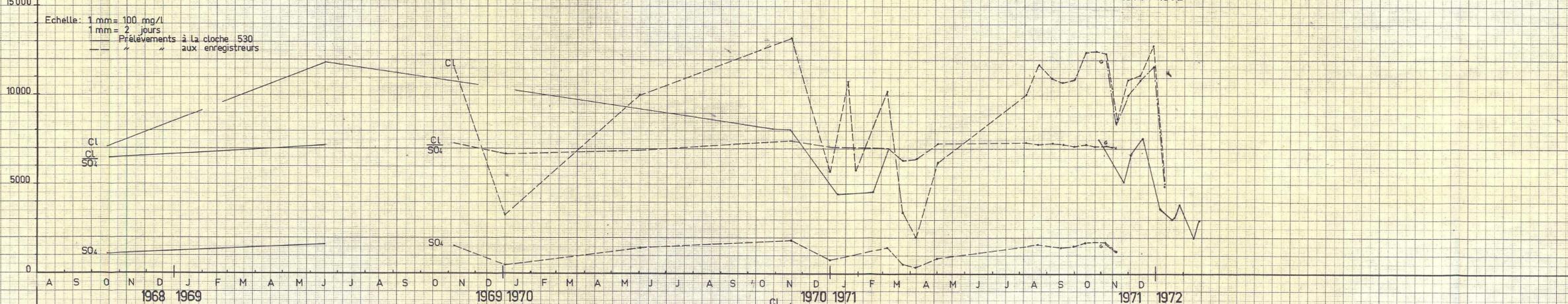
Echelle: 1mm = 100 mg/l
 1mm = 2 jours
 --- Prélèvements à la cloche 530
 - - - aux enregistreurs

PORT MIOU
 0 mètres



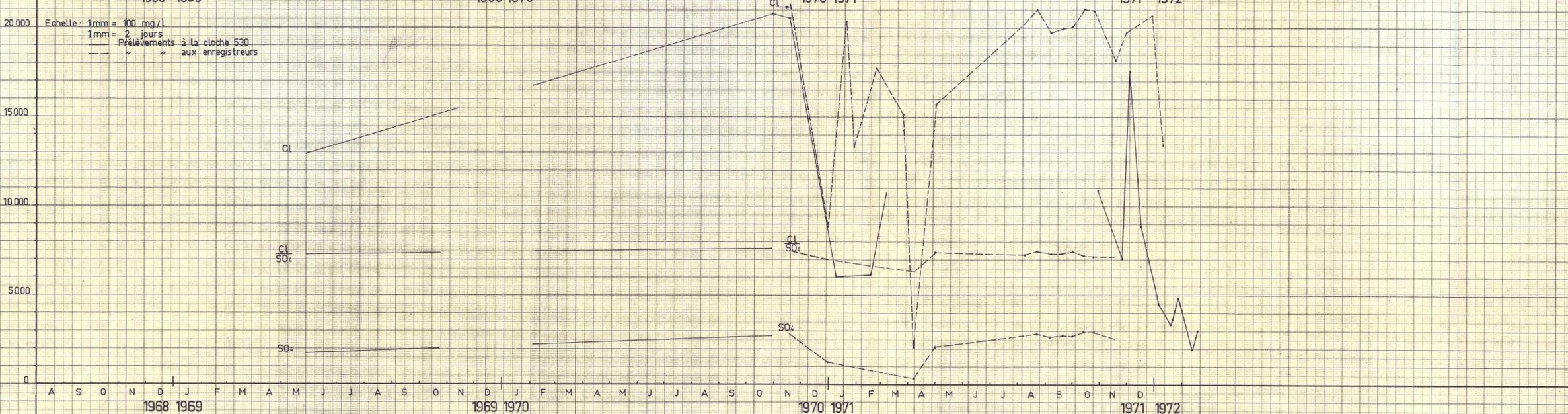
Echelle: 1mm = 100 mg/l
 1mm = 2 jours
 --- Prélèvements à la cloche 530
 - - - aux enregistreurs

PORT MIOU
 niveau moyen



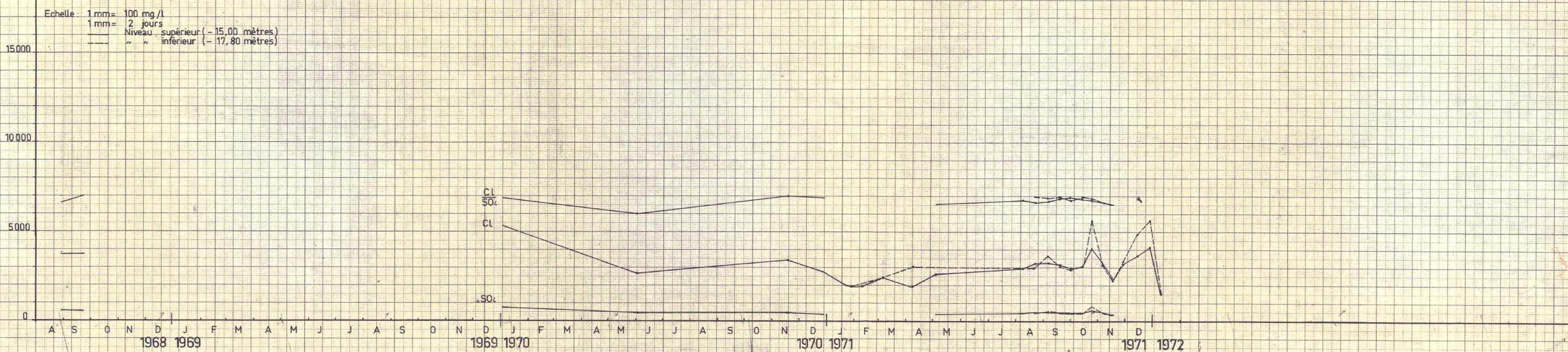
Echelle: 1mm = 100 mg/l
 1mm = 2 jours
 --- Prélèvements à la cloche 530
 - - - aux enregistreurs

PORT MIOU
 niveau inférieur



Echelle: 1mm = 100 mg/l
 1mm = 2 jours
 --- Niveau supérieur (-15,00 mètres)
 - - - " " inférieur (-17,80 mètres)

BESTOUAN



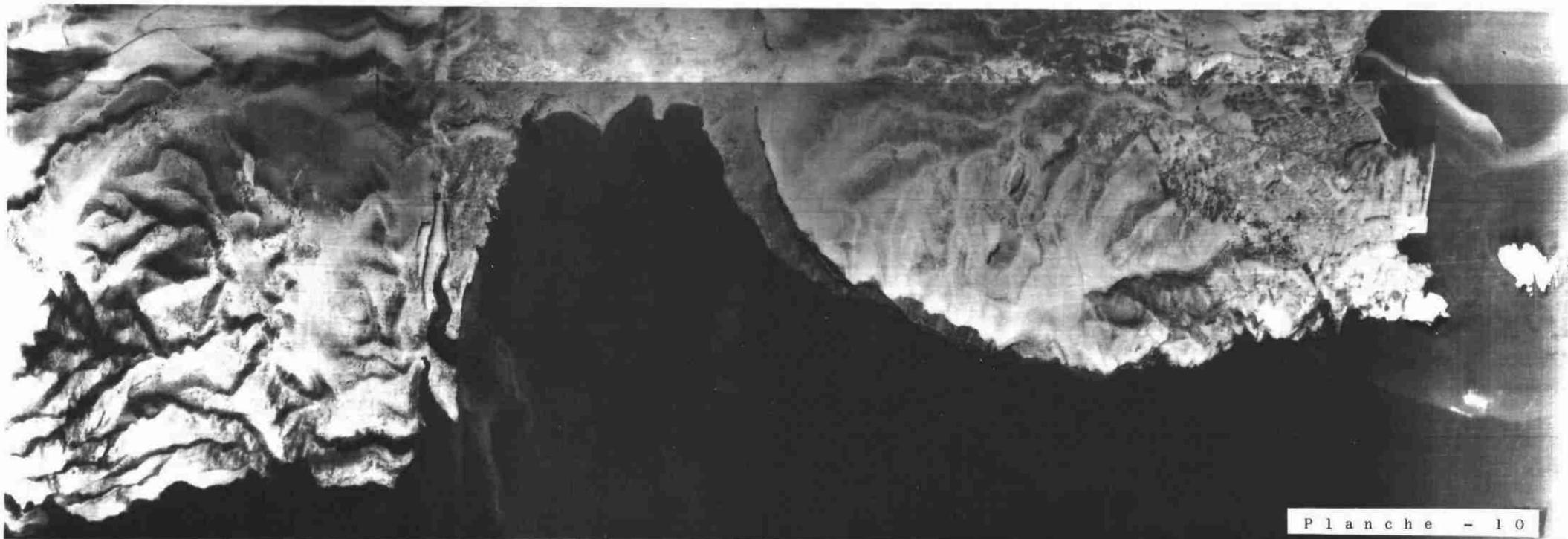


Planche - 10

Analyses chimiques

Situation		Date	Cl ⁻ (g/l)	SO ₄ ⁼ (g/l)
distance exutoire	profondeur			
530 m cote	0,00 m	17.10.68 *	4,43	0,639
530 m	-10,00 m	17.10.68	7,09	1,097
150 m	?	6.11.69	11,52	1,578
200 m	?	1.06.70	10,-	1,440
530 m	0,00 m	28.10.70 *	7,147	0,973
	-18,53 m	28.10.70	20,777	2,728
530 m	0,00 m	17.11.70 *	13,241	1,785
	-18,00 m	17.11.70	21,362	2,839
530 m	0,00 m	30.12.70 *	5,665	0,793
	-18,00 m	30.12.70	8,877	1,226
530 m	0,00 m	19.01.71	10,78	
	-18,00 m	19.01.71	20,37	
530 m	0,00 m	26.01.71	5,75	
	-18,00 m	26.01.71	13,30	
530 m	0,00 m	8.02.71	7,26	1,055
530 m	0,00 m	17.02.71	2,13	
	-18,00 m	17.02.71	6,13	
530 m	-16,00 m	22.02.71	17,73	
530 m	0,00 m	5.03.71	10,25	1,459
530 m	0,00 m	22.03.71	3,47	0,546
530 m	-16,00 m	6.04.71	2,09	0,319
530 m	0,00 m	6.04.71	2,02	0,314
530 m	0,00 m	30.04.71	6,2	0,850
530 m	-16,00 m	30.04.71	15,7	2,13

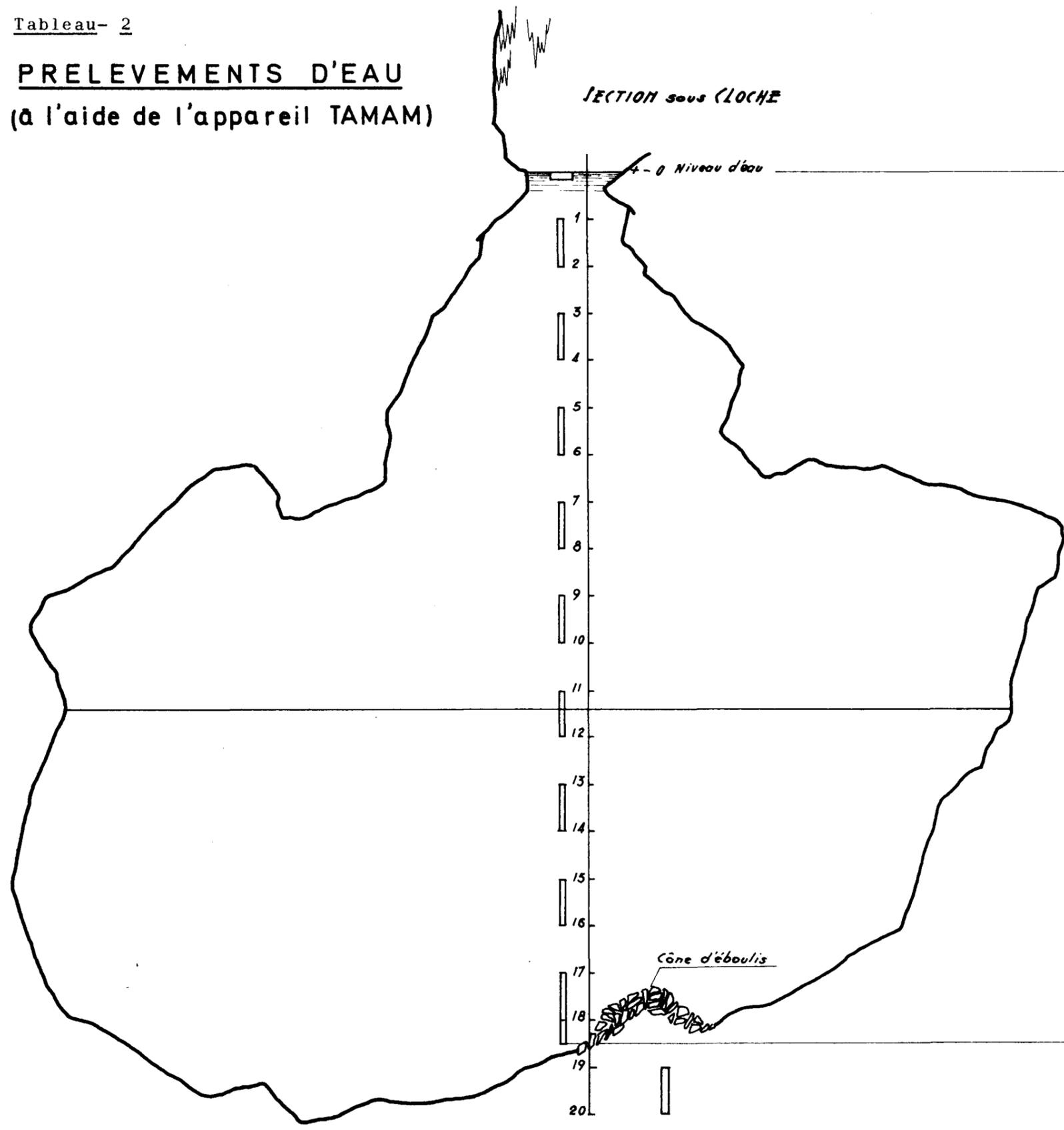
* Echantillons pour lesquels on dispose d'une analyse complète (voir diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF Figure-1)

Tableau- 2

PRELEVEMENTS D'EAU
(à l'aide de l'appareil TAMAM)

TENEURS EN CHLORURE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR (g/l)

Profondeurs.	D a t e s				
	28-10-70	16-11-70	8-1-71	17-2-71	16-3-71
0	7,147	6,984	4,141	2,130	4,500
1	7,200	7,072	4,210	2,690	4,550
2					
3	7,140	7,218	4,226	3,230	4,640
4					
5	7,370	7,473	4,300	3,440	5,200
6					
7	7,560	7,788	4,346	3,930	6,450
8					
9	8,160	8,083	4,414	4,570	6,940
10					
11	8,200	8,551	4,587	4,570	6,960
12					
13	8,750	8,848	4,708	5,070	7,480
14					
15	10,800	10,146	5,158	5,250	8,180
16					
17	19,850	20,533	6,090	6,130	10,700
18					
18,53	20,777				



		P U I T S D E P O R T - M I O U																																				R é s i s t i v i t é Ω/cm																												
Cellule de résistivité	Profondeur en mètres	14-1-71				15-1-71				16-1-71				17-1-71				18-1-71				19-1-71				20-1-71				21-1-71				22-1-71				23-1-71				24-1-71				25-1-71				26-1-71				27-1-71												
		13h	19h	1h	7h	13h	19h	1h	7h	13h	19h	1h	7h	13h	19h	1h	7h	13h	19h	1h	7h	13h	19h	1h	7h	13h	19h	1h	7h	13h	19h	1h	7h	13h	19h	1h	7h	13h	19h	1h	7h	13h	19h	1h	7h	13h	19h	1h	7h	13h	19h	1h	7h													
1	2,5	0,62	0,63	0,63	0,63	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,61	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,68	0,70	0,72	0,72	0,74	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,75	0,76	0,76	0,75	0,76	0,76	0,76	0,76									
2	3,5	0,82	0,81	0,80	0,81	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,80	0,81	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,79	0,78	0,78	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76	0,74	0,62	0,64	0,64	0,65	0,72	0,76	0,80	0,83	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,94	0,96	0,96	0,95	0,96	0,96	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94									
3	4,5	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,83	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,79	0,77	0,76	0,63	0,64	0,65	0,68	0,72	0,78	0,80	0,85	0,89	0,91	0,92	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96									
4	6,5	0,69	0,69	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,65	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,62	0,64	0,65	0,68	0,73	0,78	0,80	0,85	0,88	0,92	0,92	0,96	0,97	0,96	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,93	0,95	0,96	0,94	0,93	0,92
5	8,5	0,61	0,61	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,59	0,58	0,58	0,57	0,57	0,57	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,55	0,55	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,53	0,53	0,53	0,61	0,64	0,66	0,68	0,73	0,78	0,82	0,85	0,89	0,92	0,92	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,92	0,92	0,92	0,89	0,88	0,84				
6	10,5	0,58	0,57	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,53	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,51	0,52	0,52	0,52	0,51	0,50	0,52	0,52	0,52	0,64	0,64	0,66	0,69	0,79	0,79	0,84	0,87	0,91	0,93	0,93	0,97	0,97	1Ω	1Ω	0,92	0,96	0,92	0,94	0,94	0,93	0,89	0,88	0,87	0,86	0,83								
7	12,5	0,52	0,52	0,50	0,51	0,50	0,52	0,52	0,52	0,52	0,51	0,50	0,51	0,50	0,49	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,47	0,47	0,48	0,48	0,48	0,48	0,47	0,47	0,48	0,48	0,47	0,60	0,63	0,64	0,66	0,72	0,75	0,80	0,82	0,86	0,88	0,88	0,92	0,92	0,91	0,90	0,86	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,77	0,81	0,76	0,80	0,70	0,80							
8	14,5	0,52	0,53	0,52	0,53	0,51	0,53	0,53	0,54	0,51	0,52	0,52	0,52	0,49	0,51	0,49	0,50	0,48	0,50	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,50	0,48	0,48	0,47	0,48	0,50	0,50	0,49	0,63	0,64	0,65	0,68	0,71	0,79	0,82	0,86	0,89	0,92	0,92	0,96	0,90	0,98	0,88	0,88	0,88	0,88	0,84	0,78	0,89	0,77	0,80	0,71	0,80									
9	16,5	0,41	0,42	0,41	0,42	0,41	0,43	0,42	0,42	0,40	0,42	0,40	0,42	0,40	0,40	0,40	0,41	0,38	0,40	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,40	0,39	0,39	0,40	0,40	0,40	0,41	0,39	0,60	0,62	0,64	0,65	0,71	0,75	0,78	0,82	0,85	0,88	0,86	0,92	0,90	0,92	0,78	0,82	0,77	0,84	0,70	0,70	0,67	0,68	0,65	0,64	0,70									
10	18,5	0,25	0,22	0,28	0,21	0,23	0,30	0,29	0,24	0,22	0,29	0,24	0,24	0,22	0,24	0,20	0,21	0,20	0,24	0,20	0,23	0,20	0,27	0,20	0,21	0,20	0,21	0,20	0,28	0,23	0,26	0,24	0,56	0,60	0,61	0,64	0,70	0,72	0,76	0,80	0,84	0,85	0,82	0,89	0,85	0,90	0,68	0,76	0,63	0,78	0,57	0,63	0,57	0,61	0,52	0,52	0,62									
Températures																																																																		
1	2,5	14°7	14°7	15°1	13°9	14°3	15°1	15°2	14°6	14°5	15°2	14°6	14°7	13°8	14°8	14°8	14°2	13°7	14°8	13°7	14°5	13°7	15°1	13°7	13°9	13°6	15°1	14°8	15°	14°7	16°8	16°9	16°9	16°8	16°8	16°6	16°6	16°5	16°4	16°4	16°3	16°3	16°2	16°2	16°0	16°0	15°9	16°0	15°8	15°8	15°7	15°8	15°6	15°7	15°8											
10	18,5	16°4	16°4	16°4	16°4	16°4	16°4	16°4	16°4	16°3	16°4	16°4	16°4	16°3	16°3	16°4	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°4	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3	16°3									

— Limite à 10 g/l
 - - - Limite à 8 g/l