

iN 57a

Ministère des Travaux Publics
Ponts et Chaussées
Administration des Voies Hydrauliques

RAPPORT DE STAGE

J. J. PETERS

Ingénieur des Ponts et Chaussées
en stage.

Laboratoire de Recherches Hydrauliques
Borgerhout-Anvers

TABLE DES MATIERES.

	<u>page.</u>
CHAPITRE I. - INTRODUCTION.	
CHAPITRE II- LA SEDIMENTATION DANS LA REGION D'ANVERS	3
A. Régime de marée de l'Escaut	3
B. Problèmes techniques posés par les mesures in situ et en laboratoire	4
C. La salinité	6
D. Les suspensions	8
E. Les sédiments	10
F. Les mécanismes d'envasement	12
CHAPITRE III- INTERET ECONOMIQUE DE L'ETUDE DE L'ENVA- SEMENT DES ACCES DU PORT D'ANVERS	14
A. Coût d'un dragage de la vase dans le chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet	14
B. Intérêt de l'étude de l'envasement du chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet	15
CHAPITRE IV- RELATIONS ENTRE L'ADMINISTRATION ET LES UNIVERSITES	17
A. Apport des universités à l'étude de la sédimen- tologie de l'Escaut	18
B. Aspects positifs et négatifs de la première année de collaboration	20
C. Proposition d'amélioration à apporter à l'étude actuelle	21
D. Relations administration-universités dans d'autres pays	22
CHAPITRE V- DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES D'UN BATEAU HYDROGRAPHIQUE	23
A. Caractéristiques générales	24
B. Choix du type de bateau	26
C. Conclusions	30
CHAPITRE VI- CONCLUSIONS	30
BIBLIOGRAPHIE.	

ANNEXE I.

Caractéristiques générales de la sédimentologie de l'Escaut maritime. Mesures en nature.

ANNEXE II.

Envasement du chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet et de la darse du tunnel E3.

ANNEXE III.

Le problème de la mesure de la granulométrie des sédiments et suspensions.

LA SEDIMENTOLOGIE DE L'ESCAUT MARITIME.

CHAPITRE I. - INTRODUCTION.

La sédimentologie de l'Escaut maritime est l'étude des sédiments de l'estuaire, de leurs mécanismes de dépôt et de transport, de leurs diverses origines et de leurs transformations.

Les sédiments ou formations sédimentaires, sont formés par le dépôt, dans un fluide, de particules solides transportées par celui-ci. Le fluide peut être par exemple l'eau ou l'air.

Le Laboratoire de Recherches Hydrauliques étudie depuis de nombreuses années l'Escaut.

Un premier modèle représentant l'Escaut de Gand à l'embouchure a permis de recueillir des informations sur l'hydraulique du fleuve. C'est grâce à lui que furent analysés les profils instantanés de la marée, la répartition des vitesses et des courants, la propagation de la marée etc

L'étude des chenaux, des passes navigables et de l'évolution des fonds depuis Anvers jusqu'à Hansweert a pu être faite grâce à un second modèle construit en 1957. Cette étude a amené à proposer des améliorations qui sont actuellement en cours d'exécution. Un exemple: les digues submersibles destinées à canaliser les courants et, par là même, à maintenir la profondeur d'eau nécessaire à la navigation à hauteur des seuils.

En janvier 1968, ce modèle, dont les extrémités furent reculées jusqu'à Gand et Baarland a été mis en service pour étudier un nouveau projet d'amélioration de la courbe de Bath.

Depuis plusieurs années , les problèmes de l'ensablement et de l'envasement des ouvrages d'art du port d'Anvers apparaissent comme de plus en plus importants. On est placé devant un certain nombre d'options au sujet des plans d'extension du port.

Les envasements importants constatés dans les chenaux d'accès aux écluses et en particulier à l'écluse maritime de Zandvliet ont rendu indispensable une étude approfondie des mécanismes de sédimentation qui doit permettre de choisir l'implantation et les types d'ouvrages d'art (écluses, darses etc...) dont la construction est projetée sur la rive gauche du fleuve.

Le problème revêt un aspect économique certain.

En effet, le rendement d'un port dépend de la qualité de la passe le reliant à la mer et du degré d'accessibilité des darses.

L'idée d'une darse ouverte à la marée a été reprise pour l'extension du port vers la rive gauche.

Le but du présent rapport est d'étudier le problème de l'envasement et de l'ensablement des accès du port d'Anvers et des ouvrages projetés sur la rive gauche dans la région d'Anvers.

La première partie sera consacrée aux problèmes techniques et aux processus de sédimentation.

Plusieurs aspects techniques seront développés dans des annexes, ceci dans le but d'alléger le texte.

./..

Ce sont :

Annexe I : Caractéristiques générales de la sédimentologie de l'Escaut maritime.
Mesure en nature.

Annexe II : Envasement du chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet et de la darse du tunnel en construction sous l'Escaut à Anvers.
Ce tunnel appartient au réseau routier européen. Nous le désignerons par sa dénomination internationale E3 .

Annexe III : Le problème de la mesure de la granulométrie des sédiments et suspensions.

La seconde partie traitera de l'intérêt économique de cette étude.

Dans une troisième partie nous examinerons l'intérêt d'une collaboration des Universités à cette étude, ainsi que les conditions de leurs interventions.

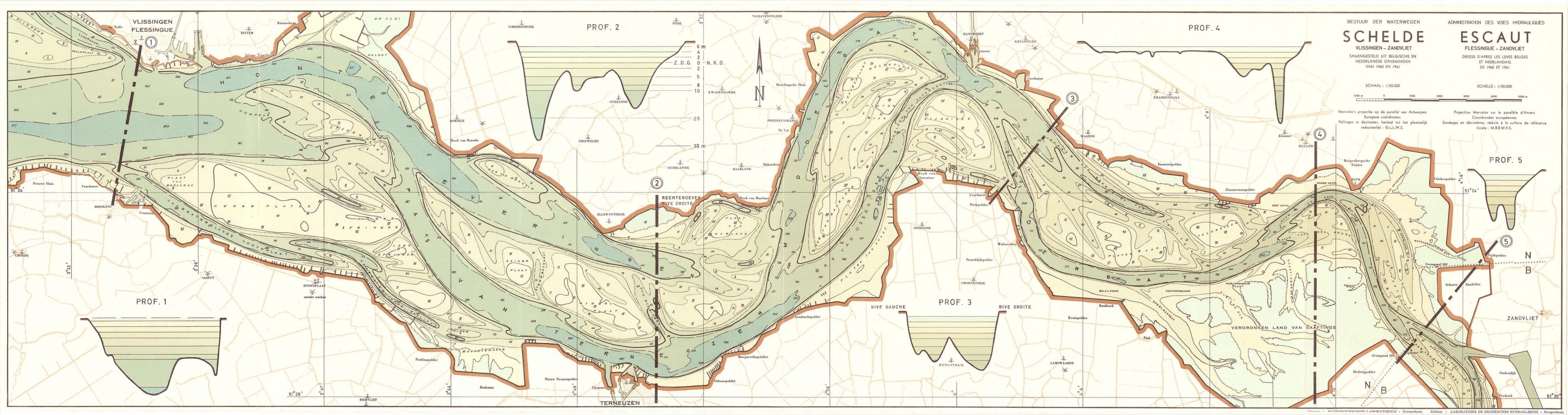
Dans une quatrième partie, nous examinerons les caractéristiques que devrait posséder un bateau hydrographique destiné à des mesures sédimentologiques.

Comme j'aurai recours à de nombreux termes techniques, j'ai cru utile de dresser un lexique que le lecteur pourra consulter à la dernière page de l'annexe I.

CHAPITRE II . - LA SEDIMENTATION DANS LA REGION D'ANVERS.

A. Régime de marée de l'Escaut.

L'estuaire de l'Escaut est caractérisé par son faible débit amont et par l'importance de la marée.



BESTUUR DER WATERWEGEN
SCHELDE
 VLISSINGEN - ZANDVLIET
 SAMENGESTELD UIT BELGISCHE EN
 NEDERLANDSE OPNEMINGEN
 VAN 1960 EN 1961

ADMINISTRATION DES VOIES HYDRAULIQUES
ESCAUT
 FLESSINGUE - ZANDVLIET
 DRESSE D'APRES LES LEVES BELGES
 ET NEERLANDAIS
 DE 1960 ET 1961

SCHAAL: 1/50.000
 ECHELLE: 1/50.000

1000 m 0 1000 2000 3000 4000 5000 m

Mercator's projectie op de parallel van Antwerpen
 Europese coördinaten
 Peilingen in decimeter, herleid tot het plaatselijk
 reductievlak: G.L.L.W.S.

Projection Mercator sur la parallèle d'Anvers
 Coordonnées européennes
 Sondages en décimètres, réduits à la surface de référence
 locale: M.B.B.M.V.E.

VLISSINGEN
 FLESSINGUE

PROF. 2

PROF. 4

PROF. 5

PROF. 1

PROF. 3

RECHTEROEVER
 RIVE DROITE

RIVE GAUCHE

RIVE DROITE

N
 B

ZANDVLIET

TERNEUZEN

51° 20'

51° 20'

51° 24'

BIERVLIET

LAMSWAARDE

Hedwigpolder

Frederik

Grenspaal 269

Grenspaal 269

51° 24'

②

③

④

⑤

Z. D. G.

N. K. D.



30 m

6 m

4 m

2 m

0

8 m

20

30

40

50

60

70

80

90

100

110

120

130

140

150

160

170

180

190

200

210

220

230

240

250

260

270

280

290

300

310

320

330

340

350

360

370

380

390

400

410

420

430

440

450

460

470

480

490

500

510

520

530

540

550

560

570

580

590

600

610

620

630

640

650

660

670

680

690

700

710

720

730

740

750

760

770

780

790

800

810

820

830

840

850

860

870

880

890

900

910

920

930

940

950

960

970

980

990

1000

N B

BESTUUR DER WATERWEGEN

ADMINISTRATION DES VOIES HYDRAULIQUES

SCHELDE

ESCAUT

ZANDVLIET - ANTWERPEN

ZANDVLIET - ANVERS

SAMENGESTELD UIT BELGISCHE
OPNEMINGEN VAN 1960 EN 1961
EN UIT DE HYDROGRAFISCHE KAARTEN
VAN DE ANTWERPSE ZEEDIENSTEN

DRESSE D'APRES LEVES BELGES
DE 1960 ET 1961 ET CARTES
HYDROGRAPHIQUES DES SERVICES
MARITIMES D'ANVERS

HORizontale schaal : 1/50000

Echelle en plan : 1/50000

Mercator's projectie op de parallel van Antwerpen
Europese coördinaten
Peilingen in decimeter, herleid tot het plaatselijk
reductievlak : G.L.L.W.S.

Projection Mercator sur la parallèle d'Anvers
Coordonnées européennes
Sondages en décimètres, réduits à la surface de référence
locale : M.B.B.M.V.E.

PROF. 6

Linkeroever Rive gauche Rechteroever Rive droite

PROF. 7

Rive gauche Rive droite

GETIEN - MARÉES

Waarnemingsplaatsen Postes d'observation	Tienjarige gemiddelden 1951-1961 Moyennes décennales											Reductievlak Surface de référence		
	Gemiddelde hoogten - Cotes moyennes								Gemiddelde vertraging op Vlissingen Retard moyen sur Flessingue		Gemiddelde duur Durée moyennes		Gemidd. hangingsnel. Établissement moyen du port	
	H.W. M.H.	L.W. M.B.	Middens-stand Hauteur moyenne	Springtij Vive eau	Doodtij Morte eau	H.W. M.H.	L.W. M.B.	H.W. M.H.	L.W. M.B.	H.W. M.H.	L.W. M.B.			stijging gagnant
VLISSINGEN FLESSINGUE	4,45	0,66	2,56	4,82	0,46	3,97	0,99	0,00	0,00	5,56	6,29	0h57	G.L.L.W.S. (1915-1920)	
TERNEUZEN	4,70	0,63	2,67	5,04	0,40	4,21	0,96	0,29	0,28	5,56	6,29	1h26		
HANSWEERT	4,96	0,58	2,77	5,30	0,38	4,51	0,98	1,03	0,58	6,01	6,24	2h00	G.L.L.W.S. (1952-1958)	
BATH	5,11	0,56	2,84	5,44	0,35	4,59	0,84	1,27	1,39	5,44	6,41	2h24		
PROSPERPOLDER	5,08	0,47	2,78	5,47	0,29	4,58	0,72	1,32	1,51	5,37	6,48	2h29		
LIEFKENSHOEK	5,16	0,49	2,83	5,55	0,32	4,65	0,73	1,40	2,06	5,30	6,55	2h37		
FORT St. MARIE	5,27	0,49	2,88	5,66	0,32	4,75	0,74	1,48	2,21	5,23	7,02	2h45		
ANTWERPEN ANVERS	5,27	0,46	2,87	5,66	0,31	4,81	0,70	2,00	2,40	5,16	7,09	2h57		

N.B. Al de hoogten zijn herleid tot het plaatselijk reductievlak : Gemiddeld Laag Laagwater Spring (G.L.L.W.S.)
Toutes les cotes sont réduites à la surface de référence locale : Moyenne des Basses Basses Mers de Vive Eau (M.B.B.M.V.E.)

PROF. 8

PROF. 9

9

Uitgave : WATERBOUWKUNDIG LABORATORIUM - Borgerhout. Edition : LABORATOIRE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES - Borgerhout.

6/66

L'amplitude de la marée est d'environ 3,75m à l'embouchure et de 2m au barrage de Gentbrugge, qui, à 160 km de la mer, arrête la progression de la marée. Cette amplitude atteint un maximum de près de 5 m aux environs d'Anvers.

Au flot il rentre dans l'estuaire à Flessingue un volume de 1.065 millions de m³ pendant un peu plus de six heures. Ce volume de flot est de 61,1 millions de m³ à Anvers. Pendant ce temps le débit amont moyen à Anvers est de 80 m³/sec. Le volume qui correspond à ce débit amont et qui s'écoule pendant les six heures du flot représente 1,728 millions de m³, soit quelques pourcents du débit de flot.

La marée dans les estuaires provoque un mouvement de va et vient de l'eau autour d'une position moyenne. Ce mouvement est appelé la marée horizontale.

A partir d'Anvers, et en allant vers la mer, les sections transversales du fleuve croissent fortement. La résultante entre les vitesses moyennes de flot et de jusant est une vitesse dirigée vers la mer. Cette vitesse diminue fortement à partir d'Anvers en allant vers la mer puisque les sections transversales croissent rapidement au contraire du débit amont.

En bref, on peut dire que l'estuaire de l'Escaut est un immense entonnoir dans lequel une marée importante crée des courants de marée élevés et un mélange énergétique, tandis que l'écoulement moyen vers la mer mesuré sur une marée est très faible.

B. Problèmes techniques posés par les mesures in situ et en laboratoire.

1. L'étude en nature de la sédimentologie des estuaires demande un appareillage fort diversifié. On peut classer les mesures en trois catégories.

- mesures hydrauliques.
- mesures sédimentologiques.
- mesures physico-chimiques.

a) Mesures hydrauliques.

Les vitesses nous intéressent en premier lieu parce qu'ils déterminent le transport du sédiment et de la suspension et conditionnent leur dépôt.

La turbulence est importante mais n'a pas encore pu être mesurée in situ.

Pour les mesures de vitesses nous avons utilisé des moulinets hydrographiques et des flotteurs (voir annexe I) .

b) Mesures sédimentologiques.

(1) Mesure de la quantité de matières en suspension.

Ce point sera exposé en détail dans l'annexe I.

(2) Prélèvements de sédiments en place (voir annexe II).

c) Mesures physico-chimiques.

La sédimentation est influencée par certaines caractéristiques de l'eau telles que la salinité, la température, l'acidité etc... Il est important de mesurer celles-ci in situ.

Dans certains cas, l'eau est pompée et circule dans des cellules de mesure. Dans d'autres cas l'élément de mesure est immergé (voir annexe I).

2. L'étude en laboratoire pose également de nombreux problèmes par la complexité des phénomènes.

Les recherches sont faites en collaboration avec des laboratoires des Universités de Bruxelles et de Louvain.

L'aspect chimique est traité par le Laboratoire de Chimie Industrielle de l'Université Libre de Bruxelles, l'aspect géologique l'est par le Laboratoire des Sédiments Récents de l'Université Catholiques de Louvain.

Cette étude aborde les problèmes suivants :

- la composition chimique ou minéralogique des eaux, suspensions et sédiments.
- la granulométrie des suspensions et des sédiments.
- l'influence des facteurs physico-chimique sur la sédimentation : la floculation.
- l'origine des sédiments.

Le problème de la mesure de la granulométrie est exposé en détail dans l'annexe 3.

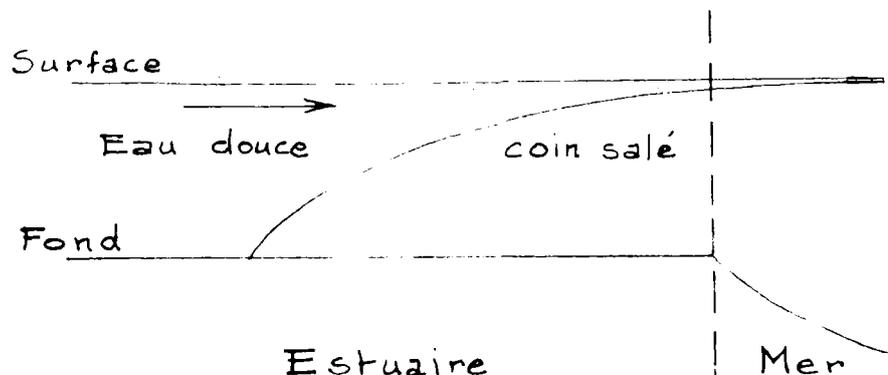
C. La salinité.

L'eau des océans a en moyenne une salinité de 35,5‰, c'est-à-dire 35,5 gr de sels par litre. Les eaux de rivière ont une salinité inférieure à 0,3 gr/l.

La conductivité est une mesure de la salinité. Cette mesure, précise et reproductible, a été recommandée par l'Association Internationale d'Océanographie Physique (R1).

Dans les estuaires à grand débit d'amont, l'eau douce n'a pas le temps de se mélanger avec l'eau salée qu'elle y rencontre. Etant moins dense, elle s'écoule au-dessus de cette dernière.

L'eau de mer forme un coin d'eau salée (qu'on appelle le "coin salé").



Les estuaires à petit débit amont et à forte marée ne présentent pas de coin salé. On obtient un mélange plutôt qu'une superposition de deux sortes d'eaux. Ce mélange a une origine purement cinématique, puisqu'il faudrait des mois pour que la diffusion mélange intimement deux eaux de salinités différentes.

Entre ces deux extrêmes on trouve une infinité de cas possibles suivant l'importance du débit amont, l'amplitude de la marée, la géométrie de l'estuaire etc..

L'Escaut se classe parmi les estuaires à forte marée et à petit débit amont avec une géométrie favorable pour le mélange.

Localement, l'oscillation de l'eau dans l'estuaire crée une variation de salinité périodique en fonction du temps.

A l'embouchure, la salinité constante est celle de la mer. Au fur et à mesure que l'on remonte l'estuaire la salinité décroît. A une certaine distance de l'embouchure, distance qui est fonction du débit amont, la salinité est celle des eaux de rivières. Dans cette localité, la marée n'influence pas la salinité. En période humide nous trouvons cette limite à Anvers alors qu'en période sèche elle se situe en amont du Rupel.

Entre la mer et la limite dont il a été question ci-dessus, l'amplitude de la variation de salinité avec la marée augmente au fur et à mesure qu'on s'éloigne de ces extrémités. En période sèche, par exemple, l'amplitude de la courbe de salinité est maximale près de Doel (voir fig.1 et 2 , annexe I).

La salinité est pratiquement constante dans les sections transversales.

Nous verrons l'importance de la salinité dans l'étude des processus de sédimentation.

D. Les suspensions.

L'eau de l'Escaut est chargée de particules solides qui sont en suspension ou sont transportées par charriage.

Comme nous nous limitons dans cette étude à l'envasement des accès du port d'Anvers, nous nous attacherons surtout au cas des suspensions.

Les particules solides, ayant dans l'eau une densité supérieure à 1 , ont tendance à se déposer au fond. Le mécanisme du transport solide est actuellement encore mal connu. On peut cependant affirmer que cette sédimentation est plus forte lorsque la vitesse et la turbulence de l'eau diminuent.

De plus en plus on met l'accent sur l'importance de la turbulence. Bagnold (B1) émet l'hypothèse selon laquelle la turbulence serait anisotrope. La force verticale ainsi créée tendrait à compenser l'action de la pesanteur. Plusieurs travaux (B10, W2) en cours ont pour objet d'étudier l'influence de la turbulence. Avant qu'ils ne puissent aboutir il faudra résoudre le problème délicat de sa mesure.

Dans le fleuve lui-même les suspensions renferment des particules allant d'une fraction de micron à un ou deux millimètres. Dans le chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet et dans la darse E3 les particules ne dépassent pas le dixième de millimètre. Les courants y sont trop faibles pour que des particules plus grosses puissent y être transportées. Le diamètre moyen des sédiments n'y est d'ailleurs que de quelques microns. On peut parler d'envasement par opposition à ensablement.

L'ensablement est provoqué par le transport des sédiments au fond sous l'influence des courants. Ce sont surtout les sables, dont le diamètre des grains dépasse 60 microns qui sont transportés de cette façon.

La vase est composée des minéraux suivants : le quartz, la calcite et des argiles (kaolinite et muscovite). Elle renferme également des combinaisons du fer et des matières organiques.

Ce sont les argiles et les matières organiques qui, en présence d'eau salée, déterminent la floculation . Celle-ci est discutée dans l'annexe II.

Remarquons qu'ingénieurs et géologues donnent une signification différente pour les termes sable et argile.

L'ingénieur appelle sable tout sédiment dont les grains sont plus grands que 100 microns et argile tout sédiment dont les grains sont inférieurs à 16 microns.

Le géologue ou le chimiste appelle argile un ensemble de particules composées de minéraux silico-alumineux.

C'est ainsi qu'un sédiment dont les grains sont inférieurs à 5 microns, mais dont la composition minéralogique ne renferme que 30 % de minéraux silico-alumineux recevra de l'ingénieur la dénomination d'argile.

Le géologue dira que le sédiment ne renferme que 30% d'argiles.

Remarquons que certaines vases de la région de l'Escaut, entre autre celles d'un ancien bras de l'Escaut, le Grote Geul, contiennent moins de 15% de minéraux silico-alumineux (P1).

Dans de nombreux cas la vase contient beaucoup de carbonates précipités dont les diamètres des particules sont inférieurs à cinq microns.

E. Les sédiments.

Lorsque les flocons de vase se déposent ils créent des sédiments légers. Au bout d'un certain temps l'eau s'échappe des interstices entre les grains et le tassement commence. Lorsqu'une nouvelle couche vient recouvrir la première, la charge sur cette dernière augmente. L'eau s'échappe par les canaux capillaires reliant les interstices. Le tassement augmente, ce qui crée une élévation du poids spécifique et une diminution de la teneur en eau.

La matière solide qui compose la vase a poids spécifique moyen de 2500 kg/m³. Une vase nouvellement déposée qui n'a pas encore tassé renferme une grande quantité d'eau (poids spécifique \pm 1000 kg/m³), ce qui abaisse son poids spécifique.

Le poids spécifique minimum que nous avons mesuré est de 1050kg/m³. Après tassement une grande partie de l'eau s'est échappée et le poids spécifique est devenu 1600kg/m³. Le volume de la vase a alors diminué de 12 fois.

Le tassement fait continuellement place à un nouveau sédiment. Ainsi à Zandvliet l'épaisseur de la couche de vase reste pendant des mois aux environs de cinq mètres alors que chaque jour se dépose environ dix kilos de matières solides par mètre carré.

Le mécanisme de consolidation de la vase ressemble à celui des argiles (T1). Nous nous proposons de les comparer au laboratoire.

La vase est comprise entre un lit de sable (le fond du chenal) qu'il faut considérer comme peu ou pas perméable et l'eau de l'Escaut. Elle est soumise à la pression de l'eau, variable avec la marée.

On peut supposer le sable sous-jacent comme imperméable. Même si au début du dépôt une circulation d'eau y est possible, les particules de vase ont vite fait de colmater les interstices entre les grains de sable, ce que montrent d'ailleurs les échantillons prélevés.

La courbe des tassements (T1) pour une argile montre que la vitesse de tassement est grande au début de l'expérience, qu'elle diminue peu à peu et tend vers zéro.

Au début la pression causée par la surcharge extérieure est reprise par l'eau intersticielle. Lorsque cette eau est expulsée en quantité suffisante, les grains se touchent et reprennent une partie des pressions.

A la fin de la consolidation, l'écoulement de l'eau intersticielle s'arrête et la surcharge extérieure est reprise par les éléments solides.

Des essais sont actuellement en cours pour déterminer à partir de quel poids spécifique la vase gêne la navigation.

Un bateau ayant un tirant d'eau de 10 m et se trouvant dans le chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet par marée basse s'enfoncé de 50 centimètres environ dans la vase. Celle-ci est actuellement encore très fluide dans sa partie supérieure.

Les premiers essais montrent que la navigation est gênée par la vase lorsque le poids spécifique de celle-ci dépasse 1200 kg/m³.

Remarquons qu'un bateau qui s'enfonce dans une vase très fluide voit son tirant d'eau diminuer. Le poids spécifique du fluide entourant la coque augmente et provoque une diminution du poids apparent du bateau.

F. Les mécanismes d'envasement.

Dans ce travail il sera principalement question de la darse E3 et du chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet. Nous proposons une théorie basée sur des mesures faites en 1967 et au début de 1968. Mais il est certain que des mesures répétées et échelonnées sur les prochaines années seront nécessaires pour contrôler les résultats obtenus.

La collaboration du laboratoire de Chimie Industrielle de l'Université Libre de Bruxelles a rendu possible l'élaboration de la théorie que nous proposons.

Deux études faites par des chercheurs de ce laboratoire en sont à la base. L'une concerne l'origine des sédiments, l'autre la floculation des suspensions.

Plusieurs auteurs ont supposé les sédiments de l'Escaut d'origine marine, en particulier les argiles (D1), qui jouent un rôle primordial dans la floculation. Nous avons examiné la question de plus près.

Certaines argiles sont caractéristiques du milieu marin, d'autres du milieu continental.

Les argiles trouvées dans les sédiments de l'Escaut étant de la 1ère espèce, on avait conclu à leur origine marine. L'étude dont il est question et qui concernait les sels dissous, et en particulier la silice, a néanmoins montré qu'une argile continentale, dans des conditions particulières - conditions qui sont réalisées dans l'estuaire de l'Escaut - peut se transformer en une argile marine.

On pouvait dès lors penser qu'une partie de la fraction argileuse, cause de la floculation, était apportée par les affluents et par le cours supérieur de l'Escaut. Des mesures faites par le Laboratoire de Sédiments Récents de l'Université Catholique de Louvain montraient des débits solides parfois très importants sur ces affluents.

Les suspensions amenées par le débit amont sont probablement dans un état peu floculé. Lorsqu'elles atteignent une eau de salinité de 1 ‰, la floculation commence et devient pratiquement totale dans une eau dont la salinité est de 5 ‰.

Voyons comment ceci peut expliquer les variations saisonnières de l'envasement de la darse E3 et du chenal d'accès à l'écluse maritime à Zandvliet.

En période humide, la limite de salinité se situe entre la darse E3 et l'écluse de Zandvliet (voir annexe I).

A E3 la floculation est faible, et comme la variation de salinité est pratiquement nulle il n'y a pas de courants de densité entre la darse et l'Escaut. L'échange d'eau est limité au remplissage de la darse dû à la marée. L'envasement y est faible (voir annexe II).

A Zandvliet la floculation est importante puisque la salinité est voisine de 5 ‰. La variation de salinité au cours de la marée crée des courants de densité dans le chenal d'accès. L'échange entre l'Escaut et celui-ci est donc augmenté. L'envasement y est important (voir annexe II).

En période sèche la limite de salinité recule en amont d'Anvers (voir annexe I).

A E3 et à Zandvliet la floculation est importante, de même que les variations de salinité au cours de la marée dans l'Escaut. Les courants de densité créent des échanges d'eau plus conséquents entre l'Escaut et la darse ou le chenal d'accès. Les envasements y sont élevés (voir annexe II).

La salinité a donc une influence double : d'une part sur la floculation, d'autre part sur les courants de densité.

Bien qu'il soit certain que la géométrie des ouvrages cités, les courants dans l'Escaut, la marée et bien d'autres facteurs ont une influence sur les mécanismes d'envasement, la salinité joue toutefois un rôle primordial.

Nos mesures permettent de prévoir un envasement important des darses ou des chenaux d'accès à des écluses qui seraient construits sur la rive gauche aux environs de Doel. En effet, il n'y a pas de grandes différences entre les variations de salinité en ces deux localités qui ne sont d'ailleurs séparées que de quelques kilomètres.

D'autre part la turbidité de l'eau est semblable à celle mesurée à Zandvliet.

On peut prévoir le rythme d'envasement d'un ouvrage d'art à Doel à partir des données que nous possédons et de celles que nous pouvons recueillir à Zandvliet.

Pour reproduire en modèle les principaux phénomènes qu'il faut considérer il faut utiliser différentes similitudes. La seule échelle qui permet de respecter les similitudes dont il faut tenir compte est l'échelle 1/1, ce qui exclut le modèle réduit.

CHAPITRE III. - INTERET ECONOMIQUE DE L'ETUDE DE L'ENVASEMENT DES ACCES DU PORT D'ANVERS.

A. Coût d'un dragage de la vase dans le chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet.

Les caractéristiques de la vase, la sédimentation de la vase, les moyens de dragage employés et surtout les modes de contrôle

des travaux de dragage font qu'il est nécessaire de prévoir des clauses au contrat qui diffèrent fort de celles que l'on rencontre dans les cahiers des charges habituels.

Nous citerons, à titre d'exemple, le cas où l'on paie le dragage non pas au mètre cube de produit dragué, mais au mètre carré de surface draguée, quel que soit l'épaisseur et la densité de la couche enlevée.

Prenons un cas concret, avec comme base de calcul les valeurs suivantes: soit 65 F le prix du mètre carré de vase dragué; soit 430.000 m² la surface. Un dragage de ce chenal revient à 28 millions de francs; ce prix comprend l'installation du matériel flottant et des conduites de refoulement.

Le coût d'un dragage du chenal est élevé car le travail est souvent interrompu par l'entrée ou la sortie des navires. Le dragage commence par les zones latérales situées en dehors du passage des bateaux. La bande centrale est nettoyée en dernier lieu.

B. Intérêt de l'étude de l'envasement du chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet.

Nous ne disposons encore que de quelques données qui permettent de calculer l'économie réalisée à ce jour et d'évaluer approximativement celle qu'on pourra faire dans l'avenir.

Les mesures par forage permettent de suivre l'envasement. Or, des essais en laboratoire ont montré que la navigation était possible dans une vase dont le poids spécifique est inférieur à 1200kg/m³.

./..

Les dragages devront commencer lorsque la vase de poids spécifique 1200 atteindra la cote -10,50 m (NKD). Or le fond du chenal se trouve à la cote -15,00 m. Ceci nous donne une réserve de 4,50m. Rappelons que le fond de l'écluse est à la cote - 13,50 m et que le seuil à l'Escaut est à -10,00m.

En octobre 1967 une drague a curé le chenal d'accès. Deux mois plus tard, les écho-sondeurs signalaient quatre mètres de vase, ce qui allait normalement entraîner de nouveaux dragages au cours du mois suivant.

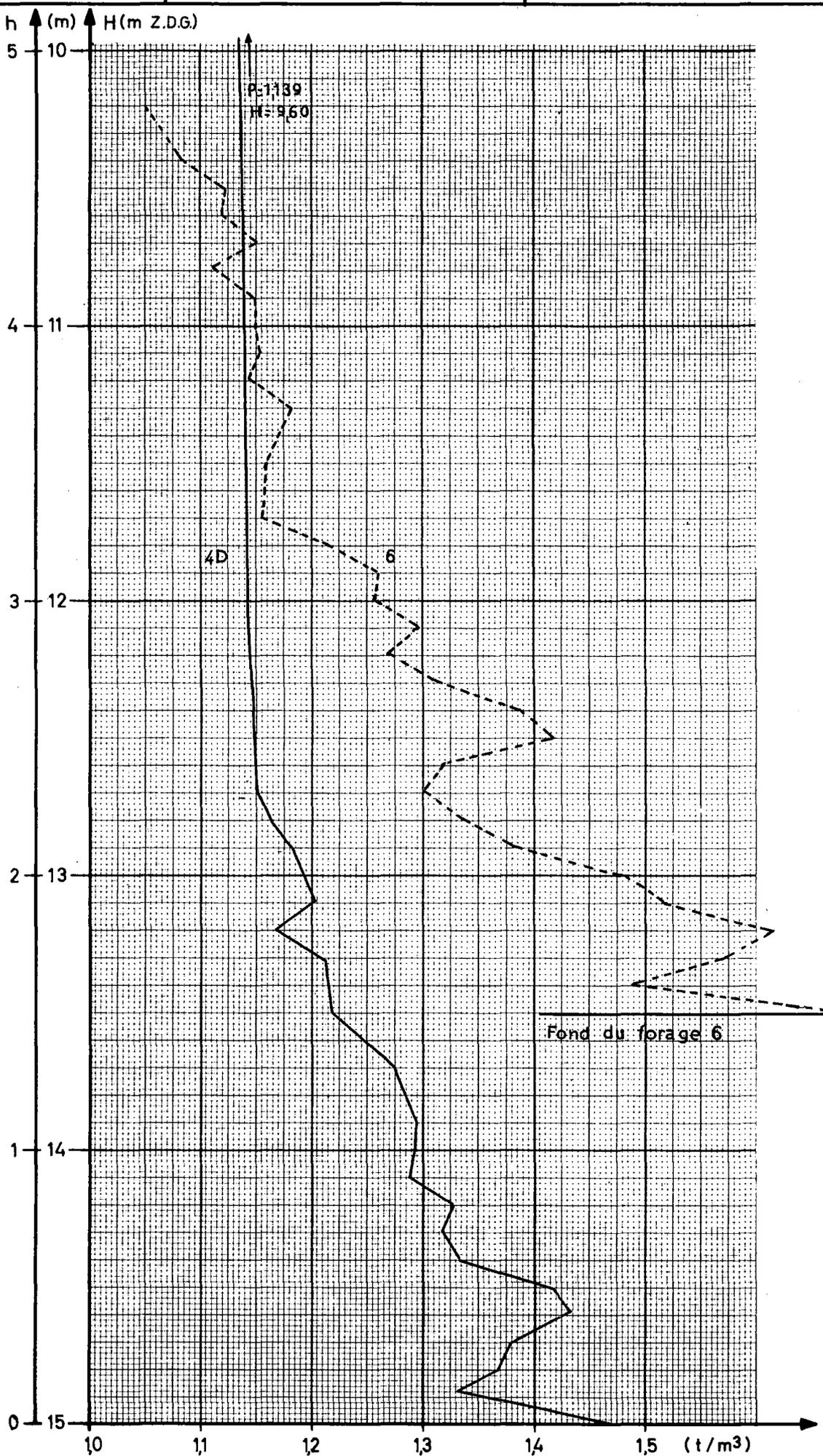
Cependant, les forages indiquaient moins d'un mètre de vase consolidée et trois mètres de vase fluide ne présentent aucun danger pour la navigation.

Depuis nous suivons l'envasement. Au mois d'avril, soit six mois après le dernier dragage, nous avons constaté que la situation n'était toujours pas dangereuse.

Ceci a évité de draguer deux fois, ce qui aurait coûté environ 56 millions de francs.

On peut se demander quand il faudra intervenir. Après avoir été constant pendant trois mois, le rythme d'envasement a diminué. En étant optimiste, on peut espérer remettre les dragages jusqu'au mois de septembre, voire même octobre. En étant pessimiste on peut craindre qu'il faille draguer au mois de juin.

Supposons que sans les forages on soit obligé de draguer tous les deux ou trois mois. En prolongeant cette période jusqu'à huit mois on ferait une économie annuelle de trois dragages, soit environ 84 millions de francs. En draguant tous les ans, l'économie réalisée serait de 112 millions de francs environ.



Il faut dire que le fait d'avoir prévu le fond du chenal à la cote -15,00m, est particulièrement bénéfique. La fig. 1 représente l'évolution des poids spécifique en fonction de la profondeur dans deux forages faits à Zandvliet dans le chenal d'accès. Le forage 6 provient d'une région où le fond en sable est à la cote -13,50m. Le forage 4 provient d'une région où le fond est à la cote -15,00 m.

Au cas où d'autres écluses ou darses seraient construites sur une des rives du fleuve, on aurait même intérêt à augmenter cette surprofondeur dans la mesure du possible. Le rythme des dragages serait ainsi réduit.

La diminution de l'envasement observé depuis deux mois est probablement dû à l'évolution du tassement, à une variation saisonnière de la salinité, de la température, de la nature des suspensions.

On a observé qu'à l'endroit où passent les navires l'envasement est moins important que près des murs de quai. Cela est probablement dû à l'effet des hélices qui remettent régulièrement la vase des couches supérieures en suspension.

CHAPITRE IV. - RELATIONS ENTRE L'ADMINISTRATION ET LES UNIVERSITES.

Lorsqu'en 1965 le Laboratoire de Recherches Hydrauliques a entrepris l'étude de la sédimentologie de l'Escaut maritime, il est apparu que les aspects chimiques et géologiques étaient fort importants.

L'étude des vases du Grote Geul (P1) avait permis de se rendre compte de l'aide que pouvaient apporter les universités dans de tels problèmes. Nous avons collaboré étroitement pendant une année avec

l'Université Libre de Bruxelles en vue de rechercher une solution au problème de la stabilisation des talus de la darse B1 du port d'Anvers, au passage d'anciens bras de l'Escaut remplis de vase, dont le "Grote Geul".

Fin 1966, deux contrats d'une durée d'un an furent conclus, l'un avec le Laboratoire des Sédiments Récents de l'Université Catholique de Louvain, l'autre avec le Laboratoire de Chimie Industrielle de l'Université Libre de Bruxelles.

En mars 1968 ces contrats furent prorogés d'une année.

Quel est l'apport des Universités ?

Quels sont les aspects positifs et négatifs de la première année de collaboration ?

C'est que nous allons examiner. Après quoi nous proposerons quelques améliorations qui pourraient être apportées à cette collaboration.

Nous terminerons par un bref tour d'horizon des relations administration-universités dans le domaine de la sédimentologie dans d'autres pays.

A. Apport des Universités à l'étude de la sédimentologie de l'Escaut.

Le programme d'étude pour l'année est établi de commun accord entre l'administration et les universités.

L'administration définit le cadre général de l'étude. Ainsi pour le contrat actuellement en cours l'accent est mis sur le problème de l'envasement des accès du port d'Anvers.

Les universités proposent les mesures et essais à faire.

On laisse suffisamment de souplesse dans le programme pour pouvoir l'adapter au fur et à mesure de l'avancement des recherches , en fonction des difficultés rencontrées.

Les rapports sont trimestriels. La réception d'un rapport donne lieu au paiement d'un quart du budget.

Un rapport final doit être remis à l'expiration du contrat.

Les mesures et prélèvements d'échantillons en nature sont faits soit par le Laboratoire de Recherches Hydrauliques, soit par les universités, soit ensemble.

Un contact est maintenu au cours de l'année. Des appareils de mesure sont mis à la disposition des universités.

A l'Université Catholique de Louvain on a demandé d'étudier les sédiments et leurs déplacements.

1. Sur le terrain.

- a. Effectuer des forages sur les rives de l'Escaut.
- b. Effectuer des forages sous eau dans les sédiments du lit de l'Escaut.
- c. Faire le bilan des déplacements de sédiments pendant des marées complètes.
- d. Etude des algues et diatomées.
- e. Etude des déplacements de sédiments par traceurs radio-actifs.

2. En laboratoire.

- a. Examen des structures des sédiments prélevés par carottier.
- b. Analyse granulométrique.
- c. Composition minéralogique.
- d. Matières organiques.

Au Laboratoire de Chimie Industrielle de l'Université Libre de Bruxelles on a demandé d'étudier les eaux et suspensions ainsi que les processus de sédimentation.

1. Etude des eaux et suspensions.

- a. Turbidité.
- b. Composition chimique des suspensions.
- c. Composition minéralogique des suspensions.
- d. Analyse granulométrique des suspensions.
- e. Analyse chimique des eaux.

2; Etude des processus de sédimentation.

- a. Précipitation des sels dissous.
- b. Sédimentation et influence de la salinité sur la floculation.

B. Aspects positifs et négatifs de la première année de collaboration.

Nous avons obtenus un résultat certain. L'essai de théorie concernant l'influence de la salinité sur la sédimentation a pu voir le jour grâce à la collaboration d'une des universités.

La sédimentologie étant une science récente, les techniques ne sont pas encore bien établies. Il y a donc un travail de recherche fondamentale très important. Les universités sont particulièrement bien placées pour l'effectuer. Elles disposent d'un appareillage spécialisé et d'un personnel ayant une formation suffisamment large.

De plus, ces laboratoires peuvent s'adresser sans difficulté à d'autres services pour des problèmes particuliers. C'est ainsi que

l'influence des diatomées, algues monocellulaires, sur la composition chimique des eaux et des argiles a nécessité la collaboration de biologistes.

En général les chercheurs des universités ont tendance à étudier certains aspects du problème qui n'ont pas un intérêt immédiat pour l'administration. Aussi longtemps que cela ne nuit pas la suite du programme d'étude, il faut encourager ces recherches. En effet il est important de mieux comprendre l'ensemble du problème de la sédimentologie de l'Escaut maritime. Ainsi l'examen de certains constituants chimiques dissous dans l'eau de l'Escaut n'avait apparemment pas de lien direct avec l'envasement à Zandvliet. Il a cependant permis de montrer que les argiles ne peuvent être utilisés pour déterminer l'origine des sédiments (W3).

Les contrats prévoyant des rapports d'activité trimestriels. Leur but est de pouvoir suivre l'état d'avancement de l'étude, le rapport final rassemblant tous les résultats suivant un schéma logique.

Les rapports trimestriels envoyés par les universités concernent chacun des problèmes dont la solution est trouvée ou en voie de l'être. Chaque rapport partiel forme ainsi un tout. On peut se demander si cette solution n'est pas meilleure.

C. Propositions d'améliorations à apporter à la collaboration actuelle.

Nous croyons qu'il est important de maintenir une collaboration étroite entre l'administration et les universités, car nous ne pouvons étudier seuls les aspects multiples d'une telle étude.

Il est regrettable par ailleurs que cette collaboration ne soit pas continue. Ce n'est que six mois après l'expiration du premier contrat

que le second a pris cours.

Cela pose des problèmes quant à l'élaboration des programmes des universités. Celles-ci hésitent naturellement à engager le personnel nécessaire puisqu'elles n'ont pas la certitude que le contrat durera plus d'un an. Pendant six mois les universités ont poursuivi les recherches sans être rémunérées.

Il serait souhaitable que le contrat soit renouvelable annuellement, pour autant que le programme soit respecté. Cela permettrait aux universités de faire les investissements nécessaires.

D. Relations administration-universités dans d'autres pays.

A l'étranger, en sédimentologie, les autorités responsables des études et les universités coopèrent activement.

En Angleterre par exemple, où il y a beaucoup d'estuaires, les "River Authoritys" ou "Harbour Authoritys" sollicitent souvent la collaboration des universités.

Le grade de sédimentologue existe dans ce pays. Environ cent cinquante personnes y étudient la sédimentologie des estuaires.

Lors de mes séjours en Angleterre en août 1967, à l'occasion du 7e Congrès International de Sédimentologie, et en mars 1968, au Congrès des Compteurs Electroniques de Particules, il y avait des ingénieurs, géologues, sédimentologues, biologistes, chimistes etc.. spécialisés dans les problèmes posés par les estuaires.

Lorsqu'on consulte les publications spécialisées en sédimentologie, on trouve cependant peu d'articles les concernant. L'explication probable

est que les recherches donnent lieu à des rapports internes. Il n'est dès lors pas rare de voir deux groupes étudier les mêmes problèmes sans jamais se rencontrer.

Aux Pays-Bas des chercheurs étudient l'Escaut Oriental. Depuis plus de cinq ans l'influence des vitesses, de la salinité, de la température etc... sur la sédimentation y est recherchée. Ces recherches n'ont pas été publiées.

En Angleterre le professeur Prentice du Kings College de Londres et les chercheurs du Laboratoire de Recherches Hydrauliques de Wallingford étudient les sédiments de la Tamise. Ces recherches se font séparément.

En France il y a eu de nombreuses études sédimentologiques d'estuaires. L'étude de l'envasement du port de Nantes par exemple a été faite à la demande des autorités du port par le professeur Berthois de l'Université de Rennes. Nous avons eu l'occasion de rencontrer le professeur Berthois en Belgique lors d'un colloque sur la sédimentologie de l'Escaut.

On peut donc dire que dans la plupart des pays une collaboration existe entre les administrations et les universités pour l'étude sédimentologique des estuaires.

CHAPITRE V. - DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES D'UN BATEAU HYDROGRAPHIQUE.

Le Laboratoire de Recherches Hydrauliques ne dispose pas d'une embarcation pour faire les mesures sédimentologiques sur l'Escaut.

Les bateaux des services du port d'Anvers sont utilisés à temps plein et ne sont pas conçus pour des mesures sédimentologiques. Nous allons décrire les caractéristiques que devrait posséder un bateau adapté à nos besoins. Nous pouvons nous baser sur l'expérience déjà acquise à bord des bateaux des services maritimes d'Anvers et des vedettes de la Force navale.

A. - Caractéristiques générales.

1. Dimensions.

Il est important d'avoir un pont dégagé et un local pour installer les appareils de mesure à l'abri des intempéries.

Pont	: > 15 m ²
Laboratoire	: > 2 m ²
Logement	: 4 à 8 lits.
Cabine de commande .	
Cuisine.	

Les dimensions extérieures seront naturellement fonction du type de bateau choisi. Elles devront cependant être telles que le tangage et le roulis soient réduits au maximum. La longueur sera au moins de 10 mètres et moins de 25 mètres.

L'enfoncement doit être réduit, de préférence en dessous d'un mètre cinquante .

2. Propulsion.

Le bateau sera muni de préférence de deux moteurs pour augmenter sa manoeuvrabilité. Ceux-ci seront soit des moteurs diesel-marin,

soit des Z-drive (moteur intérieur, hélice hors-bord pouvant être relevée). La puissance sera adaptée de façon à développer au moins une vitesse de vingt noeuds à pleine puissance.

La préférence sera donnée à des moteurs Z-drive car ainsi on peut sortir les hélices de l'eau soit pour empêcher aux appareils immergés de s'y accrocher, soit pour permettre l'échouage sans danger si la construction de la coque le permet.

3. Sources d'énergie.

Un groupe diesel triphasé 380 / 220V d'une puissance minimum de 5 kVA fournira l'énergie nécessaire pour les appareils de mesure.

Un petit groupe diesel monophasé 220V d'une puissance minimum de 1kVA fournira l'électricité nécessaire en dehors des heures de mesure.

Des accumulateurs 12V fourniront l'énergie d'appoint.

4. Appareils de levage.

Trois treuils d'une capacité de 500 kg chacun serviront à immerger les appareils. Deux de ceux-ci seront installés sur le pont, à l'arrière du bateau, l'autre à l'avant.

Au moins un bras de levage pouvant lever une charge de 150 kg à quatre mètres au-dessus du pont sera installé à l'arrière du bateau.

./..

5. Coque.

La coque sera de préférence en fibre de verre, sinon en acier.

6. Equipement de bord.

Le bateau doit être muni de l'équipement de bord réglementaire comprenant feux, drapeaux et signaux etc..

Une ancre d'au moins 100 kg. munie d'une chaîne d'ancre de 80 mètres de long doit être logée dans le pic avant.

7. Charge utile.

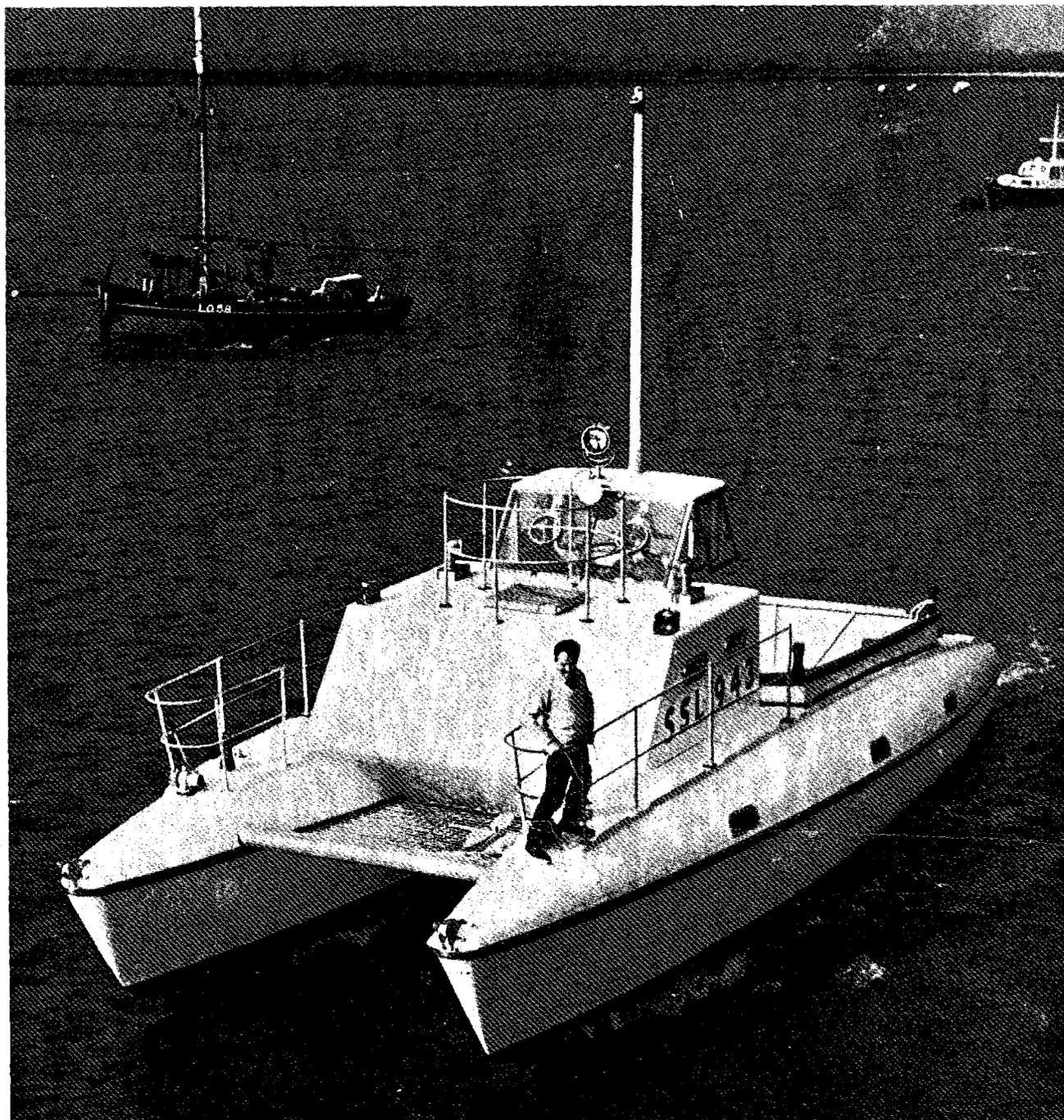
Ce bateau doit pouvoir porter 3 tonnes.

B. - Choix du type de bateau.

Le type de bateau choisi doit être fonction du genre de travail demandé. Un bateau sédimentologique doit avant tout être stable, avoir peu d'enfoncement, permettre une immersion facile des appareils de mesure et être facilement manoeuvrable.

Depuis quelques années s'est développée la construction d'un type de bateau, le catamaran, dont le principe est très ancien mais dont les exemplaires construits étaient jusqu'à présent destinés à la navigation de plaisance. Le catamaran est constitué par deux coques parallèles reliées par un pont.

CATAMARAN



A notre avis le catamaran présente toutes les qualités requises comme bateau hydrographique destiné à la sédimentologie.

1. Stabilité.

Le bateau est large et les deux coques sont suffisamment éloignées pour prévenir, lors de mesures sur l'Escaut, un tangage important. Pour un bateau monocoque de même longueur, le tangage sera beaucoup plus important.

2. Enfouissement.

L'enfoncement des catamarans est très réduit. Ceci présente un avantage certain pour la mesure sur un fleuve tel que l'Escaut à cause des nombreux bancs.

3. Immersion des appareils.

Alors que sur un bateau monocoque les appareils doivent être immergés à partir de bras de levage à l'extérieur du bateau, l'immersion à partir d'un catamaran peut se faire dans l'axe du bateau, entre les deux coques.

Le tangage n'a ainsi plus aucune influence sur la profondeur à laquelle sont suspendus les appareils. Ceci est capital pour toutes les mesures sédimentologiques.

On peut prendre comme exemple la mesure de la turbidité où des variations importantes en hauteur de pompes placées près du fond ne sont pas tolérées. Les mesures de vitesses sont également

fortement influencées par des mouvements verticaux des moulinets (K1).

D'autre part l'immersion d'appareils à l'extérieur d'un bateau est difficile et dangereuse en cas de houle.

L'immersion d'appareils à partir d'un catamaran peut se faire par une trappe construite dans le pont. L'appareil de levage peut être un petit pont roulant prenant appui sur les deux coques. De ce fait l'accostage d'un autre bateau le long du bateau hydrographique ne présente plus aucun danger pour les appareils.

4. Navigation.

Les catamarans peuvent facilement tourner sur place. Leur résistance à l'avancement est faible. Ils ont besoin de moins d'énergie qu'un bateau monocoque de mêmes dimensions.

Leur échouage ne présente aucun danger, vu leur construction particulière.

5. Surface de travail disponible.

Les catamarans étant larges, les cabines peuvent être spacieuses. Pour une même surface de travail un catamaran sera moins long qu'un bateau monocoque.

./..

Résumé des caractéristiques générales.

Dimensions.

longueur	: 10 à 25 m
largeur	: > 3m
enfoncement	: ≤ 1,50m
pont	: ≥ 15 m ²

Aménagement intérieur.

cabine de commande	
cabine-laboratoire	: > 2 m ²
couchettes	: 4 à 8
cuisine	

Propulsion.

Moteurs nombre	: 1 ou 2
type	: diesel marin ou Z-drive

Performances.

Vitesse	: ≥ 20 noeuds
---------	---------------

Capacité de transport.

charge utile	: ≥ 3 tonnes
--------------	--------------

C. - Conclusions.

Il est important de disposer d'un bateau bien adapté à notre travail. Il semble qu'un bateau catamaran soit le plus indiqué. Plusieurs modèles de catamarans destinés à des mesures hydrographiques ou autres existent à des prix très raisonnables.

L'utilisation de la fibre de verre est maintenant entrée dans les moeurs. Cette matière présente de nombreux avantages. L'entretien est réduit au minimum. Les réparations sont très faciles et rapides et peuvent se faire même en naviguant.

Une solution économique est d'acheter un bateau catamaran commercial et de le faire aménager en fonction de notre appareillage.

CHAPITRE VI. - CONCLUSIONS.

L'étude de la sédimentologie de l'Escaut maritime entreprise par le Laboratoire de Recherches Hydrauliques a déjà permis d'éclairer certains aspects du mécanisme de l'envasement du chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet.

Les campagnes de forages ont permis de retarder les premiers travaux de dragages et permettent d'espacer ceux-ci.

Ces études ont pu être menées à bien avec la collaboration de laboratoires des Universités de Bruxelles et de Louvain.

C. - Conclusions.

Il est important de disposer d'un bateau bien adapté à notre travail. Il semble qu'un bateau catamaran soit le plus indiqué. Plusieurs modèles de catamarans destinés à des mesures hydrographiques ou autres existent à des prix très raisonnables.

L'utilisation de la fibre de verre est maintenant entrée dans les moeurs. Cette matière présente de nombreux avantages. L'entretien est réduit au minimum. Les réparations sont très faciles et rapides et peuvent se faire même en naviguant.

Une solution économique est d'acheter un bateau catamaran commercial et de le faire aménager en fonction de notre appareillage.

CHAPITRE VI. - CONCLUSIONS.

L'étude de la sédimentologie de l'Escaut maritime entreprise par le Laboratoire de Recherches Hydrauliques a déjà permis d'éclairer certains aspects du mécanisme de l'envasement du chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet.

Les campagnes de forages ont permis de retarder les premiers travaux de dragages et permettent d'espacer ceux-ci.

Ces études ont pu être menées à bien avec la collaboration de laboratoires des Universités de Bruxelles et de Louvain.

Lorsqu'on étudie la sédimentologie de l'Escaut, on se rend compte que les estuaires sont mal connus et que chaque cas est un cas d'espèce.

Ce rapport concerne une étude de recherche fondamentale. Pour un ingénieur débutant au Ministère des Travaux Publics c'est une chance, peut-être assez rare, de pouvoir commencer sa carrière dans un domaine relativement vierge.

Il faut regretter que la Belgique dispose de si peu de données sédimentologiques sur ses cours d'eau.

Il est nécessaire de développer cette étude car une meilleure connaissance du mécanisme d'envasement peut permettre la mise au point de techniques pour combattre celui-ci.

Certains avancent que l'augmentation de l'envasement observé ces dernières années est liée à l'utilisation de plus en plus grande d'engrais chimiques en agriculture. Les sols sont plus facilement délavés. Les particules fines sont évacuées vers les fleuves. Une corrélation entre la superficie des terrains défrichés dans le bassin versant et le volume dragué annuellement a été établie pour le port de Boston (USA).

D'autres mettent en cause la pollution de l'eau par les déchets industriels et par les eaux d'égout.

Ces hypothèses sont plausibles. Il faut y ajouter que malgré ses dimensions impressionnantes, l'Escaut n'évacue que relativement peu vers la mer, ni suspensions, ni polluants.

./..

Nous avons montré l'importance de la salinité dans le mécanisme d'envasement de l'estuaire de l'Escaut. Or la salinité est un facteur sur lequel il n'est pratiquement pas possible d'agir.

Si on veut réduire l'envasement du port d'Anvers il faut combattre l'érosion des sols, la pollution du fleuve et l'utilisation inconsidérée de l'eau douce des darses du port.

Dans l'immédiat, l'étude de la sédimentologie permet de choisir plus judicieusement le type et l'implantation d'ouvrages d'art tels qu'écluses ou darses.

Le problème du dragage de la vase est important et doit être traité en fonction des mécanismes de transport et de dépôt de la vase dans l'estuaire. Il faut s'inspirer des travaux faits par des pays tels que les Etats-Unis, l'Angleterre, et nos pays voisins.

Les réunions internationales, les visites de services étrangers s'occupant des problèmes d'envasement sont particulièrement utiles. En effet, la plupart des recherches font l'objet de rapports internes.

Les articles intéressants nous arrivent en général avec un retard de plusieurs années, les délais de publication étant particulièrement longs. Or on constate que des études de ce genre sont souvent entreprises simultanément dans différents pays. On ne peut donc trop insister sur l'intérêt des contacts avec les chercheurs étrangers.

Les résultats prometteurs acquis dès la première année
montrent que cette étude doit être poursuivie.

Borgerhout, avril 1968.

J.J.PETERS
Ingénieur des Ponts et Chaussées
en stage.

BIBLIOGRAPHIE.

- B1 BAGNOLD R.A. 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. Geological survey professional paper 422-1. U.S. G.P.O.
- B2 BERTHOIS L. 1959. Essai de corrélation entre le transport en suspension des sédiments grossiers et la dynamique de l'estuaire de la Loire pendant la crue de mars 1957. Cahiers Océanographiques. juin.
- B3 BERTHOIS L. 1958. Sédimentation dans l'estuaire de la Loire pendant la crue de mars 1957. C.R. Académie des Sciences . 19 mai .
- B4 BERTHOIS L. 1958. Observation d'une tranche d'eau suivie dans ses déplacements entre Basse-Indre et Saint-Nazaire . Bulletin du Comité Central d'Océanographie et d'Etude des Côtes. Avril.
- B5 BERTHOIS L. 1958. Les modalités d'envasement dans l'estuaire de la Loire. C.R. Académie des Sciences. 6 janvier.
- B6 BERTHOIS L. 1956. Turbidité des eaux à l'entrée de l'estuaire de la Loire. C.R. Académie des Sciences. 17 décembre.
- B7 BERTHOIS L. 1956. Comportement du bouchon vaseux dans l'estuaire de la Loire. Communication aux IVe Journées de l'Hydraulique. Société Hydrotechnique de France. juin .

- B8 BERTHOIS L. CHATELIN-MARCOU. Influence de la salinité
et de la température sur la vitesse de sédimentation dans
les eaux de l'estuaire de la Loire.
C.R. Académie des Sciences. 17 août.
- B9 BOURCART J. - FRANCIS-BOEUF C. 1942. La vase.
- B10 BOUVARD M. et DUMAS H. 1967. Application de la méthode de
fil chaud à la mesure de la turbulence dans l'eau.
La Houille Blanche. n°3. 1967.
- B11 BOWDEN K.F. 1967. Circulation and Diffusion.
Estuaries. American Association for Advancement of Science.
- C1 CODDE R. 1958. Het verloop van het zoutgehalte in de Zeeschelde.
Revue Génie Civil. Construction. Vol I, n°6.
- D1 della FAILLE. 1961. Vergelijkende physico-chemische studie van
suspenziemateriaal in Schelde en Noordzee, op kleimineralen.
- D2 DJUNKOVSKI N.N. et SMIRNOFF G.S. 1957. Etude de l'envasement
des estuaires en URSS.
XIXe Congrès International de Navigation. Londres.
- F1 FERGUSON H.A. - WEMELSFELDER P.J. - SANTEMA P. 1957.
Sedimentation problems in the Dutch coastal Waters and
Estuaries .
XIXe Congrès International de la Navigation. Londres.
- F2 FLEMING G. 1967. The Application of a continuous monitoring
instrument in sediment transport and water pollution studies.
Reprints of Bulletin of the IASH-XIIe année, n°4.

- H1 HANSEN D. V. 1967. Salt balance and circulation in partially mixed estuaries.
Estuaries . AAAS.
- H2 HERDAN G. 1953. Small particle statistics.
Elsevier.
- H3 HERRER P. L. 1967. Methods and Devices for Measuring Currents.
Estuaries . AAAS.
- H4 HUBBELL D. W. 1967. Apparatus and Techniques for Measuring Bedload.
Geological Survey water-supply paper 1748-U.S. G.P.O.
- J1 JACKSON W. H. 1964. An Investigation into Silt in Suspension in the River Humber.
The dock & Harbour Authority. Vol. WLV n° 526. August.
- J2 JOTTRAND R. 1959. Décantation et fluidisation des solides en suspension liquide.
Thèse de docteur en sciences appliquées U. L. B.
- K1 KALLIO N. A. 1966. Effect of Vertical motion on current meters.
Geological Survey water - supply paper 1869-B U.S. G.P.O.
- L1 LARRAS J. 1964. Embouchures estuaires et deltas.
Eyrolles.

- L2 LAUFF G.H. 1967. Estuaires.
AAAS.
- L3 LAVAL D. 1957. Méthodes de mesures de profondeurs, courants,
houles, marées, mouvement des matériaux solides.
Communication au XIXe Congrès International de la Navigation.
Londres.
- M1 MANGELSDORF P. C. 1967. Salinity measurements in Estuaries.
AAAS.
- M2 MUNDORFF J. C. et WADDELL K. M. 1966. Fluvial Sediment
and Chemical Quality of Water in the Little Blue River
Basin Nebraska and Kansas.
Geological Survey water-wupply paper 1819-H. US G.P.O.
- P1 PETERS J. J. 1965. Les vases d'anciens bras de l'Escaut.
Rapport du Laboratoire de Recherches Hydrauliques-Borgerhout-
Anvers. Etude faite à l'Université Libre de Bruxelles.
- P2 POSTMA H. 1967. Sediment transport and sedimentation in the
estuarine environment.
Estuaries . AAAS.
- P3 PRITCHARD D. W. 1967. Observations of circulation in coastal
plain estuaries.
Estuaries . AAAS.
- P4 PRITCHARD D. W. 1952. Estuarine hydrography.
Advance in Geophysics.

- R1 RILEY J.P.-SKIRROW G .1966. Chemical Oceanography.
Tome I & II. Academic Press. London and New-York.
- S1 SANTEMA P. 1953. Coagulatie van rivierslib bij ontmoeting met
zeewater.
De Ingenieur. 17 avril , n°16.
- S2 SCHULTZ E.A. & SIMMONS H.B. 1957. Fresh water-salt water
density currents, a major cause of siltation in estuaries.
Communication au XIXe Congrès International de Navigation.
Londres.
- S3 SCOTT C.H. et STEPHENS H.D. 1966. Special sediment investi-
gations Mississippi River at St.Louis, Missouri 1961.-63.
Geological Survey water-supply paper 1819-J-US.G.P.O.
- S4 A study of methods used in measurement and analysis of
sediment loads in streams. 1964.
Report R. Progress report. Electronic sensing of sediment.
Federal Inter-Agency Sedimentation project.
St.Anthony Falls Hydraulic Laboratory.
- T1 TERZAGHI K.V. 1939. Théorie du tassement des couches argileuses
DUNOD
- W1 WARTEL .1967.Stratigrafisch en sedimentologisch onderzoek
van de opbouw van het Schelde-estuarium. Laboratorium voor
recente sedimenten Katholieke Universiteit van Leuven.

- W2 WILSON G.A., ALLEN F.H., STEPHENS N.D.E. 1957. The
Conservancy of the River Thames.
Communication au XIXe Congrès International de Navigation.
Londres.
- W3 WOLLAST - 1967. Contribution à l'étude de l'envasement de
l'Escaut.
Rapport Interne. Laboratoire de Chimie des solides.
Université Libre de Bruxelles.
-

IN 57a

Ministère des Travaux Publics
Ponts et Chaussées
Administration des Voies Hydrauliques

RAPPORT DE STAGE

ANNEXES

J. J. PETERS
Ingénieur des Ponts et Chaussées
en stage.

Laboratoire de Recherches Hydrauliques
Borgerhout-Anvers

CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA SEDIMENTOLOGIE DE
L'ESCAUT MARITIME. MESURES IN SITU.

Pour bien comprendre l'envasement dans l'Escaut à hauteur d'Anvers il est indispensable de connaître les caractéristiques générales de la sédimentologie de l'Escaut dans sa partie maritime.

La sédimentologie de l'Escaut est mal connue. En 1958, R. CODDE, alors Ingénieur en chef-Directeur des Ponts et Chaussées, Directeur des Services Maritimes d'Anvers écrivait (C1) :

" Indien de gegevens nopens de voortplanting van het getij in het maritiem gedeelte van het Scheldebekken sinds bijna één eeuw opgenomen werden en daaruit regelmatig de hoofdkarakteristieken werden afgeleid, zijn de gegevens nopens het zoutgehalte veel minder gevorderd...."

La variation de la salinité commence maintenant à être mieux connue dans l'Escaut maritime, mais la sédimentologie n'a encore fait l'objet que de quelques monographies (D1). La partie de l'Escaut Occidental situé en territoire hollandais a été étudiée par les hollandais, mais il est difficile d'obtenir leurs résultats.

En 1965, le Laboratoire de Recherches Hydrauliques a entrepris une étude de la sédimentologie de l'Escaut maritime, principalement dans la région d'Anvers.

Cette étude porte sur l'hydraulique, la salinité, les suspensions et les sédiments. Depuis 1966, l'administration des Voies Hydrauliques a conclu des contrats avec les Universités de Bruxelles et de Louvain dans le cadre de cette étude.

Nous allons examiner les techniques de mesures que nous utilisons. Les résultats d'une campagne de mesure faite en juillet 1967 seront exposés, ainsi que ceux de quelques mesures faites pendant l'hiver de 1967 à 1968.

1. Mesures en nature. Description des techniques.

a. Mesures hydrauliques.

(1) Vitesse.

Un moulinet OTT est utilisé pour mesurer les vitesses. Cette mesure ne présente aucune difficulté. Malheureusement ce moulinet ne permet pas de connaître la vitesse en direction.

La rotation de l'hélice dans l'eau provoque des impulsions électriques qui sont comptées. On mesure une vitesse moyenne.

Trois nouveaux moulinets sont en commande . Ils permettront de mesurer la grandeur et la direction horizontale de la vitesse. Ces données peuvent être enregistrées.

(2) Courants.

Pour obtenir des informations concernant les courants nous avons tenté de mesurer la vitesse de déplacement de flotteurs jetés dans l'Escaut.

Ces flotteurs sont constitués par un élément lourd, relié à un élément flottant par un ruban de 1m40 de long. L'élément flottant renferme une carte postale numérotée.

La personne qui repêche le flotteur remplit le formulaire imprimé sur la carte postale. Celle-ci mentionne, entre autres, la date, l'heure et le lieu du repêchage et des renseignements concernant l'état du flotteur.

Cette méthode est couramment utilisée dans les études d'estuaires. Isolée elle n'a pas beaucoup de signification. Son utilisation combinée à d'autres méthodes peut apporter des renseignements sur l'écoulement de l'eau vers la mer.

Son avantage principal est de ne nécessiter que peu de personnel. Le rendement est malheureusement faible. On compte en général que $\pm 10\%$ des cartes sont récupérées et que $\pm 2\%$ sont utilisables.

Nous avons jeté 2800 flotteurs à l'eau en six jours. 1035 furent récupérés, c'est-à-dire 37%. Ce chiffre record est certainement dû au temps exceptionnellement beau qui a provoqué un afflux d'estivants.

b. Mesures de caractéristiques physico-chimiques.

(1) Salinité.

La salinité est la caractéristique physico-chimique la plus importante pour l'étude de la sédimentologie des estuaires.

Elle peut être mesurée de différentes manières (R1). Citons la titration du chlore, la détermination de la conductivité ou du poids spécifique etc...

./..

La conductivité est certes le paramètre le plus facile à déterminer et le plus utile.

Lorsqu'on cherche à connaître l'évolution pendant une marée de la salinité en un endroit bien déterminé, la précision de la mesure n'a pas une grande importance.

Une pompe immergée envoie l'eau au travers d'une cellule de mesure. Celle-ci comprend une électrode de conductivité et une résistance de compensation de température. La conductivité étant fonction de la température, cette résistance compense la mesure de telle façon qu'on enregistre la conductivité ramenée à 20 ou à 25°C.

L'étude des courants de densité nécessite des mesures de conductivité extrêmement précises. Nous avons utilisé un appareil ECR P4N muni d'une sonde. La compensation de température doit être calculée.

Cet appareil fonctionne suivant la méthode du point zéro. L'électrode immergée forme une branche d'un pont électrique. Celui-ci est déséquilibré, suite à une variation de salinité. L'équilibrage est manuel et très précis.

L'inconvénient majeur est la lenteur des mesures, alors que dans les chenaux d'accès et les darses les phénomènes varient très rapidement.

Depuis le mois de mars 1968 le Laboratoire de Chimie Industrielle de l'U.L.B. étudie un nouveau système pour localiser les courants de densité. La méthode est basée sur le fait que les courants de

densité sont caractérisés par leur salinité, leur vitesse et leur température. La mesure de la température permet par conséquent de différencier les couches.

La mesure de la température par thermistance présente l'avantage d'être précise, rapide et de permettre l'enregistrement.

(2) Température.

La température peut influencer la sédimentation de différentes manières. Sa variation provoque des changements dans la viscosité de l'eau, dans l'activité biologique, dans les réactions chimiques de précipitation ou de floculation etc; .

La mesure se fait à l'aide d'un thermocouple.

(3) pH.

L'influence de l'acidité de l'eau sur la sédimentation a été mise en évidence dans de nombreux estuaires. Ce paramètre semble être de moindre importance dans l'estuaire de l'Escaut.

L'appareil utilisé est soit un pH-mètre MBLE, soit un pH-mètre portatif Beckman.

c. Mesures sédimentologiques. Transport solide.

Les sédiments peuvent être transportés par un cours d'eau soit par charriage, soit en suspension.

Dans le premier mode de transport, les particules solides sont souvent en contact avec le lit. Leur vitesse de déplacement est inférieure à la vitesse de l'eau.

Les particules solides transportées en suspension sont rarement en contact avec le lit. Leur vitesse de déplacement est pratiquement égale à celle de l'eau.

Les suspensions nous intéressent en premier lieu. En effet, elles sont responsables de l'envasement des chenaux d'accès du port d'Anvers.

(1) Mesure du transport solide par charriage et saltation.

D. W. HUBBELL (H4) a fait une très bonne synthèse des appareils et des techniques utilisés pour la mesure du transport par charriage. Comme nous n'avons pas encore fait des mesures de charriage nous n'examinerons pas ce problème.

(2) Mesure de la quantité de matières solides en suspension.

C'est certes un des problèmes les plus ardues. Une méthode ancienne toujours utilisée consiste à prélever des échantillons d'eau à l'aide de bouteilles du type Nansen. Ces bouteilles, suspendues à un câble, sont descendues à la profondeur voulue. Les deux extrémités sont ouvertes. Un messenger envoyé à partir de la surface provoque la fermeture des extrémités. L'eau ainsi prélevée est filtrée. La quantité de matières solides est déterminée par pesée.

Nous nous sommes efforcés d'utiliser des méthodes plus modernes.

Nous prélevons les échantillons à l'aide de pompes immergées.

La turbidité est mesurée par une des méthodes suivantes :

(a) Turbidimètres.

Un turbidimètre mesure la quantité de matières solides en suspension dans un liquide par absorption ou diffusion de la lumière.

L'appareil doit être étalonné pour la suspension étudiée.

Il ne mesure que la fraction fine de la suspension, c'est-à-dire les particules dont le diamètre est inférieur à ± 60 microns.

(a) Turbidimètre à absorption de lumière.

Un rayonnement lumineux passant au travers d'une eau chargée de suspension est absorbé par celle-ci. Une cellule photo-électrique mesure le rayonnement transmis. Il existe deux versions de cet appareil.

Dans la première, l'élément de mesure constitué par la lampe et la cellule photo-électrique est immergé. Cet appareil a deux inconvénients principaux :

Le premier est que la mesure n'est plus correcte près de la surface où la lumière naturelle s'ajoute au rayonnement transmis.

Le second est que les particules dont le diamètre est supérieur à 60 microns échappent à l'observation.

Malgré tout cette technique offre un intérêt certain à cause de sa rapidité.

Dans la seconde version, l'eau est pompée au travers d'une cellule de mesure dont les parois sont transparentes. De part et d'autre de celle-ci se trouvent la lampe et la cellule phot-électrique.

Le défaut principal de cet appareil est que les vitres de la cellule s'encrassent rapidement.

Les particules de diamètre supérieur à 60 microns peuvent être séparées à partir d'échantillon prélevés au sortir de l'appareil.

Le turbidimètre à absorption de lumière est de plus en plus abandonné au profit du turbidimètre à diffusion de lumière dont la mesure est plus précise et plus reproductible.

(F) Turbidimètre à diffusion de lumière

L'eau est envoyée dans une cellule en forme de baquet. Elle s'écoule par un déversoir. La surface de l'eau est donc en contact avec l'air. Un rayonnement lumineux pénètre dans la suspension par la surface libre.

Les particules solides diffusent la lumière. Le rayonnement diffusé est mesuré perpendiculairement à la surface libre et comparé au rayonnement incident. La mesure n'est donc pas influencée par des variations de tension accidentelles.

Cet appareil ne mesure que les suspensions fines des grains ne dépassant pas 60 microns.

Les turbidimètres ont l'avantage de permettre une mesure continue avec enregistrement. Cela permet de déceler des variations de turbidité brutales qui passent inaperçues par les autres méthodes.

(b) Filtration.

Des échantillons d'eau prélevés à l'aide d'une pompe sont filtrés sous vide sur des filtres "millipore" de 0,22 microns d'ouverture. Absolument toute la matière solide, y compris les bactéries, est recueillie sur le filtre. La turbidité est déterminée par la pesée du filtre.

La méthode par filtration est certainement la plus précise. Par contre elle est fort longue. On l'utilise surtout comme contrôle d'autres méthodes.

Dans les cas où il est nécessaire d'analyser la matière solide, le filtre peut être utilisé tel quel pour la plupart des analyses chimiques ou physiques.

(c) Centrifugation.

Certaines analyses chimiques ou minéralogiques nécessitent plusieurs dizaines de grammes de matières solides. Pour récupérer ce solide on fait passer l'eau dans une centrifugeuse continue ALFA-LAVAL.

La turbidité moyenne pendant la centrifugation peut être calculée en divisant le poids de vase recueillie par le volume d'eau centrifugée. On obtient toujours une mesure par défaut, car les particules les plus fines échappent à la centrifugation.

En résumé on peut dire que la meilleure méthode pour suivre l'évolution de la turbidité à une profondeur donnée est de pomper l'eau, de l'envoyer au travers d'un turbidimètre à diffusion de lumière et de contrôler la mesure par filtration et centrifugation.

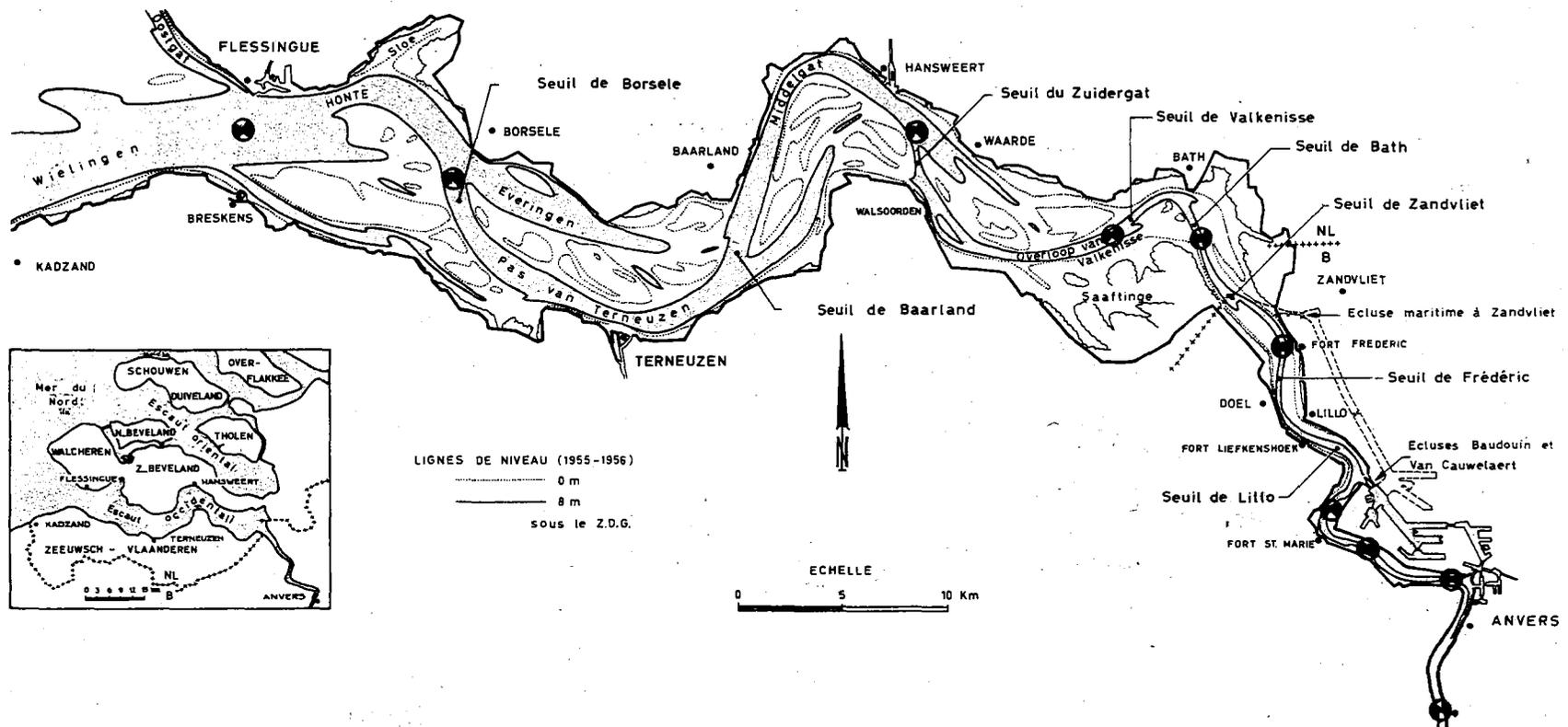
Pour étudier l'évolution de la turbidité en fonction de la profondeur, on peut soit utiliser pour une suspension fine un turbidimètre immergé à absorption de lumière, soit filtrer des échantillons pompés à différentes profondeurs.

La figure 20 montre la très bonne concordance de ces différentes mesures pour les suspensions dans le chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet.

2. Campagne de mesures juillet 1967.

En juillet 1967 des mesures sédimentologiques furent entreprises en dix points répartis le long de l'Escaut entre Hoboken et Vlissingen.

Le but était de voir l'évolution de la salinité le long de l'Escaut maritime et sa variation avec la marée en chacune des localités, de prélever des échantillons d'eau et de suspensions aux fins d'analyses



● Points de mesures juillet 1967

en laboratoire , de suivre l'évolution de la turbidité au cours de la marée en fonction de l'évolution de la vitesse.

Les mesures se faisaient à partir d'une vedette de la Foce Navale ancrée à la limite de la passe navigable.

a. Salinité.

Nous avons retrouvé une évolution de la salinité semblable à ce qu'avait trouvé R. CODDE (C1).

La figure 1 montre que l'amplitude de la variation de salinité au cours de la marée est maximum à Fort de Parel.

La salinité maximum à l'embouchure n'est que de 28,7 ‰, alors que la salinité moyenne des océans est de 35,5 ‰.

A Hoboken, en amont d'Anvers, la salinité varie de 1 ‰ à 4,5 ‰ au cours de la marée.

La figure 2 compare l'évolution de la salinité au long de l'Escaut que nous avons mesurée en juillet 1967 aux courbes moyennes renseignées par R. CODDE (C1).

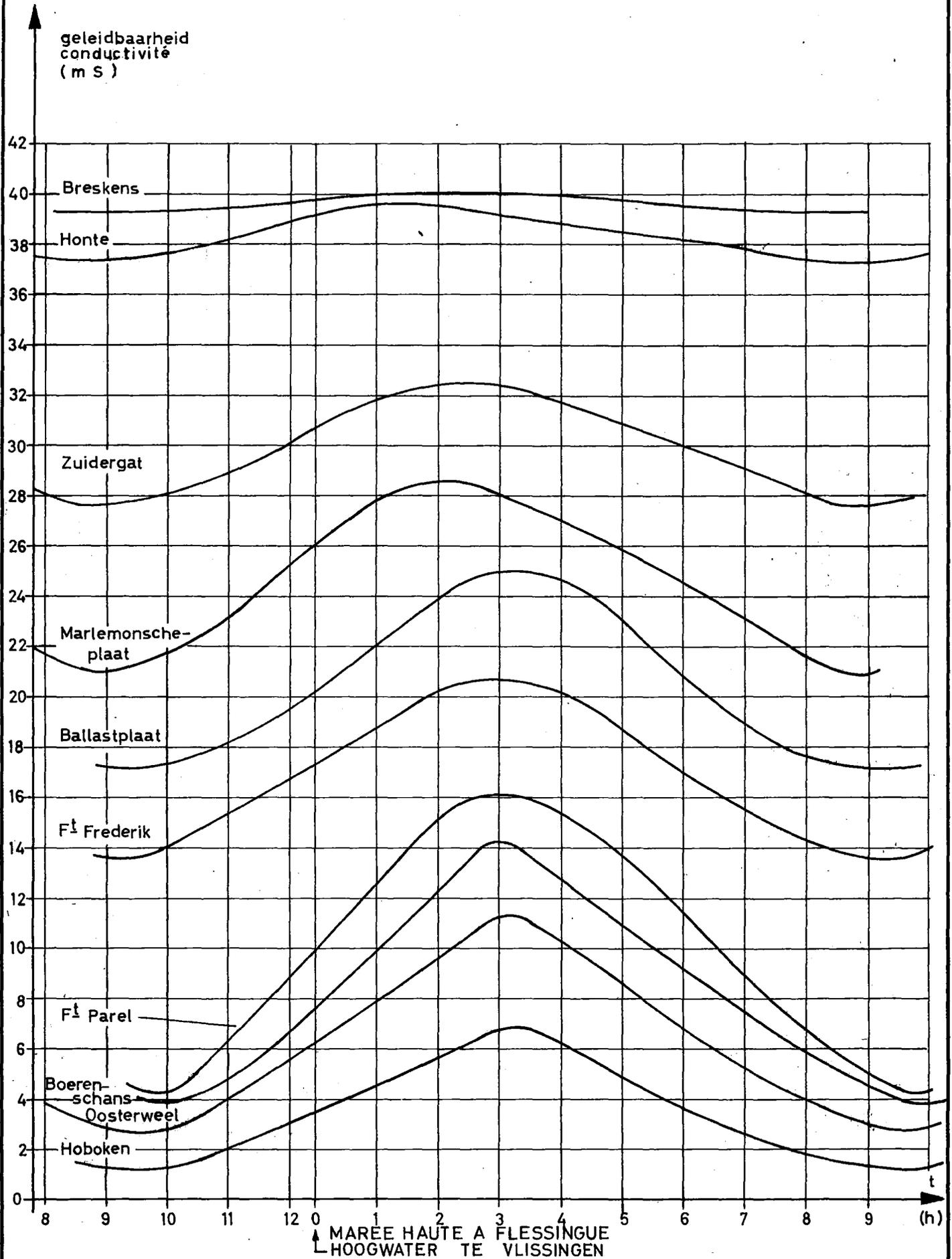
Des mesures faites simultanément à différentes profondeurs indiquent un faible gradient de salinité. Les appareils dont nous disposons n'étaient malheureusement pas assez précis. A Breskens cette variation atteignait $\pm 0,5$ ‰ sur une profondeur d'environ 15 mètres.

./..

Metingen: juli 1967
Mesures: juillet 1967

Variatie geleidbaarheid over volledig getij
Variation de la conductivité en fonction
de la marée

Bijlage I
Annexe I
Fig. 1



WL 67.378

Metingen : juli 1967

Mesures : juillet 1967

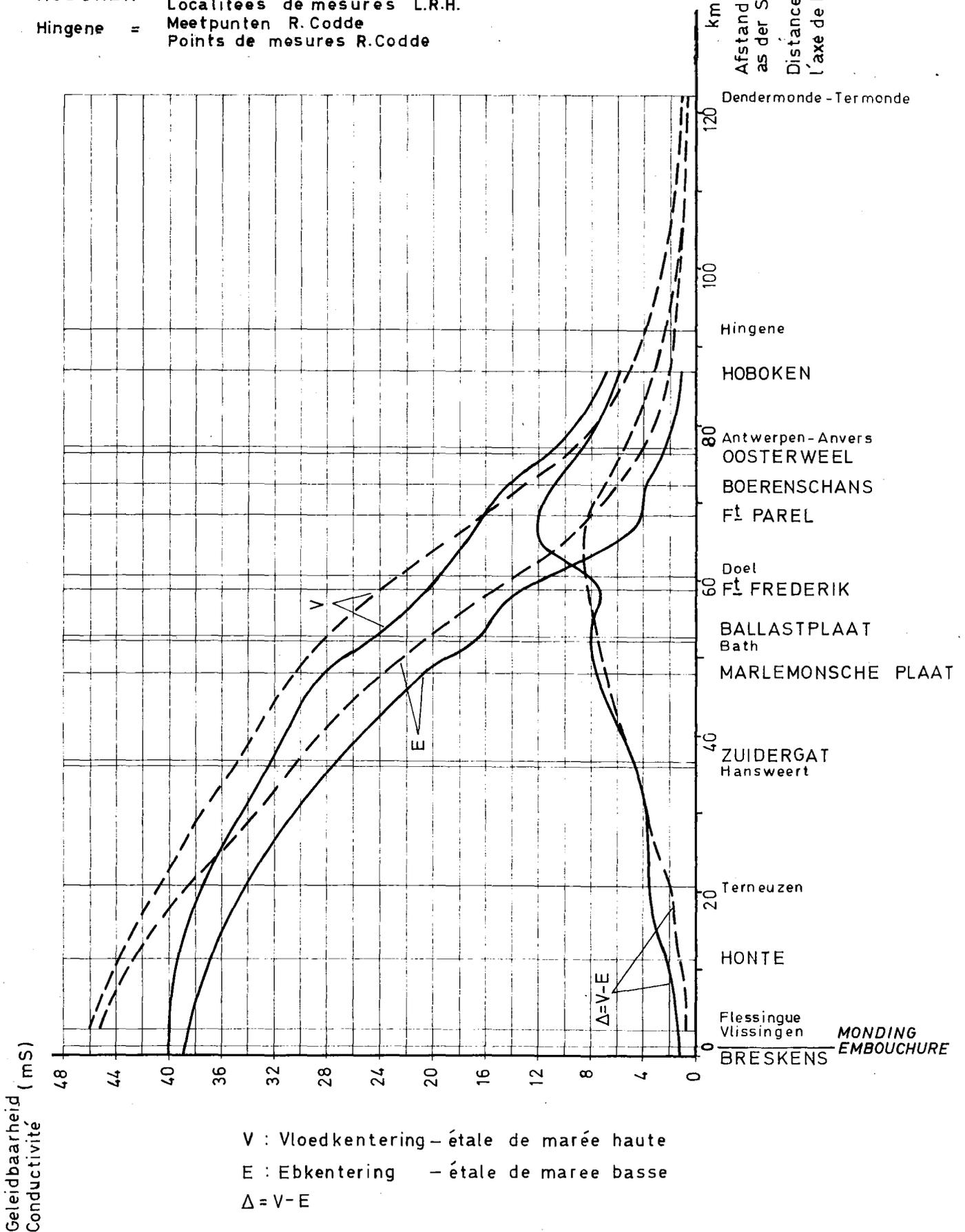
Variatie geleidbaarheid over volledig getij

Variation de la conductivité en fonction de la marée

Bijlage I

Annexe I Fig. 2

————— Metingen W.L.
 ————— Mesures L.R.H.
 - - - - - Gegevens R. Codde zie Revue C. tijdschrift 1/6/1958
 - - - - - Données R. Codde voir " " "
 HOBOKEN = Meetplaatsen W.L.
 Localités de mesures L.R.H.
 Hingene = Meetpunten R. Codde
 Points de mesures R. Codde



V : Vloedkentering - étale de marée haute
 E : Ebkentering - étale de marée basse
 Δ = V - E

b. Turbidité.

La turbidité a été mesurée à quatre profondeurs. Deux pompes étaient maintenues à des distances constantes du fond, l'une à 0,50 m, l'autre à 1,25 m.

Deux pompes étaient suspendues au bateau, l'une à 6 m de profondeur, l'autre 0,40m sous la surface.

Les échantillons prélevés à 0,50m et 1,25 m du fond contiennent des sédiments charriés et de la suspension .

Les échantillons prélevés à 6m et 0,40 m de la surface ne renferment que de la suspension, sauf peut-être à Breskens où la proximité des brise-lames provoquaient la remontée de nuages de sable par turbulence.

Il faut remarquer qu'en cet endroit la mesure en continu à l'aide du turbidimètre Sigrüst prenait toute sa valeur. En effet, les variations étaient tellement rapides que les échantillons prélevés n'étaient certainement pas représentatifs.

Les mesures à 0,50m et 1,25m du fond sont à prendre avec des réserves, car maintenir une pompe à cette distance du fond à partir d'un bateau soumis à la marée et aux vagues , et cela dans des courants dont la vitesse dépassait parfois 1m/s est en soi un tour de force.

D'une façon générale on peut voir que les turbidités minimum suivent de peu les étales.

Les diagrammes les plus significatifs sont ceux de Hoboken, Fort de Parel et Breskens.

Par manque de temps des analyses minérologiques ainsi que des analyses granulométriques n'ont pu se faire. Grâce à elles on peut savoir si les particules fines, argileuses et les matières organiques sont plus concentrées dans la région d'Anvers.

c. Courants.

2800 flotteurs ont été jetés à l'eau entre la frontière Belgo-Néerlandaise et Breskens. Ils furent retrouvés depuis Doel jusqu'aux plages de l'île de la mer du Nord Walcheren.

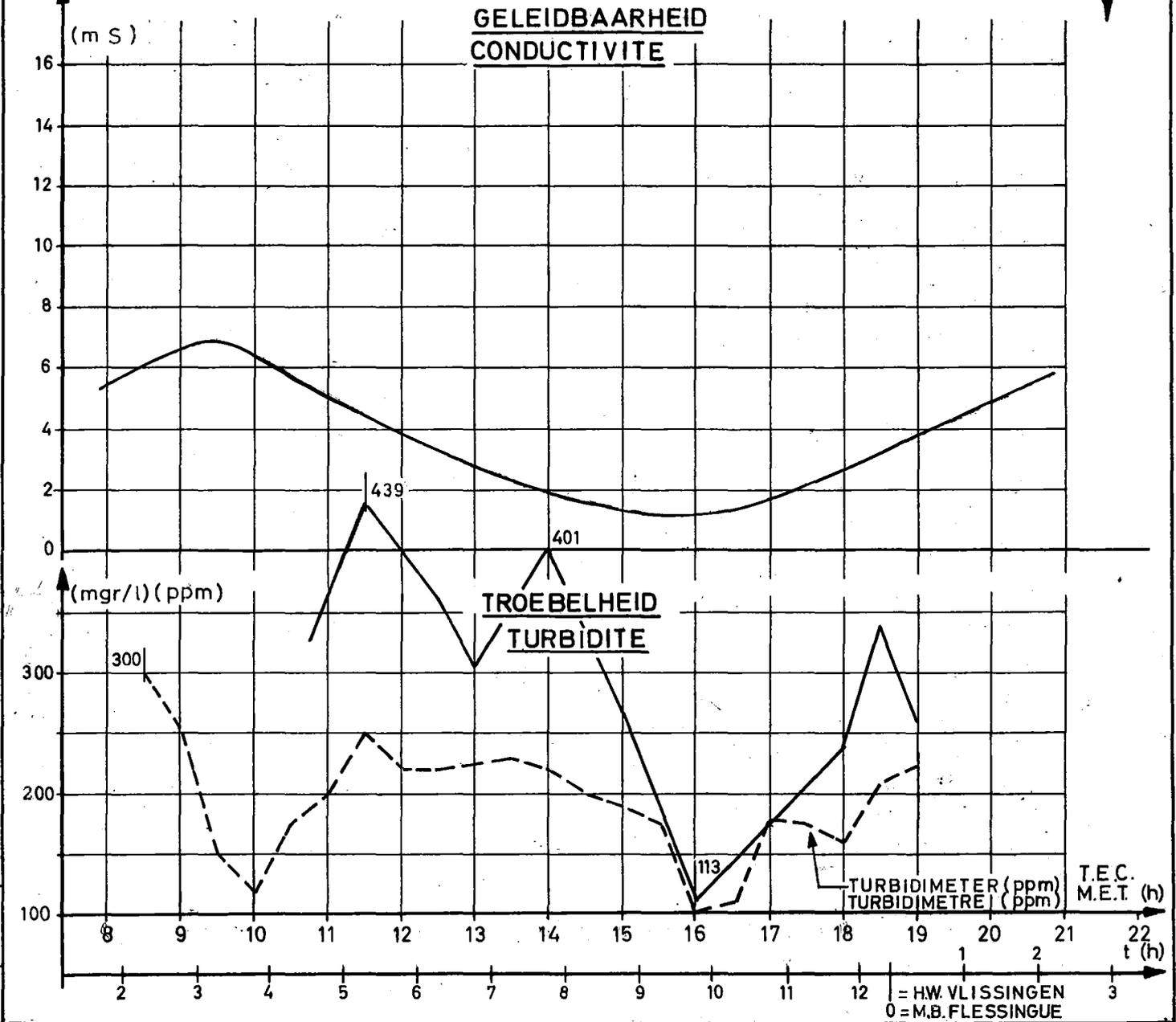
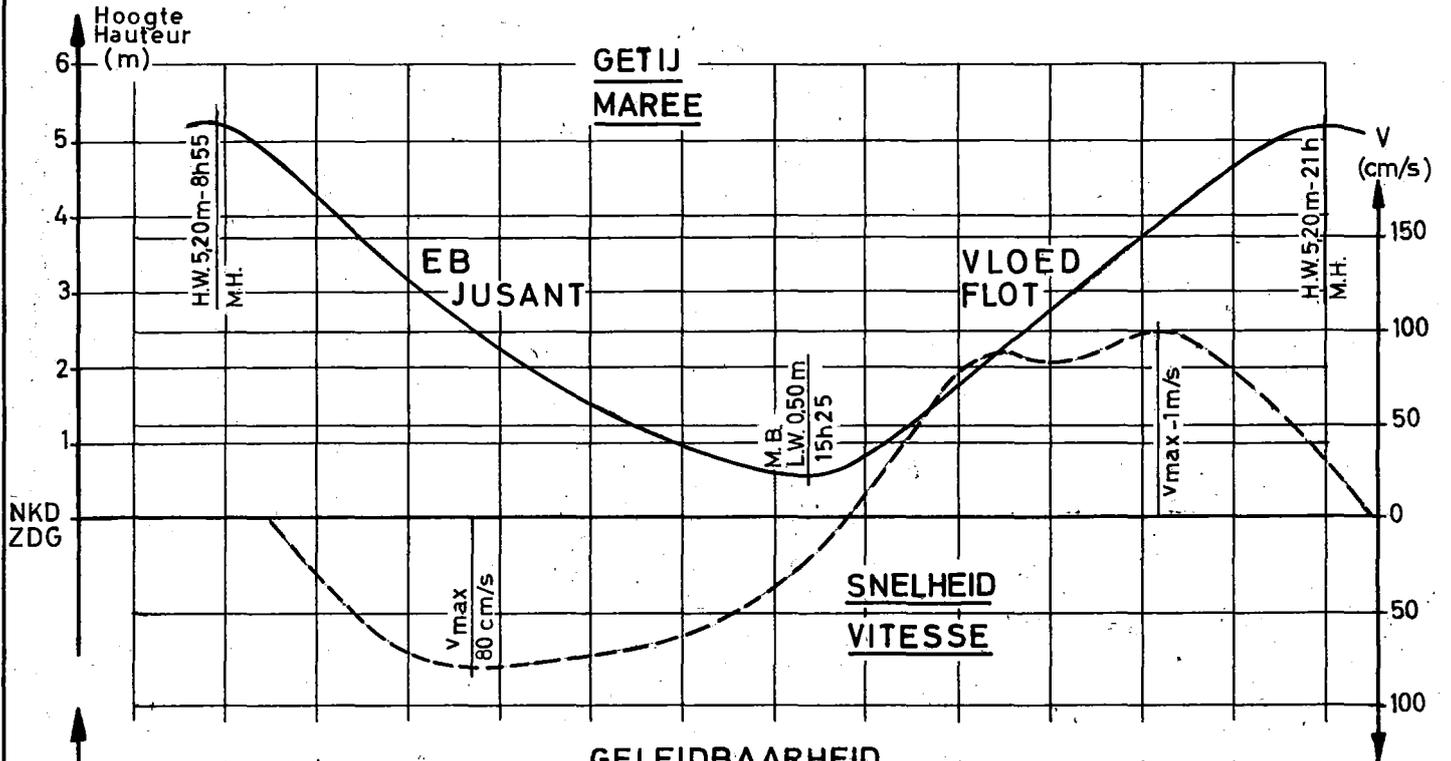
Les résultats de ces mesures ne signifient pas grand chose si on ne les compare pas aux résultats d'essais faits avec des traceurs radio-actifs par le Centre Nucléaire de Mol.

On peut néanmoins faire quelques remarques quant à la méthode.

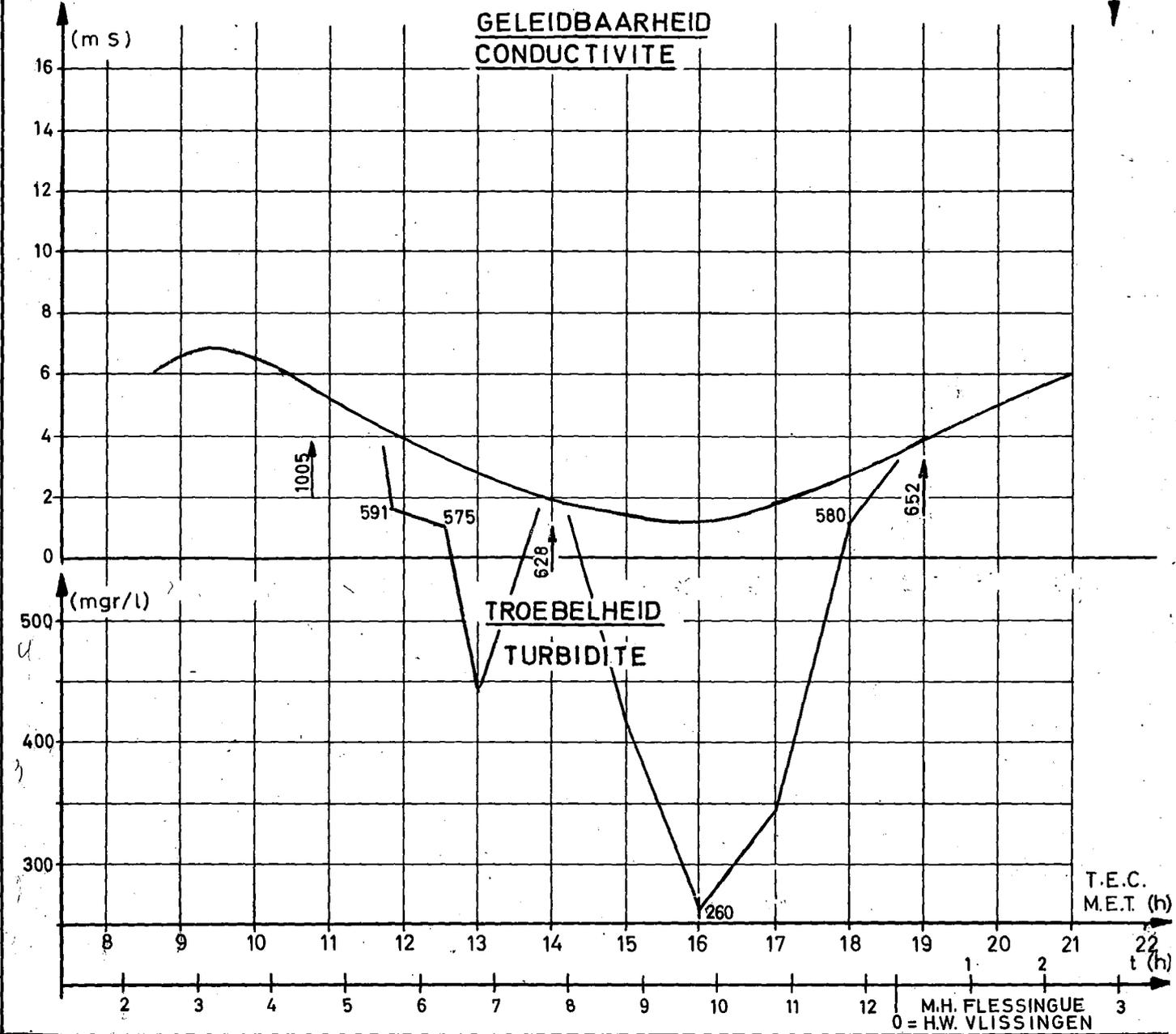
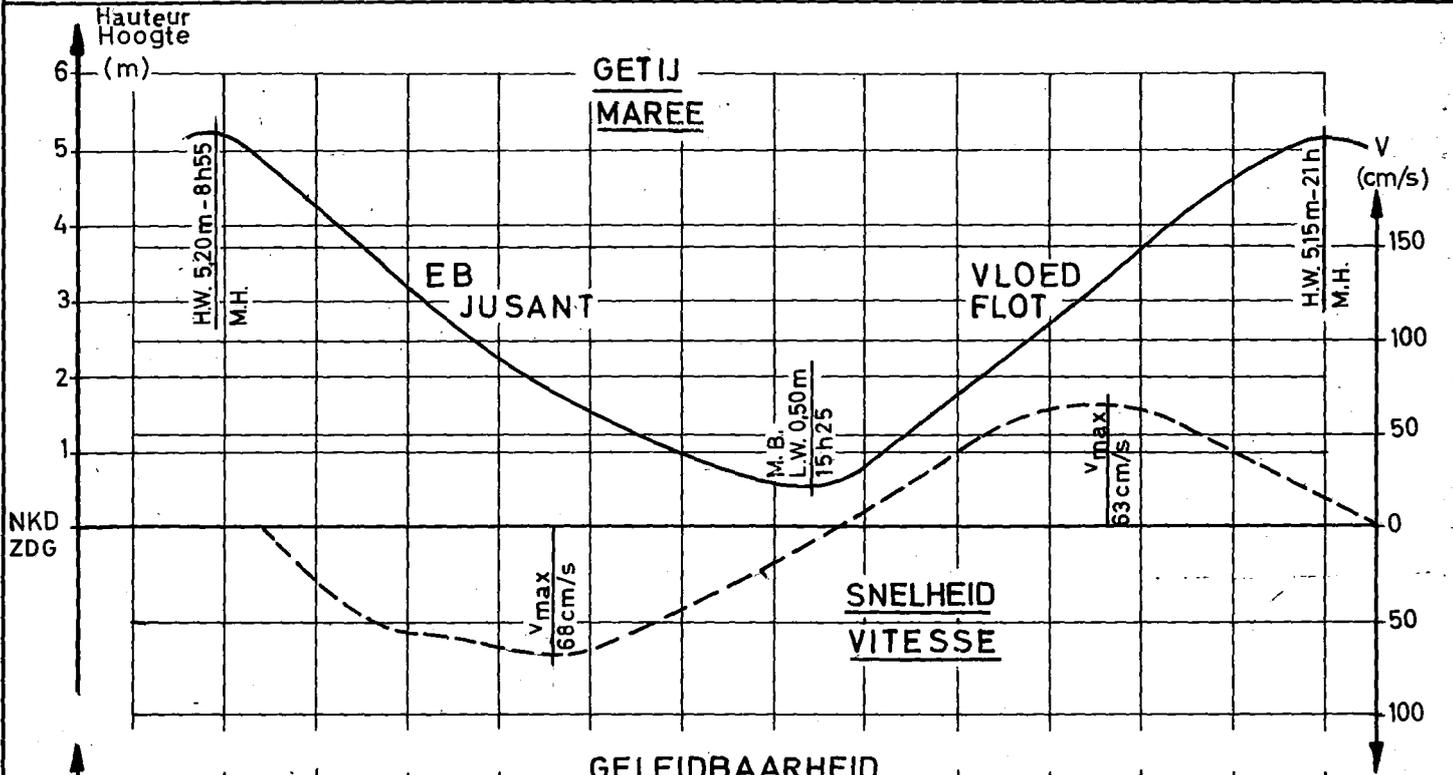
Beaucoup de flotteurs rentrent dans les ports et n'en sortent plus.

Certains flotteurs sont très rapidement emmenés jusqu'en mer. Cela pourrait vouloir dire que ces flotteurs accompagnent les courants de jusant et stationnement dans des zones calmes au flot. En effet l'eau ne suit pas les mêmes chemins au flot qu'au jusant.

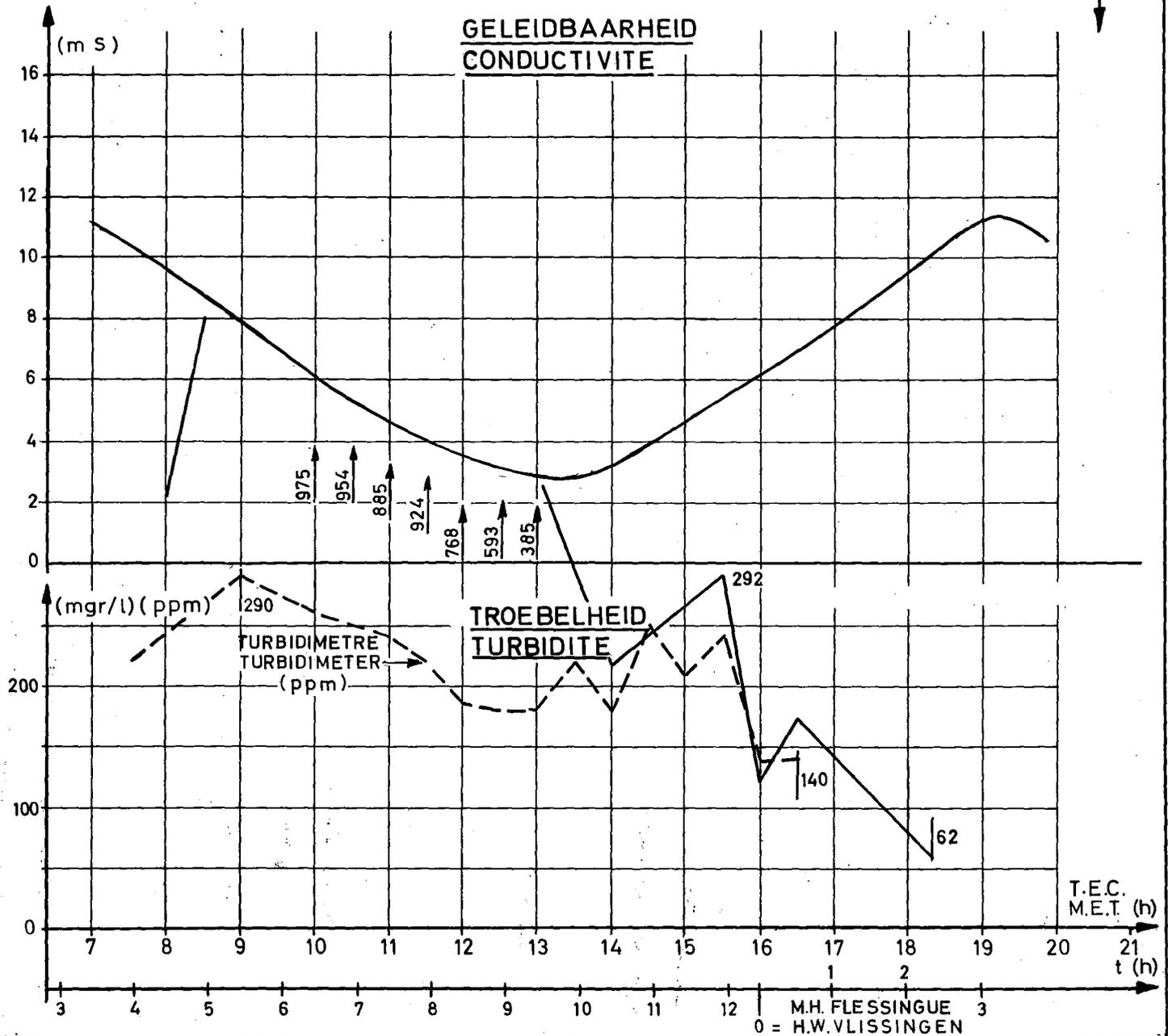
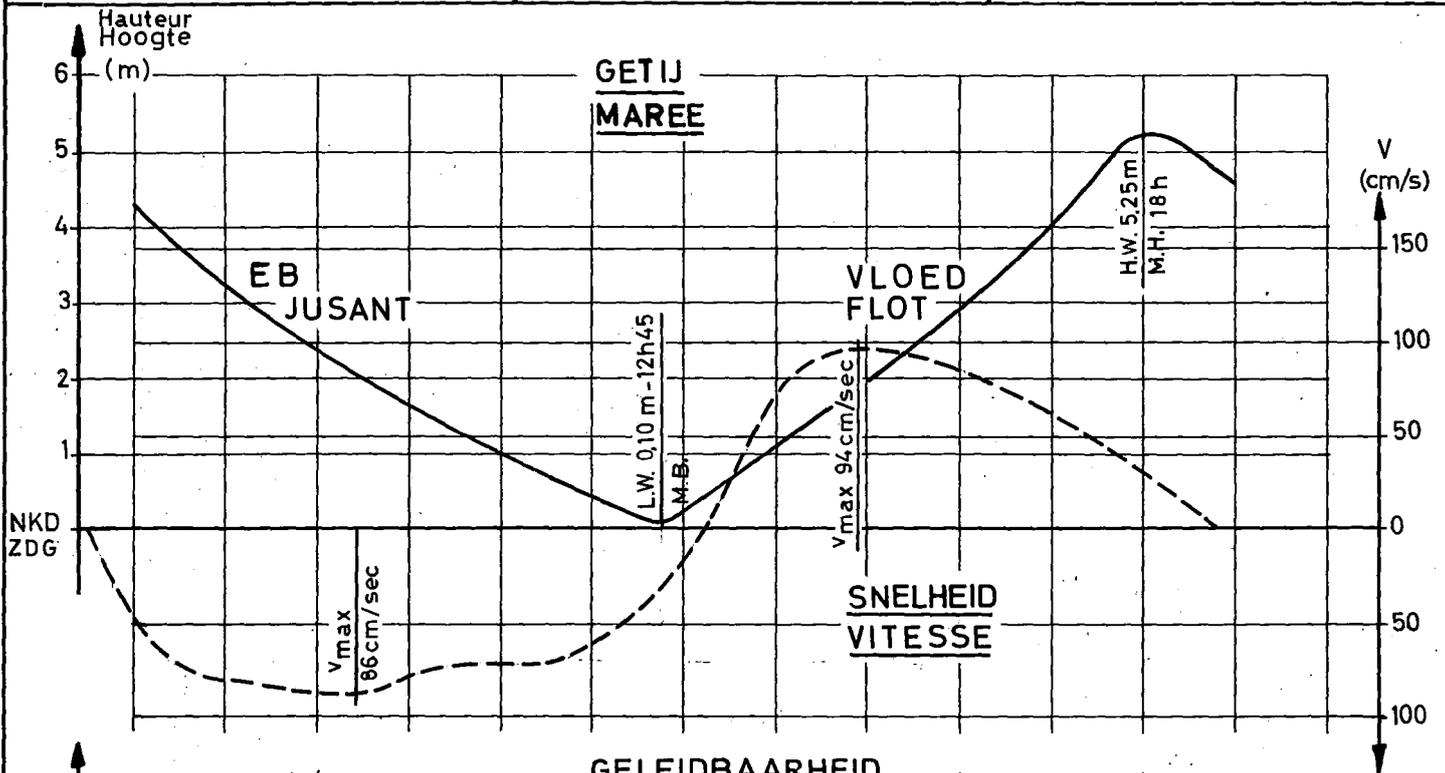
Les différences de vitesses obtenues pour les flotteurs sont énormes. La méthode des flotteurs ne permet donc pas de calculer une vitesse moyenne de l'eau.

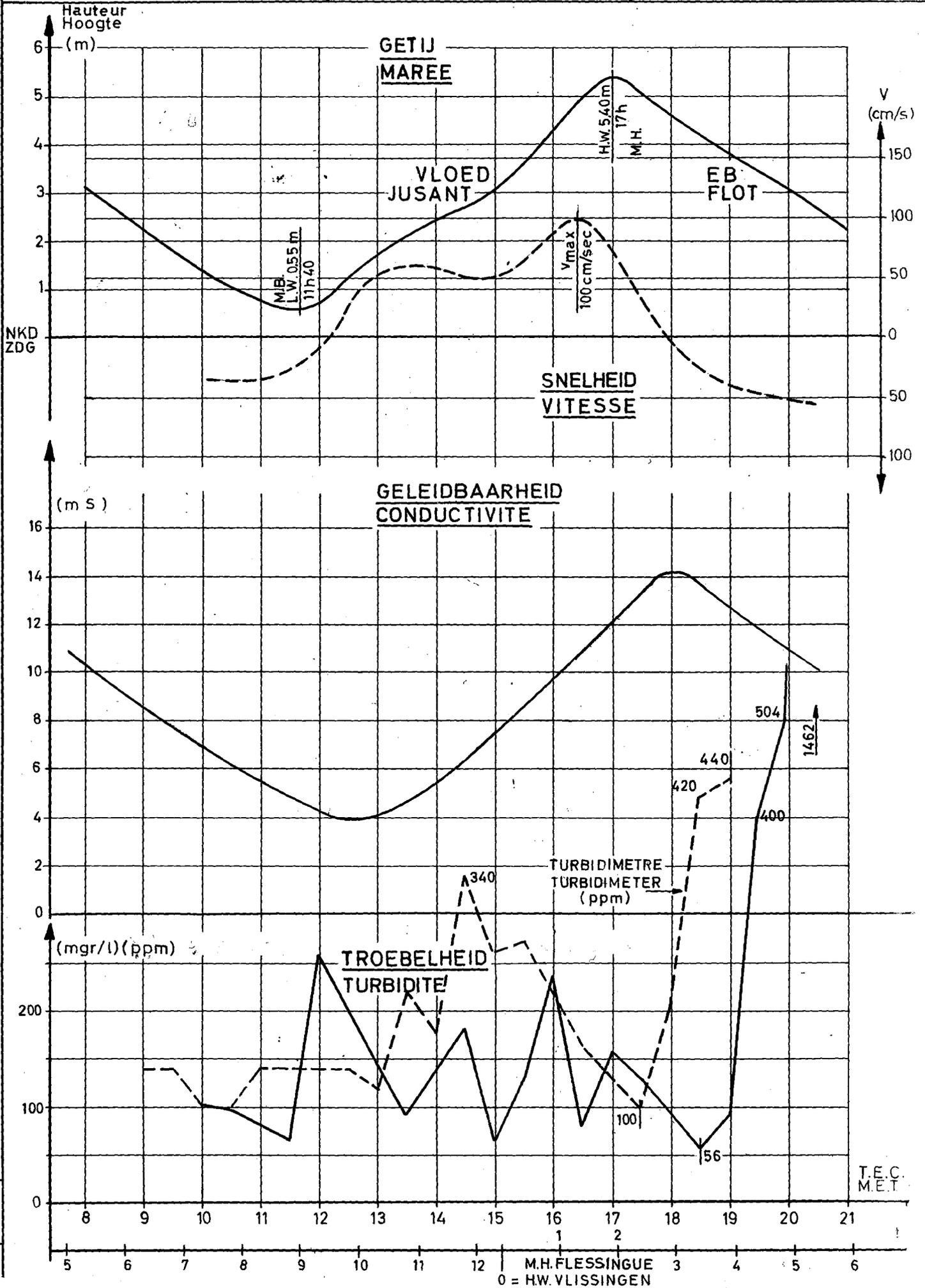


W.L. 67.498

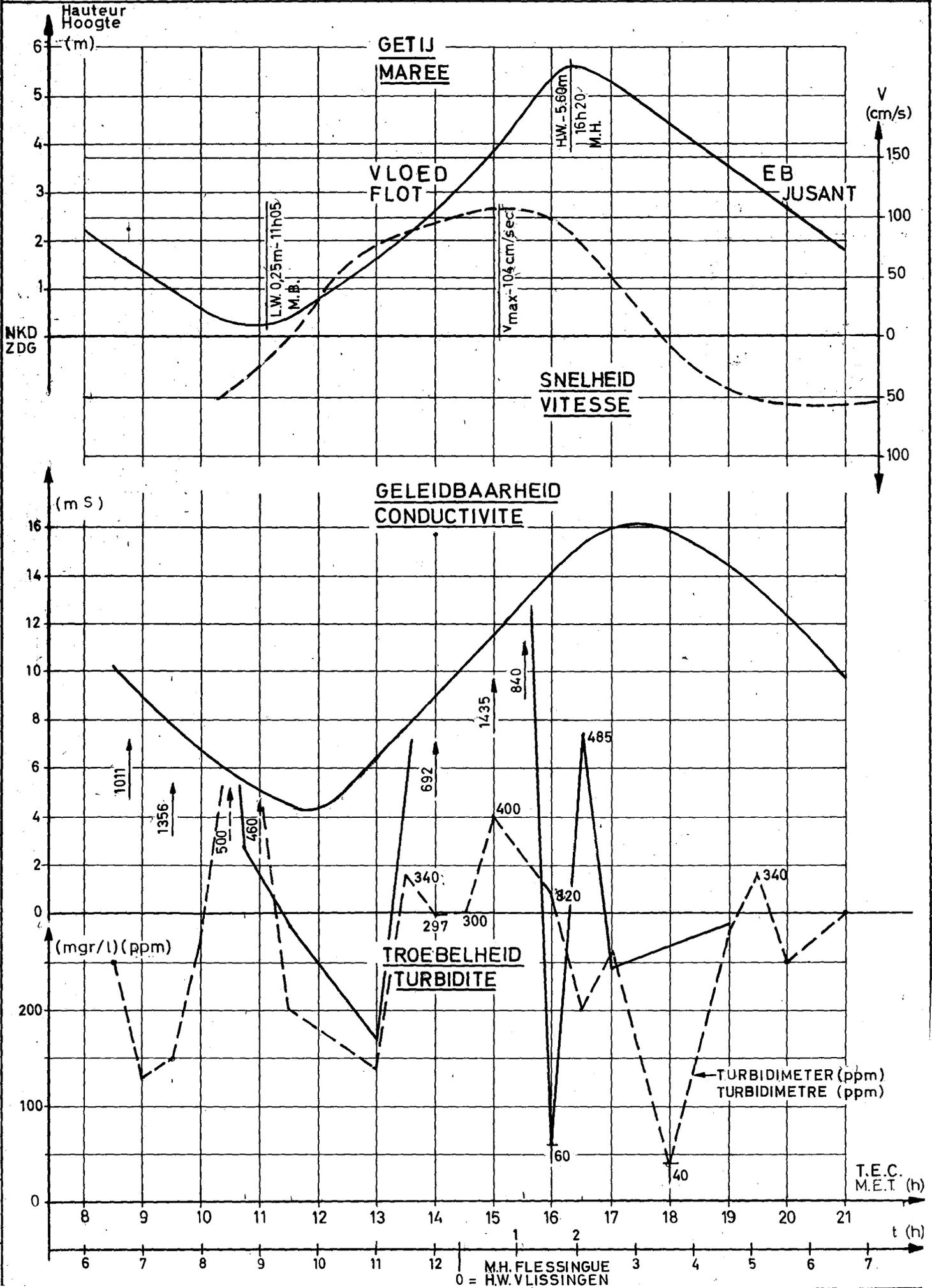


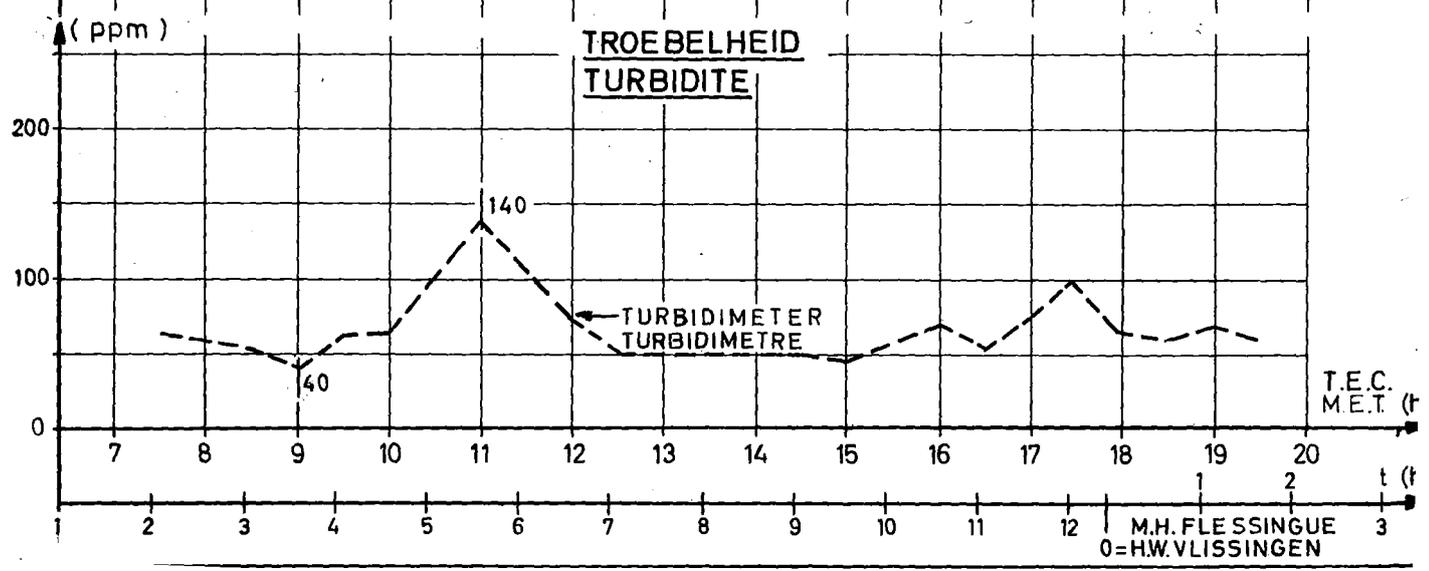
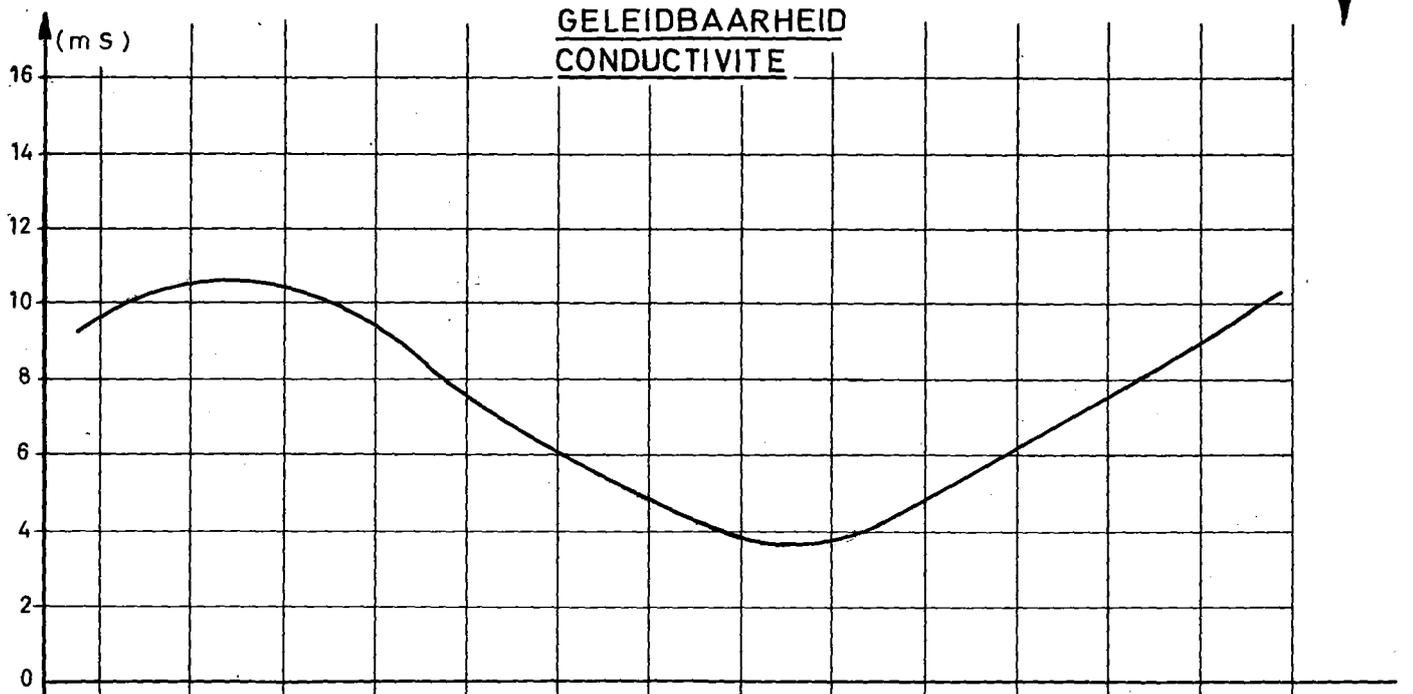
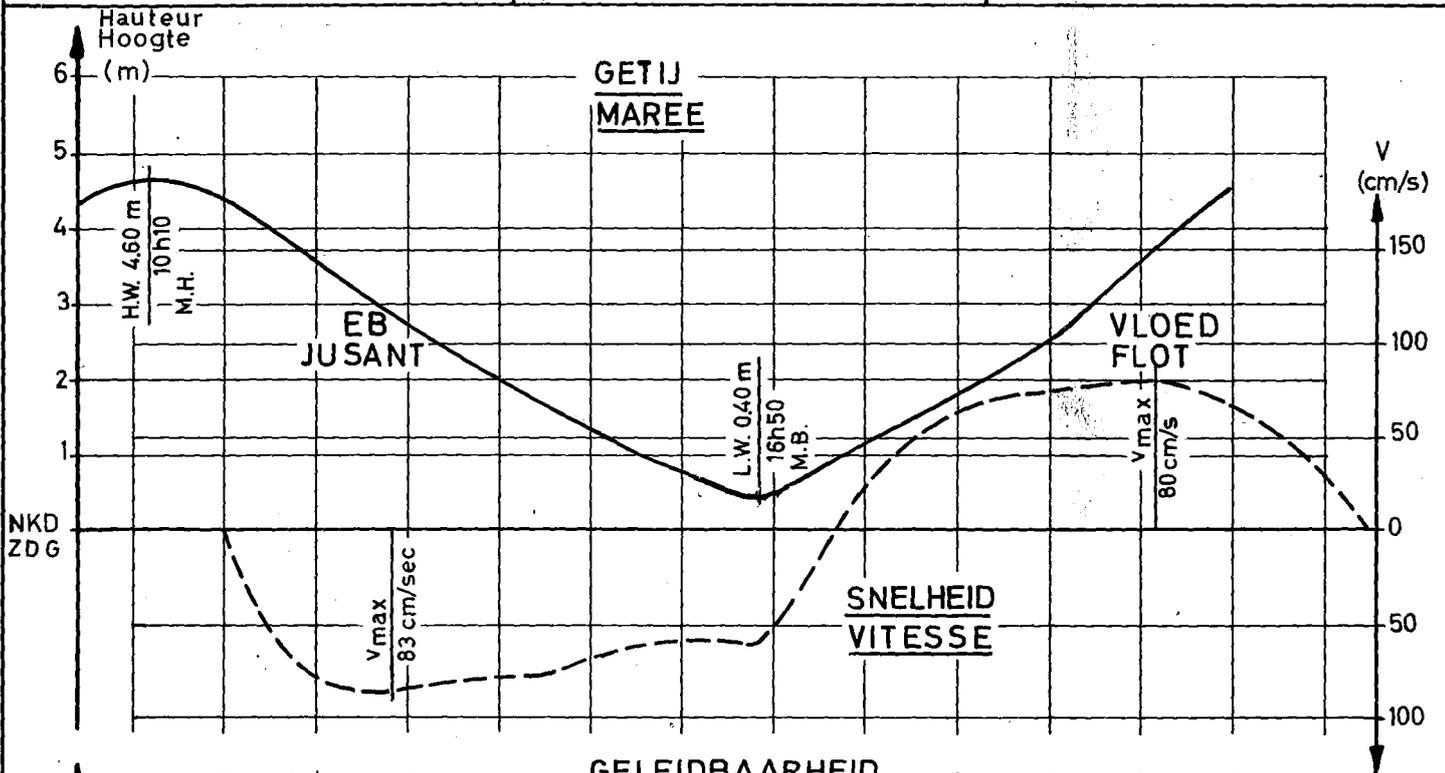
W.L. 67.449





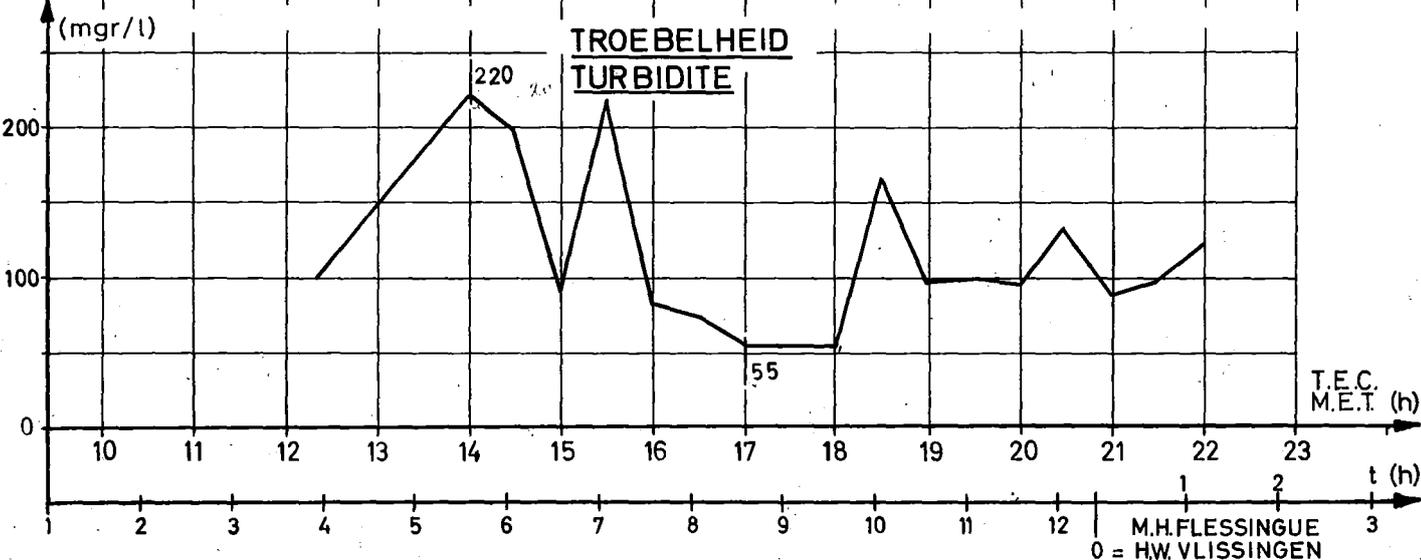
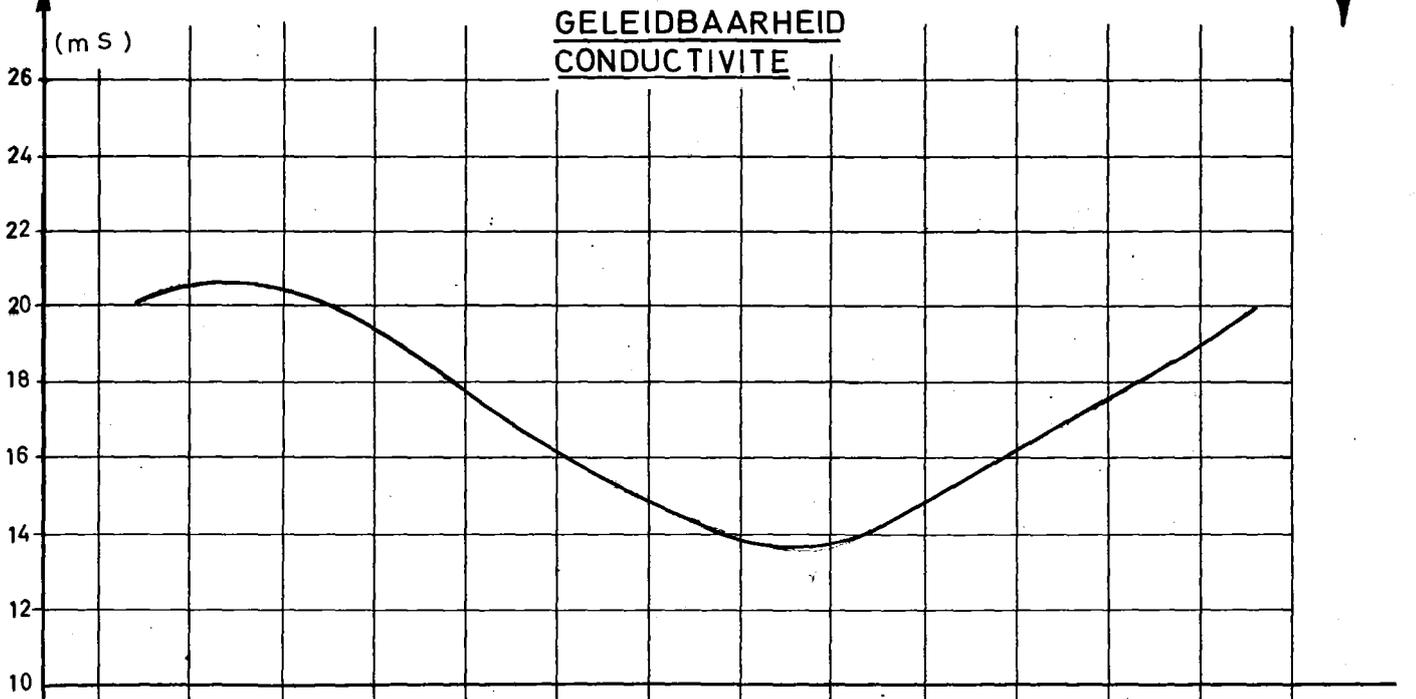
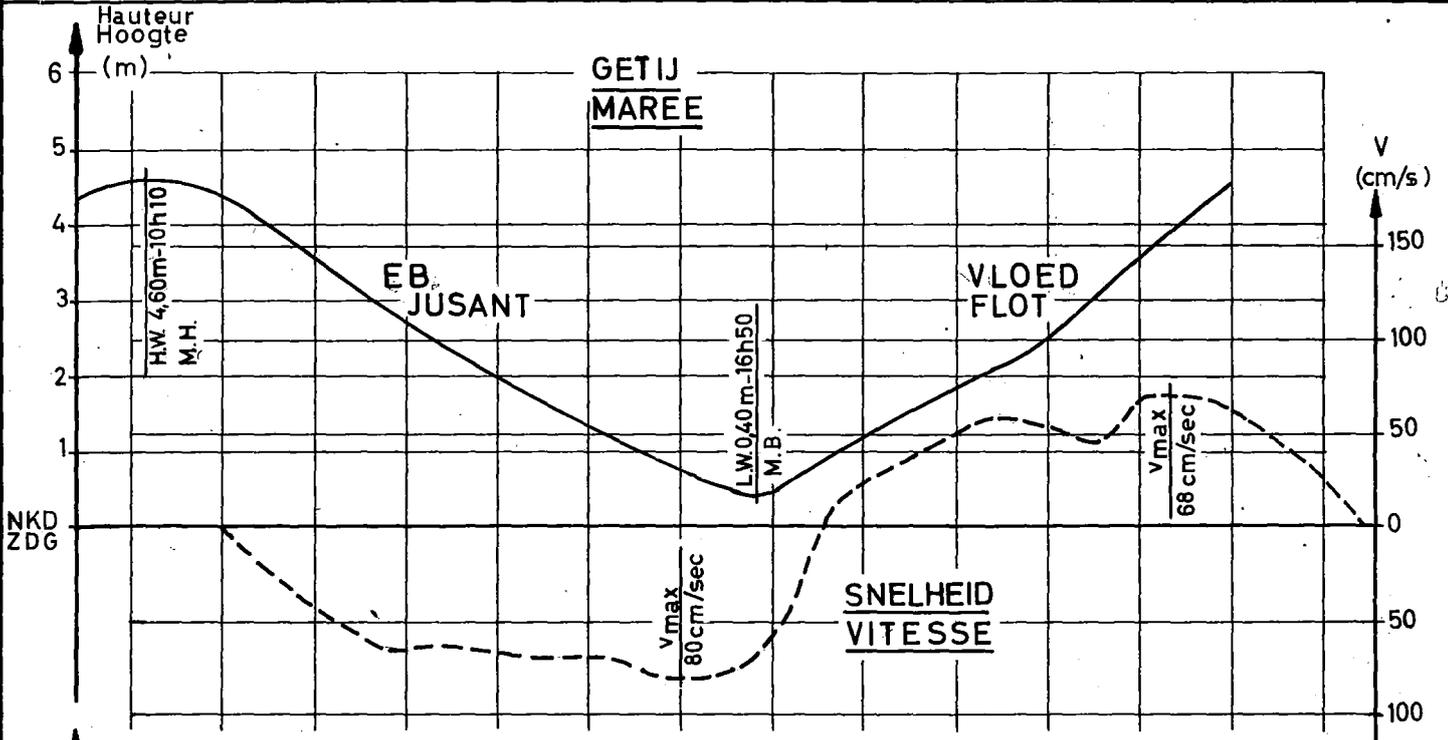
W.L. 67.496



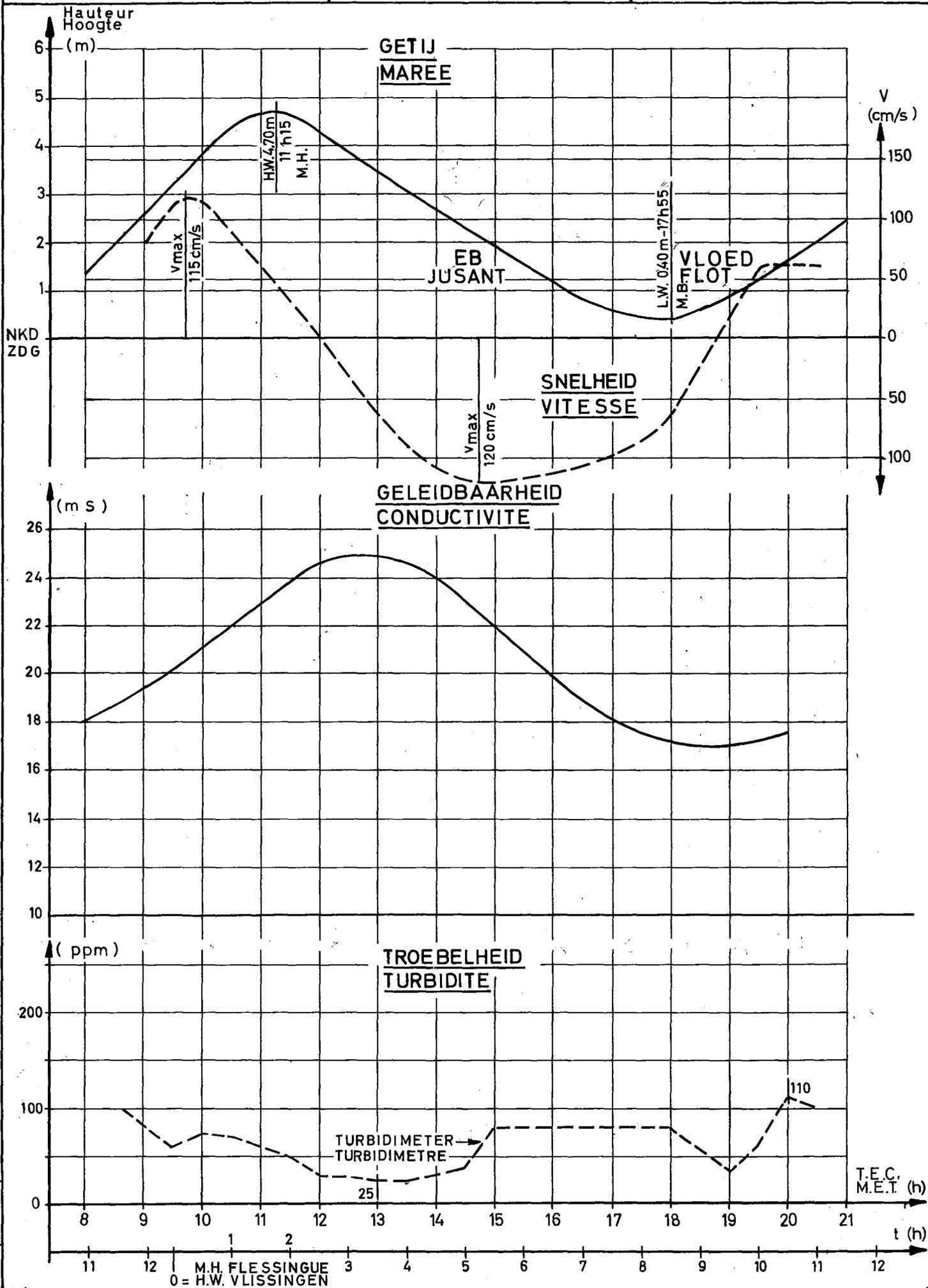


W.L. 67.484

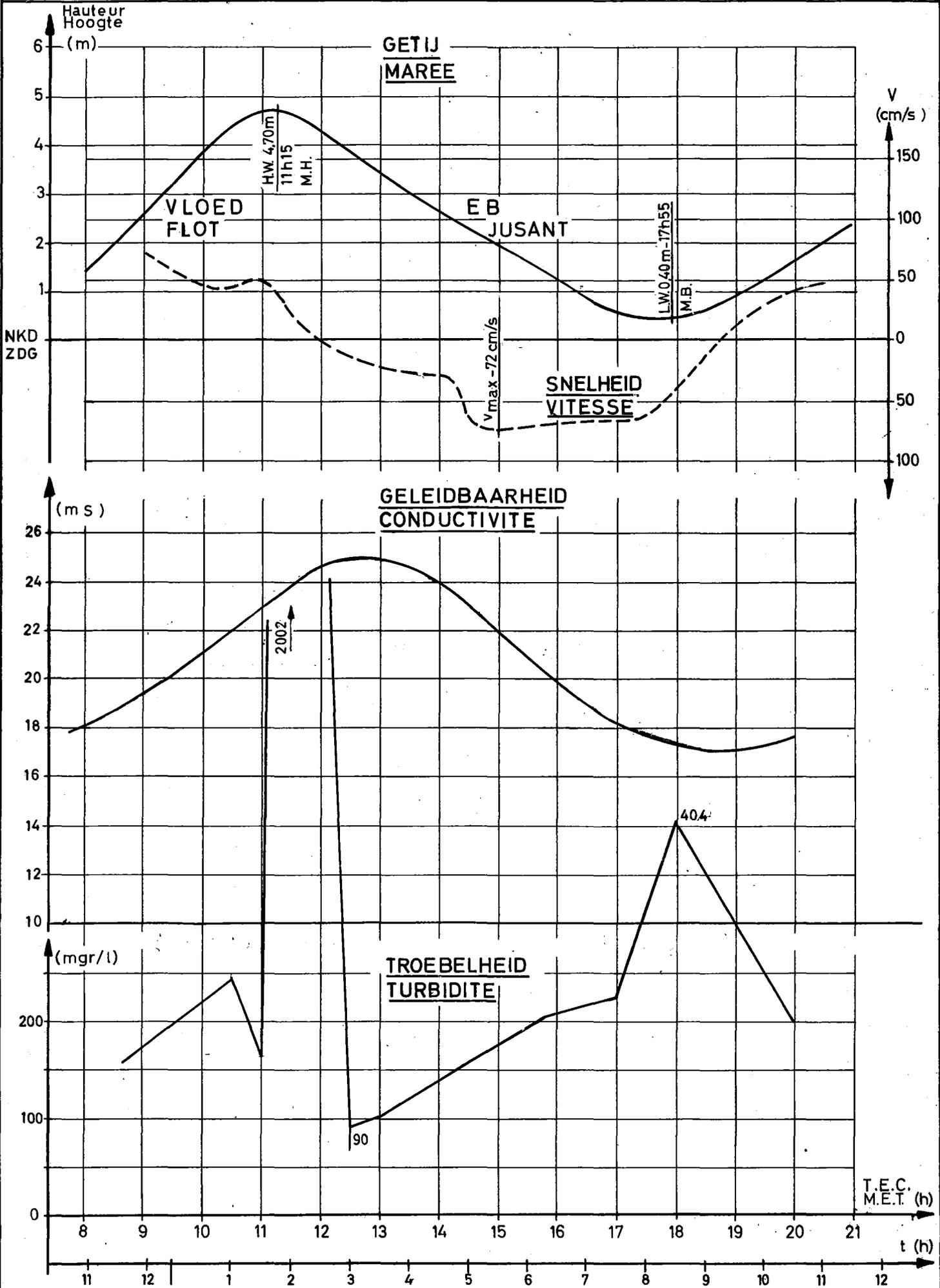
T.E.C. M.E.T. (t)

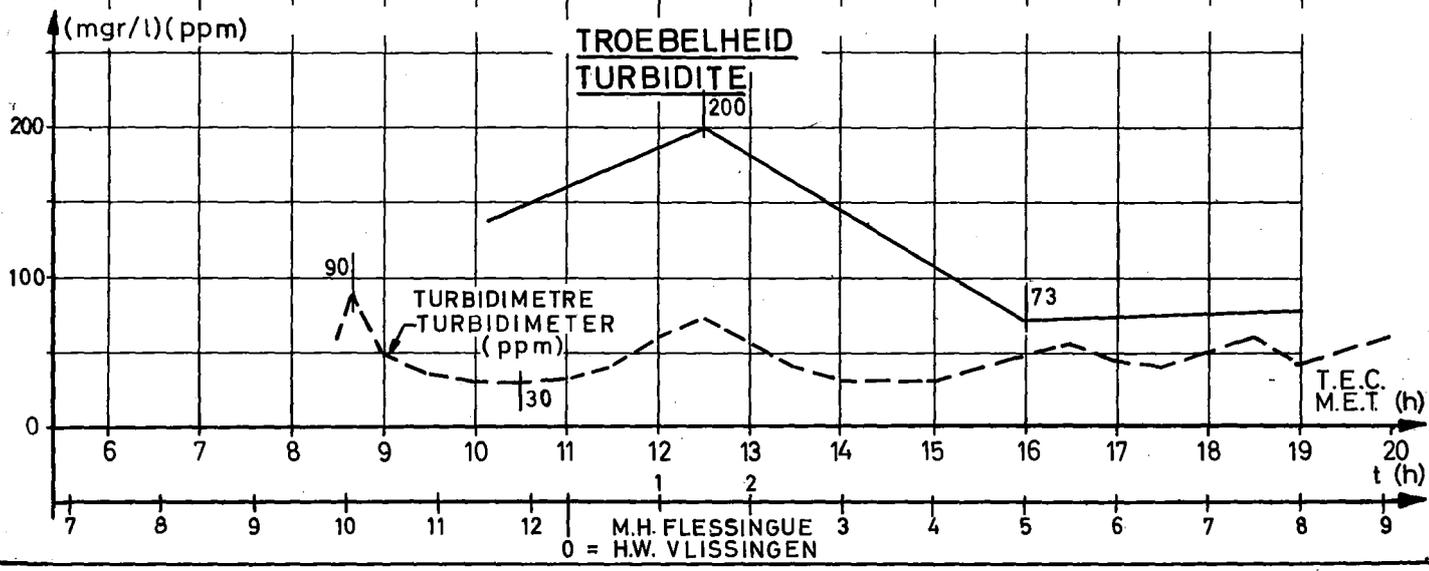
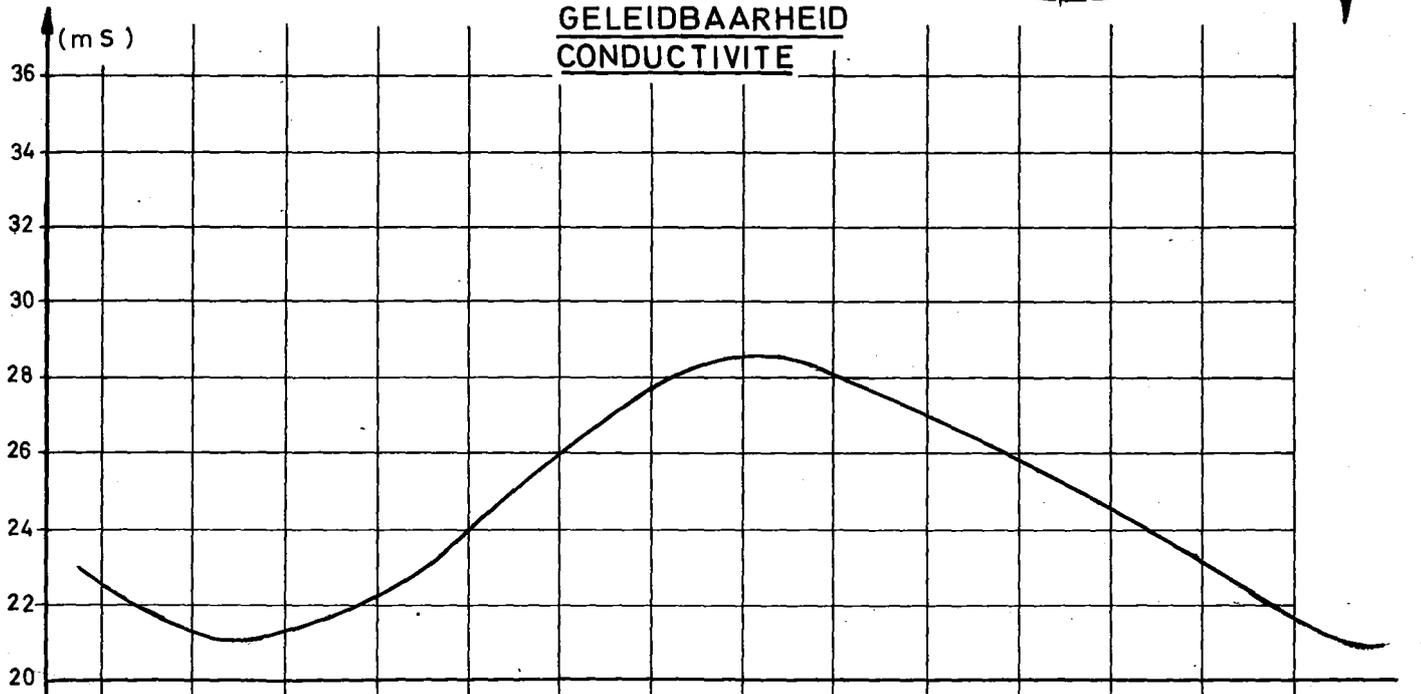
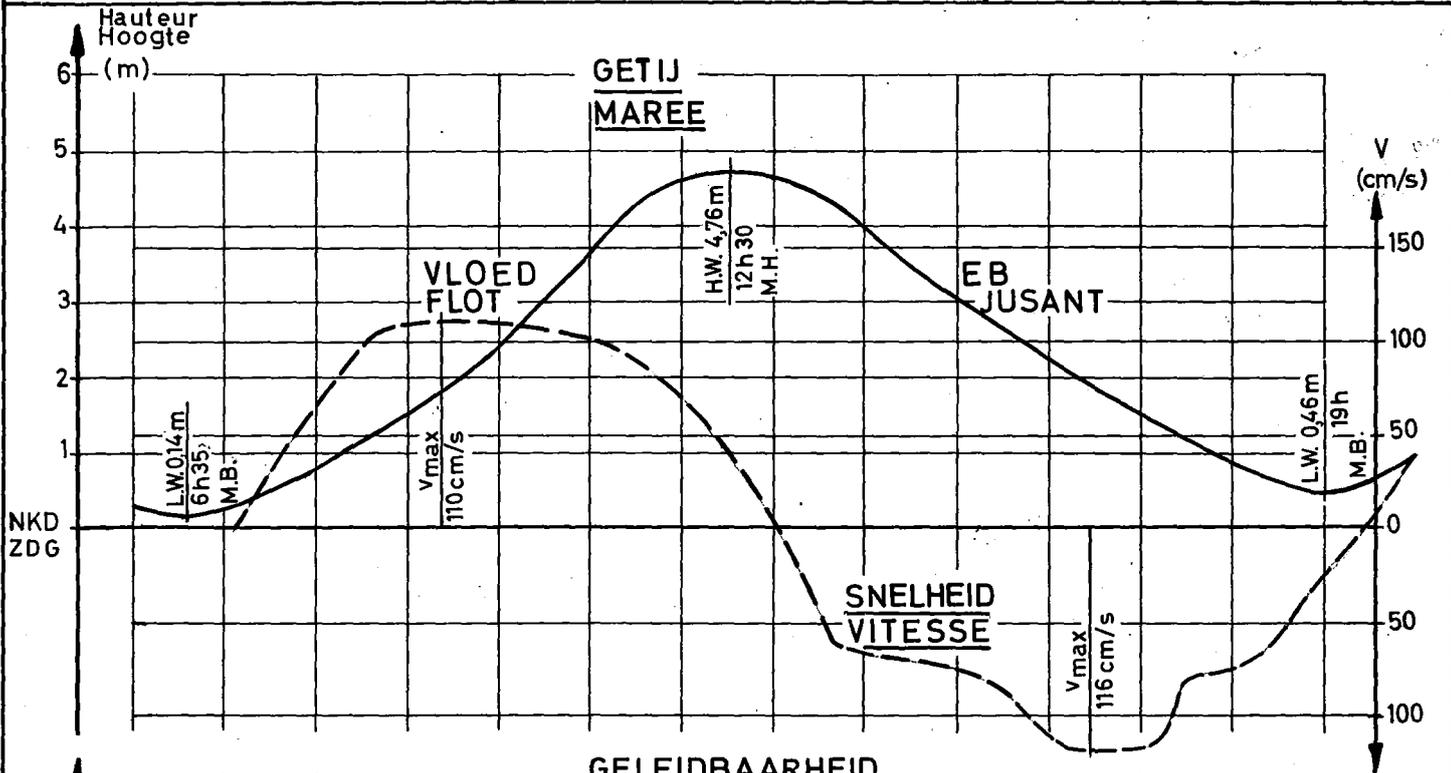


W.L. 67483

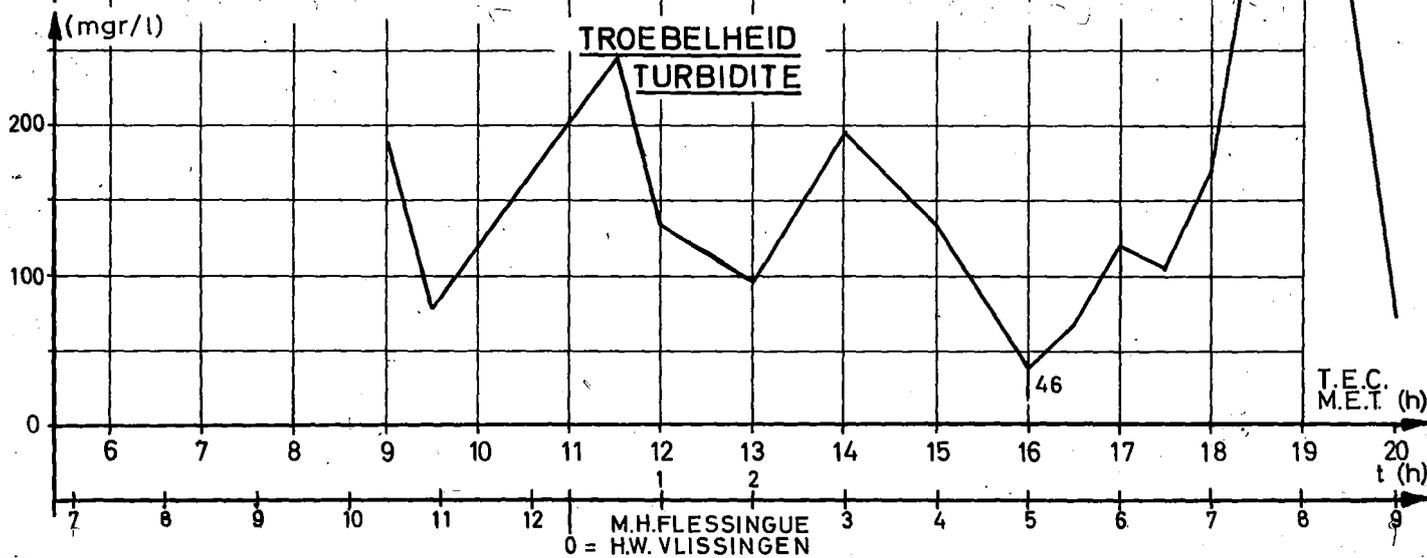
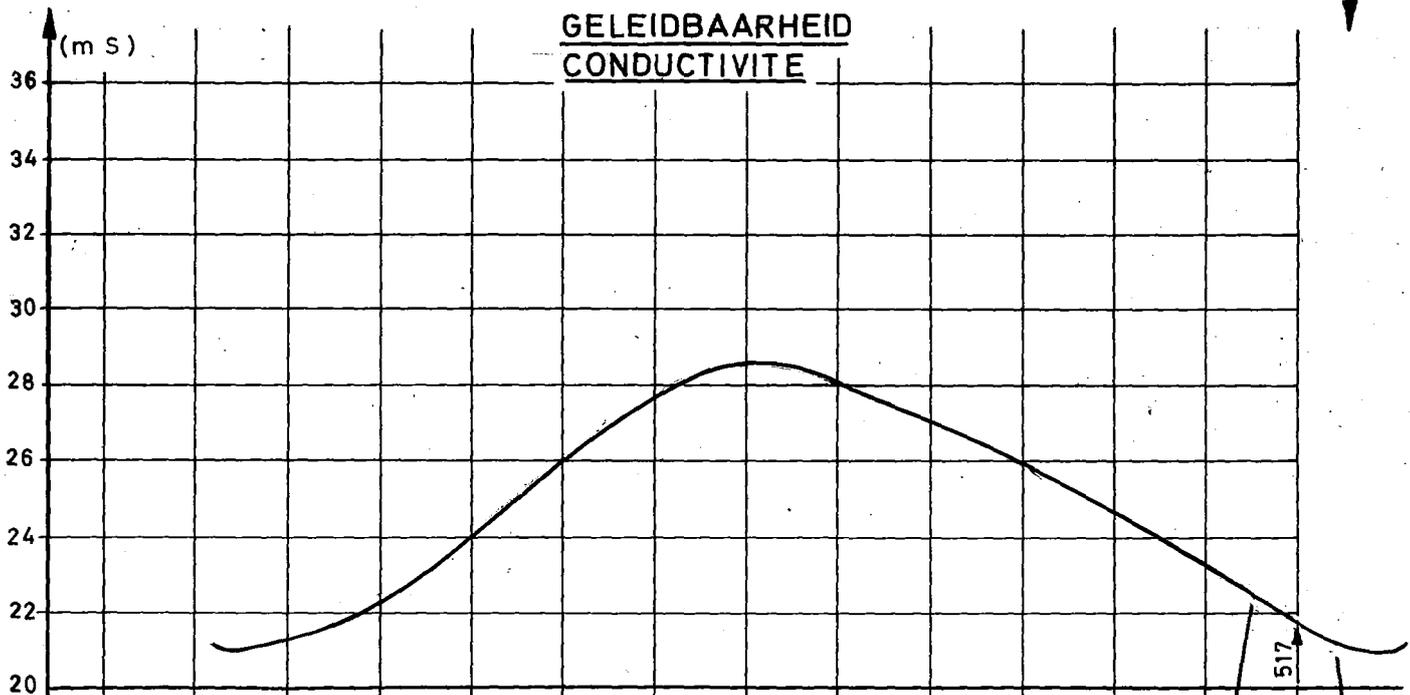
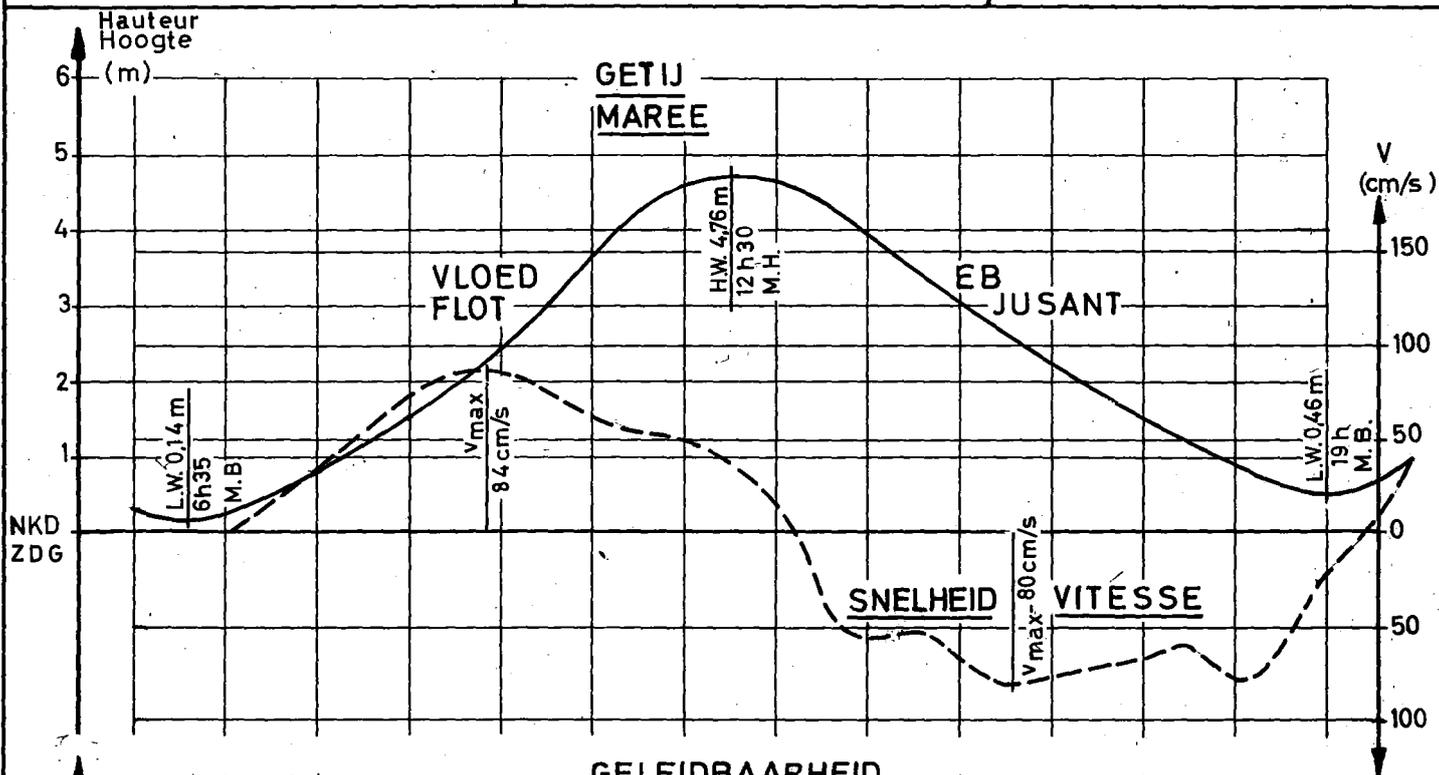


W.L. 67.486



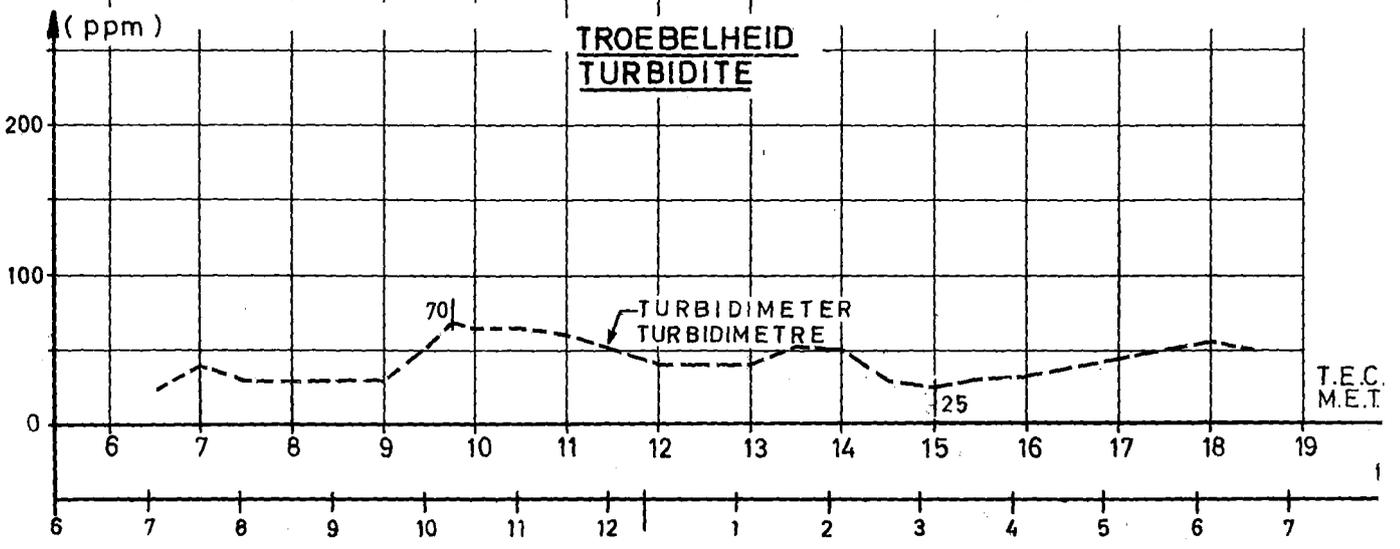
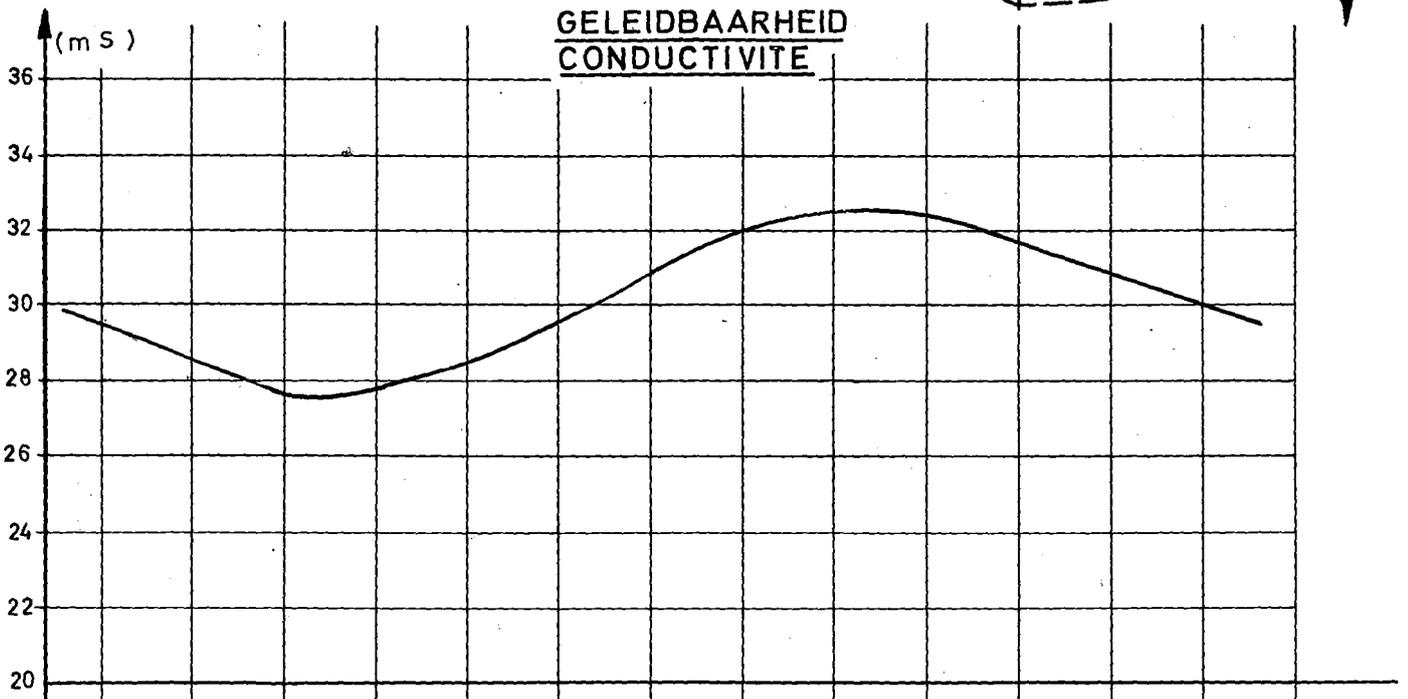
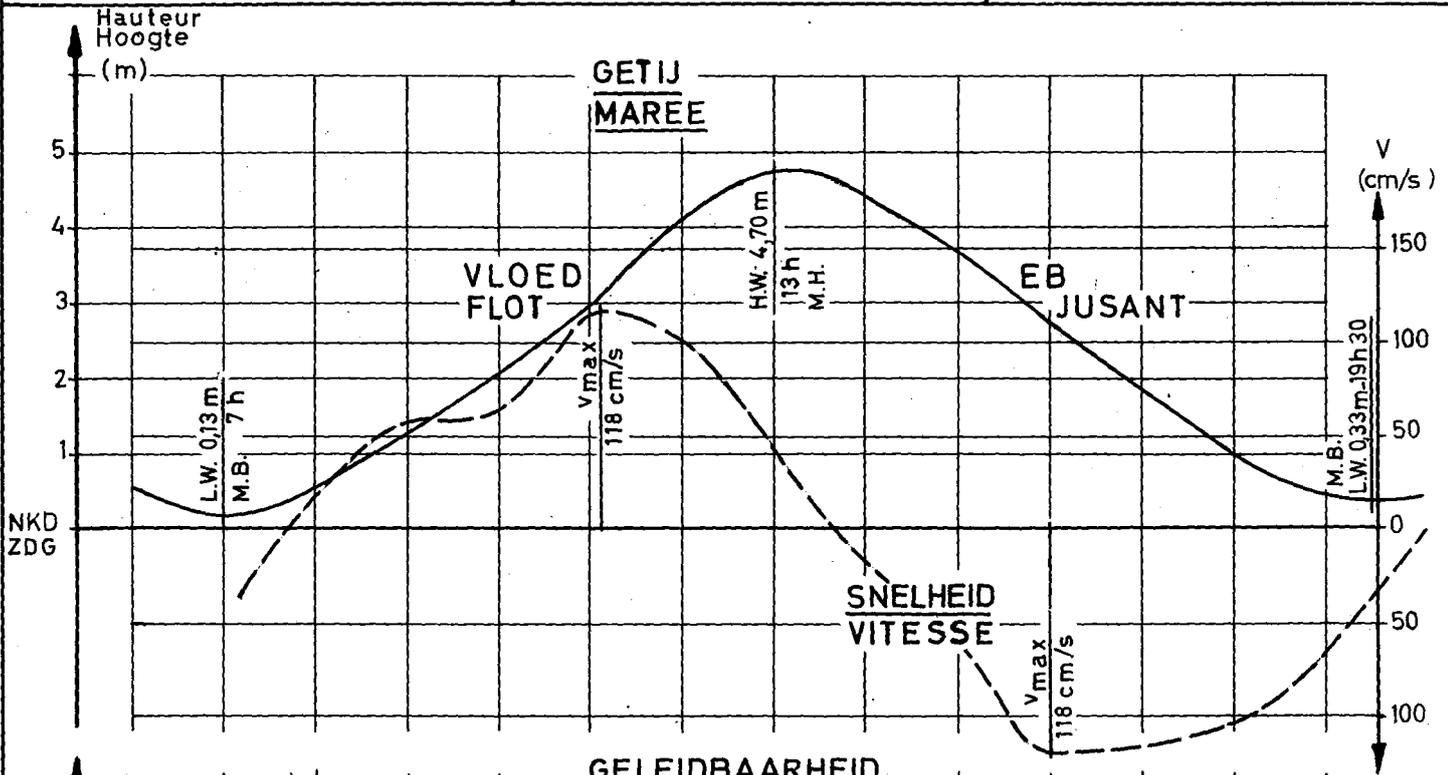


W.L. 67.488

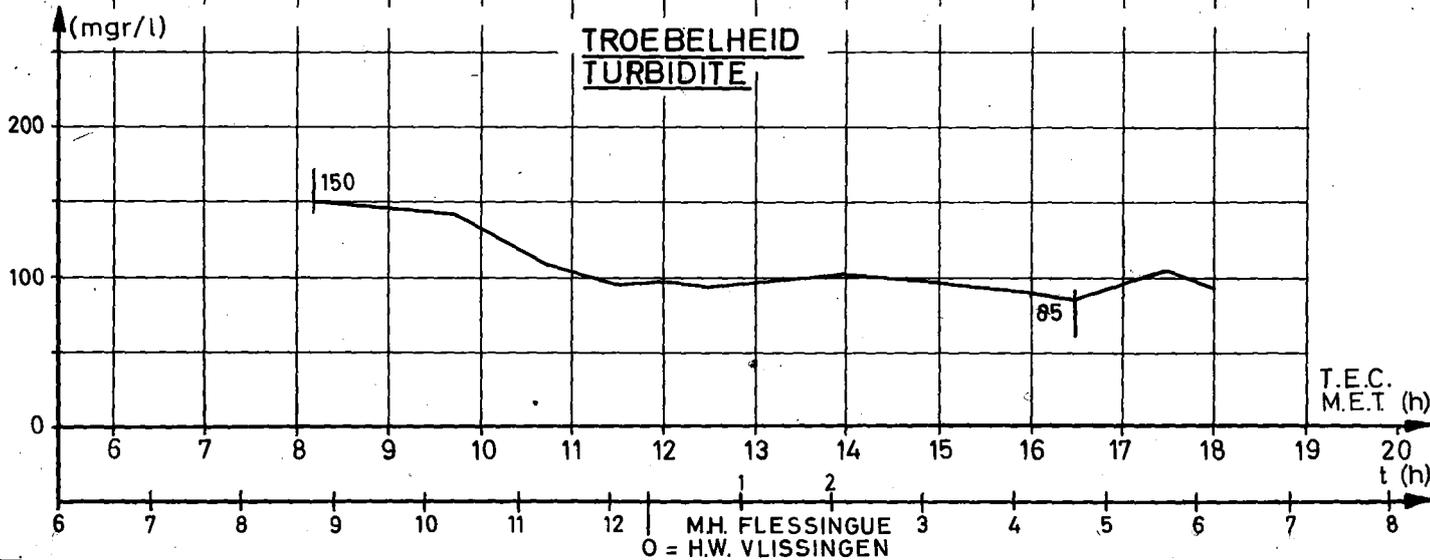
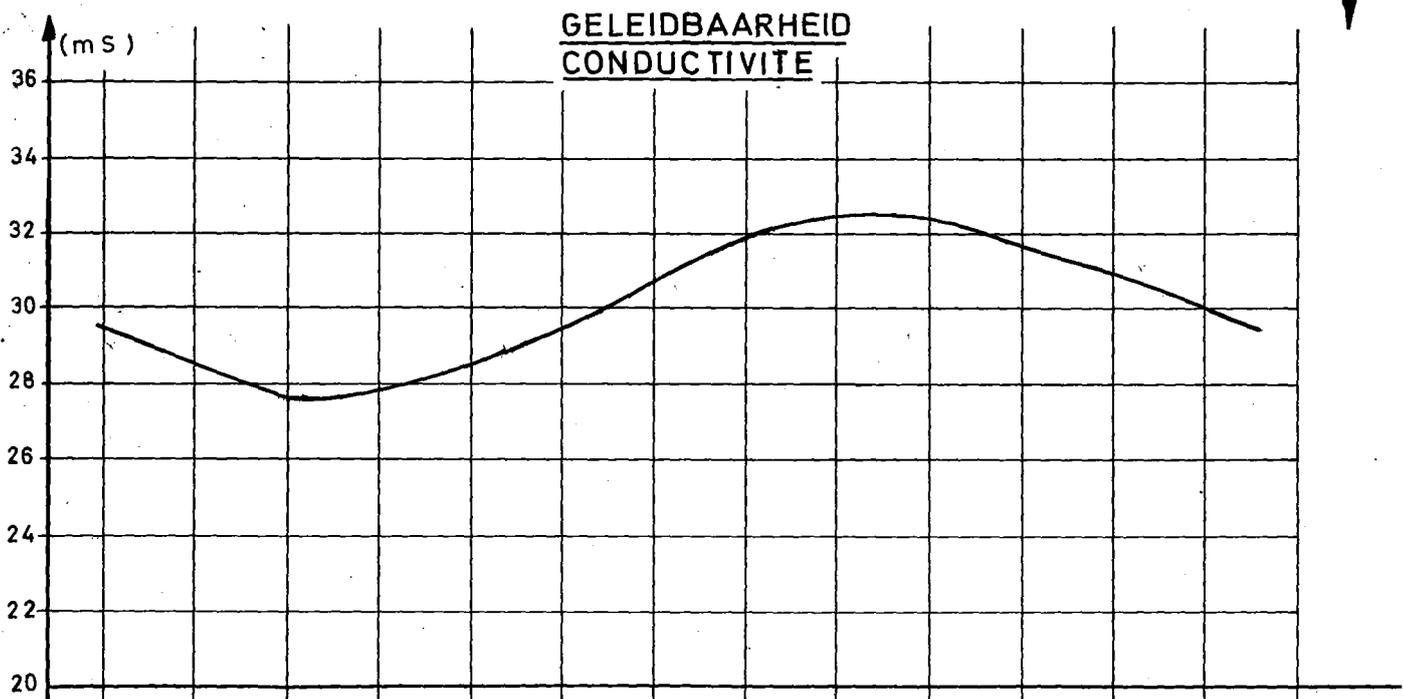
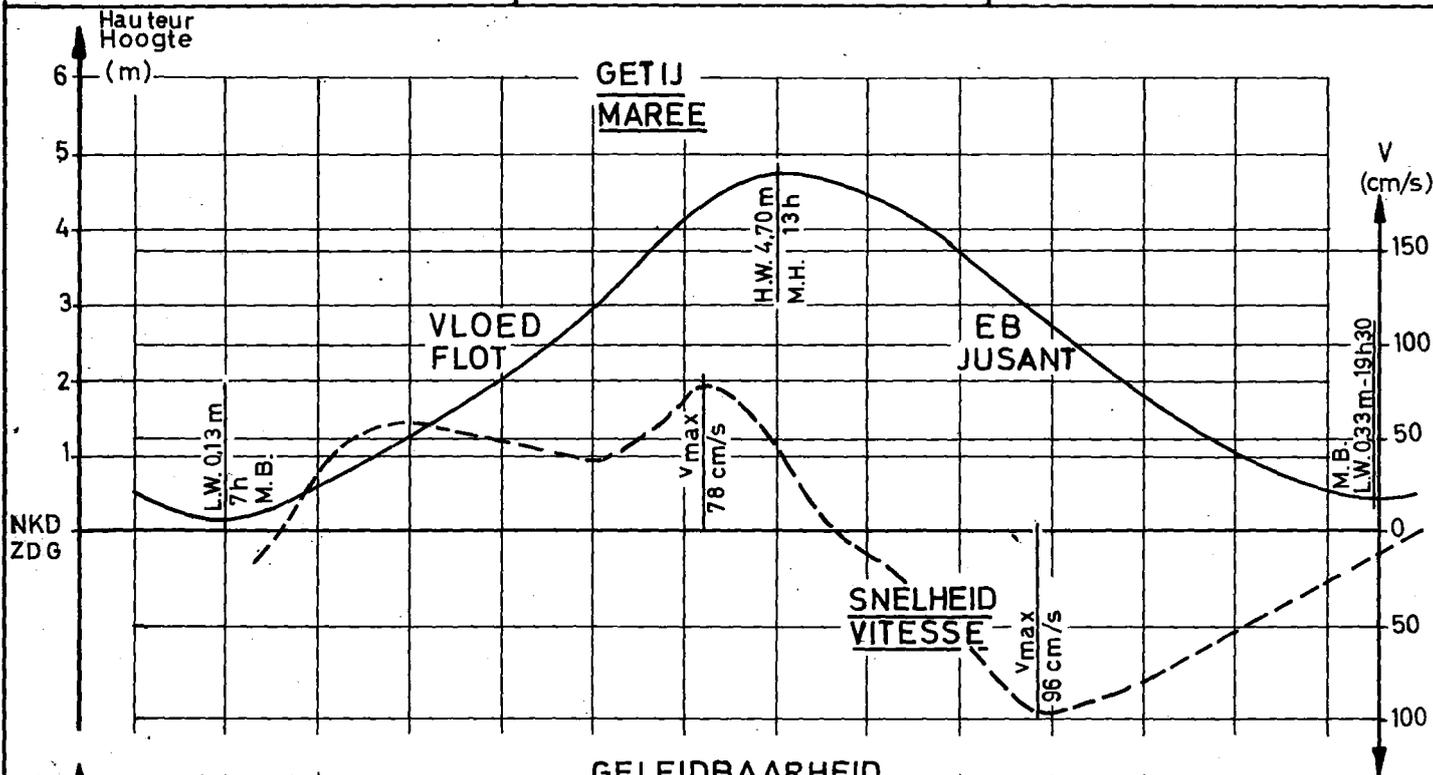


W.L. 67.487

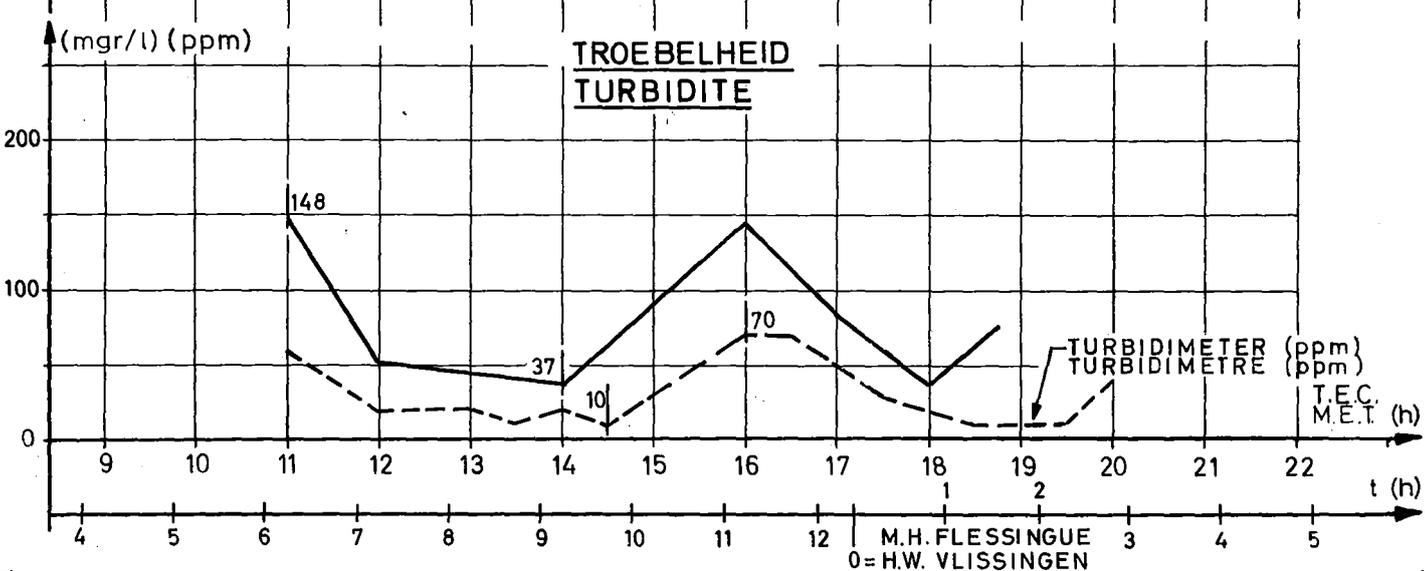
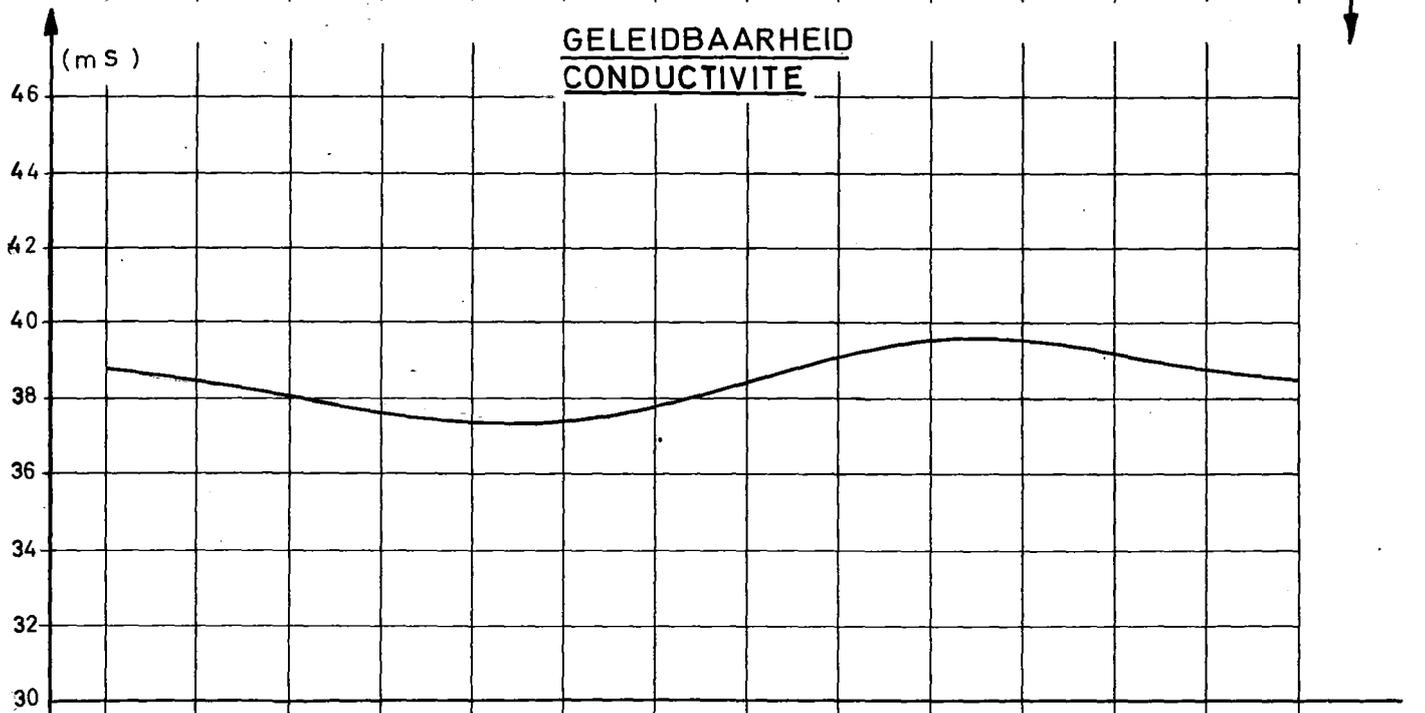
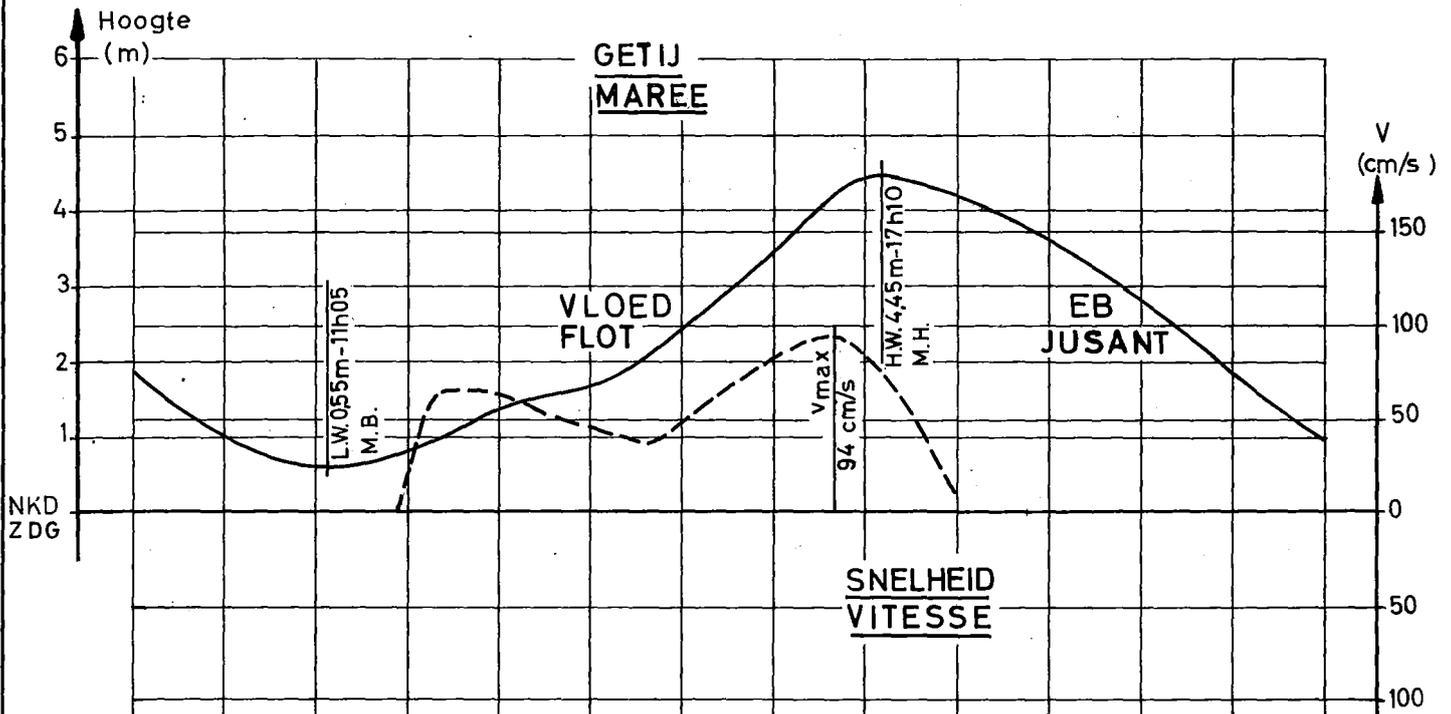
M.H. FLESSINGUE
 0 = H.W. VLISSINGEN



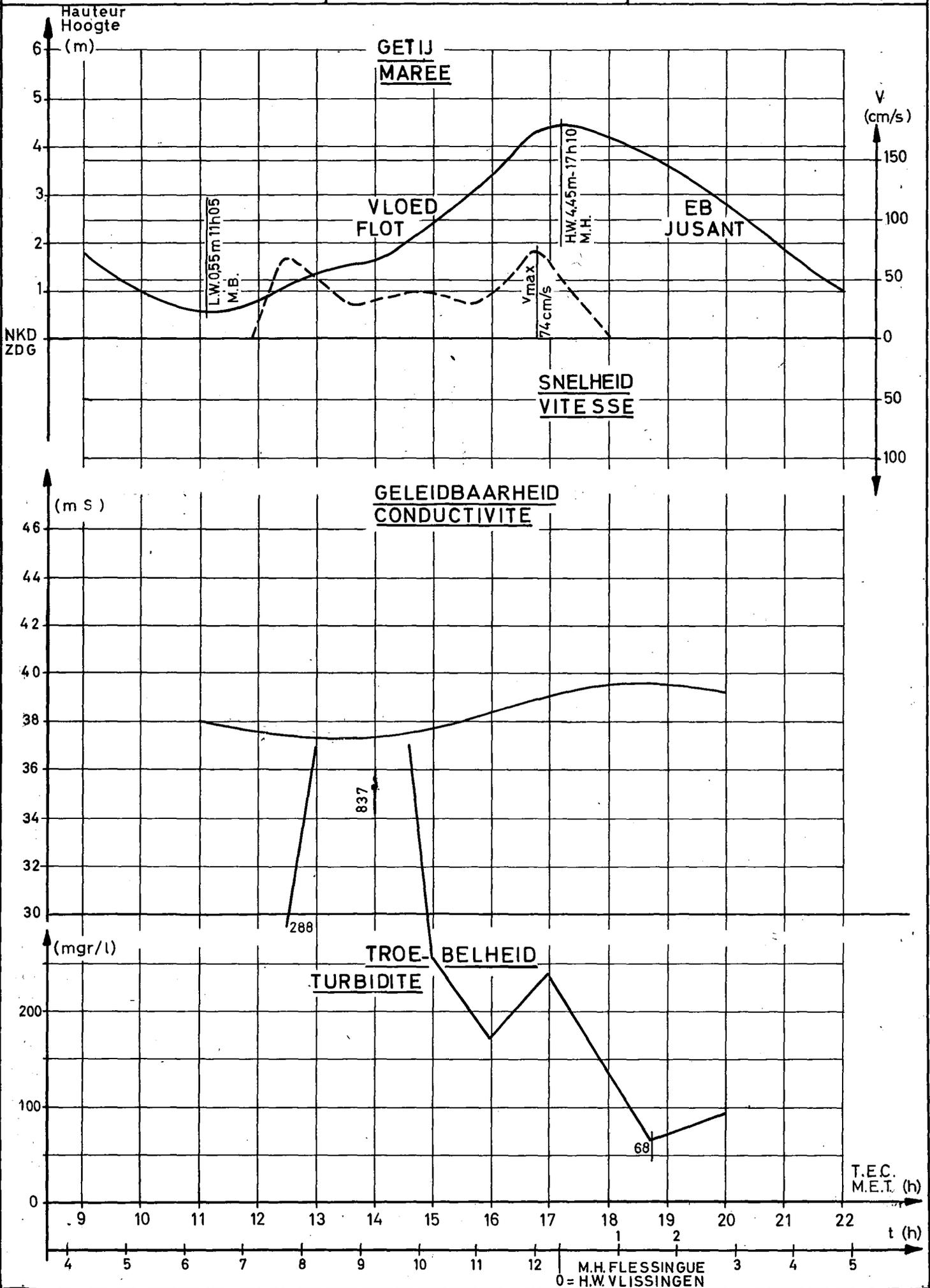
W.L. 67.490

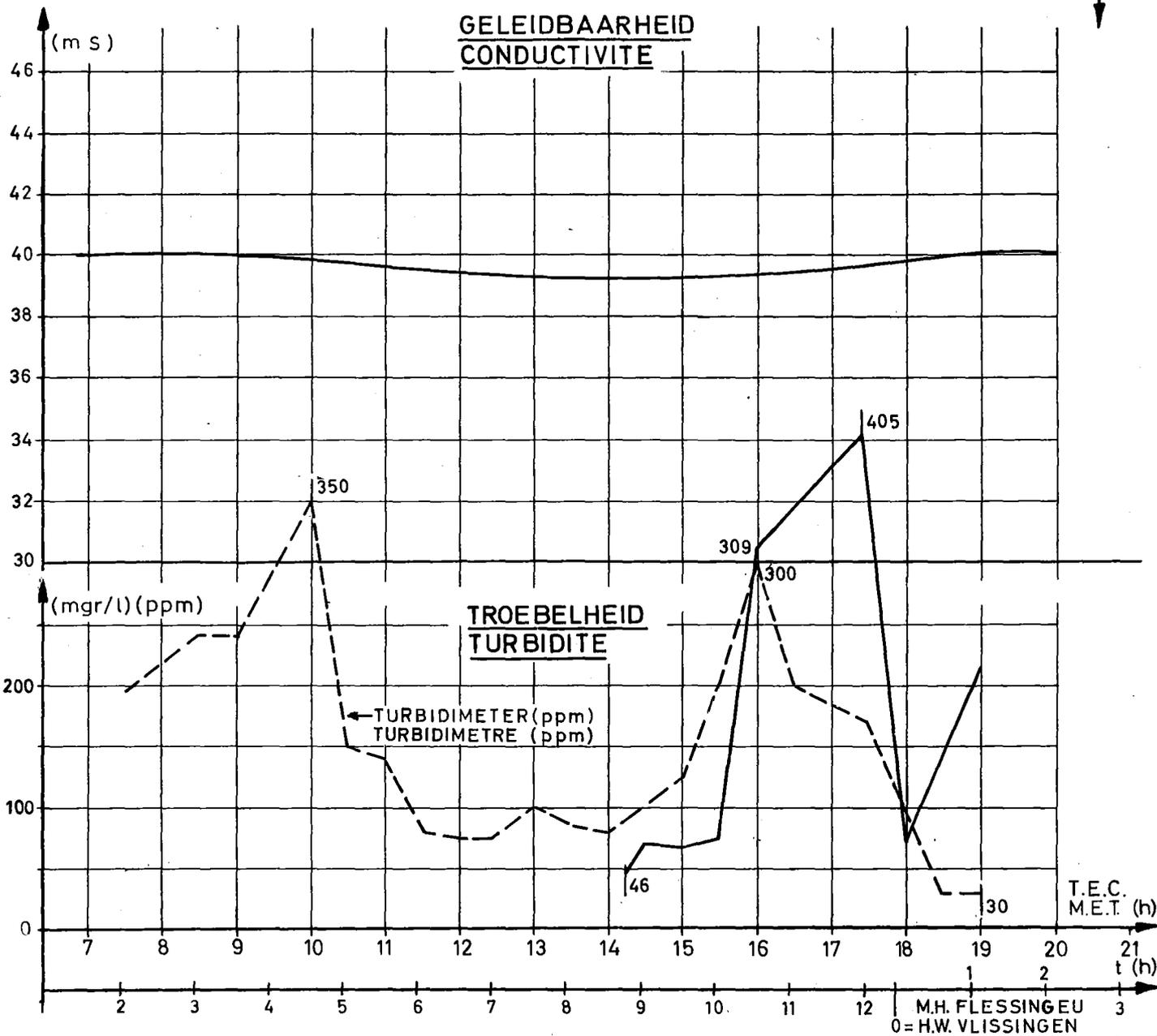
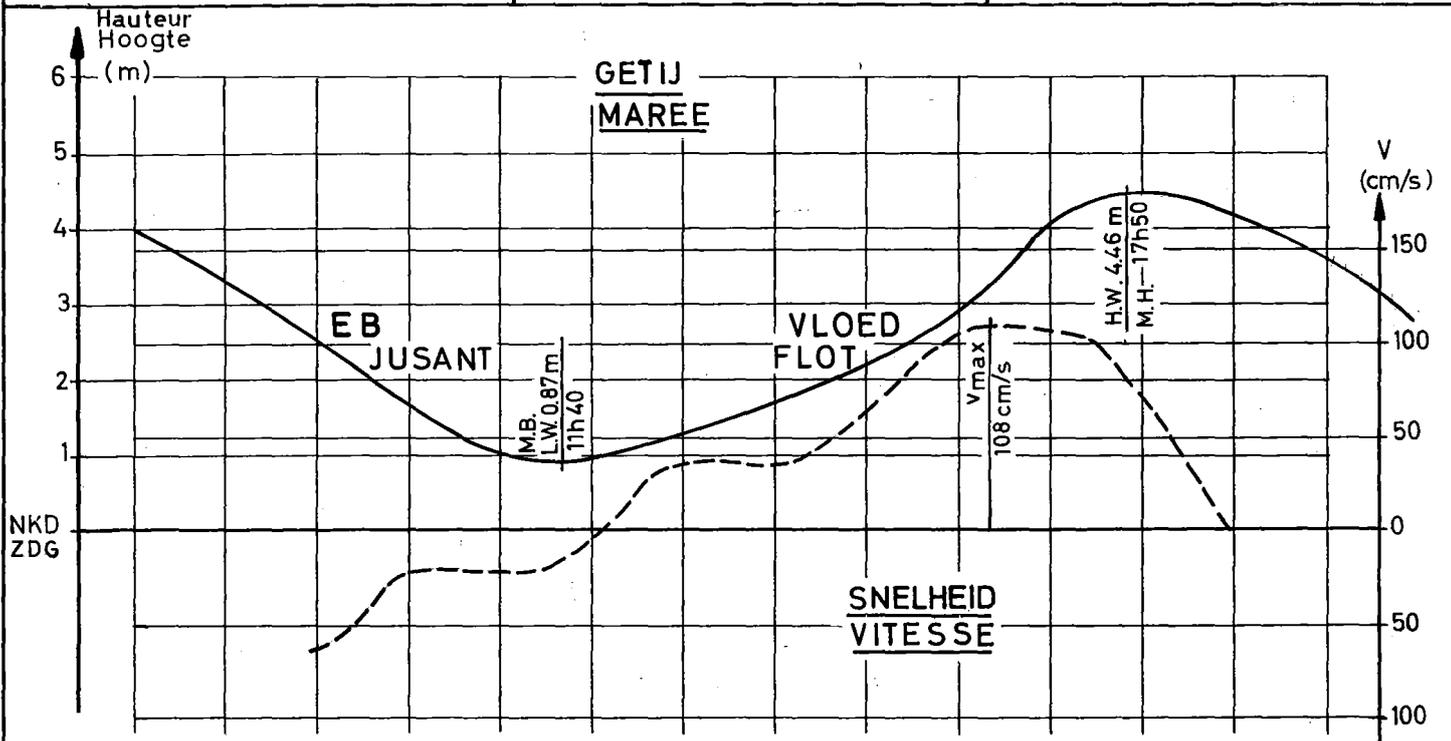


W.L. 67489

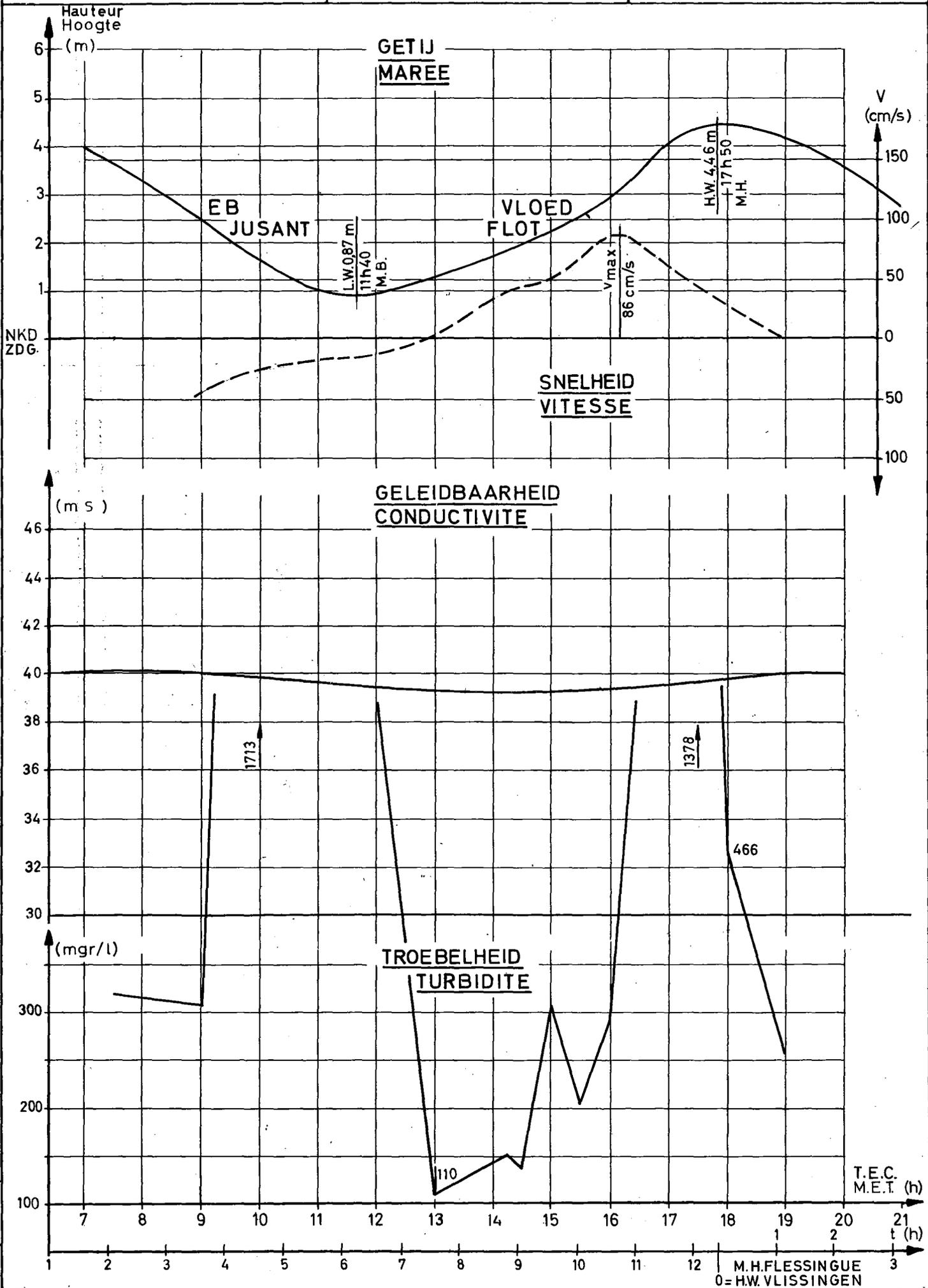


W.L. 67.492

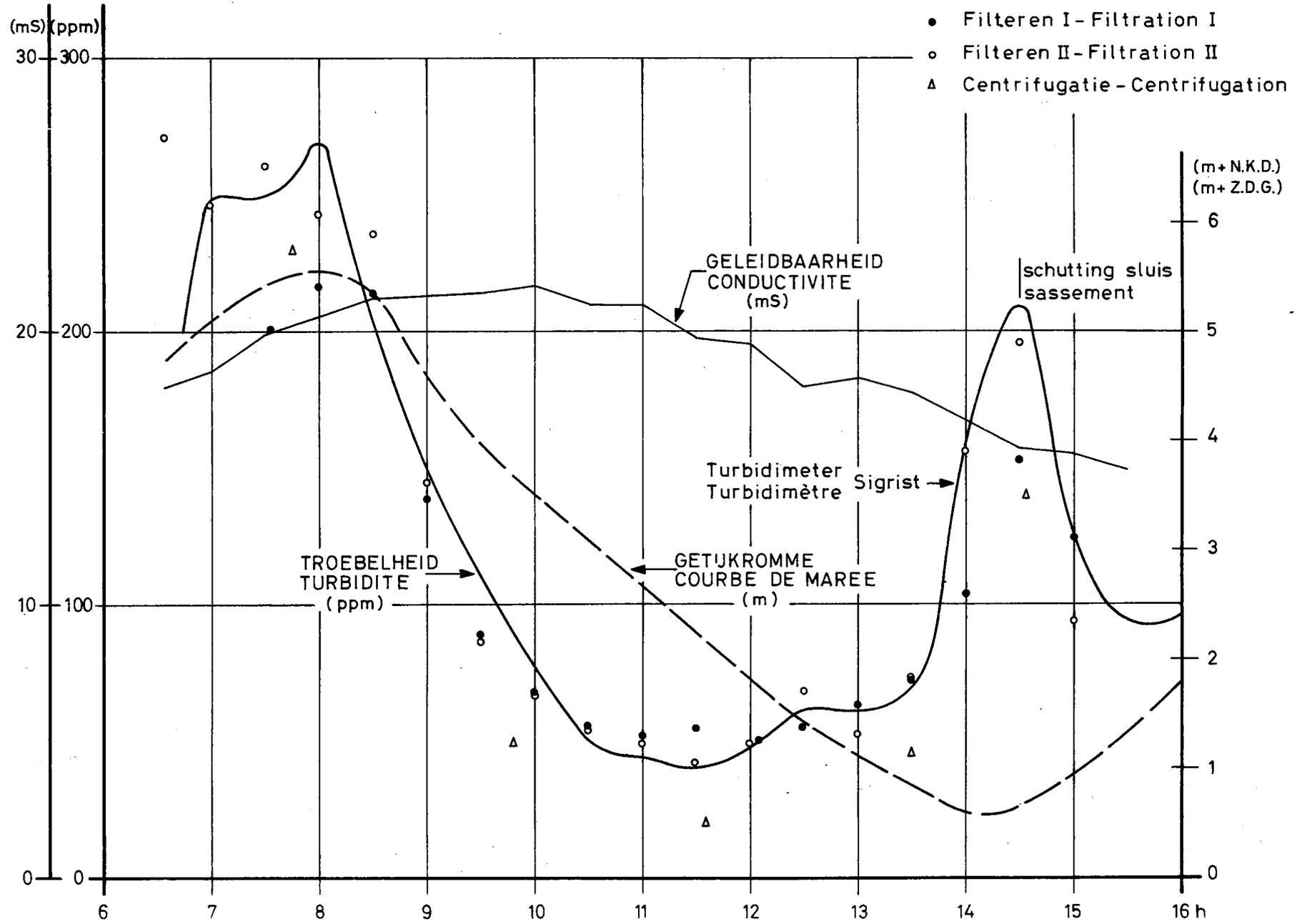




W.L. 67.494

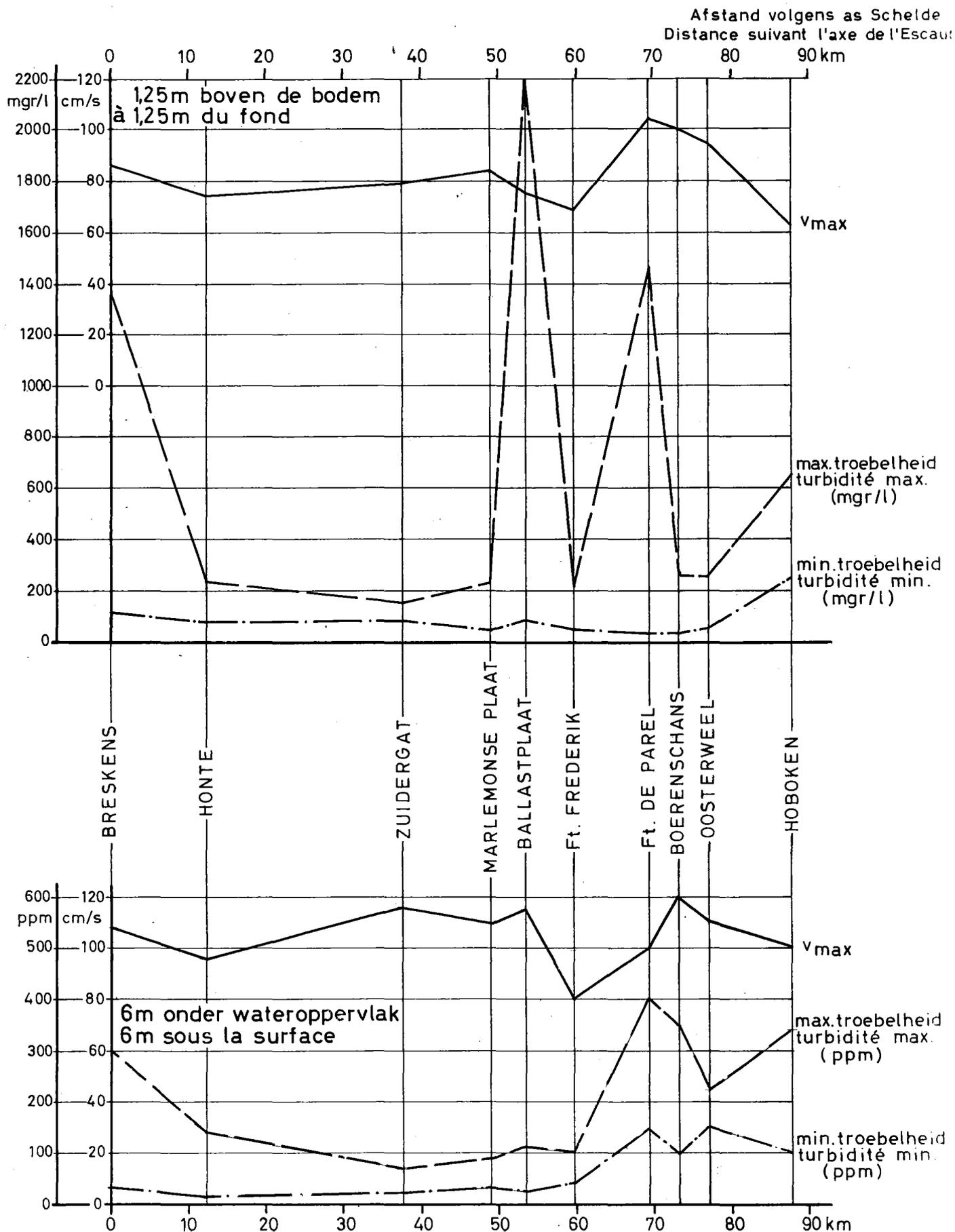


W.L. 67493



JULI
JUILLET 1967

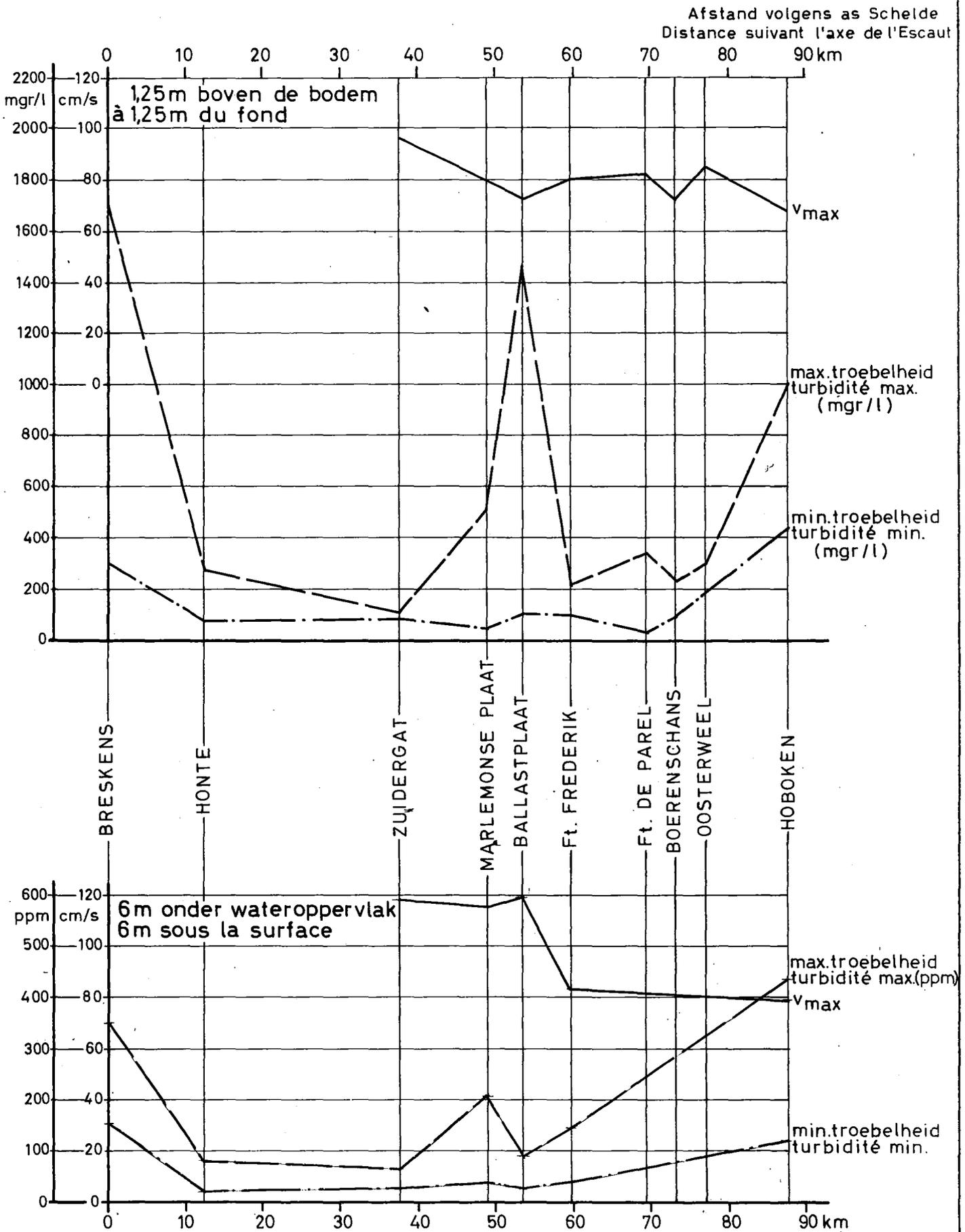
Variation de la vitesse et la turbidité

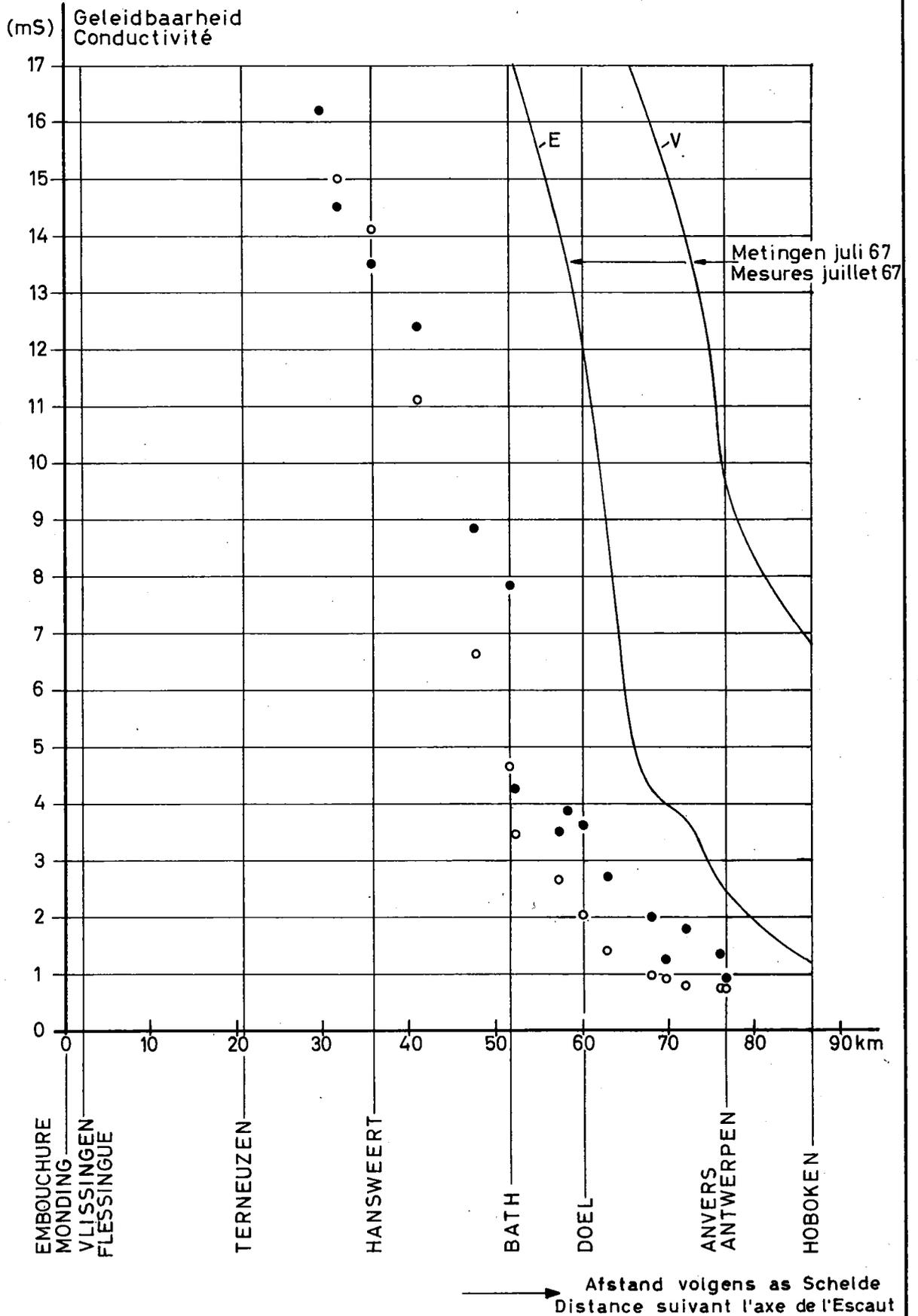


JULI
JUILLET 1967

Variation de la vitesse et la turbidité

Fig. 22





On pourrait améliorer l'efficacité de la méthode en multipliant le nombre de bateaux prenant part à l'opération. Certains de ceux-ci ne serviraient qu'à repêcher des flotteurs, noter leur numéro et les rejeter. Ceci n'est pas faisable, surtout que l'utilité de la méthode est de ne nécessiter qu'un personnel réduit. Avec plusieurs bateaux il vaut mieux utiliser des traceurs.

d. Analyses en laboratoire.

Les échantillons d'eaux et de sédiments ont été envoyés pour analyse aux Universités de Louvain et de Bruxelles.

La campagne de mesures de juillet 1967 a montré que l'Escaut était un estuaire où l'eau douce venant d'amont se mélange bien à l'eau de mer, mais que ce mélange n'est pas parfait puisqu'on trouve des gradients de salinités en fonction de la profondeur. L'estuaire de l'Escaut est un estuaire à mélange partiel.

Les turbidités sont en général inférieures à 1gr/l. La composition minéralogique semble changer au fur et à mesure que l'on s'éloigne du Rupel en se rapprochant de l'embouchure. Des analyses devront montrer si la suspension est plus vaseuse à Anvers qu'à Breskens.

La limite de salinité de 1,5‰ se trouve à Anvers. Cette limite correspond au début d'une floculation de la suspension fine.

3 . Mesures février 1968.

Dans le cadre de l'étude de l'envasement du chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet il était intéressant de savoir comment évoluait la salinité entre Anvers et Hansweert. Les mesures se sont donc

limitées au prélèvement d'échantillons d'eau entre ces deux localités. L'évolution de la conductivité est représentée à la figure 23 .

La limite de salinité de 1,5‰ correspondant à une floculation rapide se situe au niveau du Ballastplaat, c'est-à-dire dans les environs immédiats de l'écluse de Zandvliet. Postma (P2) a constaté un maximum de turbidité dans les estuaires lorsque la salinité passe de 0,2 à 2 ‰ .

4. Conclusions.

Nous ne possédons encore que des données fragmentaires sur la sédimentologie de l'Escaut maritime. Des campagnes de mesures telles que celle de juillet 1967 sont nécessaires pour mieux comprendre ce qui se passe dans les chenaux d'accès aux écluses du port d'Anvers.

Le fait que l'estuaire de l'Escaut n'est pas un estuaire à mélange parfait peut faire craindre qu'il y existe un "bouchon vaseux".

Outre les causes dont nous avons déjà parlé, ce bouchon peut en avoir une autre qui a été découverte par des chercheurs américains (S2). Dans un estuaire à mélange parfait la moyenne des vitesses sur une marée est à tout endroit et à toute profondeur dirigée vers l'embouchure. Mais un gradient vertical de salinité même insignifiant peut créer des courants moyens près du fond dirigés vers l'amont dans une partie de l'estuaire près de l'embouchure.

La longueur de cette partie est fonction du débit amont. Le mouvement moyen horizontal oscillant de l'eau et des sédiments près du fond y est dirigé vers l'amont. En amont de cette partie, la composante moyenne des vitesses est dirigée vers l'aval. A la limite entre les deux se créent des dépôts très importants.

Nous essayerons de mettre ce problème en évidence.

LEXIQUE

- amont : Indique la partie d'un cours d'eau d'où vient l'eau.
- amplitude de marée : Différence maximum du niveau des eaux provoquée lors d'une marée.
- anion : Ion chargé négativement.
- anisotrope : Dont les propriétés physiques dépendent de la direction suivant laquelle on les évalue.
- aval : Indique la partie d'un cours d'eau située vers l'embouchure.
- carotte : Echantillon de roche (dans ce cas ci roche sédimentaire) prélevé avec un instrument de forage en forme de tube appelé carottier.
- charriage : Mode de transport d'un sédiment sous l'influence d'un courant fluide. Le sédiment en mouvement est pratiquement toujours en contact avec le sédiment sous-jacent.
- cation : Ion chargé positivement.
- Chenal : Voie d'eau assez longue, bordée de dangers, ménagée par la nature ou artificiellement et servant d'accès suffisamment profond et sûr à un port ou une rade.
- colloïde : Ensemble de particules de dimensions inférieures au micron et qui reste en suspension stable.

- conductivité ; Inverse de la résistivité (électrique).
- courant de densité : Courants provoqués par la mise en présence de deux liquides de densités différentes. Le liquide le plus lourd tend à s'écouler sous le liquide le plus léger.
- courant de marée : courant provoqué par le mouvement de la marée.
- darse : Bassin dans un port.
- débit : Volume d'eau écoulé en un point donné pendant l'unité de temps.
- débit solide : poids de solide passant en une section du fleuve pendant l'unité de temps.
- densité : Rapport de la masse d'un certain volume d'un corps à celle du même volume d'eau.
- digues submersibles : Ouvrage destiné à orienter les courants de façon à entretenir naturellement les profondeurs d'eau à certains endroits. La crête de la digue est sous eau pendant une partie de la marée.
- écho-sondeur : Appareil servant à déterminer la profondeur de l'eau. Un rayonnement ultrason, émis à partir de la surface, réfléchi par un obstacle, est enregistré avec un retard fonction de l'éloignement de celui-ci.
- écluse maritime : Ecluse séparant un cours d'eau ou un port non soumis à la marée de la mer ou d'un cours d'eau soumis à la marée.

- envasement : Amas de vase apporté par les eaux, déposé en un endroit à cause de modifications physiques ou chimiques du cours d'eau.
- ensablement : Amas de sable apporté par les eaux, déposé en un endroit à cause de modifications physiques ou chimiques du cours d'eau.
- érosion : Réduction des reliefs sous l'action des courants.
- estuaire : Un estuaire est une étendue d'eau semi-fermée en contact avec la mer et dans laquelle l'eau de mer est diluée d'une façon mesurable avec l'eau douce provenant du drainage des terres.
- floculation : processus physico-chimique d'agglomération de particules colloïdales.
- flot : Période de la marée pendant laquelle l'eau pénètre dans l'estuaire.
- géologie : Science qui a pour objet la description des matériaux constituant le globe terrestre, l'étude des transformations actuelles et passées subies par la terre.
- granulométrie : Classement d'une matière pulvérulente en pourcentage de grains de différentes grosseurs qui les composent.
- jusant : Période de la marée pendant laquelle l'eau sort de l'estuaire.

- marée : la marée dans les estuaires ne constitue pas une onde d'oscillation , au sens classique du terme, puisque les renverses de courant ne sont pas en quadrature avec les étales de hauteur, mais les suivent ou les précèdent d'assez peu. La marée dans les estuaires ne constitue pas non plus une onde de translation , puisque l'eau s'y meut de part et d'autre d'une position moyenne au lieu de progresser par bonds.
- marnage : amplitude de la marée = différence de hauteur entre marée haute et marée basse.
- micron : millième de millimètre.
- moulinet hydrographique : instrument de mesure de vitesse. Le courant de l'eau provoque la rotation d'une hélice dont la mesure est fonction de la vitesse.
- passage navigable : ligne de fonds suffisants à la traversée d'un banc sous-marin ou d'une barre fluviale, entretenue naturellement ou artificiellement.
- pH : exprime l'inverse du logarithme de l'activité en ions H_3O^+ . Il représente le degré d'acidité ou de basicité d'une solution.
- poids spécifique : rapport du poids d'un corps à son volume. S'exprime en kg/m^3 .
- profil instantané de la marée : surface libre de l'onde-marée le long de l'estuaire à un instant donné, pour un marnage donné en mer ouverte et pour un débit du fleuve donné.

- salinité : La salinité est le poids de sel dissous dans un litre d'eau.
- sédimentation : Formation de sédiments sous l'influence de facteurs hydrauliques, physiques, chimiques ou biologiques.
- sédiments : Dépôt qui se forme dans un fluide ou des particules sont en suspension.
- seuil : élévation du fond d'un estuaire ou de la mer entre deux parties profondes.
- silice : ~~Oxyde~~ oxyde de silicium. SiO_2 .
- suspension : Etat d'un solide très divisé, mêlé à la masse d'un liquide sans être dissous par lui.
- suspension : Mode de transport d'un matériel détritique dans la masse d'un fluide, où il se maintient sous l'influence de forces ascensionnelles.
- turbidité : Quantité de matières solides en suspension.
- turbulence : Agitation désordonnée d'un fluide.
- vase : Le terme de vase est souvent confondu avec "boue" ou "limons". Etymologiquement, les vases sont déposées dans l'eau, tandis que les limons sont les dépôts abandonnés à l'air libre par les eaux courantes. Une boue est la substance crémeuse qui se forme lors des pluies à la surface des chemins et routes, c'est une suspension stable de particules minérales, avec ou sans colloïdes, dans l'eau. Il ne s'agit pas de confondre

vase et argile. Une première différence est la teneur en eau, qui fait de la vase presque un liquide et de l'argile un solide. D'autre part les vases en général ne contiennent qu'en très faible quantité les minéraux des argiles. Dans ce cas qui nous occupe il n'y en a pour ainsi dire pas. Nous pensons cependant ne pas devoir suivre Messieurs J. Bourcart et C. Francis Boeuf donnant le nom de limon à ce type de vase, car la présence ou absence de matériaux argileux n'influe pas ou peu sur les propriétés essentielles des vases.

z-drive

: Unité de propulsion d'un bateau dont la partie moteur est située à l'intérieur du bateau et dont la partie de propulsion est extérieure et peut être relevé hors de l'eau à n'importe quel moment.

ENVASEMENT DU CHENAL D'ACCES A L'ECLUSE MARITIME A
ZANDVLIET ET DE LA DARSE DU TUNNEL E3 .

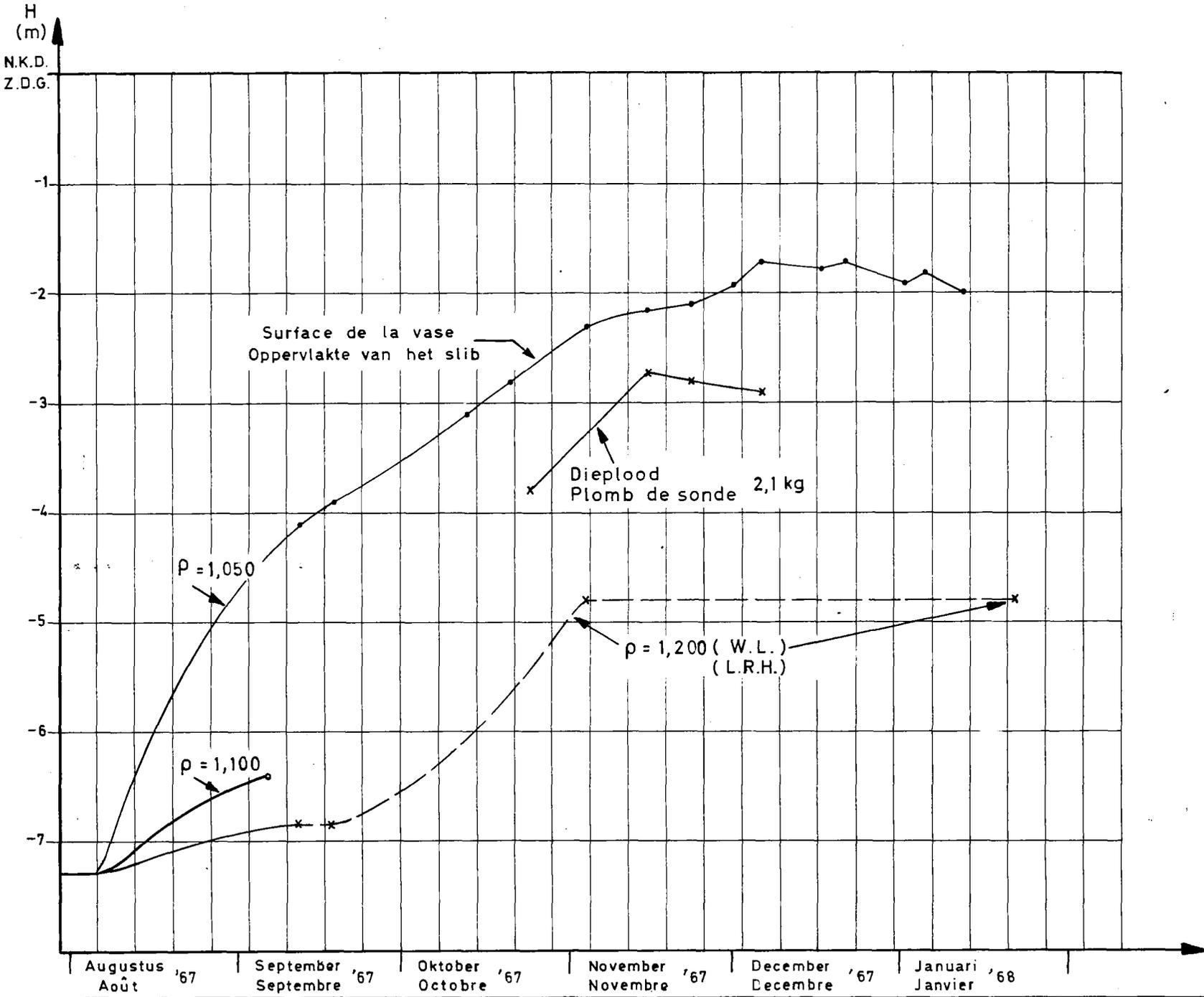
Au début du mois d'août 1967 , la fouille dans laquelle furent bétonnés les cinq éléments constituant le futur tunnel E3 sous l'Escaut a été mis en contact avec le fleuve par l'ouverture de la digue. Le 8 août 1967 le fond de la darse où reposaient les cinq éléments était constitué d'une couche de gravier . Le 18 août 1967, il y avait deux mètres de vase à l'extrémité intérieure de la darse . Le 2 novembre 1967 la couche de vase était épaisse de cinq mètres. La figure 1 montre l'évolution de cet envasement. (La couche supérieure de la vase a un poids spécifique de 1050 kg/m³).

En mai 1967 le dragage du chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet était terminé. Le 9 juin 1967 les sondages renseignaient trois mètres de vase. En septembre l'épaisseur maximum de vase atteignait cinq mètres.

Lors de l'inauguration de l'écluse, le 2 octobre 1967, une drague curait le chenal pour permettre la réception de l'écluse par la ville d'Anvers. Le 18 décembre 1967 il y avait à nouveau quatre mètres de vase. Le 16 février 1968 l'épaisseur de la couche atteignait cinq mètres cinquante.

Ces deux exemples montrent combien spectaculaires sont les phénomènes d'envasement dans la région du port d'Anvers.

En juin 1967 nous avons entrepris des études in situ afin d'expliquer les mécanismes responsables de darses ouvertes à la marée.



DARSE
DOK E3

FORAGE ELEMENT V
BORING ELEMENT V
(prim. Burcht)

Bilage II
Annexe II
Fig. 1

Nous verrons d'abord comment se mesure l'envasement.

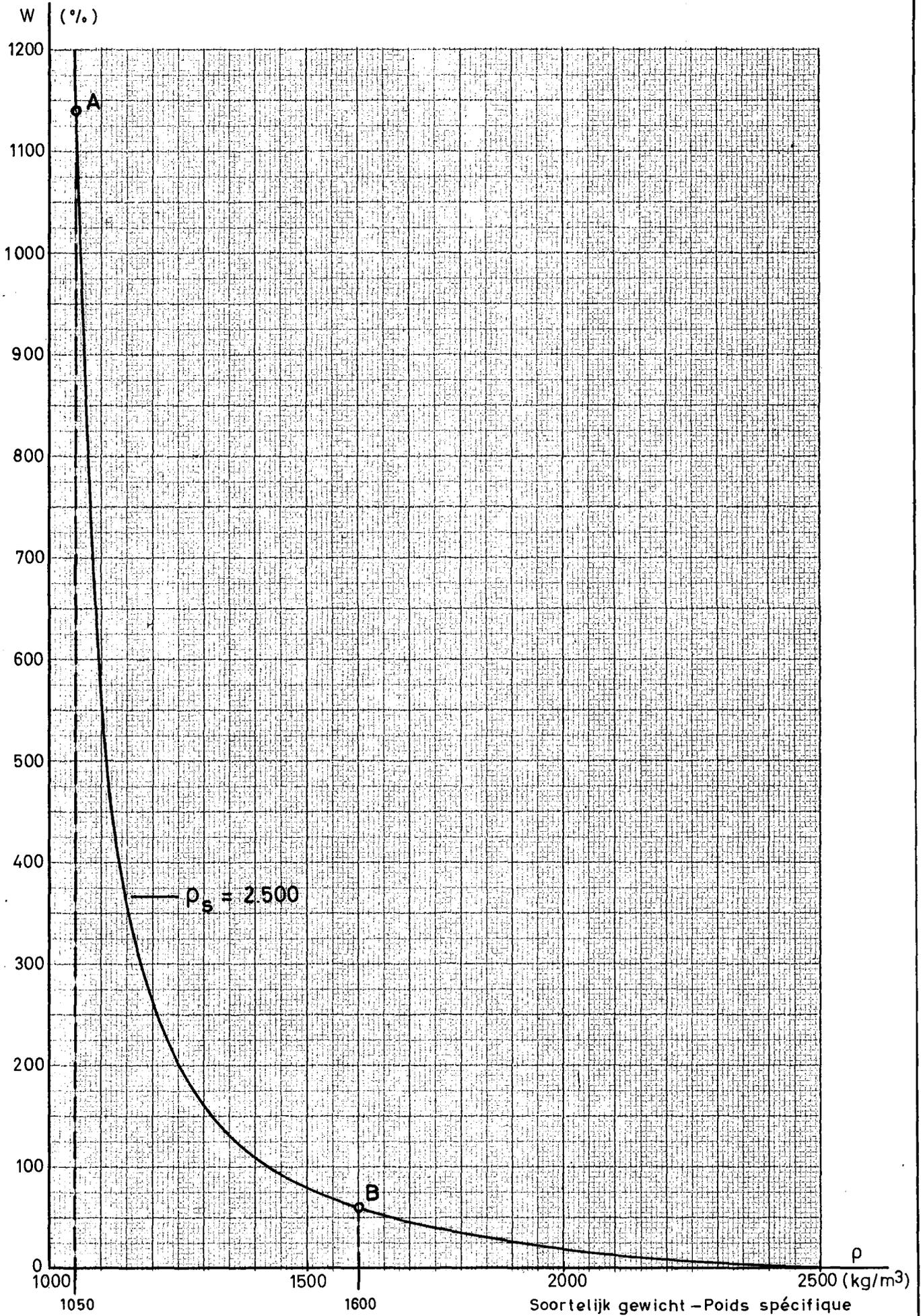
Ensuite nous examinerons les causes probables de l'envasement important constaté à Zandvliet et au tunnel.

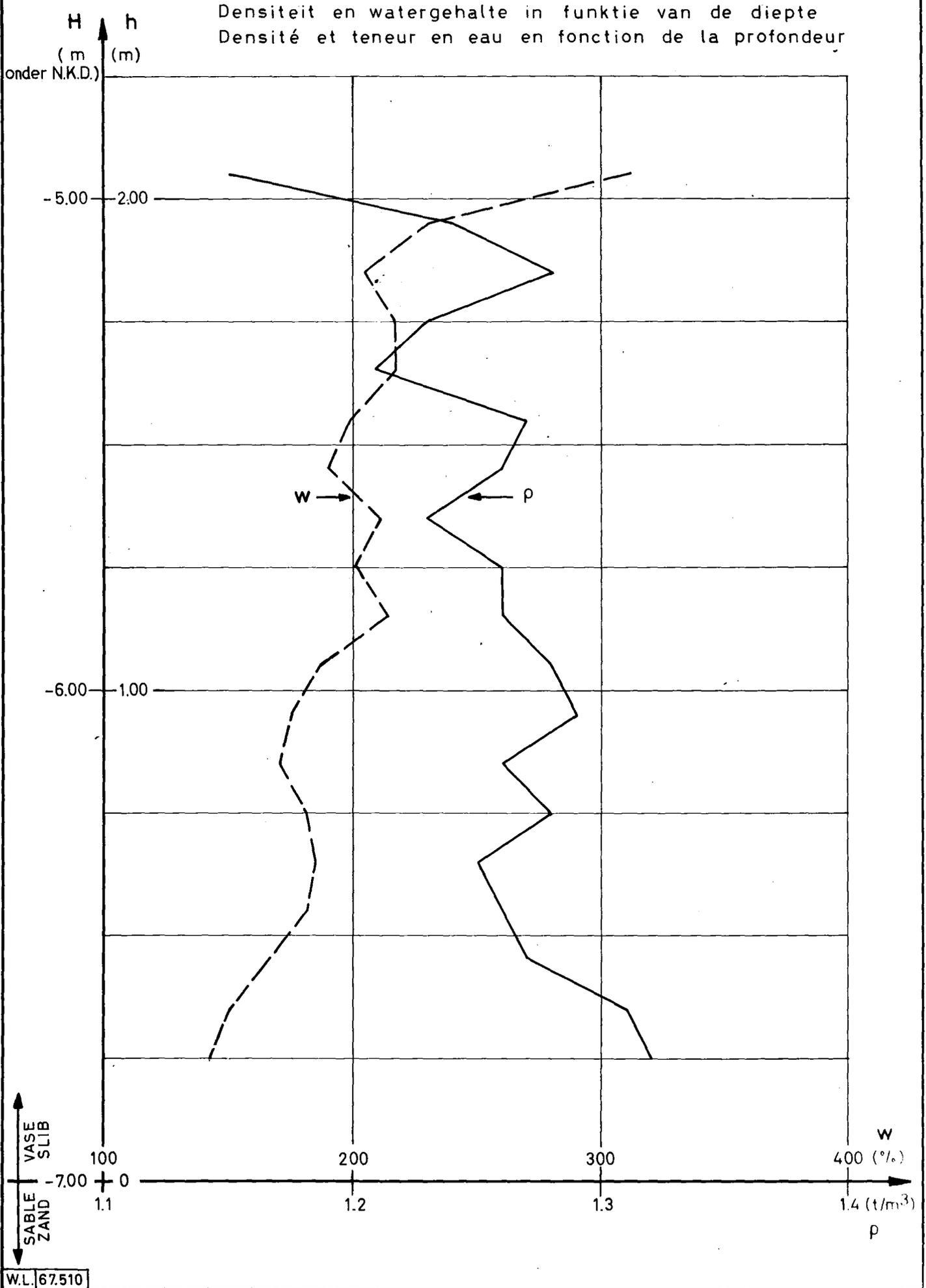
1. Mesure de l'envasement.

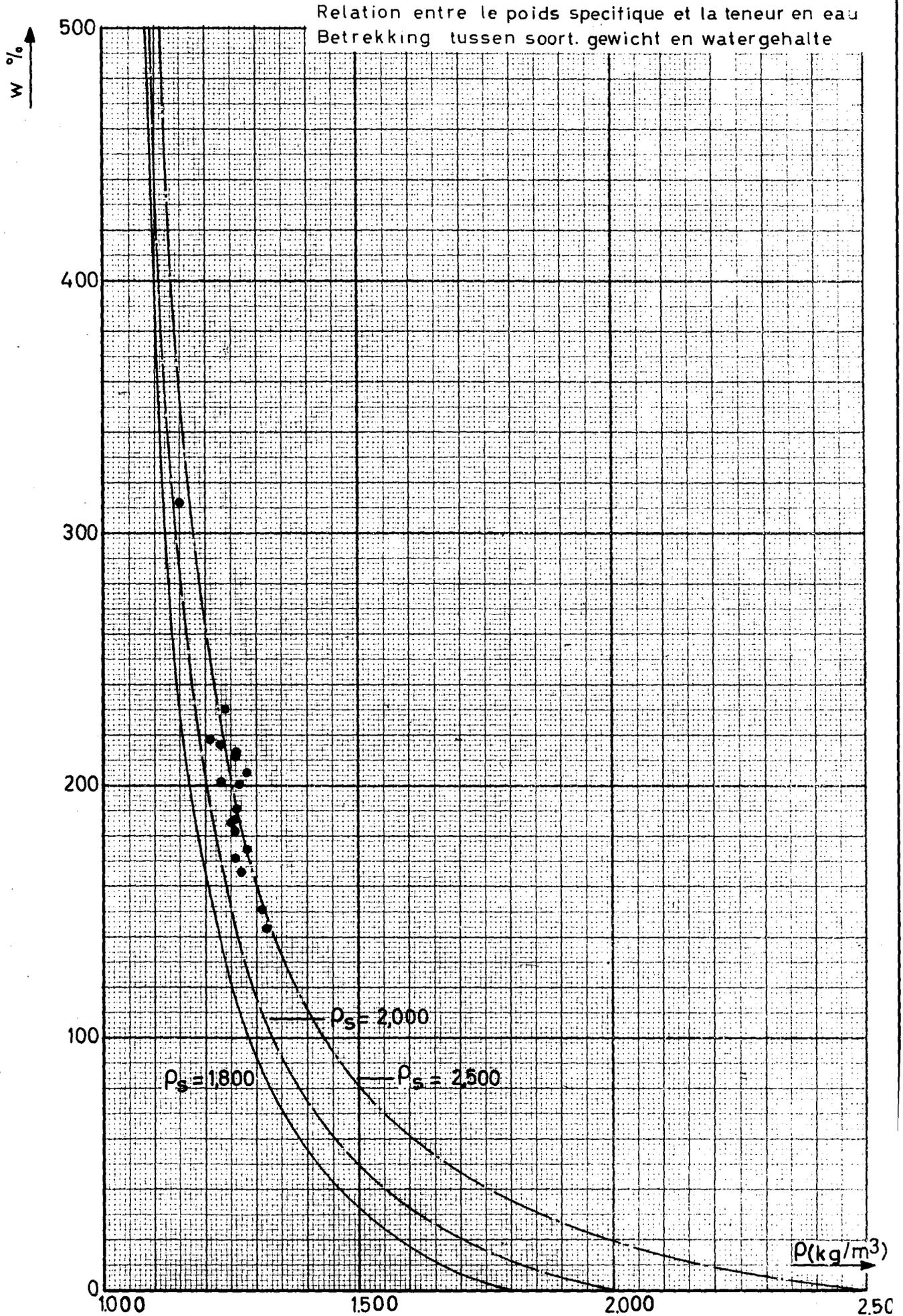
La matière solide fine en suspension se dépose sous la forme de flocons en des endroits où l'eau est calme. Ces flocons renferment une grande quantité d'eau, ce qui leur confère une faible densité. Le diamètre apparent d'un flocon est en général de l'ordre de quelques dizaines de microns et parfois de l'ordre du millimètre alors que le diamètre des particules est de l'ordre du micron.

Une faible quantité de matières solides en suspension déposée peut ainsi former une couche de sédiments épaisse. Le sédiment va se tasser au cours du temps. Son poids spécifique apparent augmente et sa teneur en eau diminue. Sur la figure 2 cela se traduit par un déplacement de A vers B. Les figures 3 et 4 illustrent la relation entre le poids spécifique et la teneur en eau pour de la vase prélevée dans la darse E3. La figure 5 montre la variation de l'épaisseur des couches de sédiment en fonction du poids spécifique. Chaque courbe correspond à une vitesse d'envasement différente.

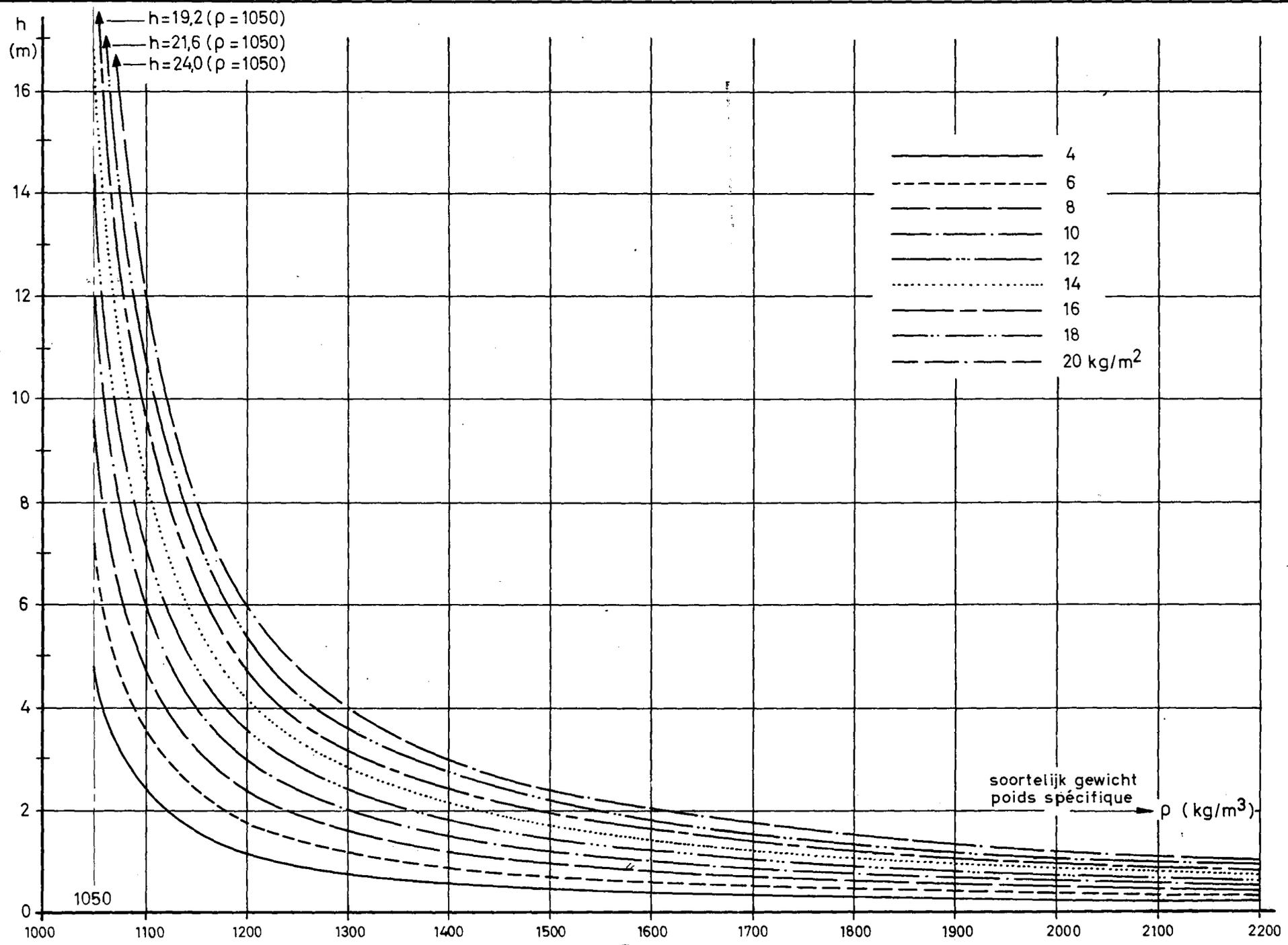
On peut donc imaginer en un lieu donné un apport de vase constant lors que l'épaisseur totale de la couche reste constante, le tassement étant exactement compensé par l'apport de nouveau sédiment .







W.L. 68150



Hoogte van de sliplaag in functie van
het soortelijk gewicht
Hauteur de la couche de vase en fonction
du poids spécifique

Bijlage II
Annexe II
Fig. 5

Le tassement est provoqué par le poids du sédiment qui fait s'échapper l'eau des interstices capillaires. La vase se dépose avec un poids spécifique de 1050 à 1100 kg/m³ et une teneur en eau de 1160 % à 560 % exprimé en % du poids de matières solides.

La vase se tasse jusqu'à avoir un poids spécifique de 1600 kg/m³ et une teneur en eau de 60% (fig. 6) . Le tassement commence au fond et remonte au fur et à mesure.

La mesure du poids de sédiment d'un dépôt de sable ou d'un dépôt de vase n'est pas la même.

Un sédiment sableux est constitué par un ensemble de grains qui se touchent et s'imbriquent plus ou moins les uns dans les autres. Le tassement qui se fait après le dépôt est en général faible. Le poids spécifique varie de 1600 à 2000 kg/m³ environ et la teneur en eau de 60 à 25 % (fig. 6). L'épaisseur d'un dépôt sableux est une mesure du poids de sédiment.

L'épaisseur de la couche de vase ne permet pas d'en déduire le poids du sédiment. Il faut connaître la variation du poids spécifique en fonction de la profondeur.

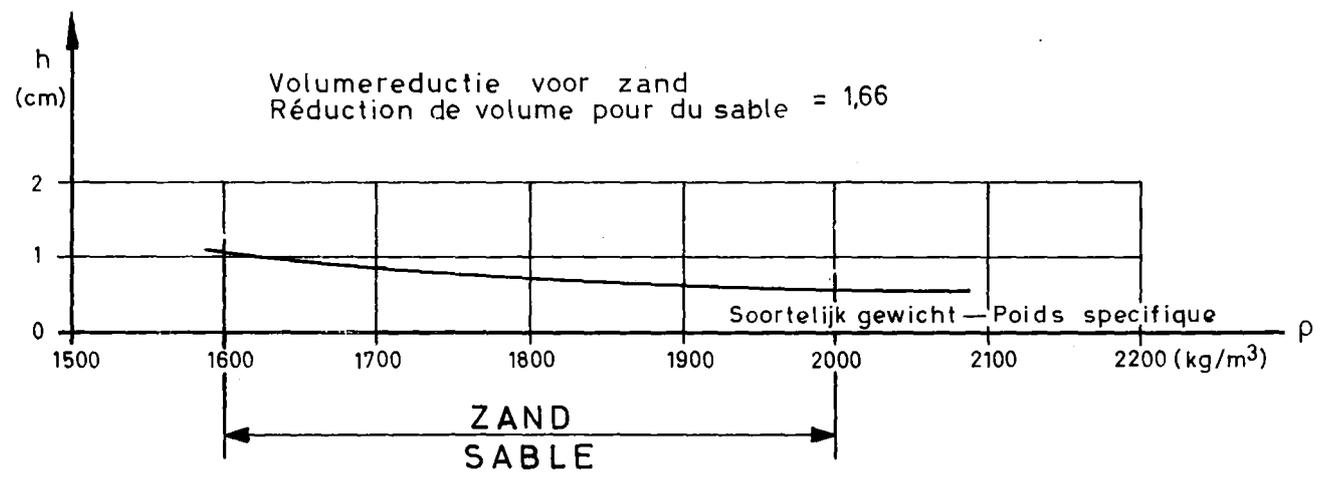
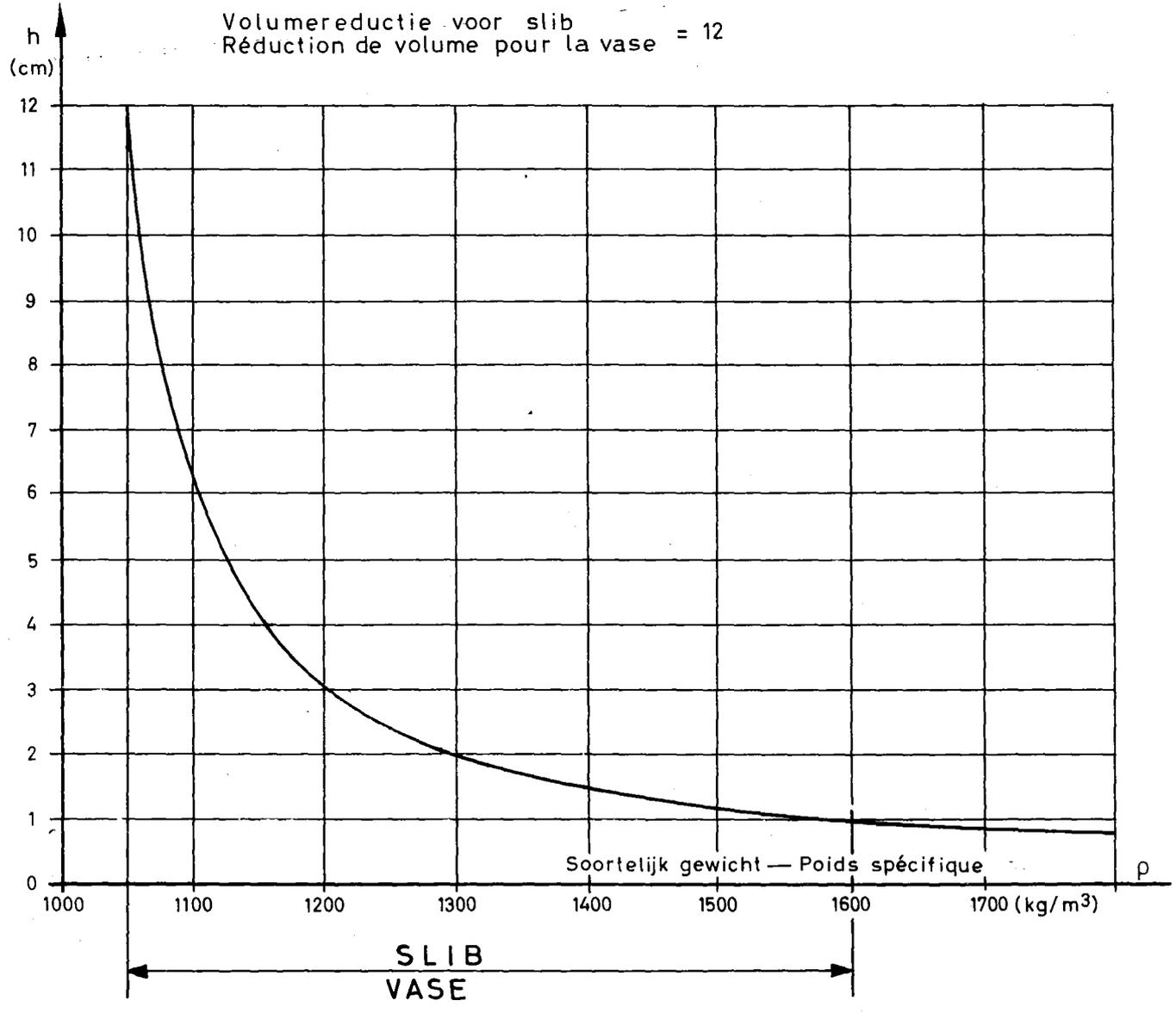
Les services chargés du relevé des fonds de l'Escaut utilisent soit des écho-sondeurs, soit des sondes. Lors de la mise en service de l'écluse de Zandvliet et de l'ouverture de la darse E3 il s'est avéré nécessaire de mesurer le rythme d'envasement et le poids spécifique des différentes couches de la vase. Il fallait prélever une carotte de vase de cinq mètres de long.

./..

Neerzetting van :
 10 kg / m² / dag
 Dépôt de :
 10 kg / m² / jour

Hoogte van de sedimentlaag in functie
 van het soortelijk gewicht
 Hauteur de la couche de sédiment en
 fonction du poids spécifique

Bijlage II
 Annexe II
 Fig. 6



Un carottier a été imaginé et un prototype de trois mètres cinquante de long a été construit au Laboratoire de Recherches Hydrauliques. Ce dispositif, simple et facile à manier, a immédiatement donné de bons résultats. Un second carottier légèrement modifié est actuellement en service (voir fig. 7). Il est composé d'un tube en acier inoxydable renfermant une gaine en matière plastique, surmonté d'un dispositif d'étanchéité et d'un lest.

Le forage dure environ cinq minutes et est fait à partir du bateau LILLO qui est muni d'une grue. L'échantillon est retiré dans sa gaine et celle-ci est donc remplacée pour le prélèvement suivant. Il faut compter de vingt minutes à une demi-heure par forage.

La carotte est divisée en échantillons de dix centimètres de hauteur. Le poids spécifique et la teneur en eau sont déterminées au laboratoire.

Les forages sont faits tous les mois à Zandvliet en quatre à six points représentés sur le plan du chenal d'accès. En chacun de ces points on peut calculer la quantité de vase qui se dépose en un mois (fig. 9 à 44). Cette quantité est faible près de l'écluse et croît au fur et à mesure qu'on approche de l'Escaut. La figure 8 illustre les rythmes d'envasement.

Actuellement nous recherchons une méthode permettant de mesurer directement dans la vase la densité de celle-ci. Une sonde utilisant des radio-isotopes semble être la solution.

Echelle

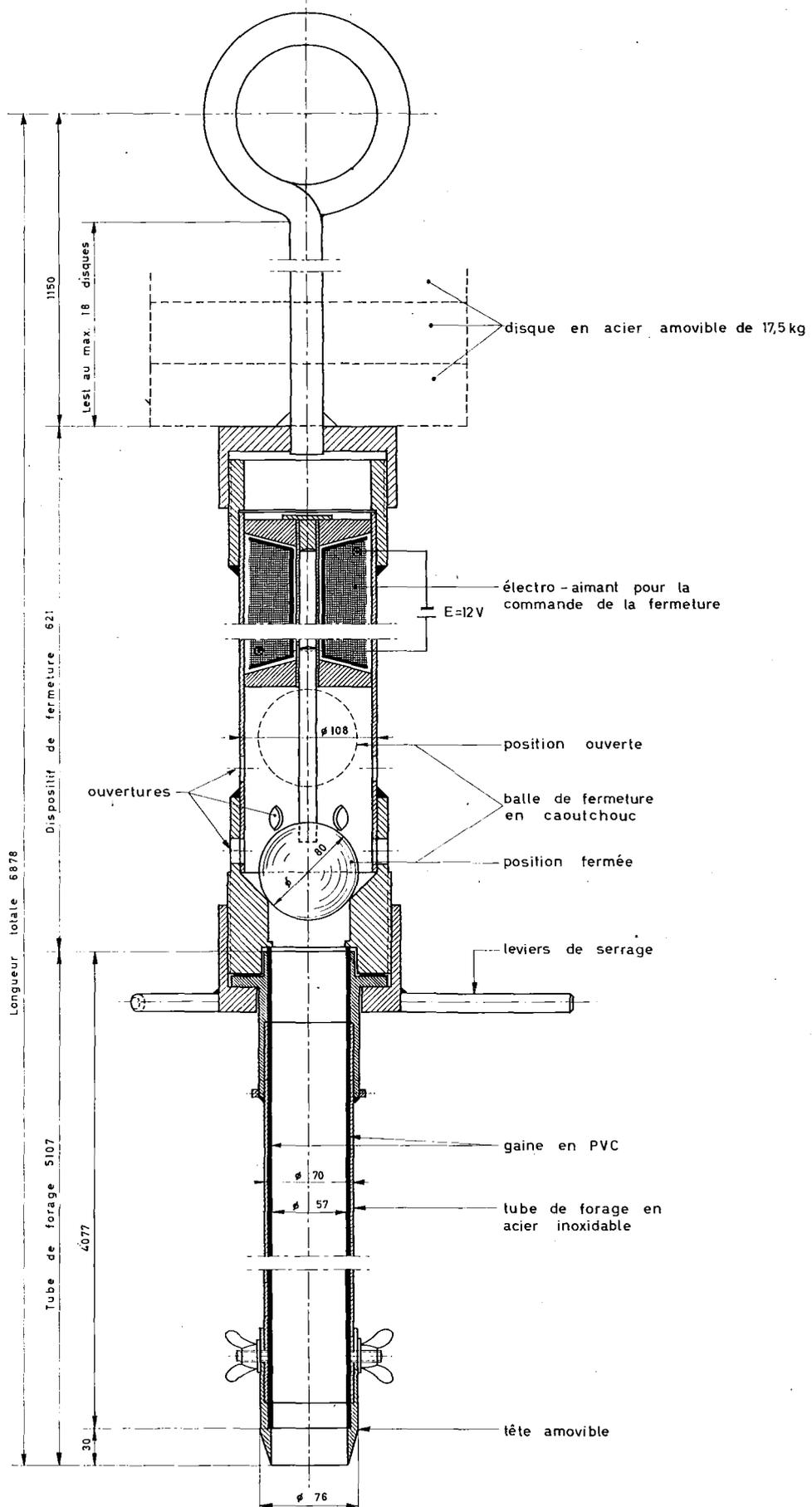
0 10 20 cm

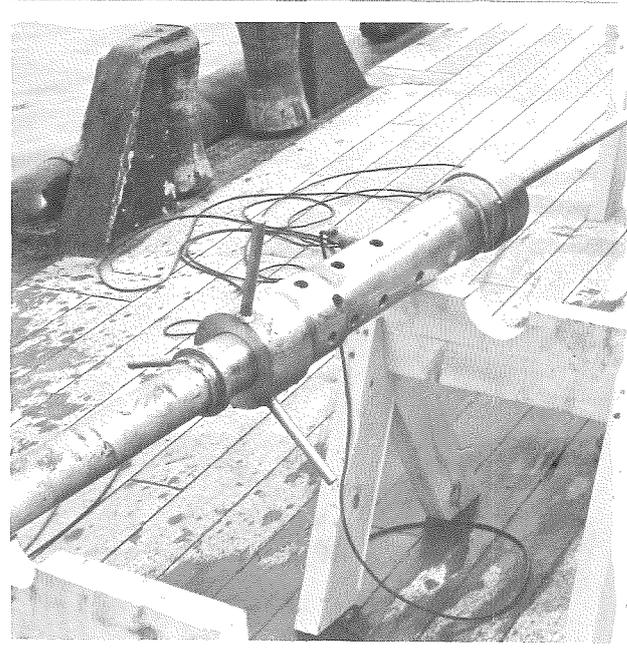
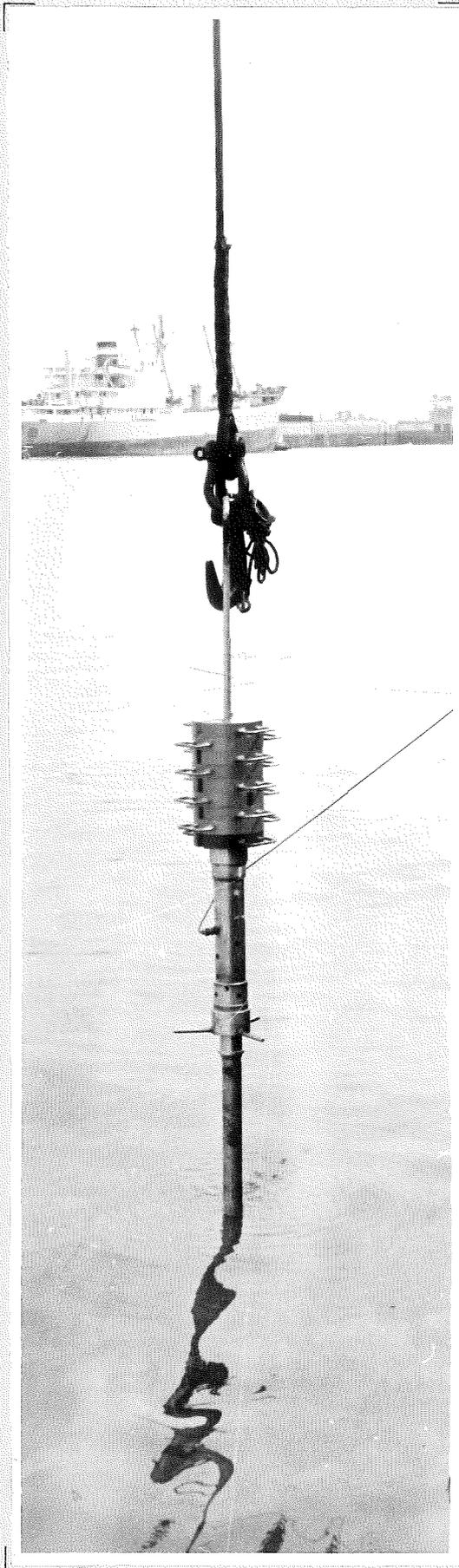
CAROTTIER

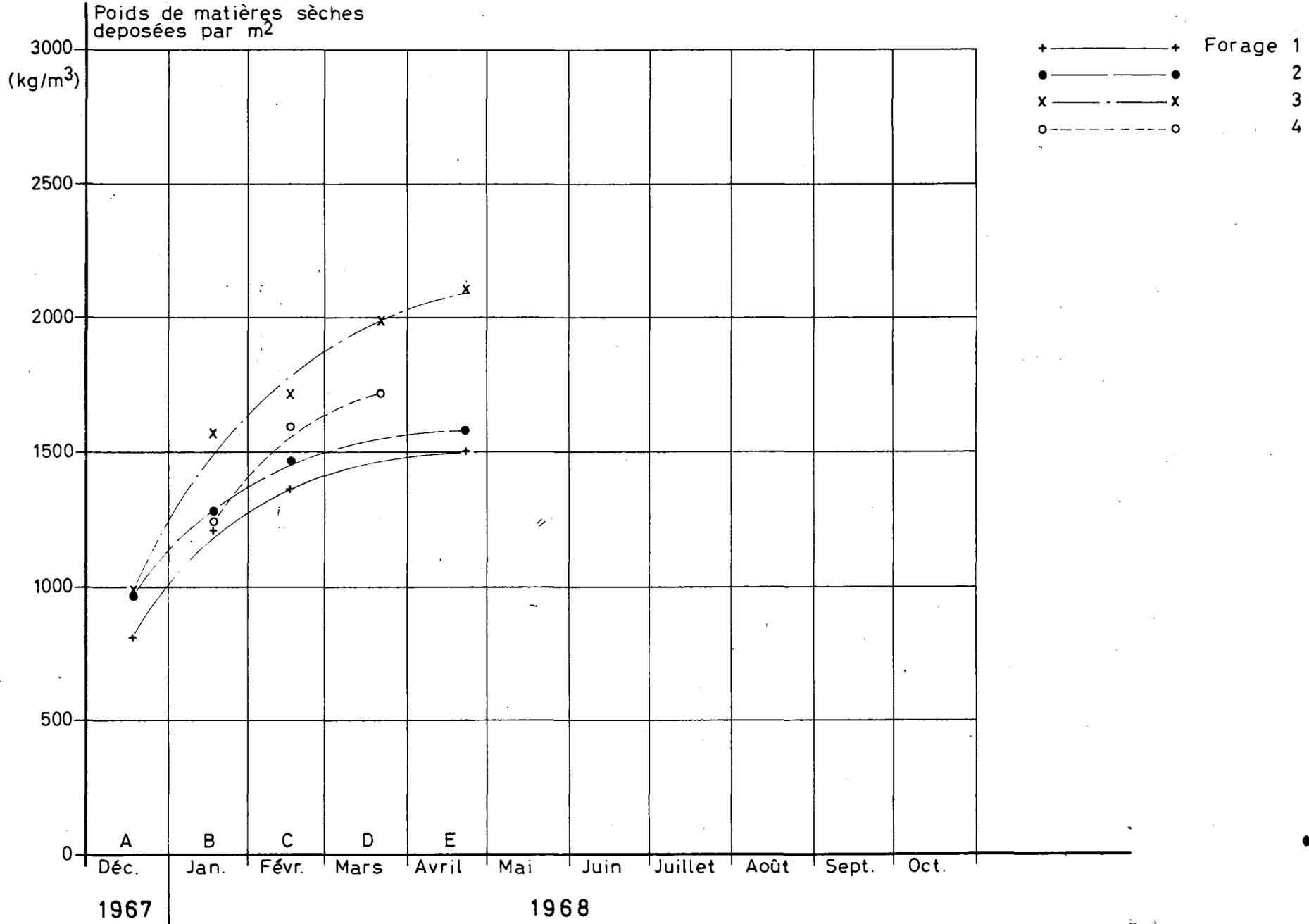
Annexe II

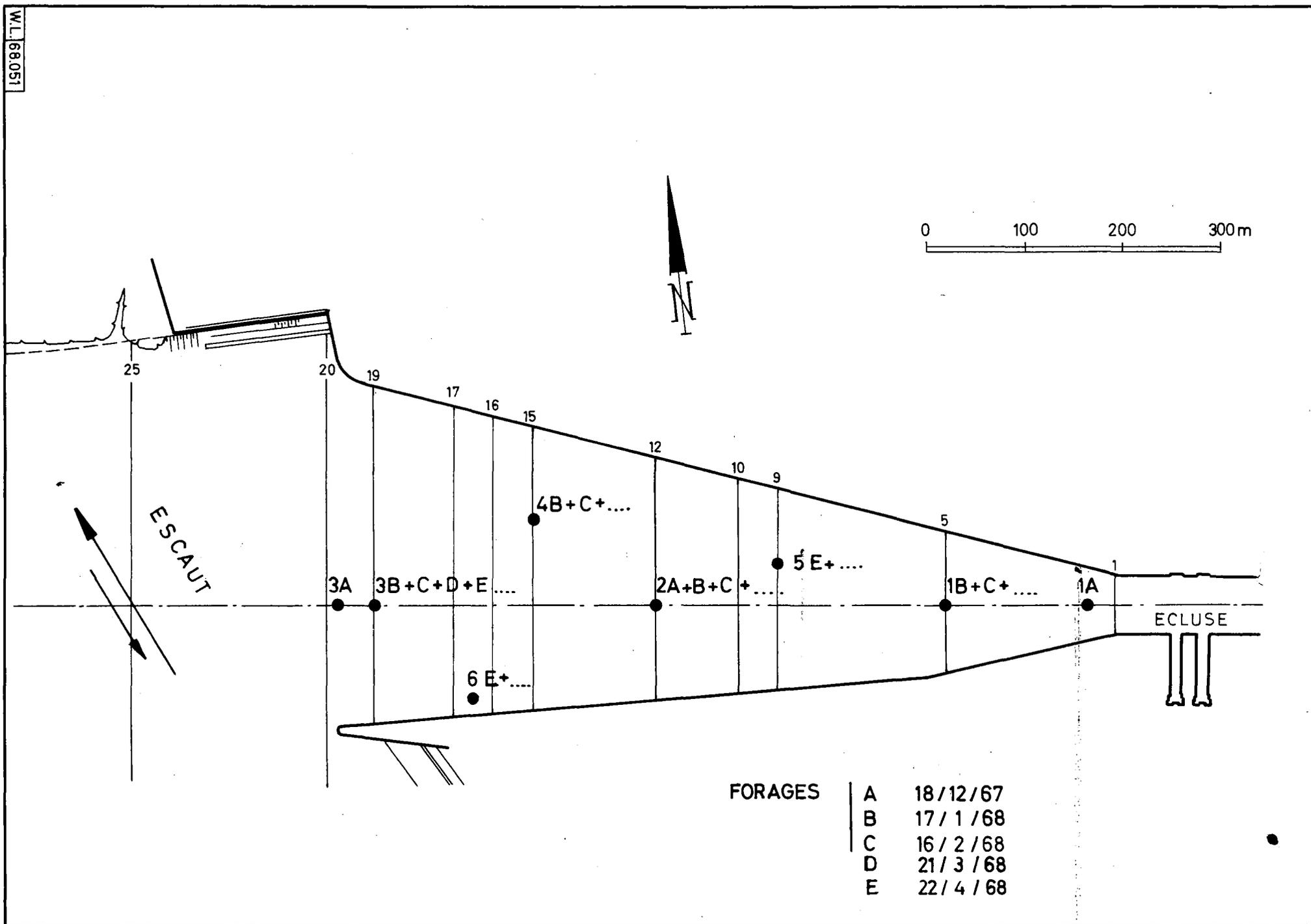
Fig. 7

Dimensions en mm



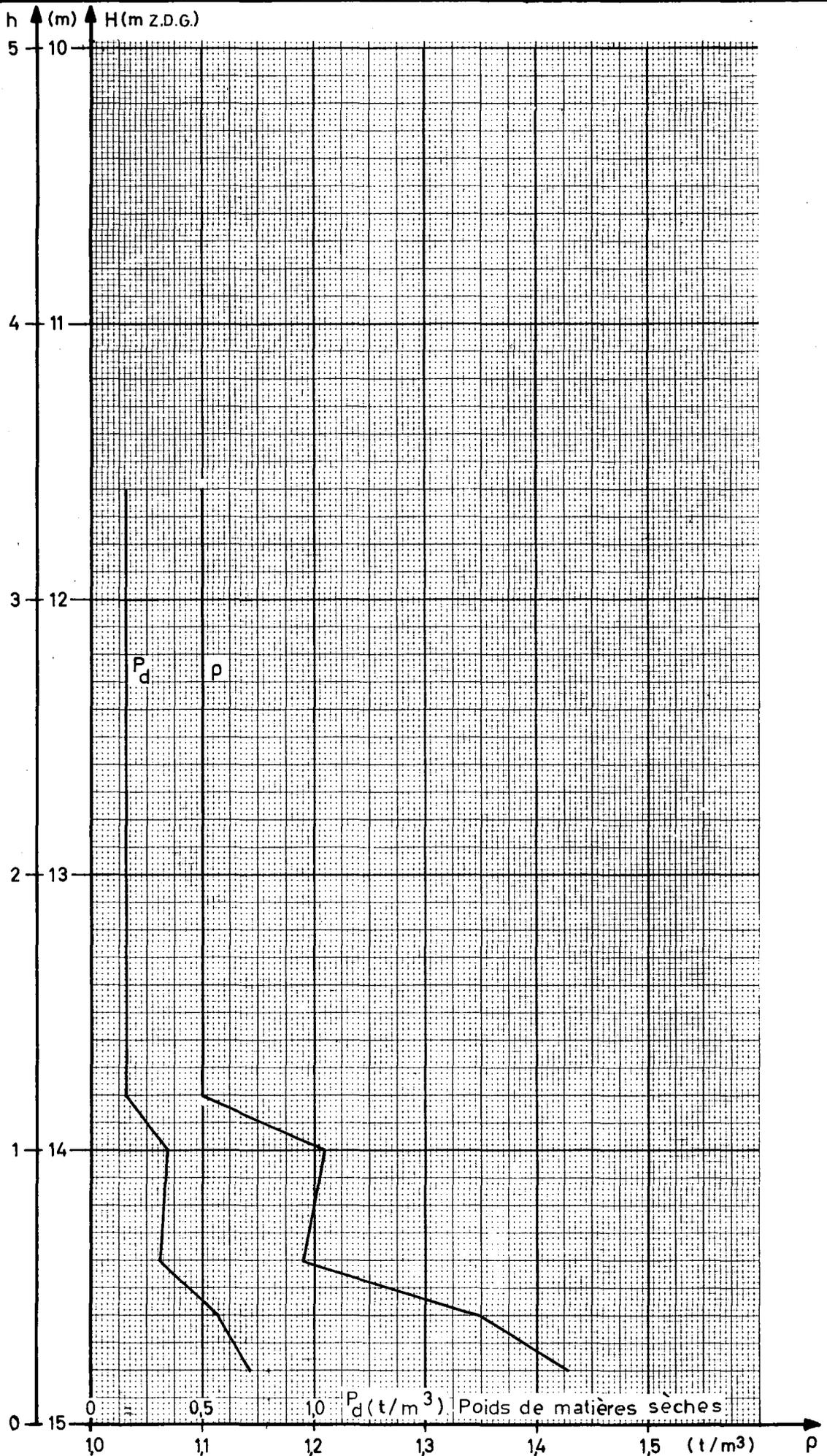


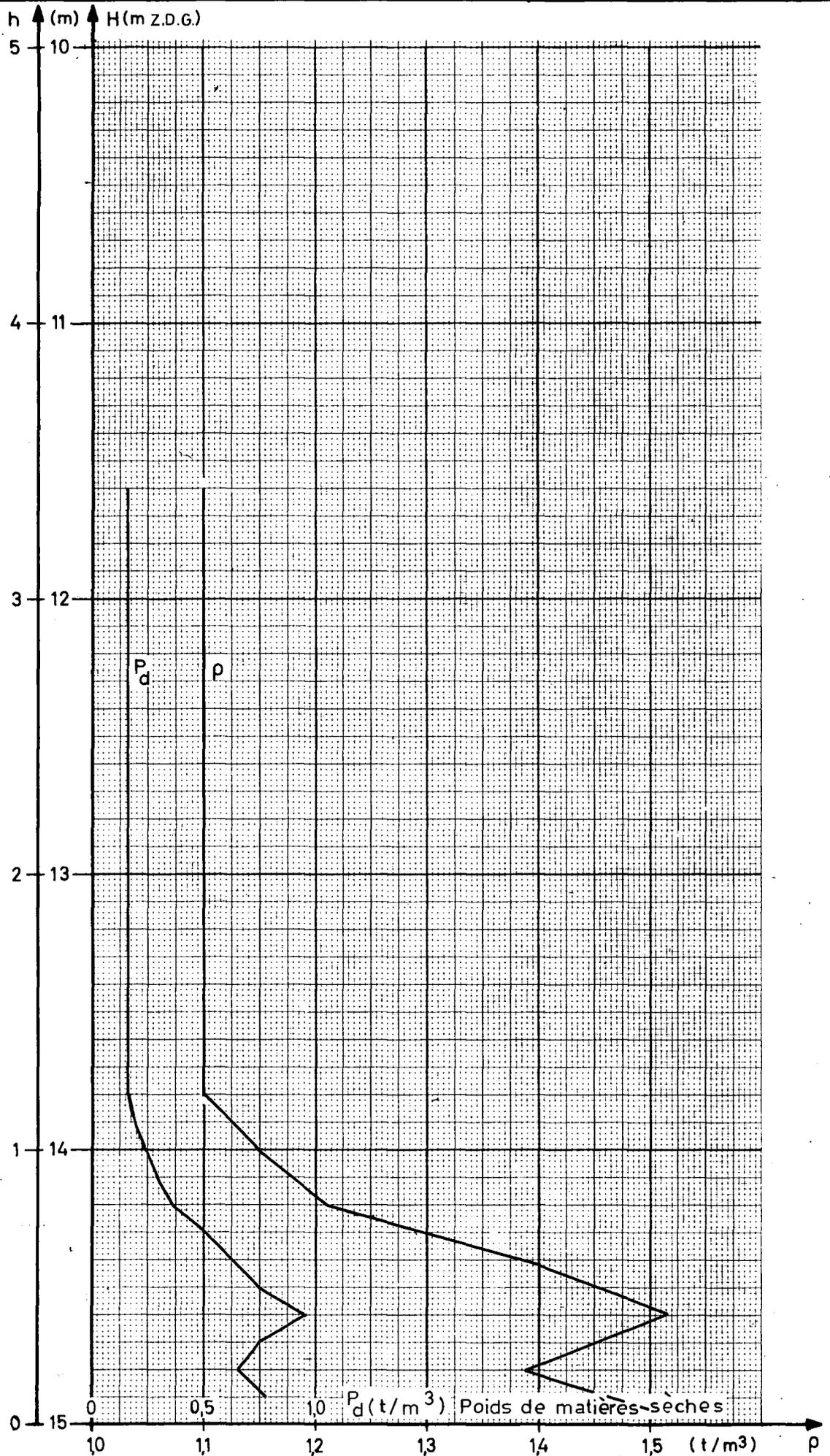


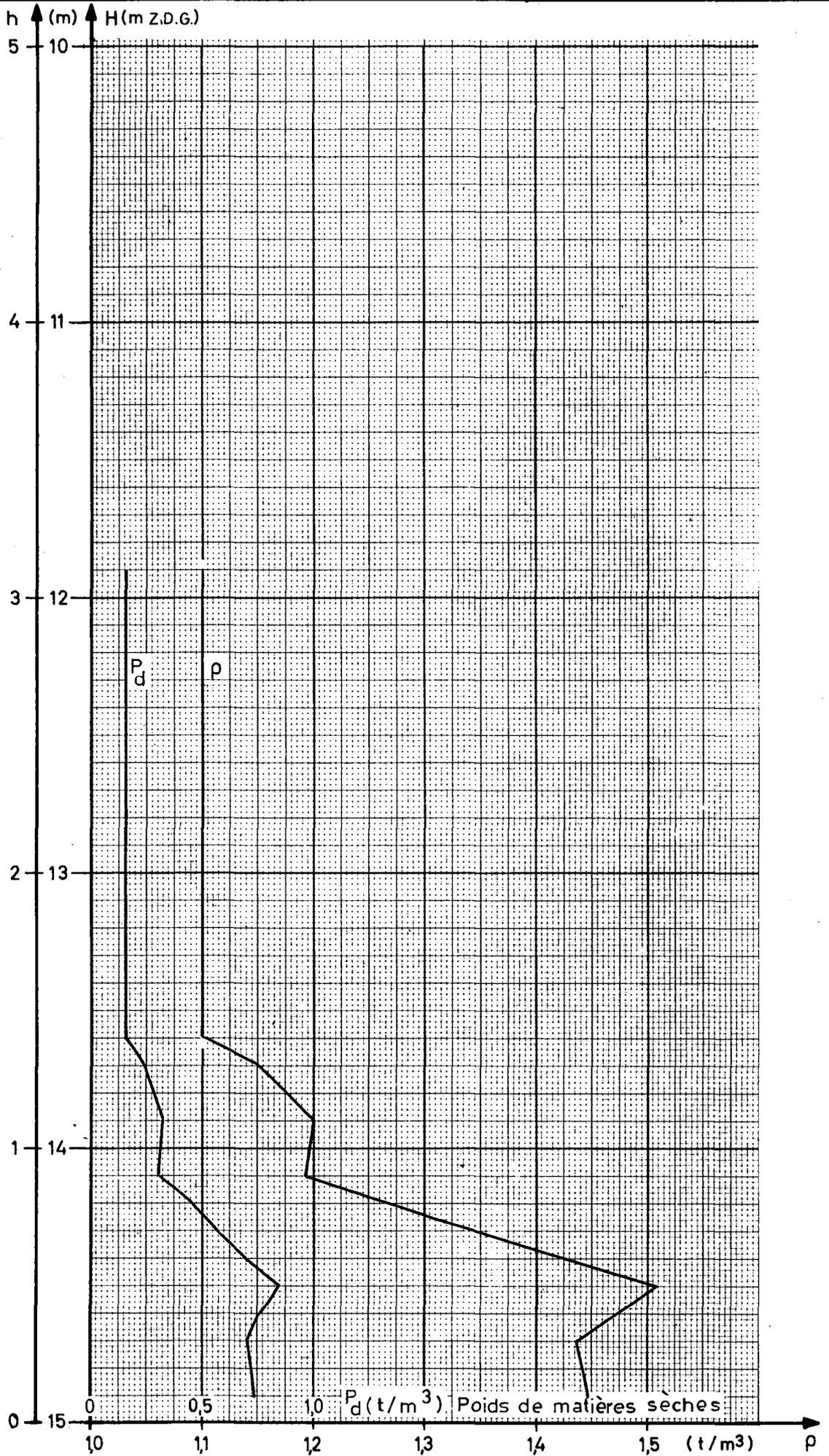


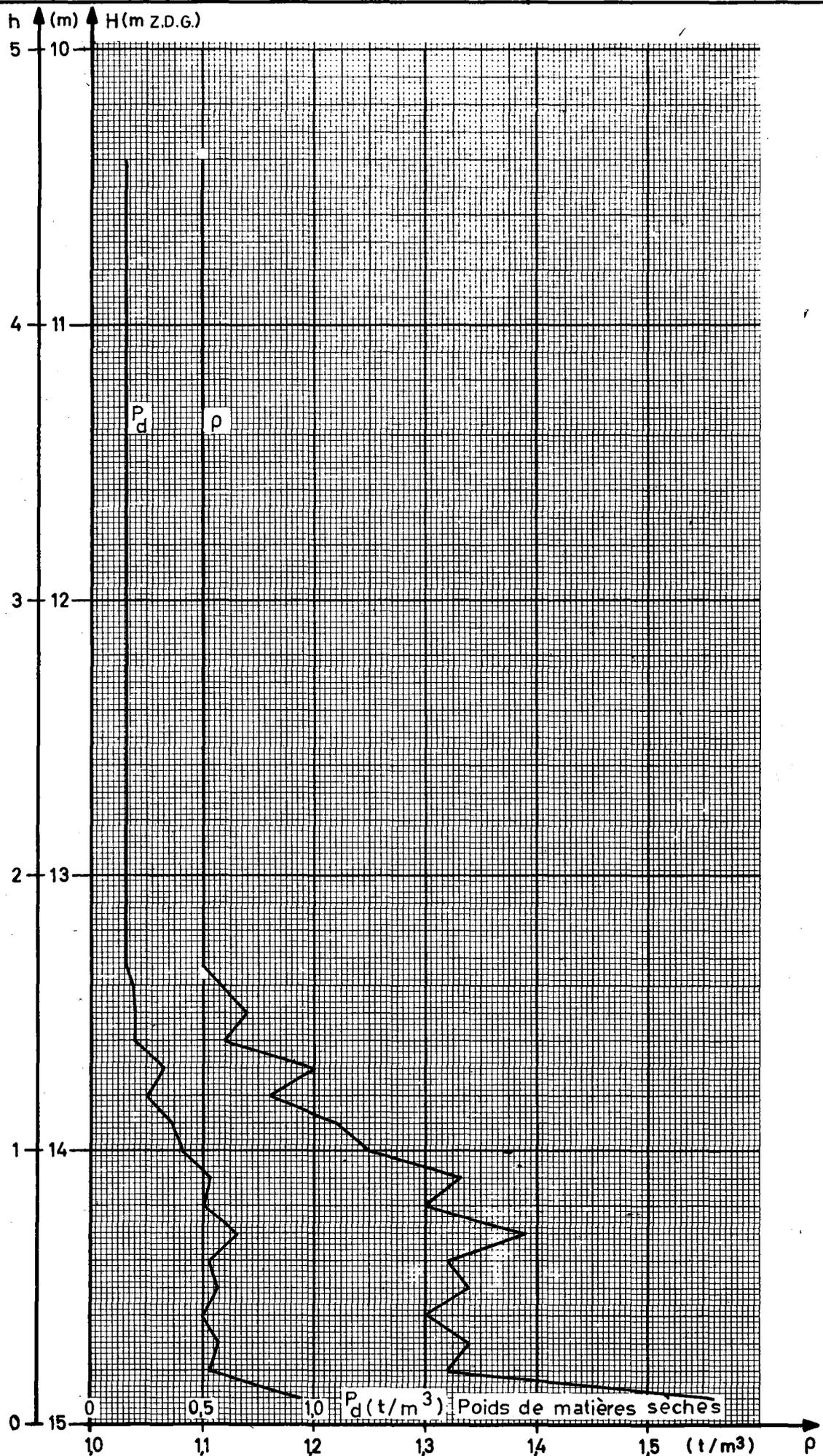
FORAGES	
A	18 / 12 / 67
B	17 / 1 / 68
C	16 / 2 / 68
D	21 / 3 / 68
E	22 / 4 / 68

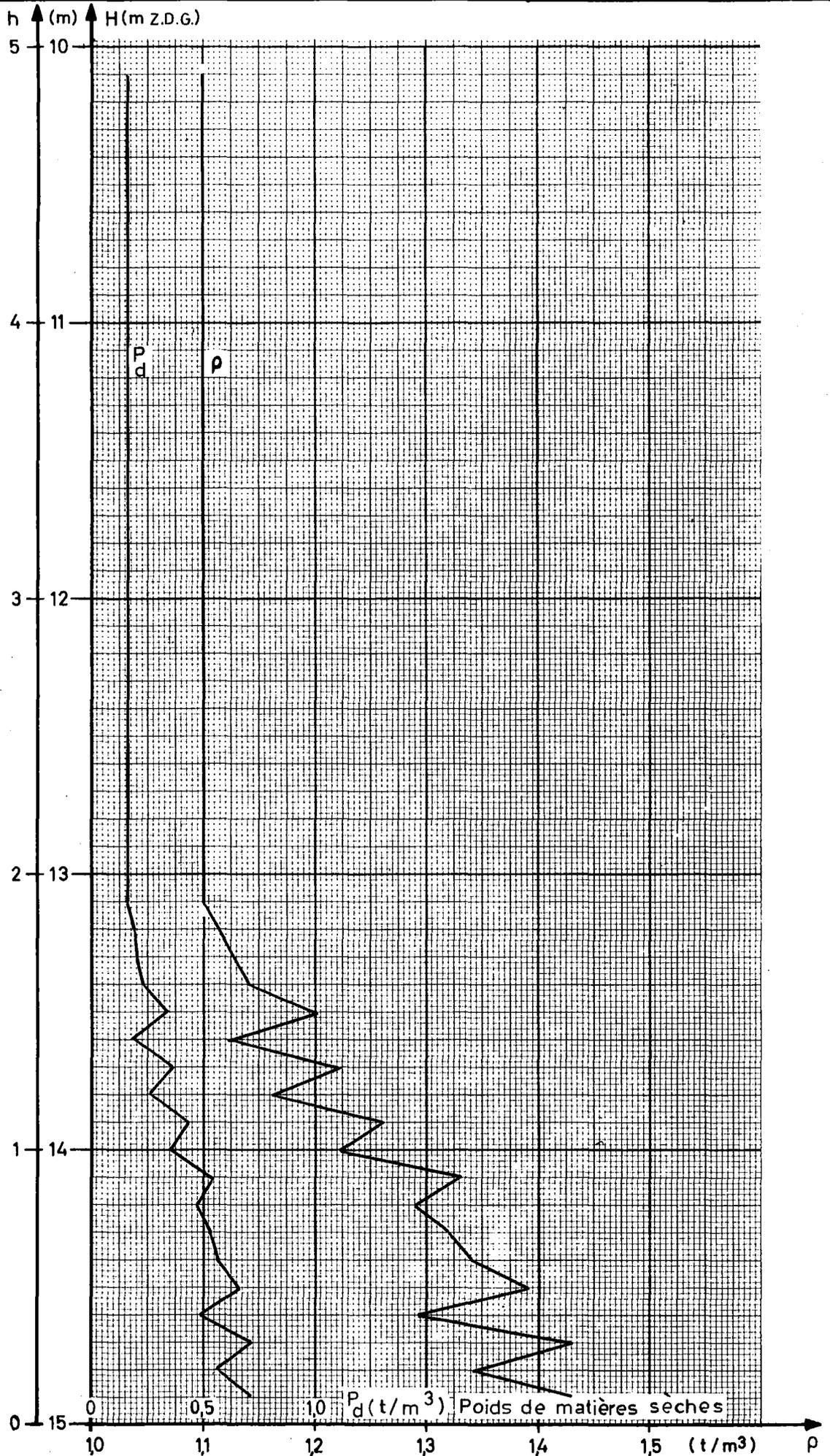
W.L. 68.051

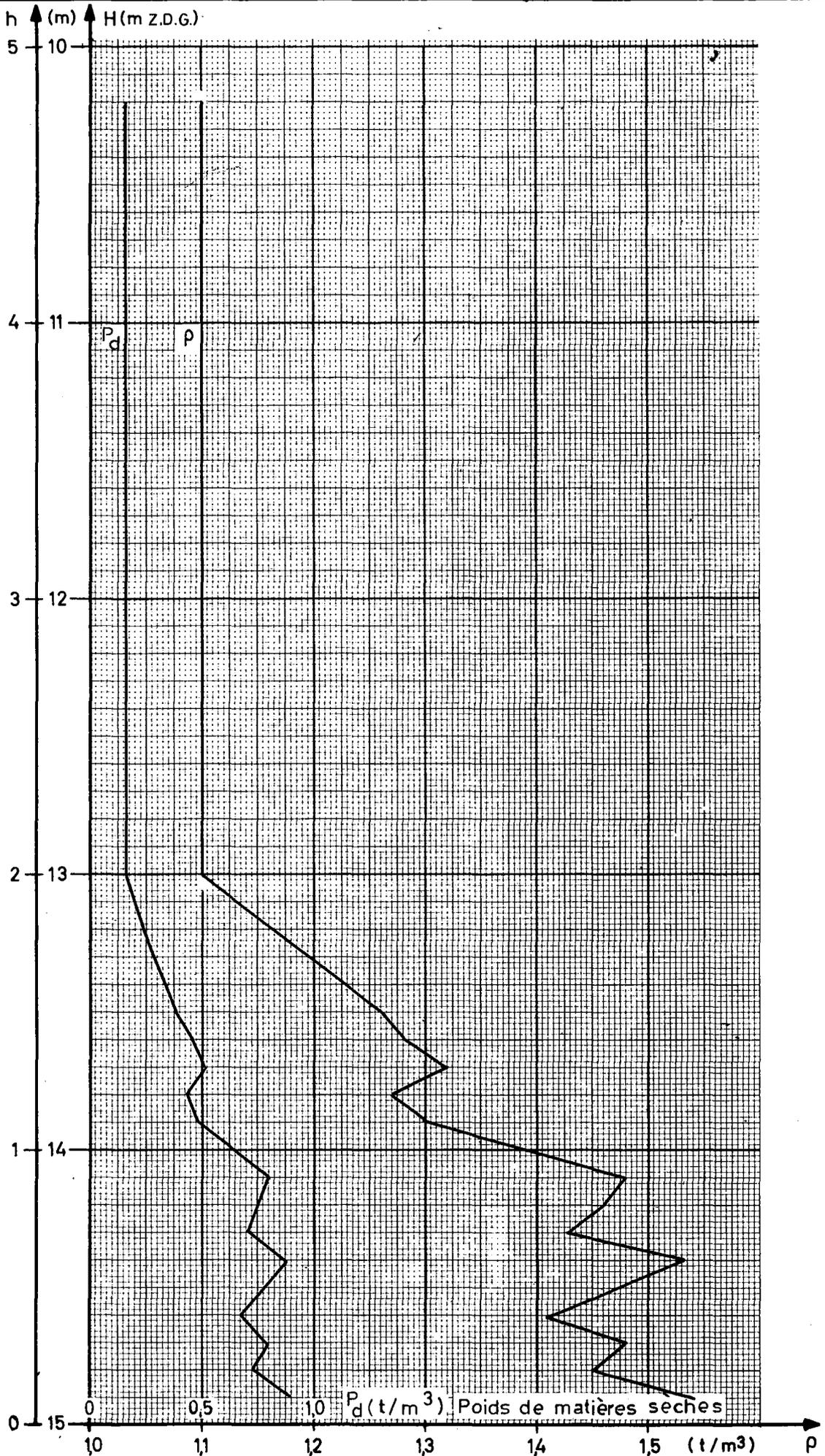


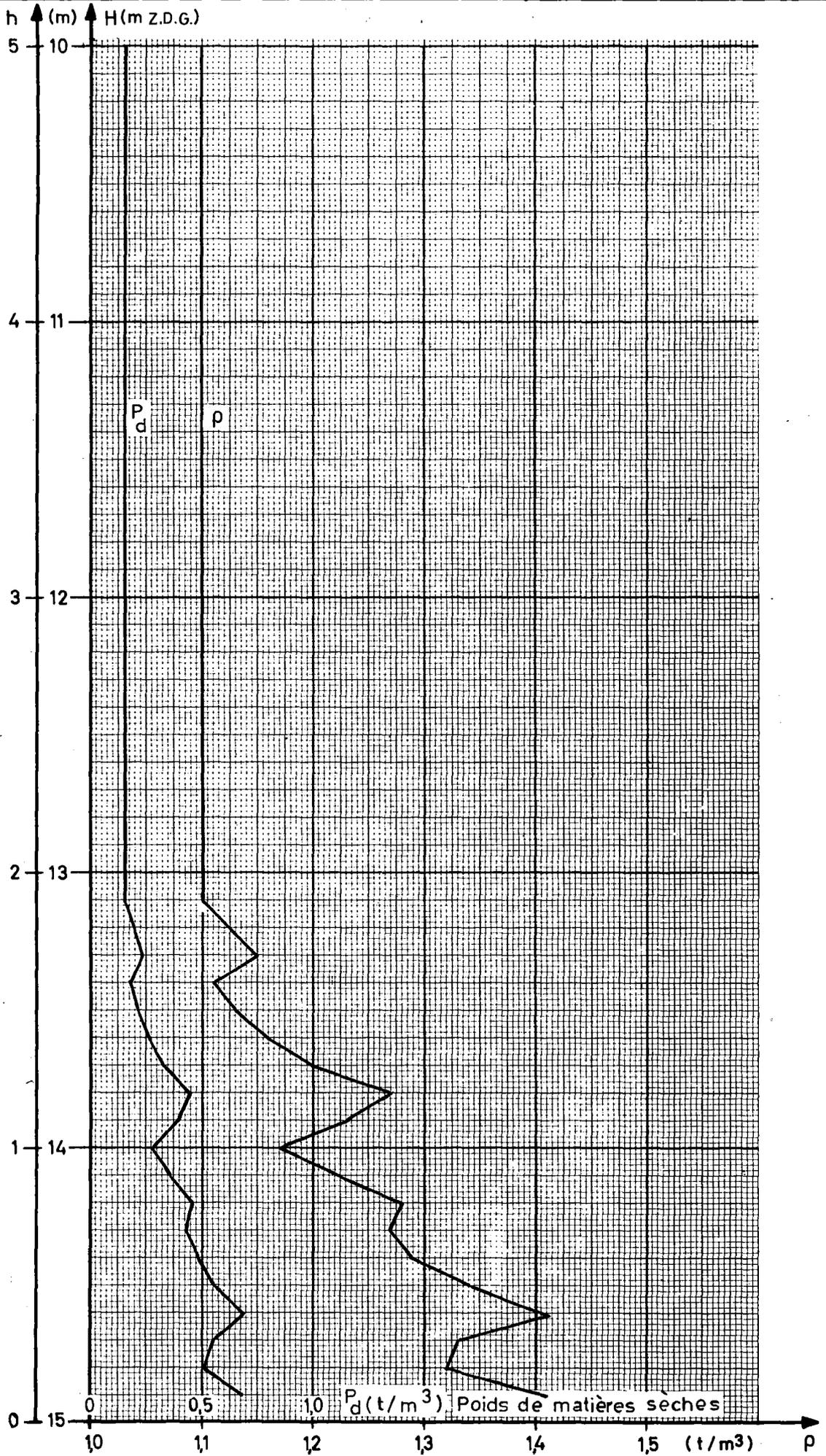


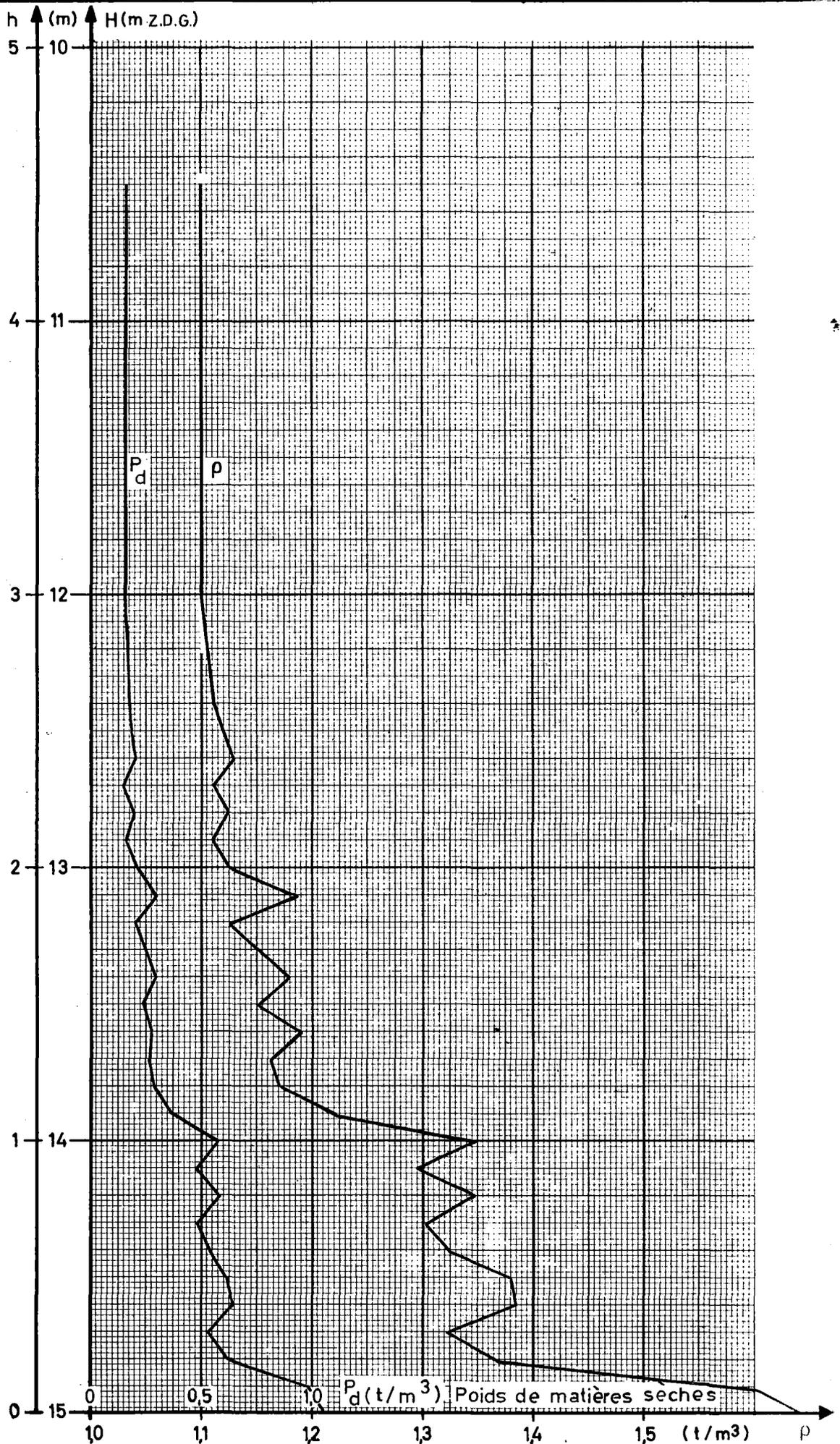


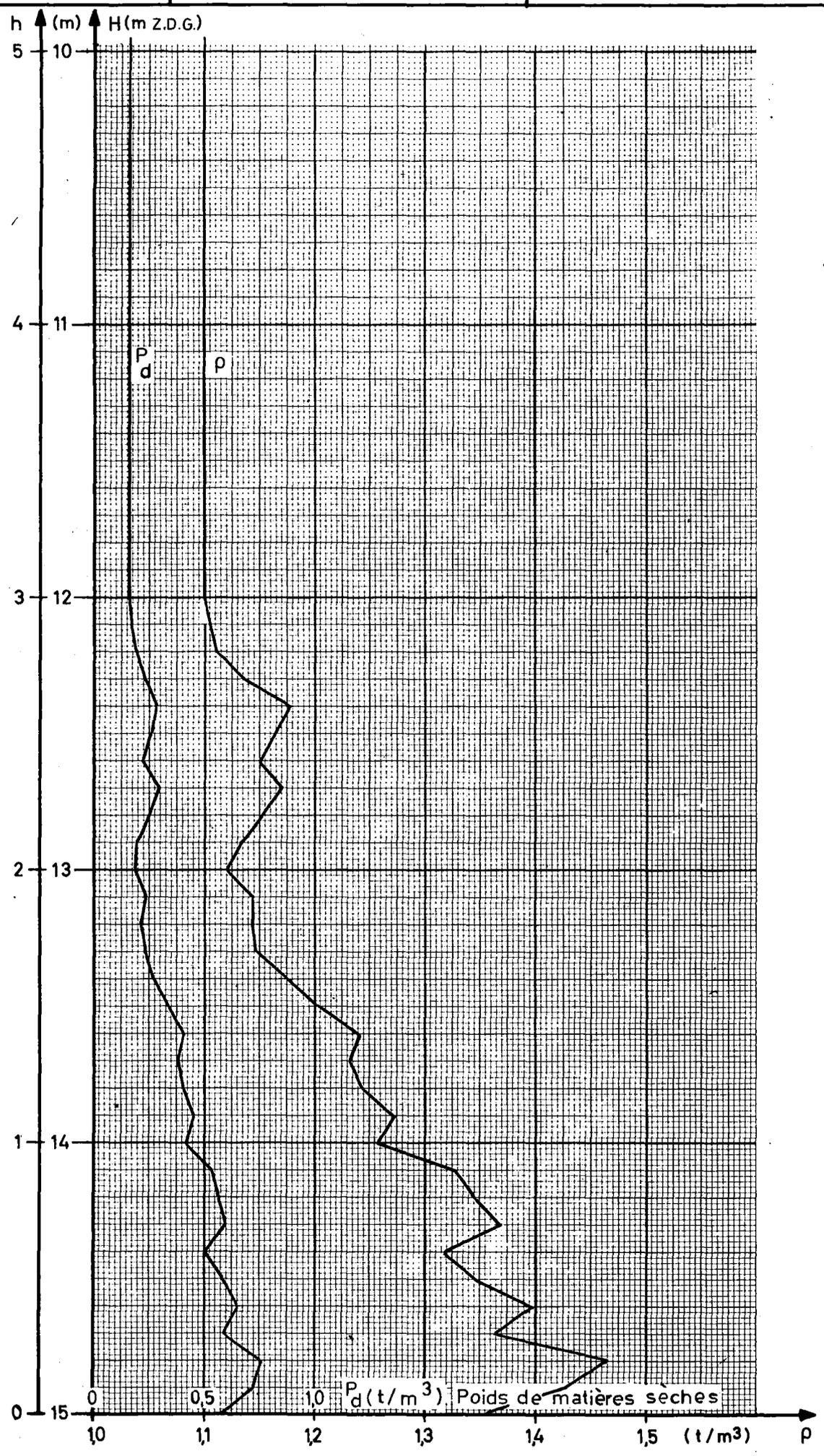


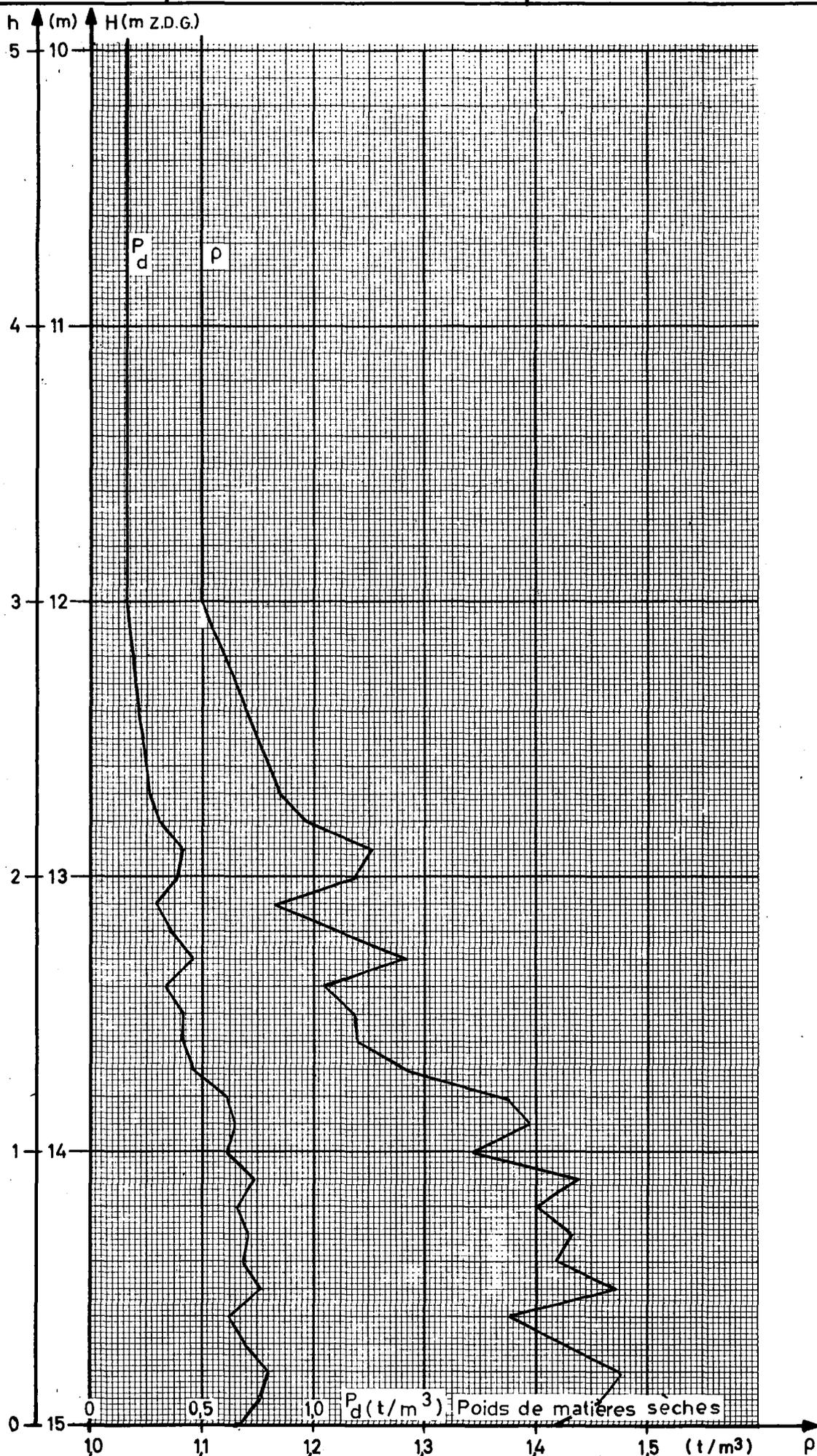


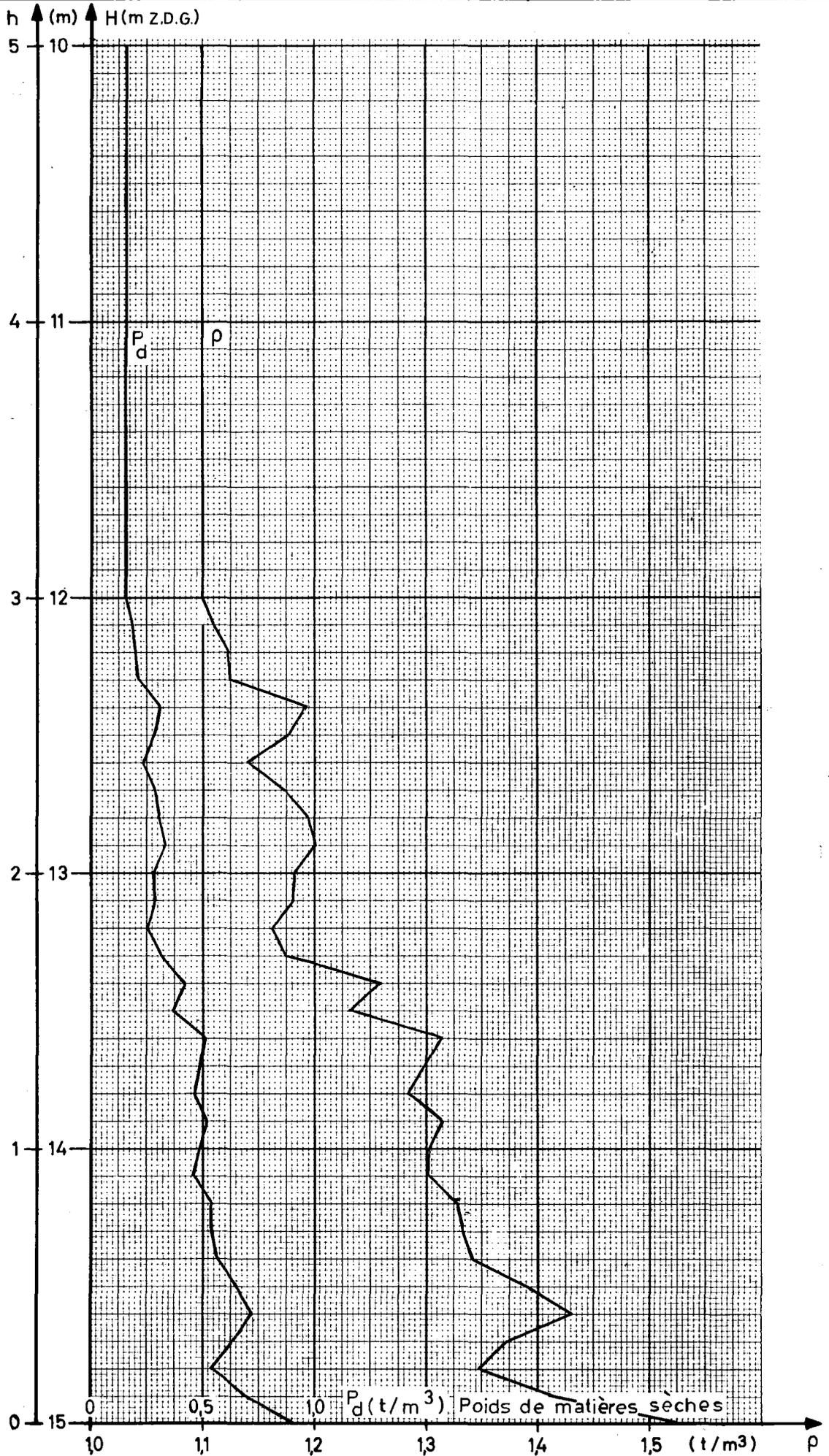


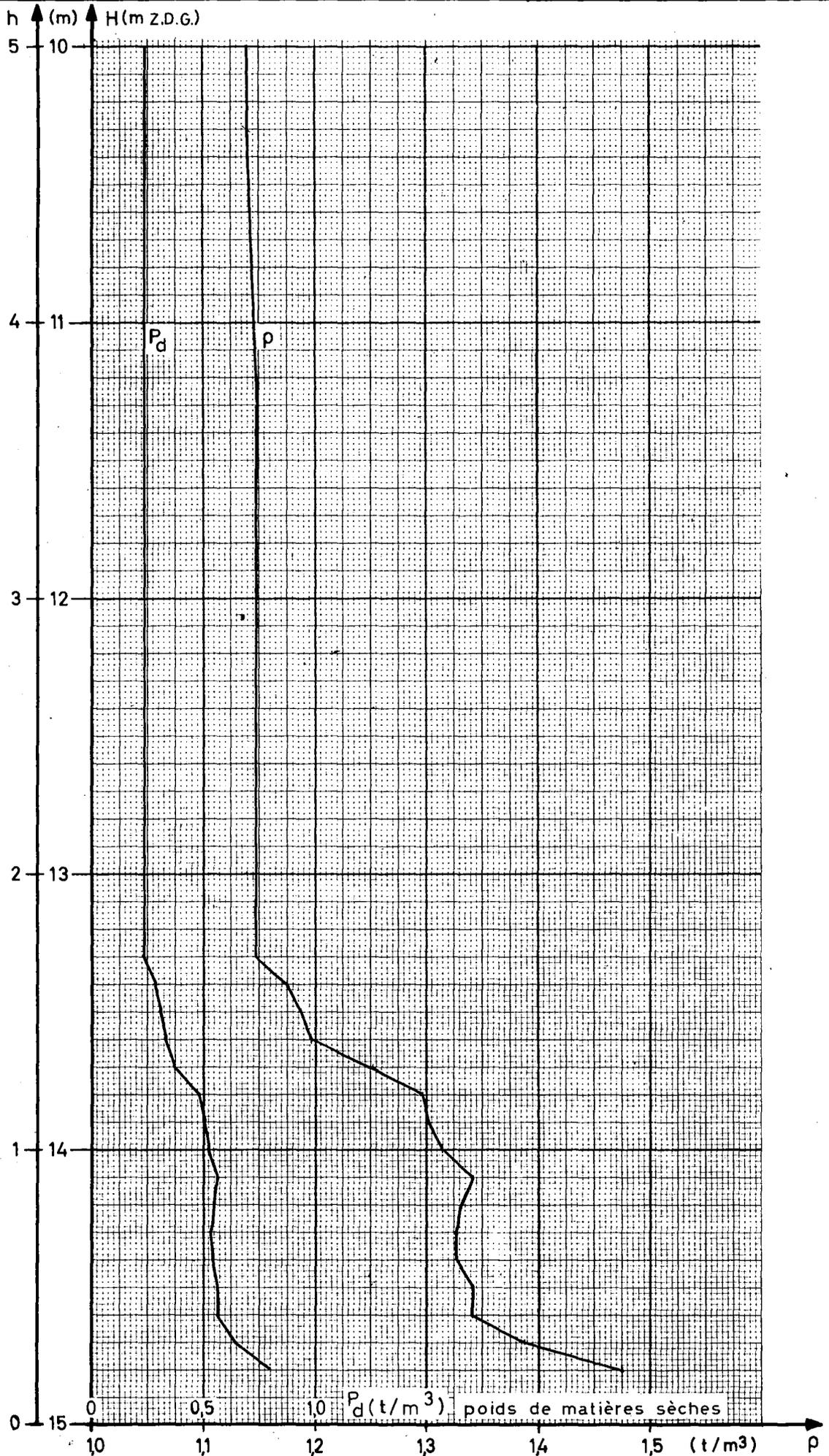


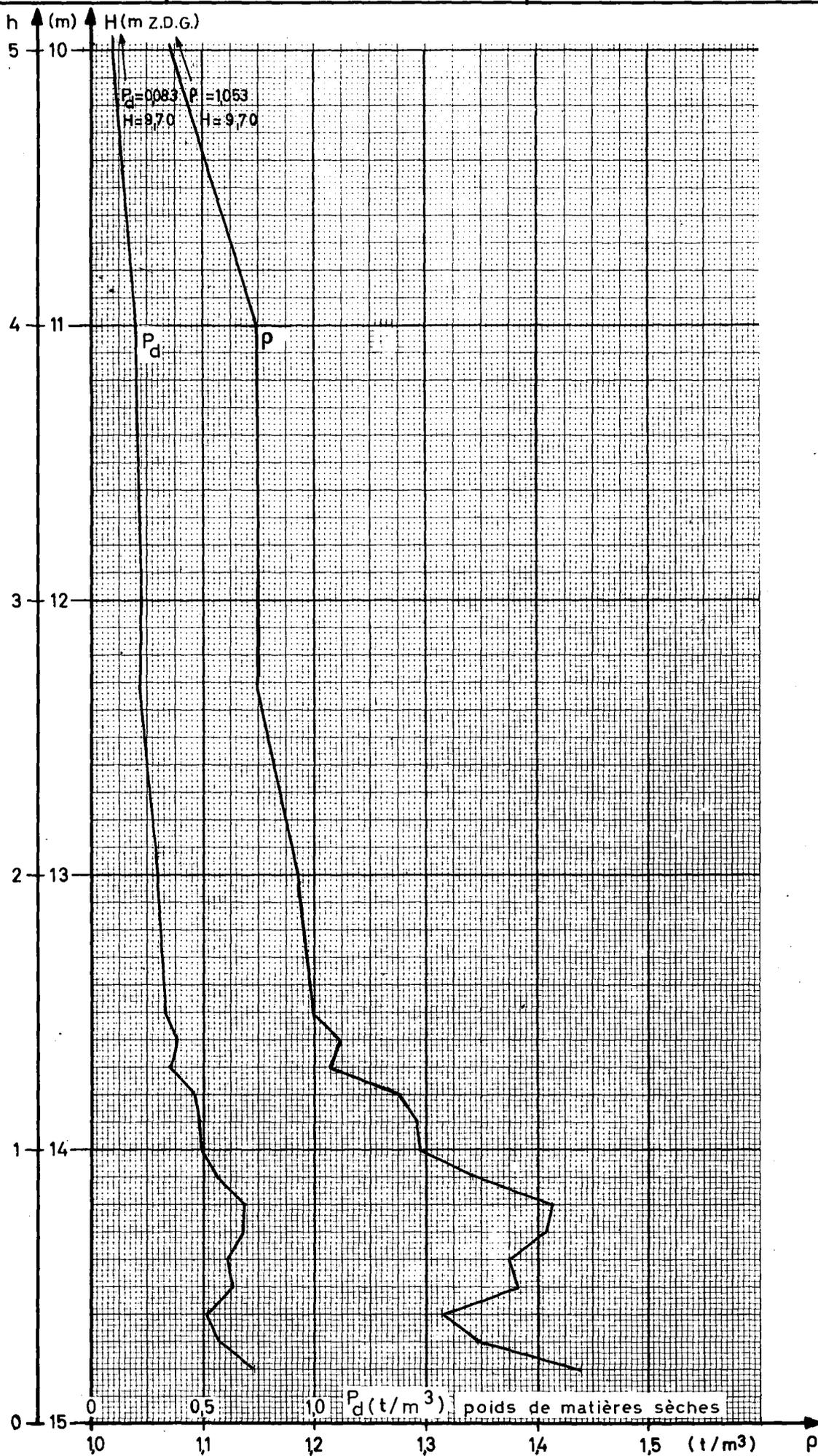


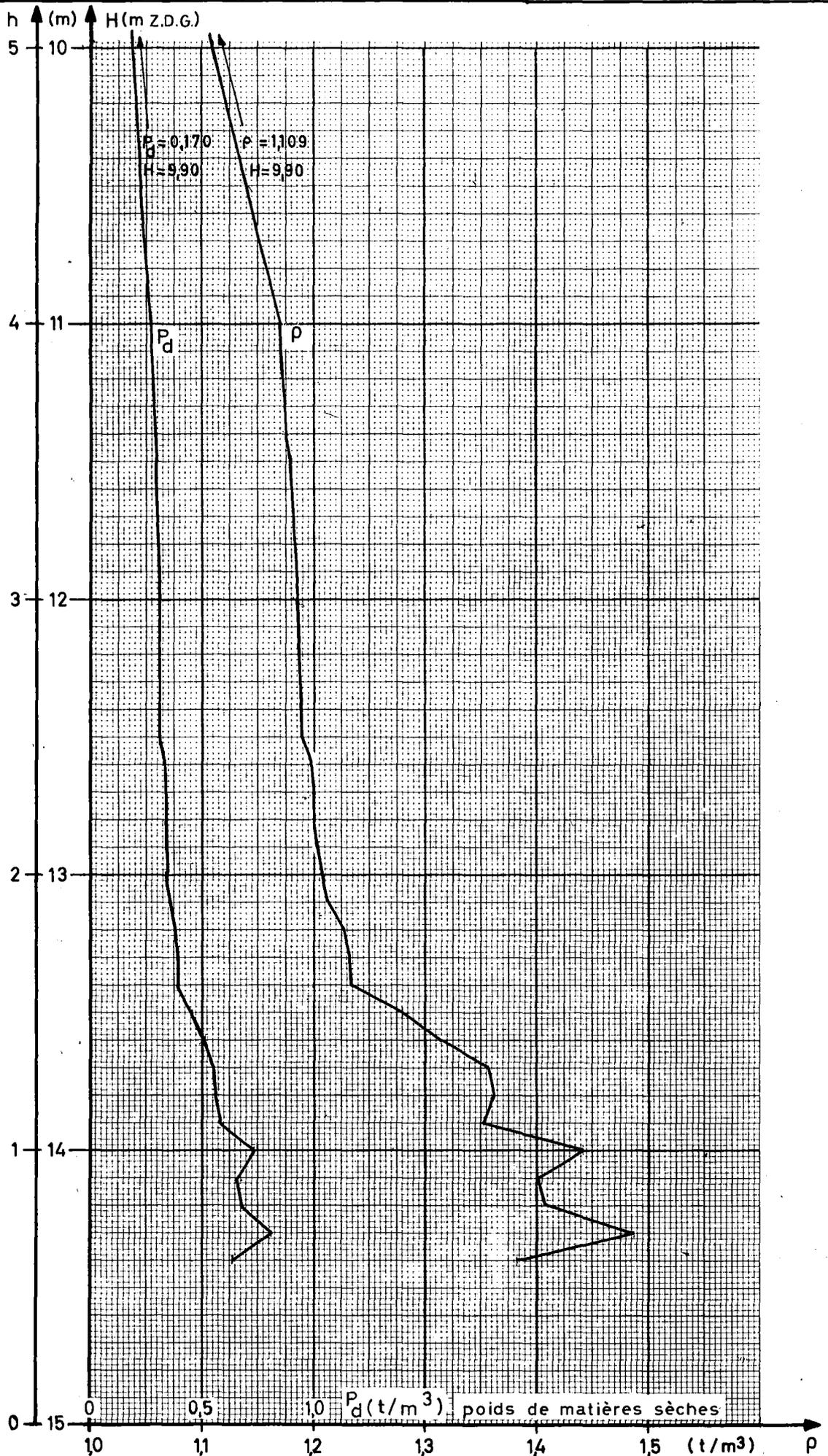


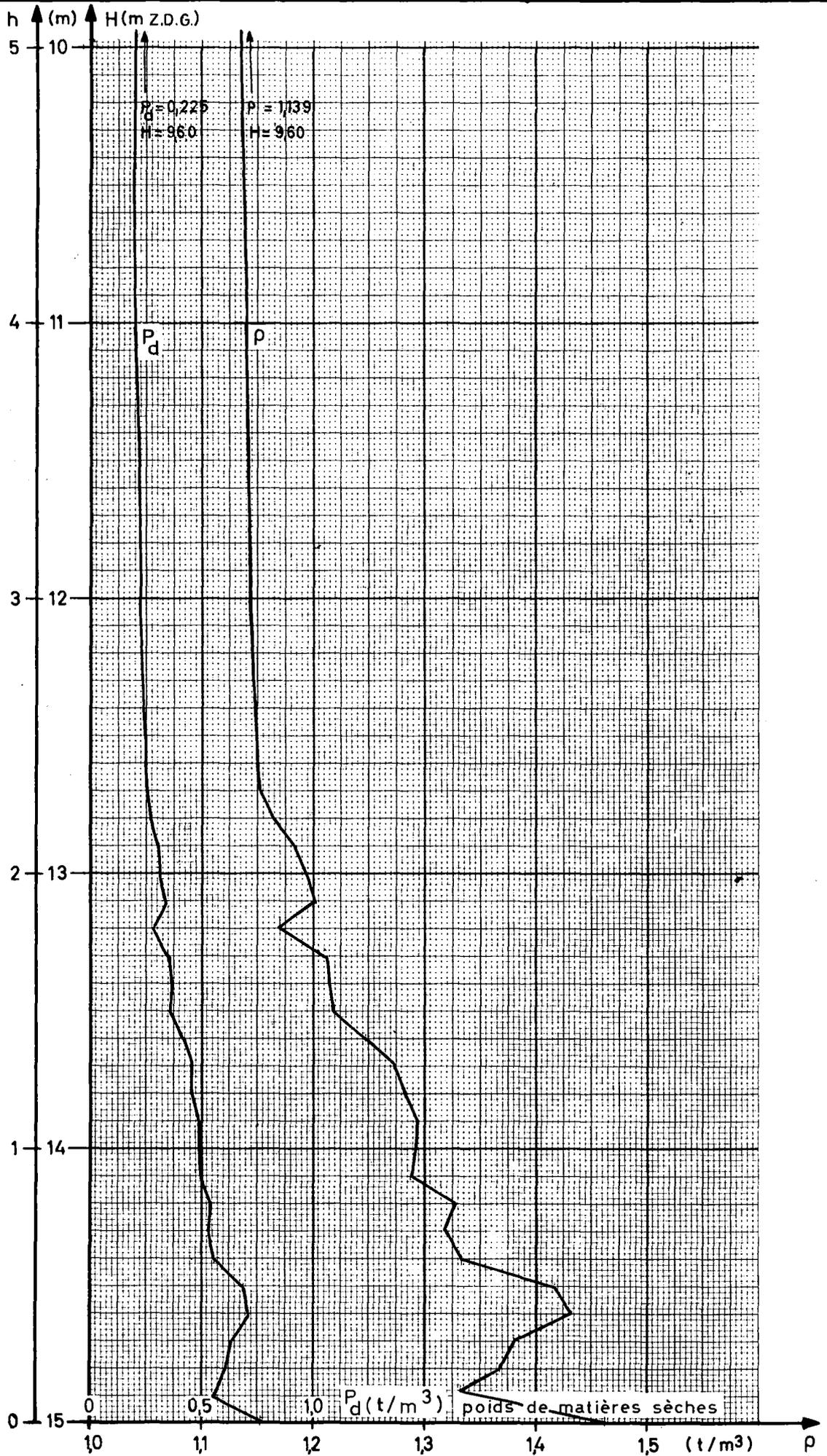


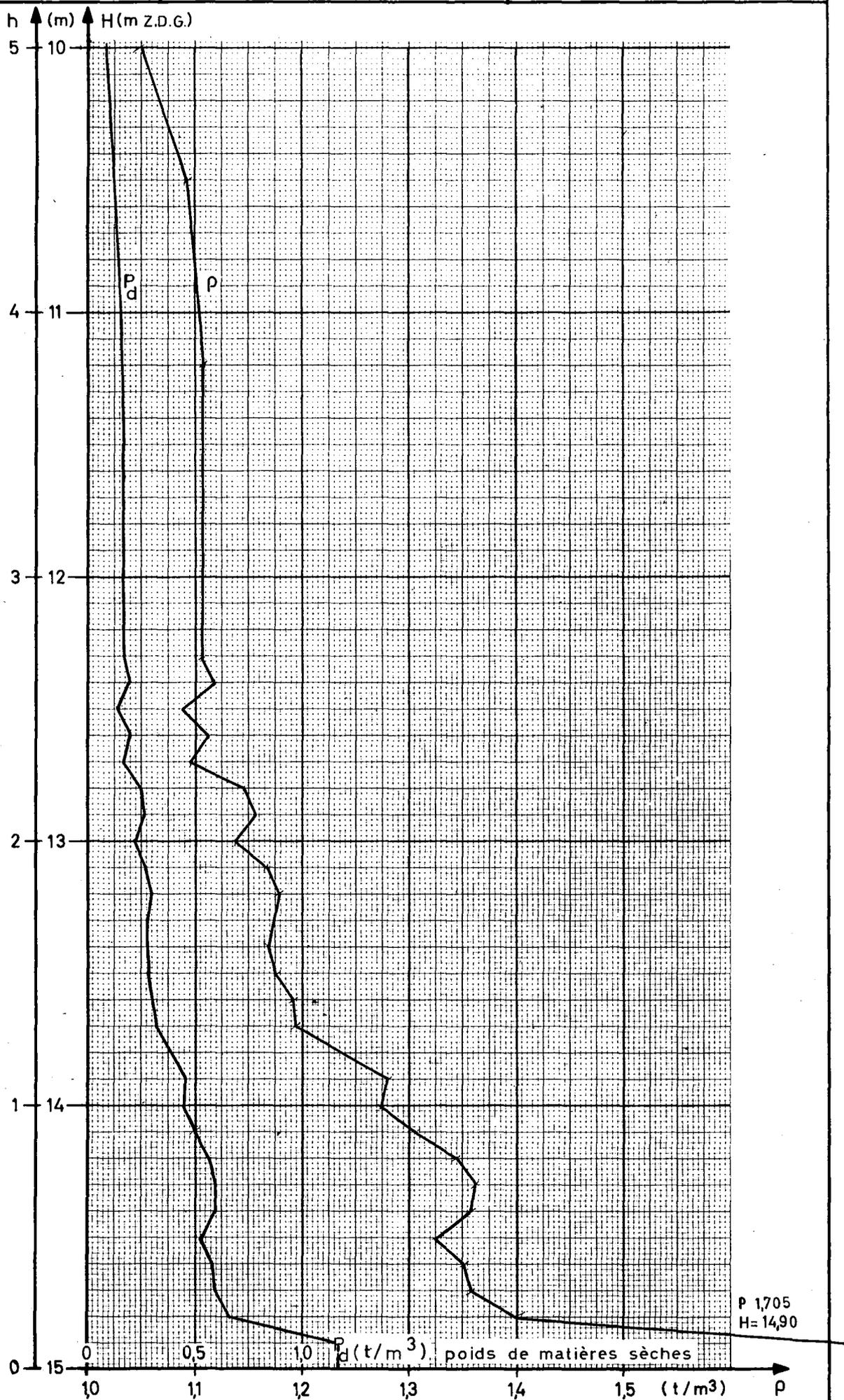


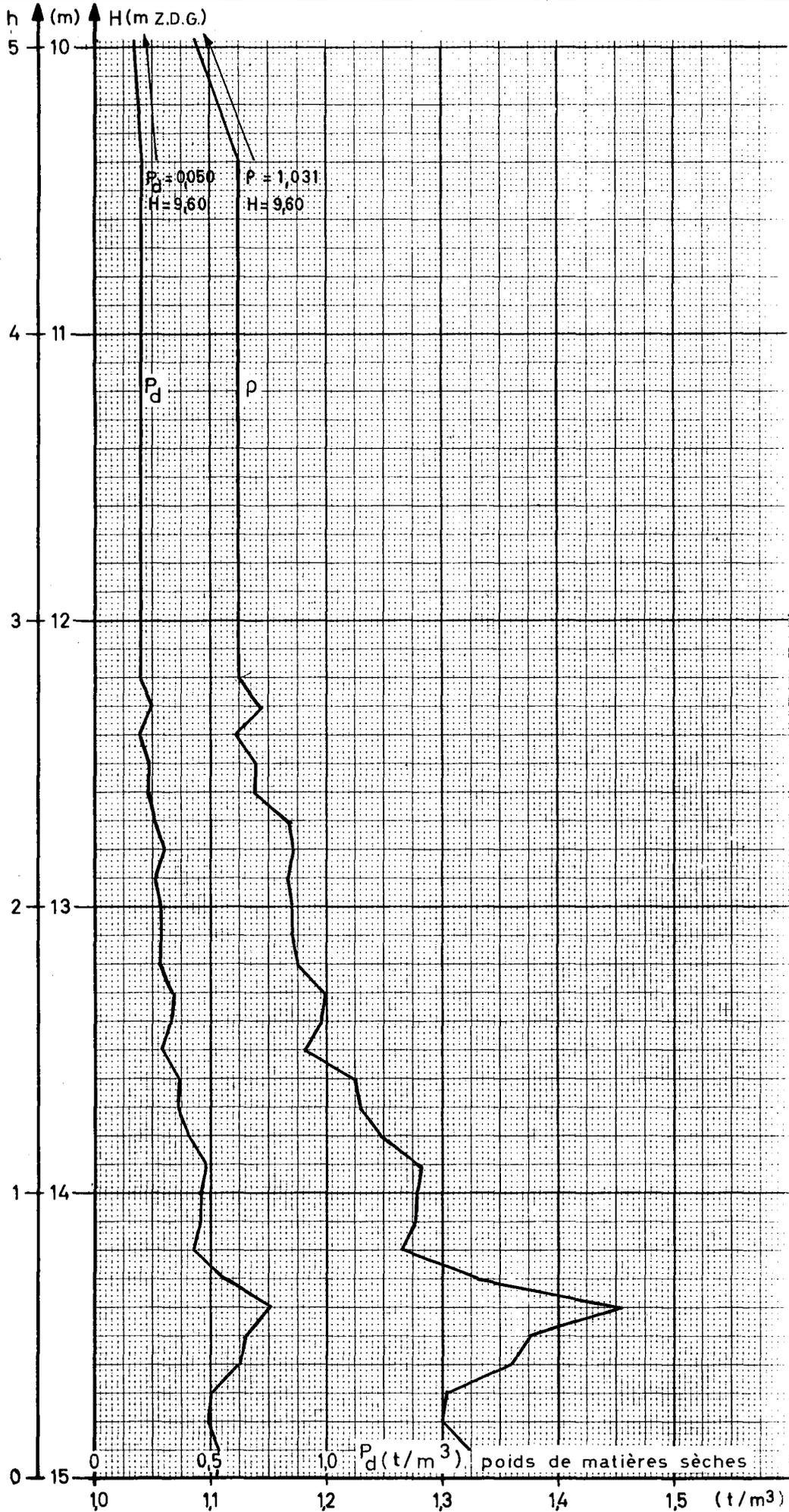


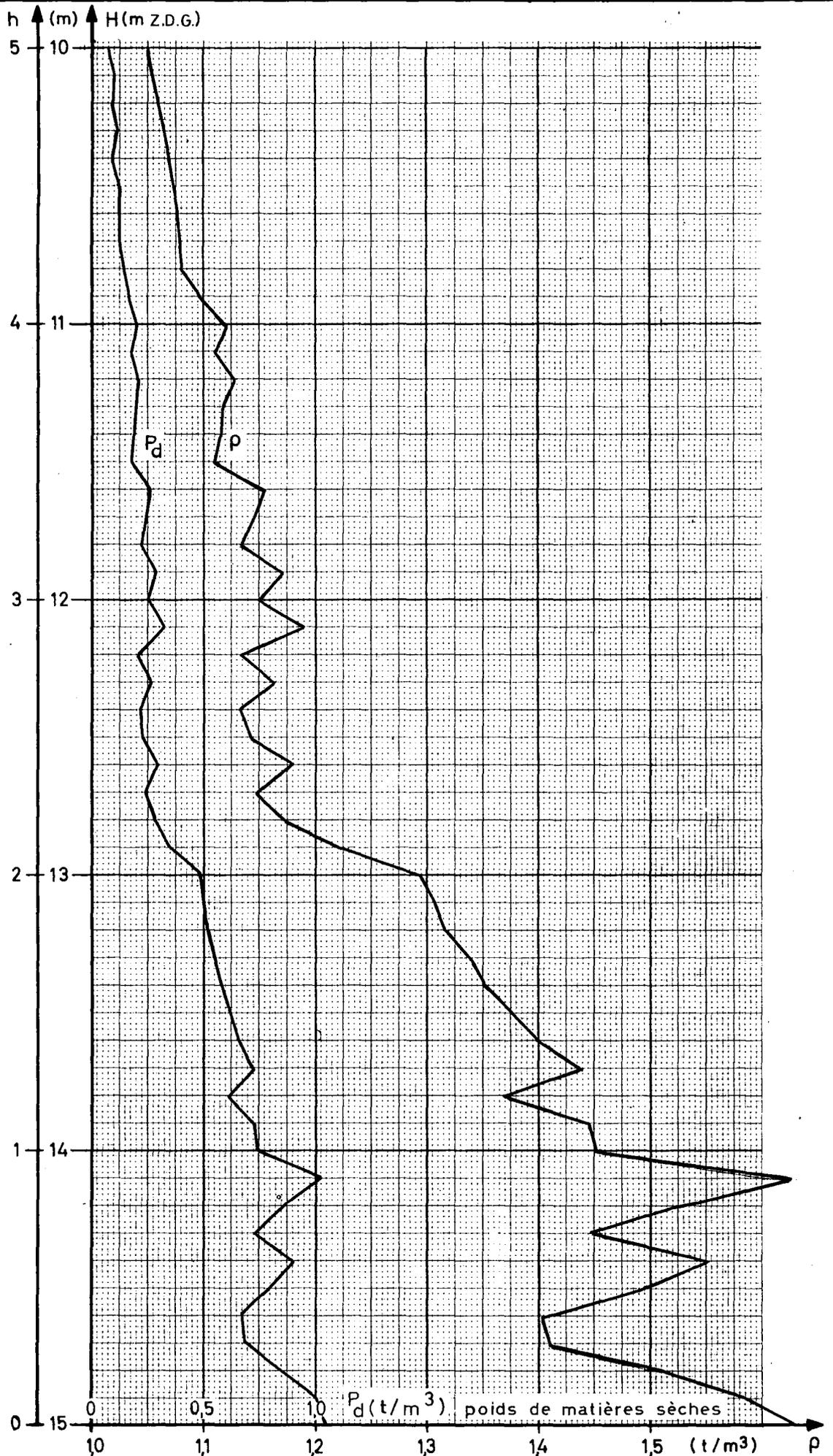


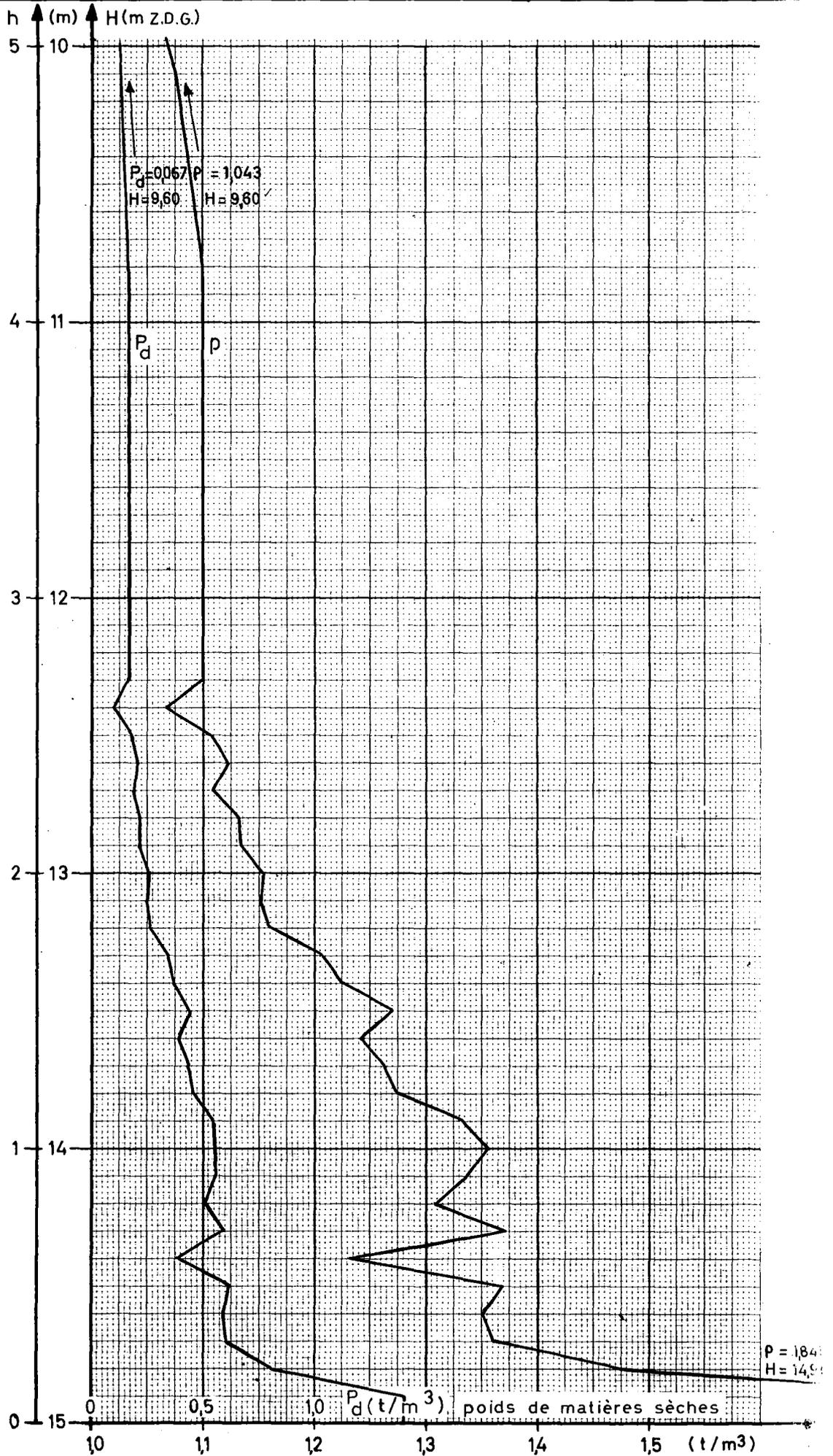


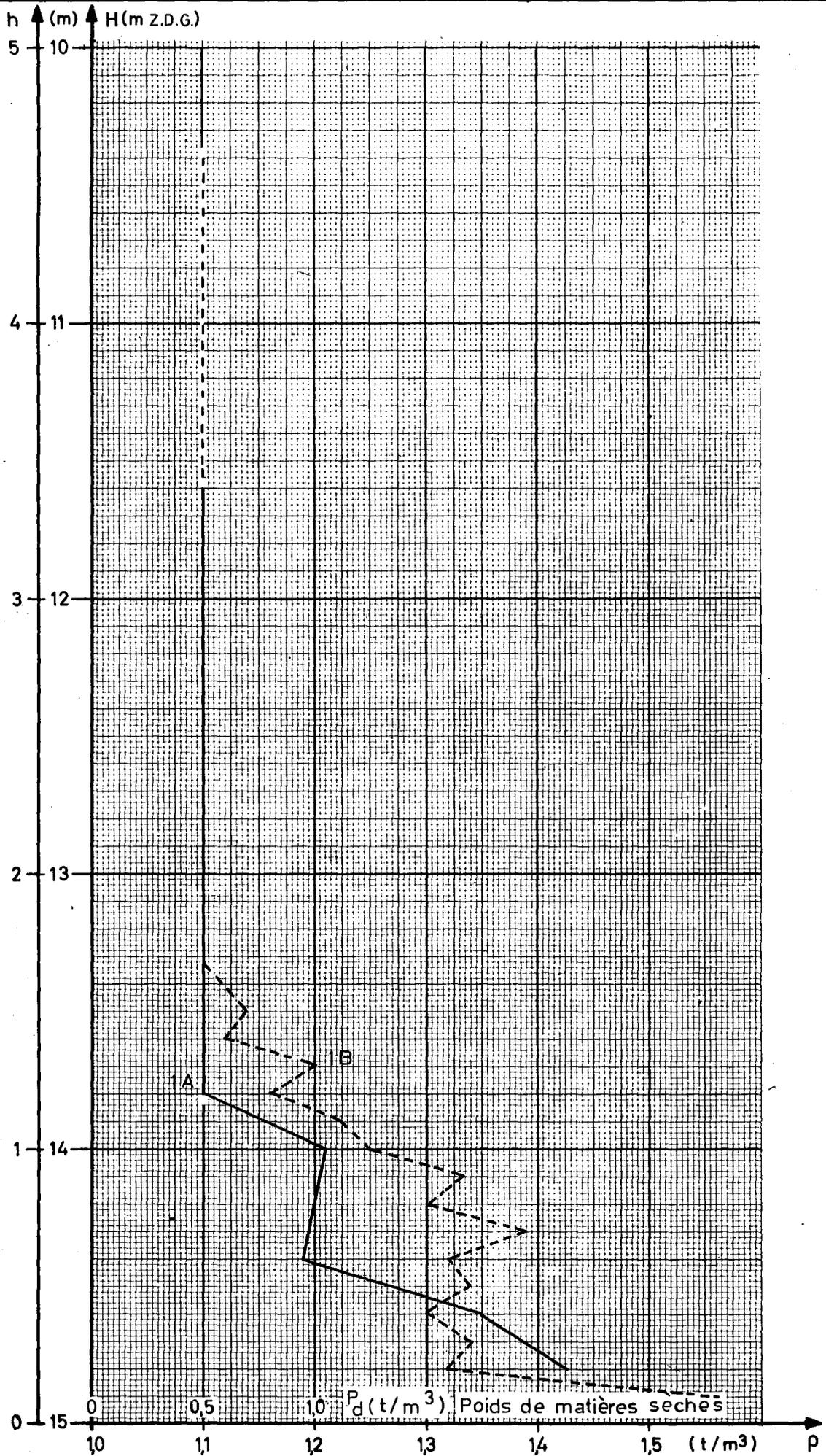


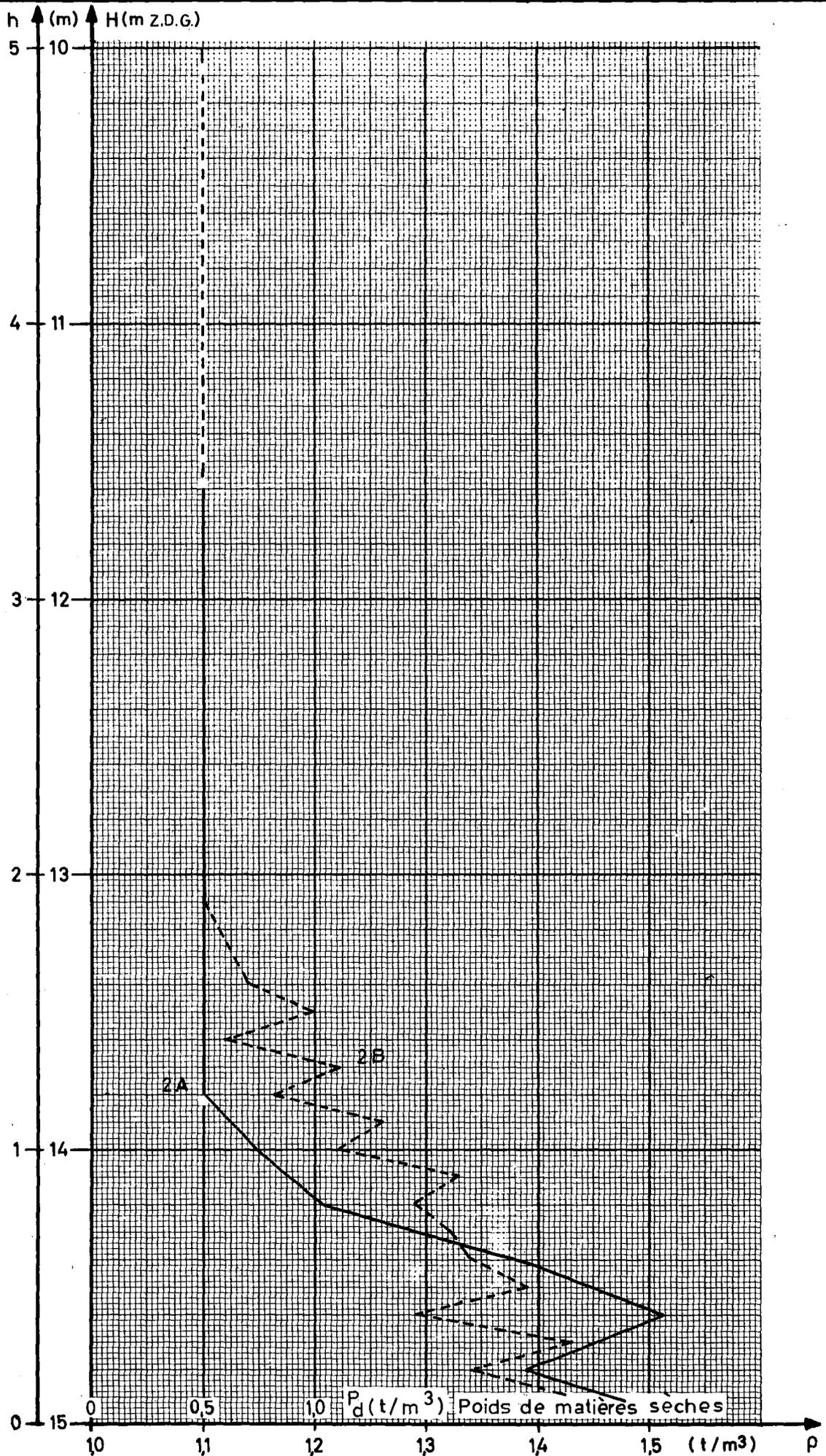


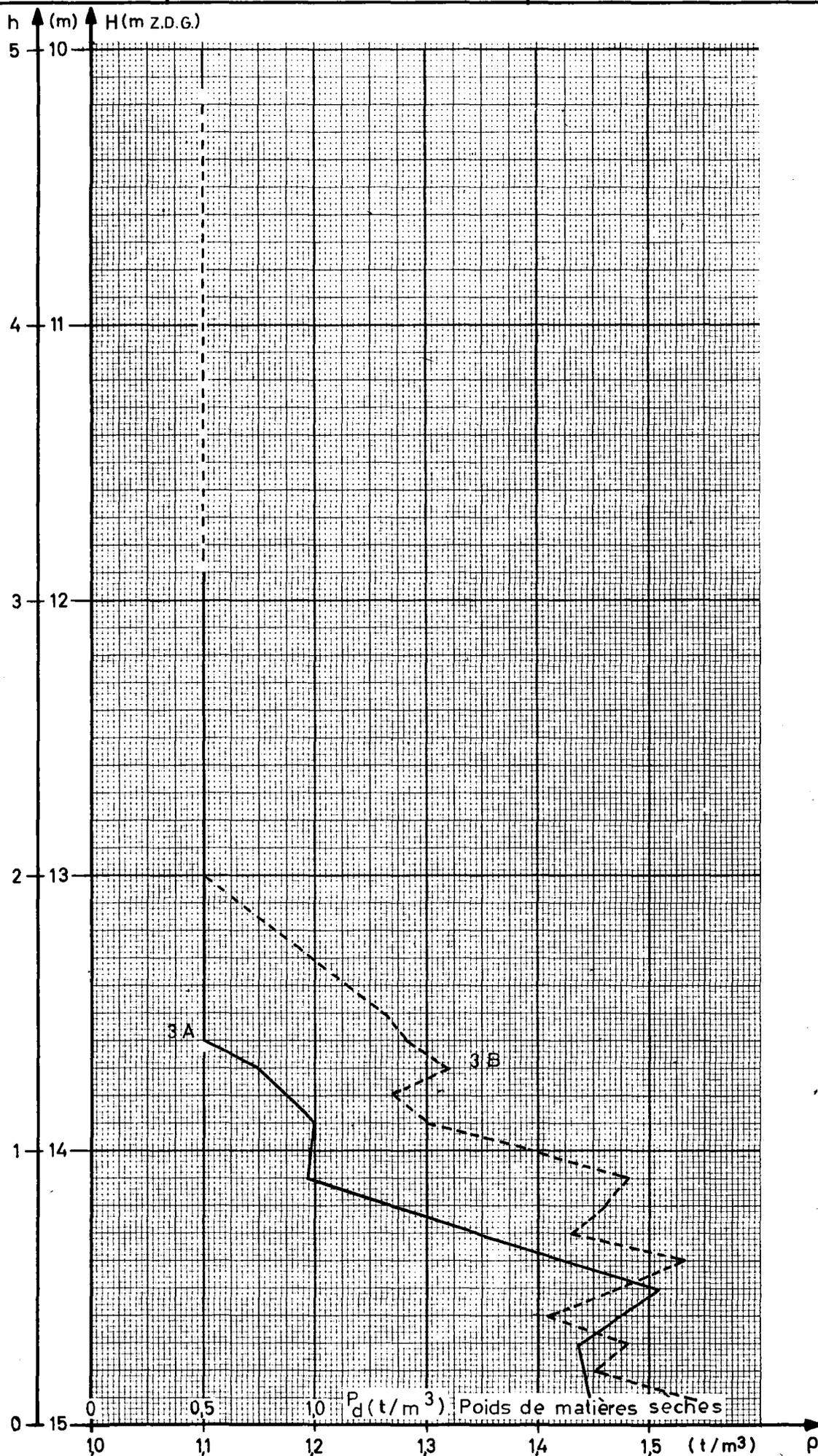


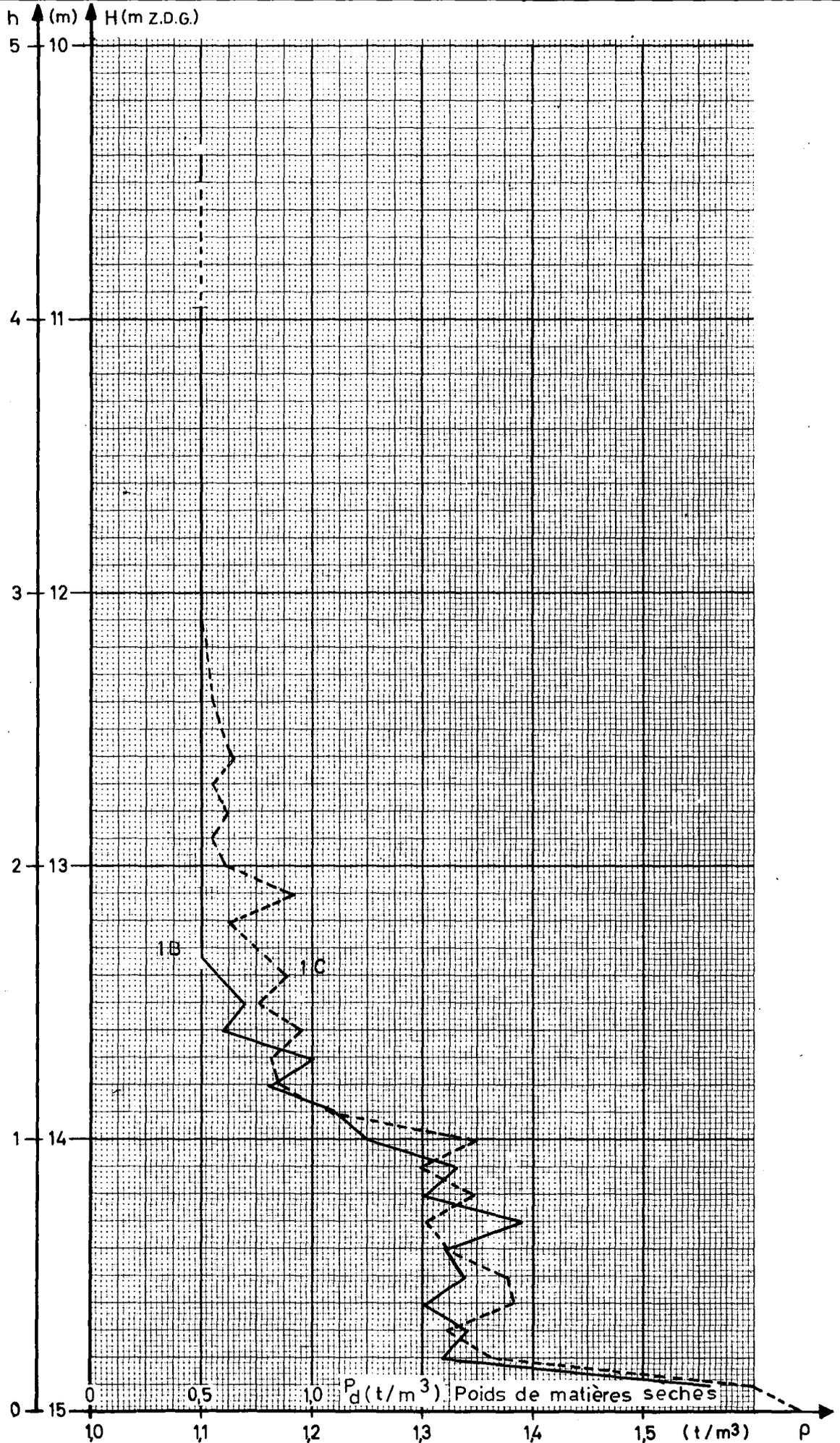


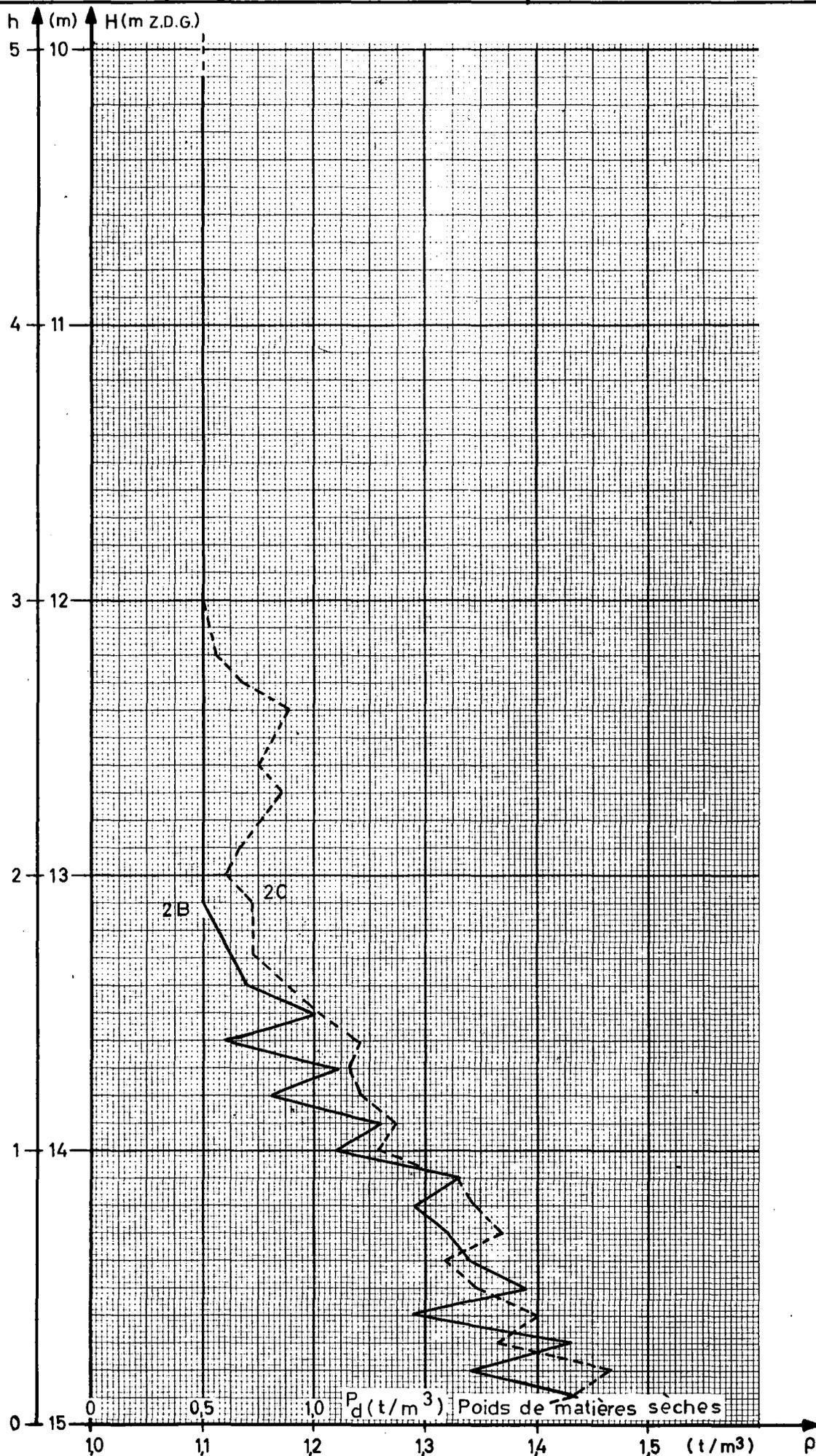


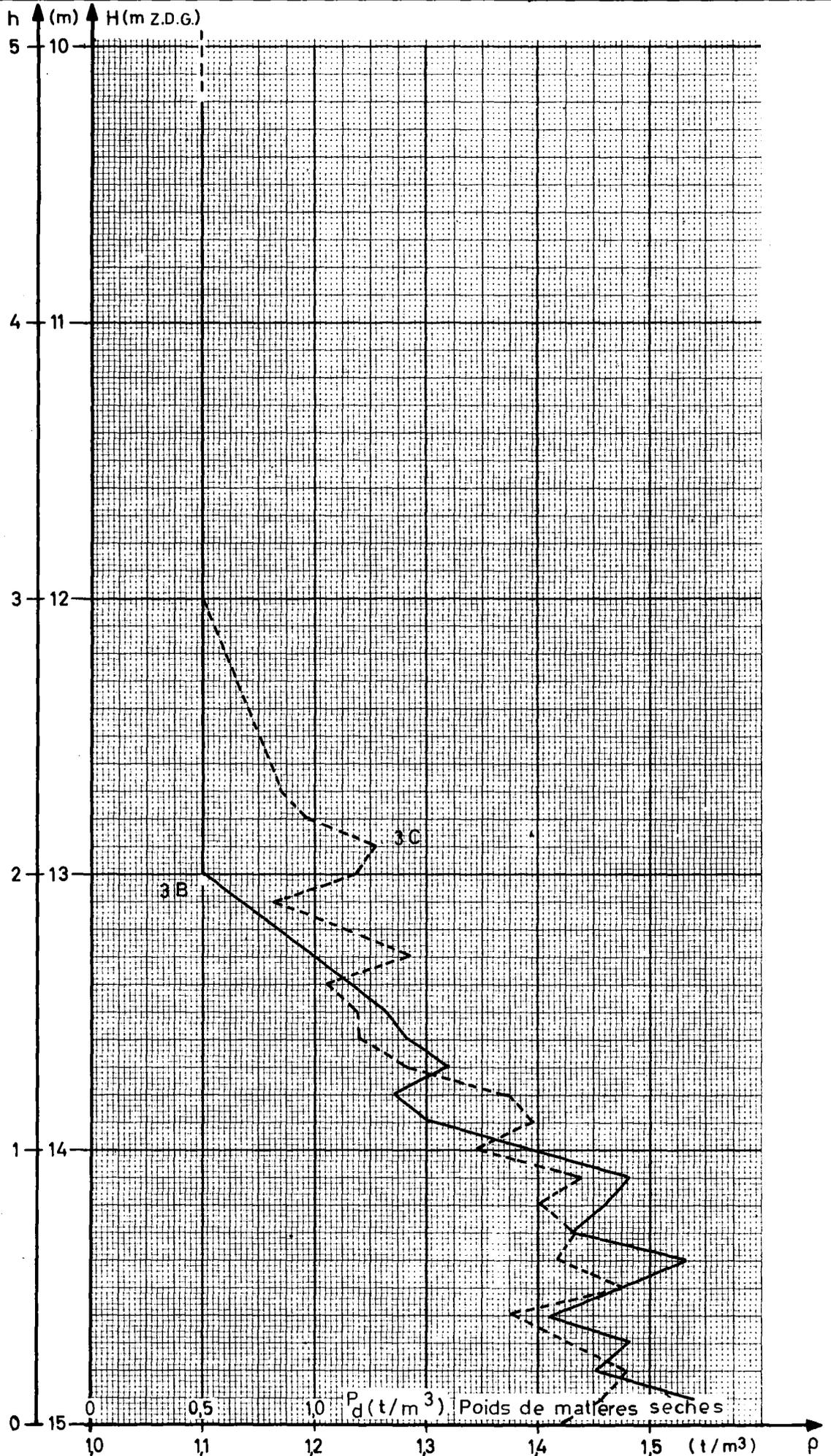


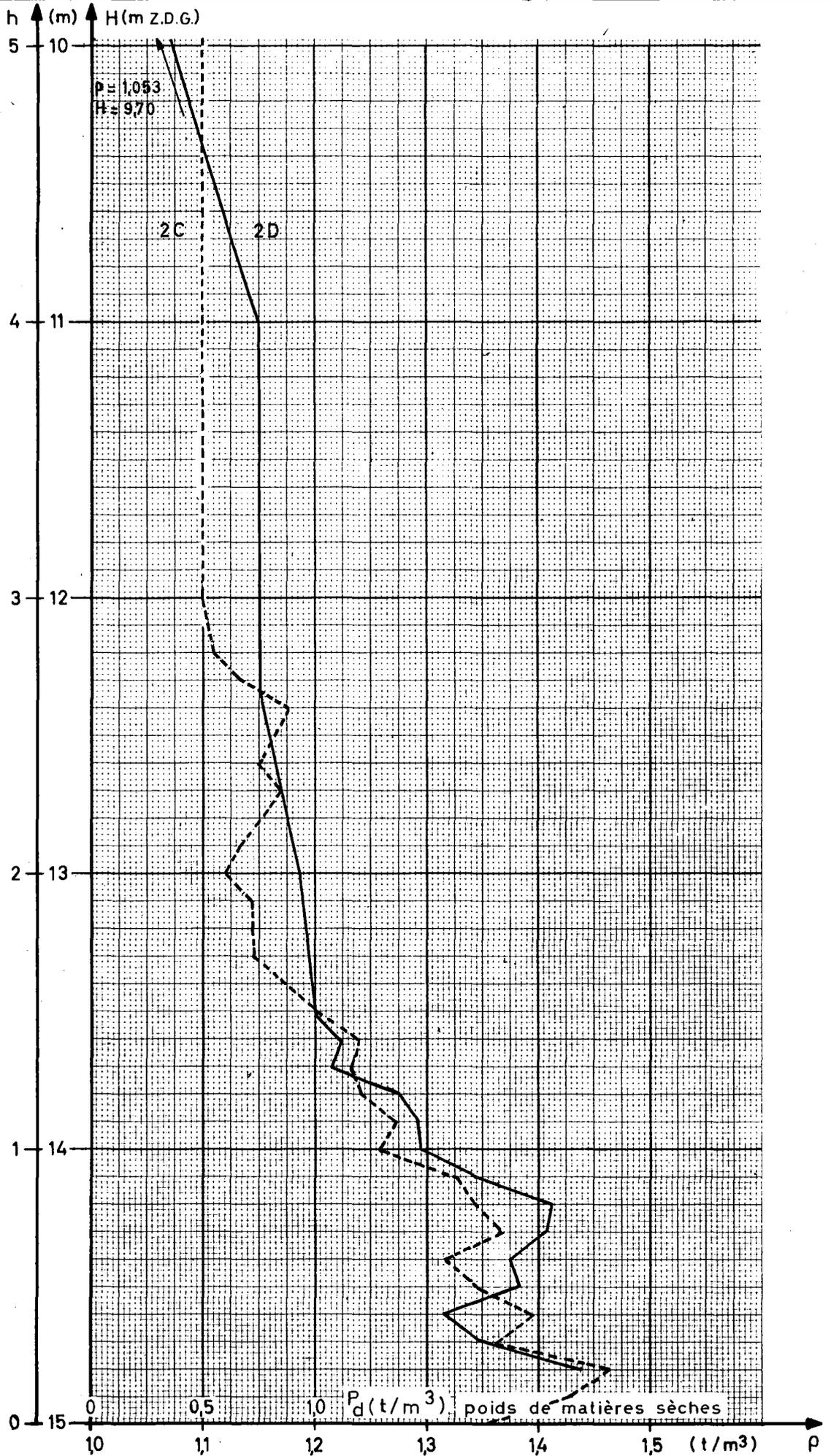


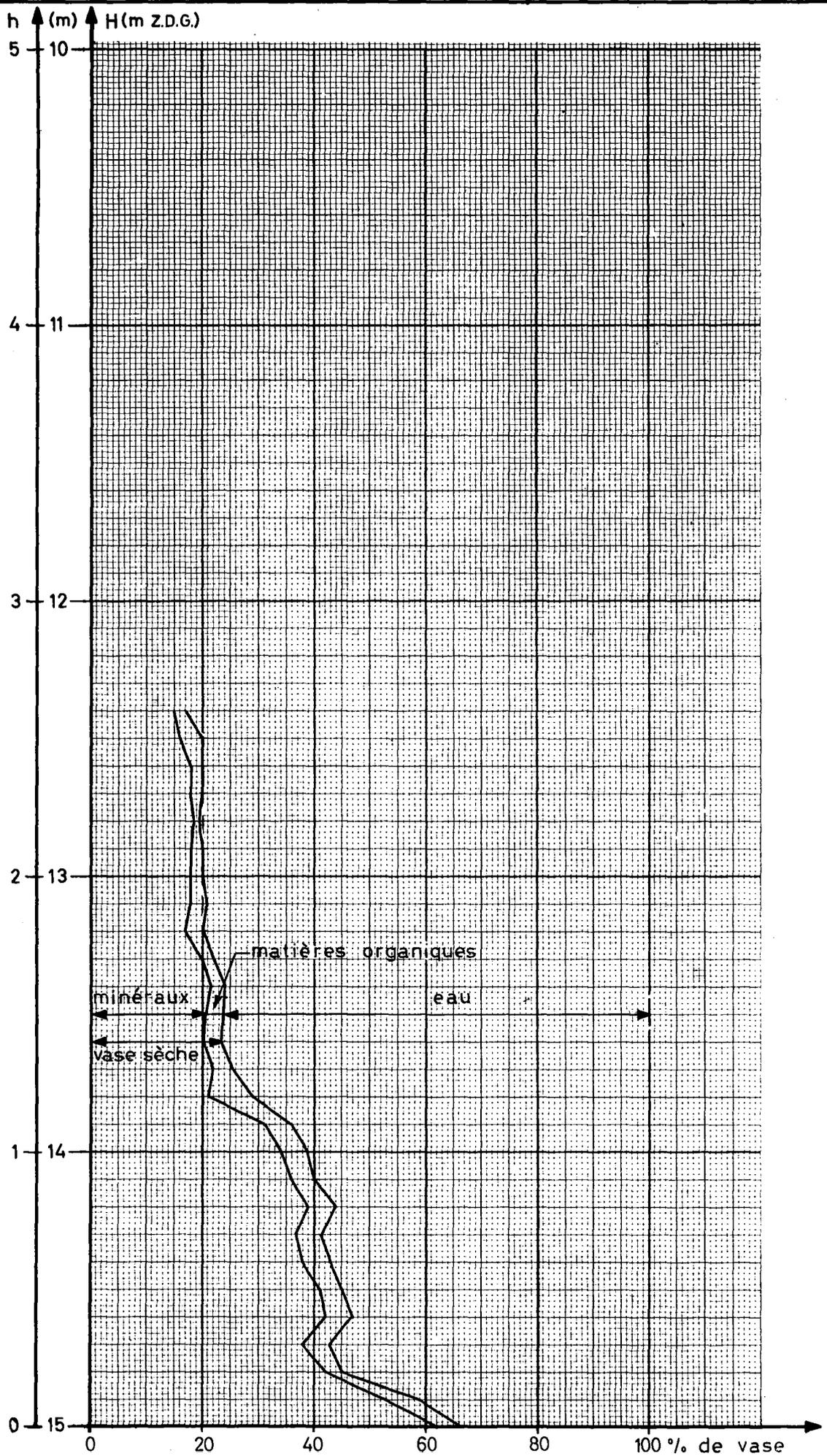


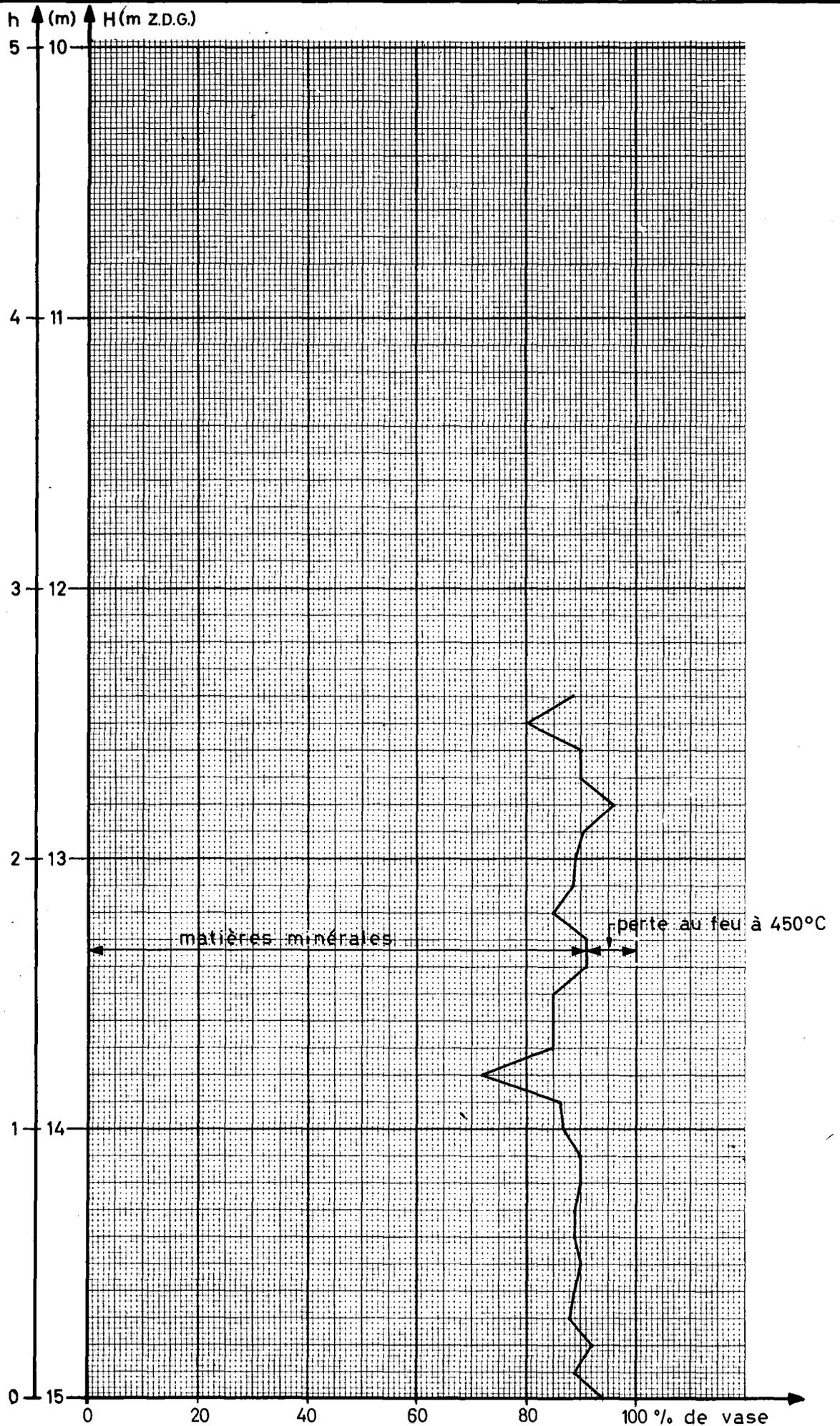


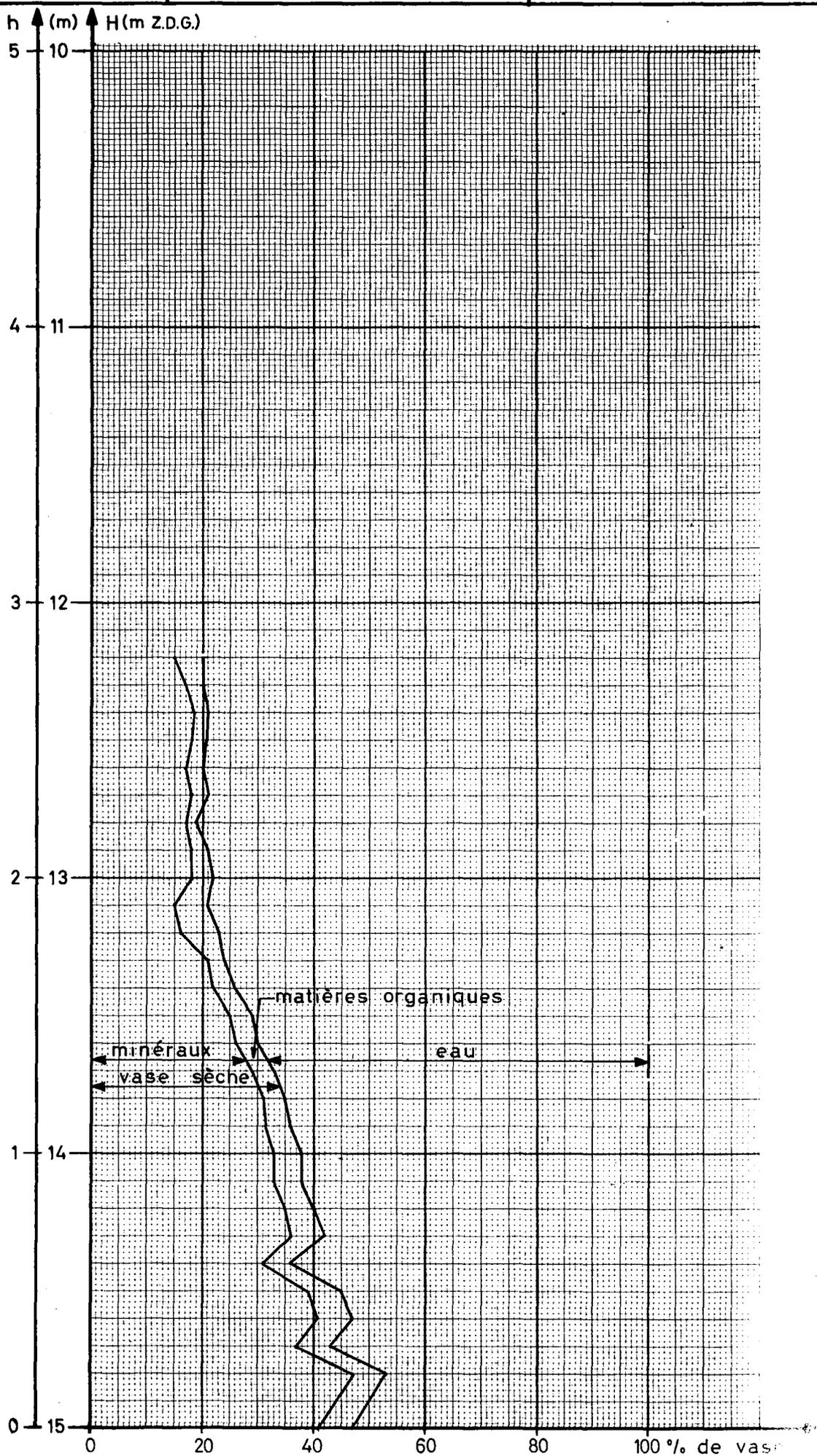


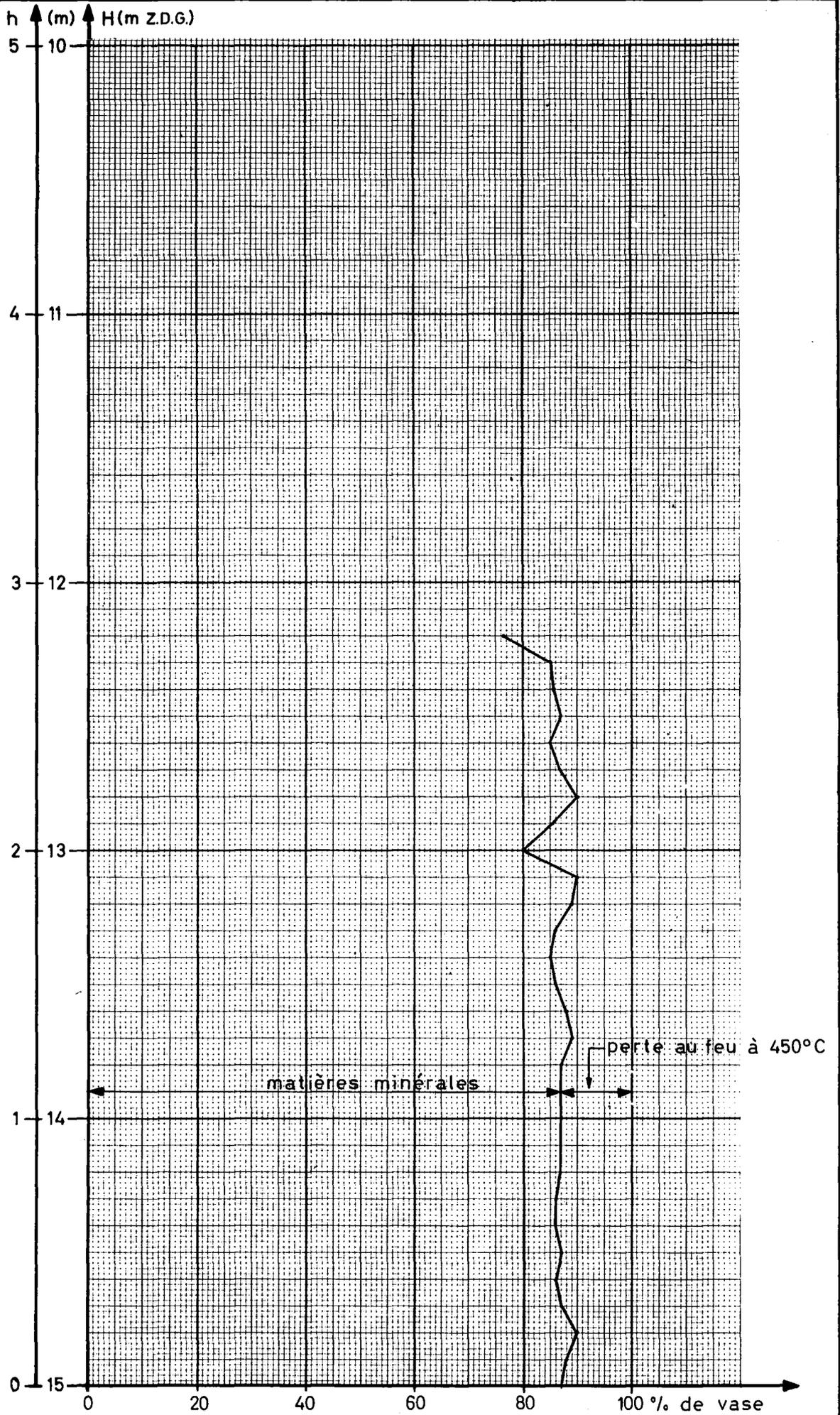


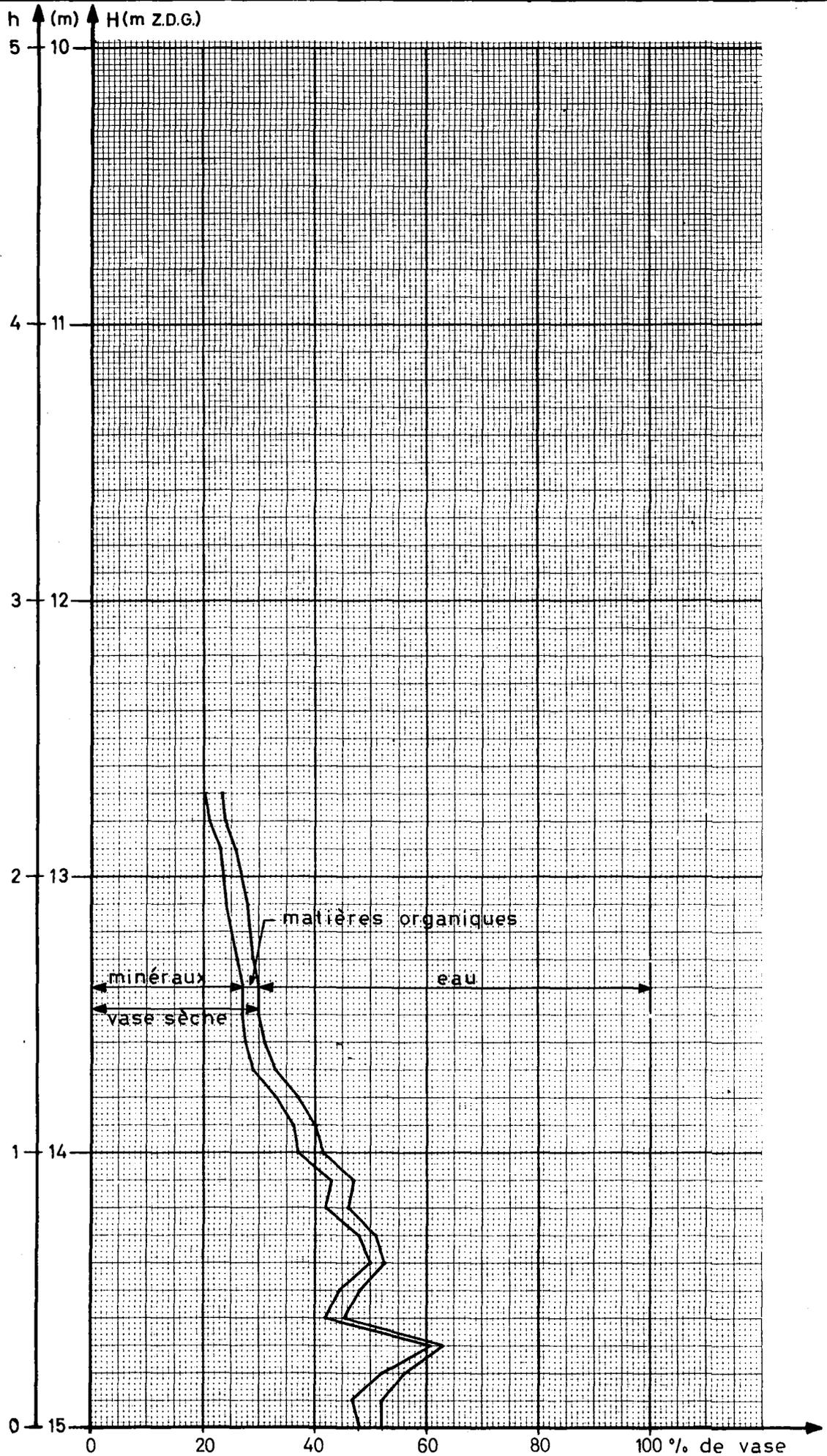


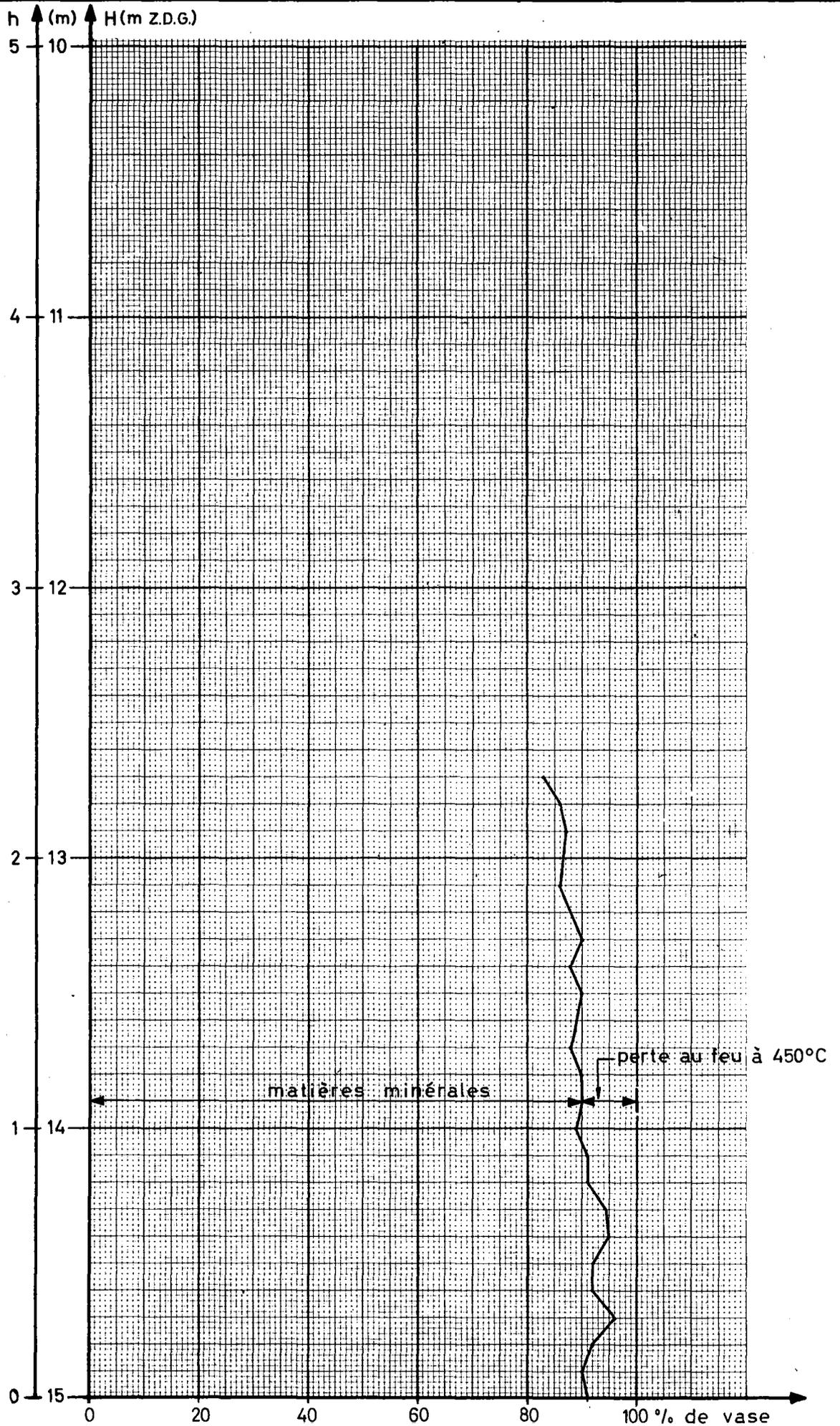


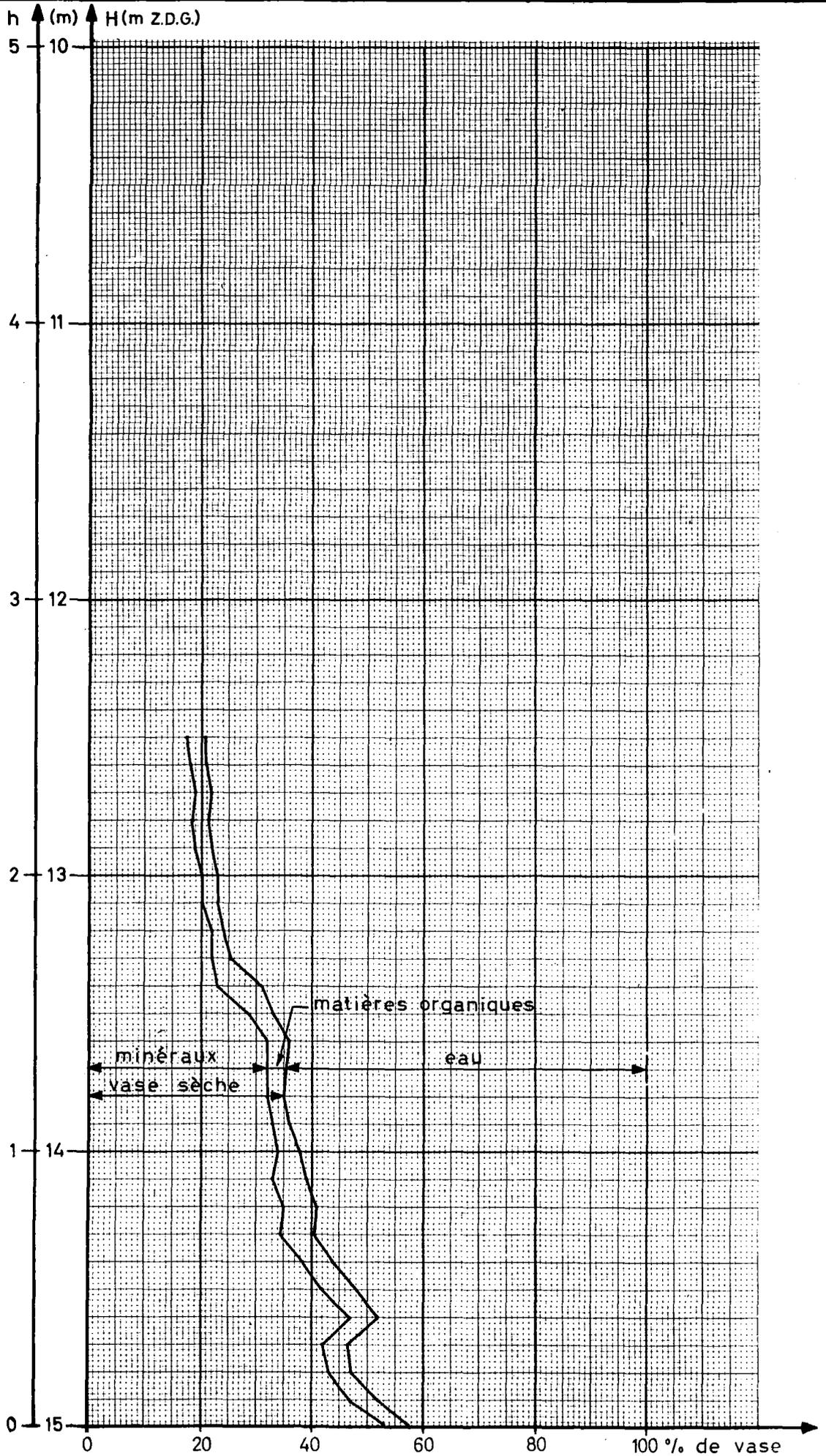


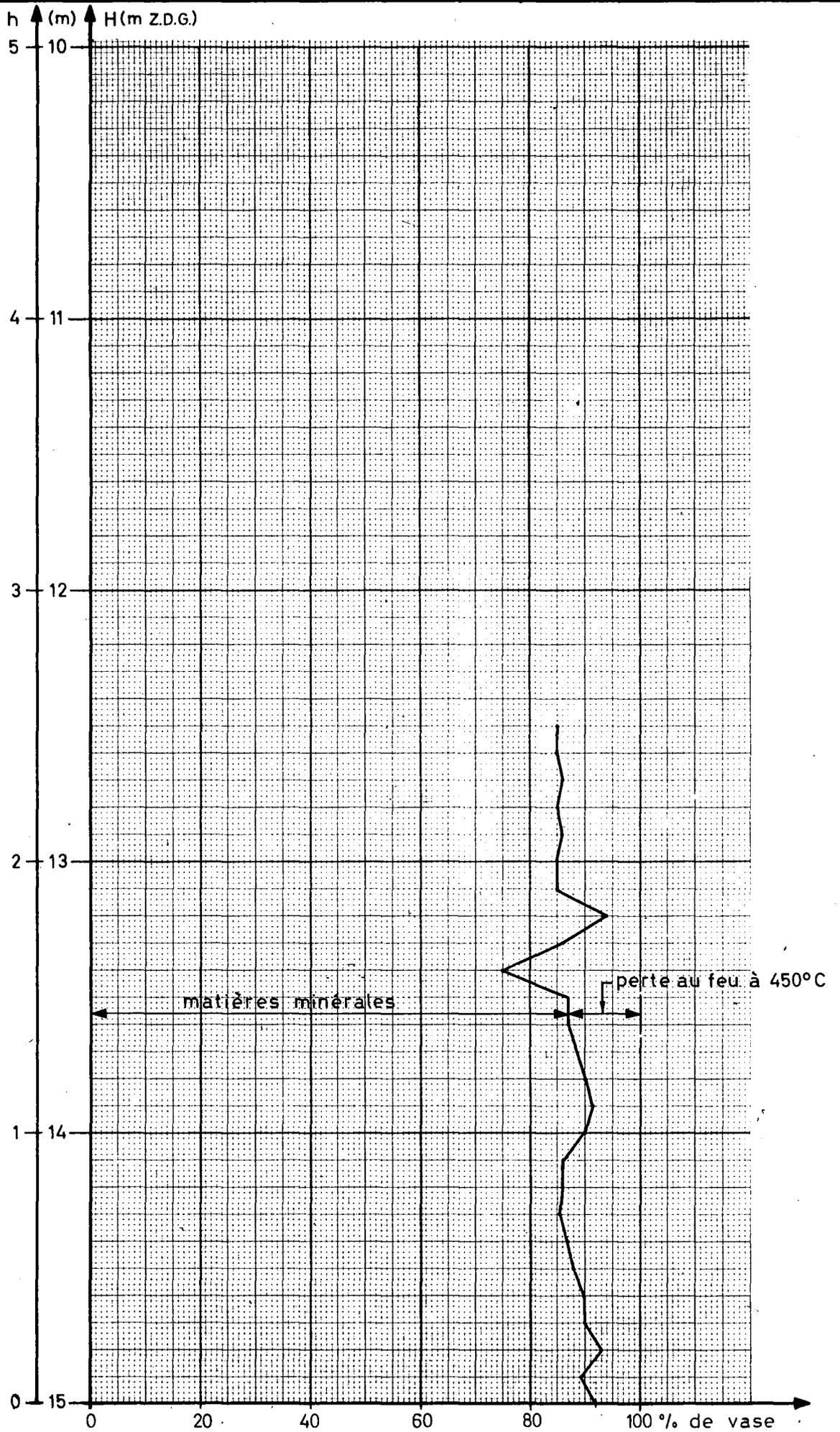


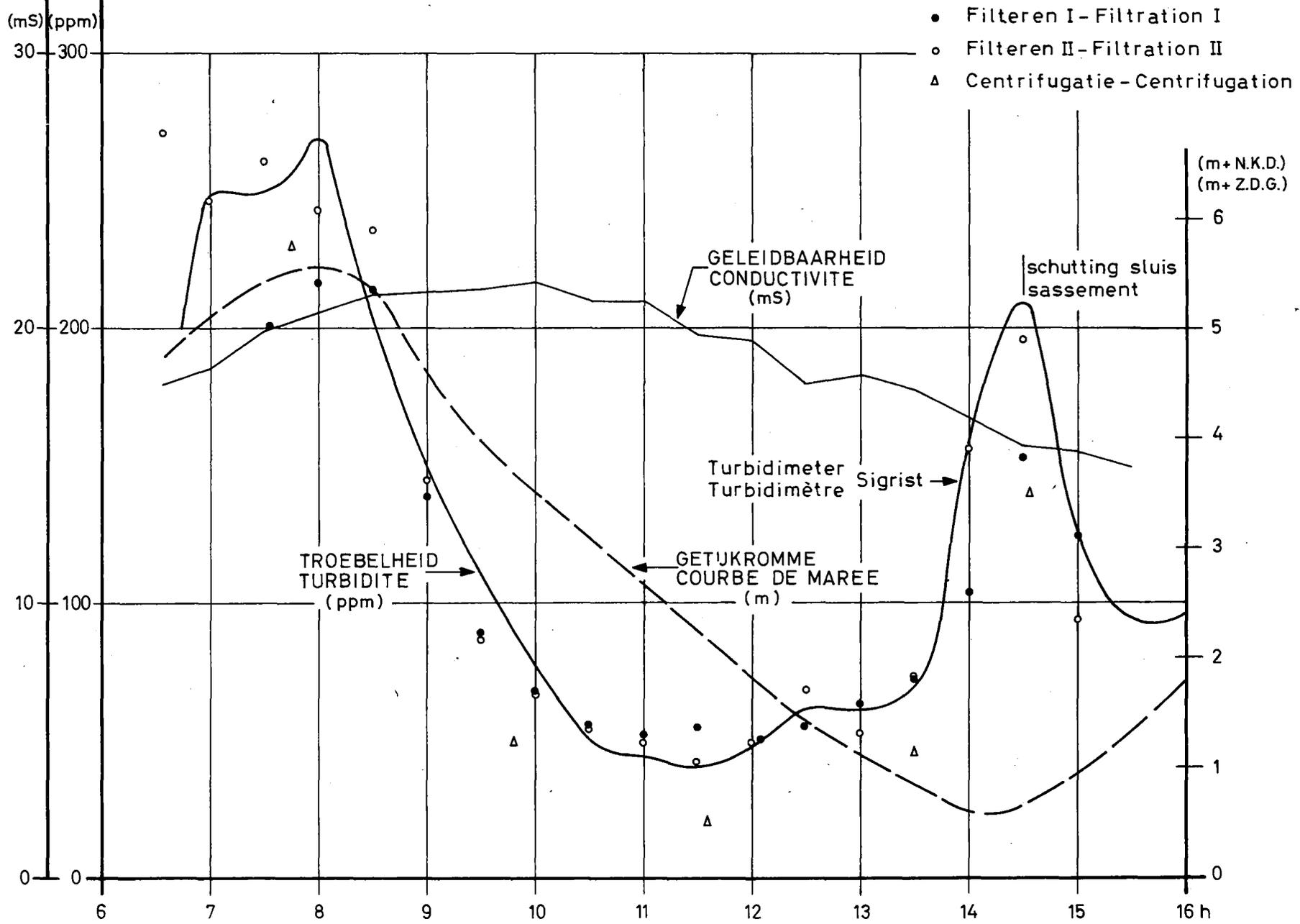












TOEGANGSGEUL
 ZEESLUIS ZANDVLIET
 CHENAL DIACCES
 ECLUSE MARITIME
 ZANDVLIET

Suspensie en zoutmetingen
 Mesures de salinité
 et de suspension

Bijlage II
 Annexe II
 Fig. 44

2. Causes probables de l'envasement du chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet et de la darse E3.

Au stade actuel de l'étude il semble que la salinité soit une des causes les plus importantes des envasements. La salinité agit de deux façons. D'abord elle est responsable des phénomènes de floculation. Ensuite elle provoque dans la darse et le chenal d'accès des courants de densité qui augmente la quantité de matières solides amenées du fleuve.

a. Influence de la salinité sur la floculation des suspensions.

Nous avons vu que les suspensions sont principalement constituées de quartz, de calcite, d'argiles et de matières organiques. Ces deux derniers constituants sont responsables de la floculation.

Mécanisme de la floculation.

Les argiles, particules colloïdales, ont une charge électrique, qui provient de leur structure. En solution, cette charge fixe autour de la particule des couches d'anions ou de cations qui forment ce qu'on appelle la "double couche".

Les argiles peuvent flocculer suivant un grand nombre d'associations.

La floculation est conditionnée par l'importance relative de forces d'attraction ou de répulsion entre particules.

Les forces de répulsion sont de trois types:

- répulsion électrostatique lorsque les deux doubles couches sont de mêmes signes.

- répulsion de Born qui s'oppose à l'interpénétration de deux réseaux cristallins.
- répulsion due à la l'adsorption de solvant.

Les forces d'attraction sont également de trois types :

- les forces de Van der Waals, peu puissantes, mais additives.
- les forces électrostatiques lorsque les deux doubles couches sont de signes opposés.
- les forces de pontage dans le cas de polyélectrolytes.

Voyons l'influence sur la floculation de la quantité d'électrolyte en solution.

Les forces de Born et de Vander Waals ne sont pas modifiées par la présence de l'électrolyte.

Dans de l'eau pure, la répulsion électrostatique due aux doubles couches empêche en grande partie la floculation.

Une faible quantité d'électrolyte crée une compression des doubles couches. Les forces de répulsion restent prépondérantes. L'attraction électrostatique diminue ce qui empêche la floculation mutuelle.

Lorsqu'on augmente la quantité d'électrolyte les forces de répulsion deviennent de moins en moins importantes devant les forces d'attraction. On assiste alors à une augmentation de la floculation.

La défloculation, ou peptisation peut avoir trois causes :

- Certains électrolytes, en très faible quantité, peuvent créer une inversion du signe d'une des deux doubles couches et empêcher ainsi la floculation mutuelle.
- Une addition d'alcalis peut provoquer une inversion du signe de la double couche par changement du pH .
- La matière organique dissoute sous forme d'anions ou de cations organiques peuvent également peptiser la suspension.

Les macromolécules organiques peuvent , elles aussi, influencer la floculation. En faible quantité et en présence de sel elles provoquent une floculation. En grande quantité elles l'empêchent.

Des essais faits au Laboratoire de Chimie Industrielle de l'U. L. B (W1) montrent clairement l'influence de la salinité sur la floculation des suspensions de l'Escaut. Celle-ci commence pour une salinité de 1 ‰. et est complète pour une salinité de 5 ‰. .

- b. Influence de la salinité sur les échanges d'eau entre la darse E3 ou le chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet et l'Escaut.

Nous allons , dans un but de clarté, schématiser le plus possible les phénomènes.

La marée horizontale créée dans l'Escaut, à l'entrée des darses ou des écluses , une variation de la salinité au cours de la marée.

La marée verticale suit une loi périodique qui rappelle une sinusoïde.

La variation de la salinité suit également une loi qui ressemble à la courbe de marée. Elle est légèrement décalée dans le temps par rapport à cette dernière. L'accroissement de la salinité correspond au flot, la diminution de la salinité correspond au jusant.

Nous allons simplifier en considérant provisoirement que le décalage dans le temps des courbes de marée et de salinité est nul, le flot et la montée de la marée coïncidant.

Au flot, l'eau salée remonte l'Escaut. A un moment, l'eau du fleuve sera plus salée, donc plus lourde que celle de la darse.

Elle aura tendance à entrer dans la darse sous l'eau douce qui est repoussée dans le fleuve. Comme à ce moment-là se produit la montée nous devons superposer aux courants de densité des vitesses dues au remplissage de marée.

Au jusant nous aurons le même phénomène, mais inversé.

Nous voyons que la salinité provoque des courants de densité qui accroissent l'échange d'eau entre le fleuve et la darse.

En réalité les phénomènes sont plus complexes mais le résultat est le même.

Le calcul de la quantité de solide en suspension qui se dépose dans la darse ou le chenal d'accès doit faire intervenir comme facteur le volume réel d'échange et non la superficie de la darse fois l'amplitude de la marée.

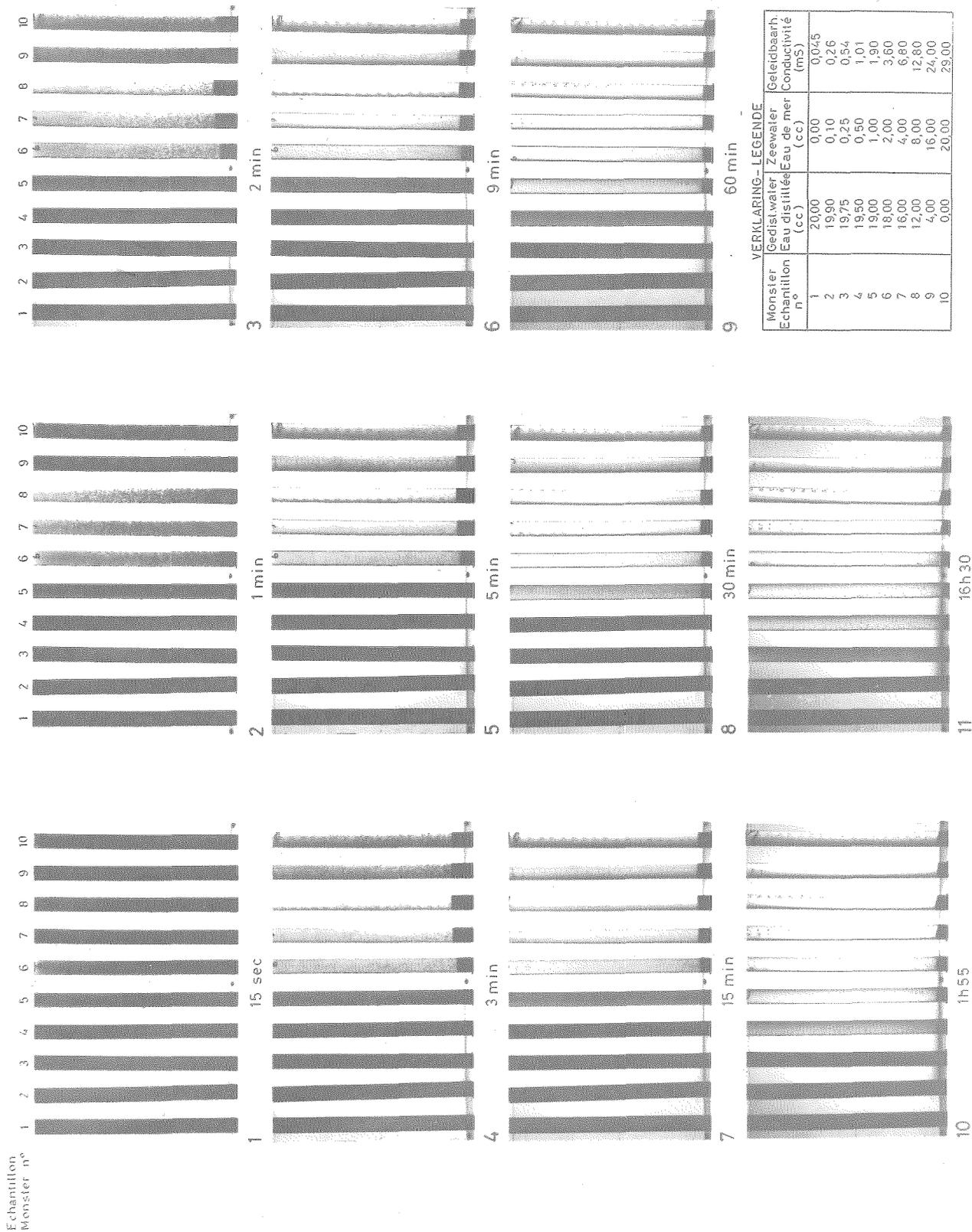
Les figures qui suivent illustrent des mesures faites dans la darse du tunnel E3 . Les courants de densité y sont mis en évidence par les diagrammes de vitesse et de salinité.

c. Variations saisonnières de l'envasement.

En hiver, l'envasement de la darse E3 est faible contrairement à celui du chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet. En effet, à hauteur du tunnel E3 il n'y a ni floculation, ni courant de densité car la salinité est très basse et constante, alors qu'à hauteur de Zandvliet la floculation et les courants de densité sont déjà importants, vu que la salinité y varie entre 3 et 7 ‰ environ.

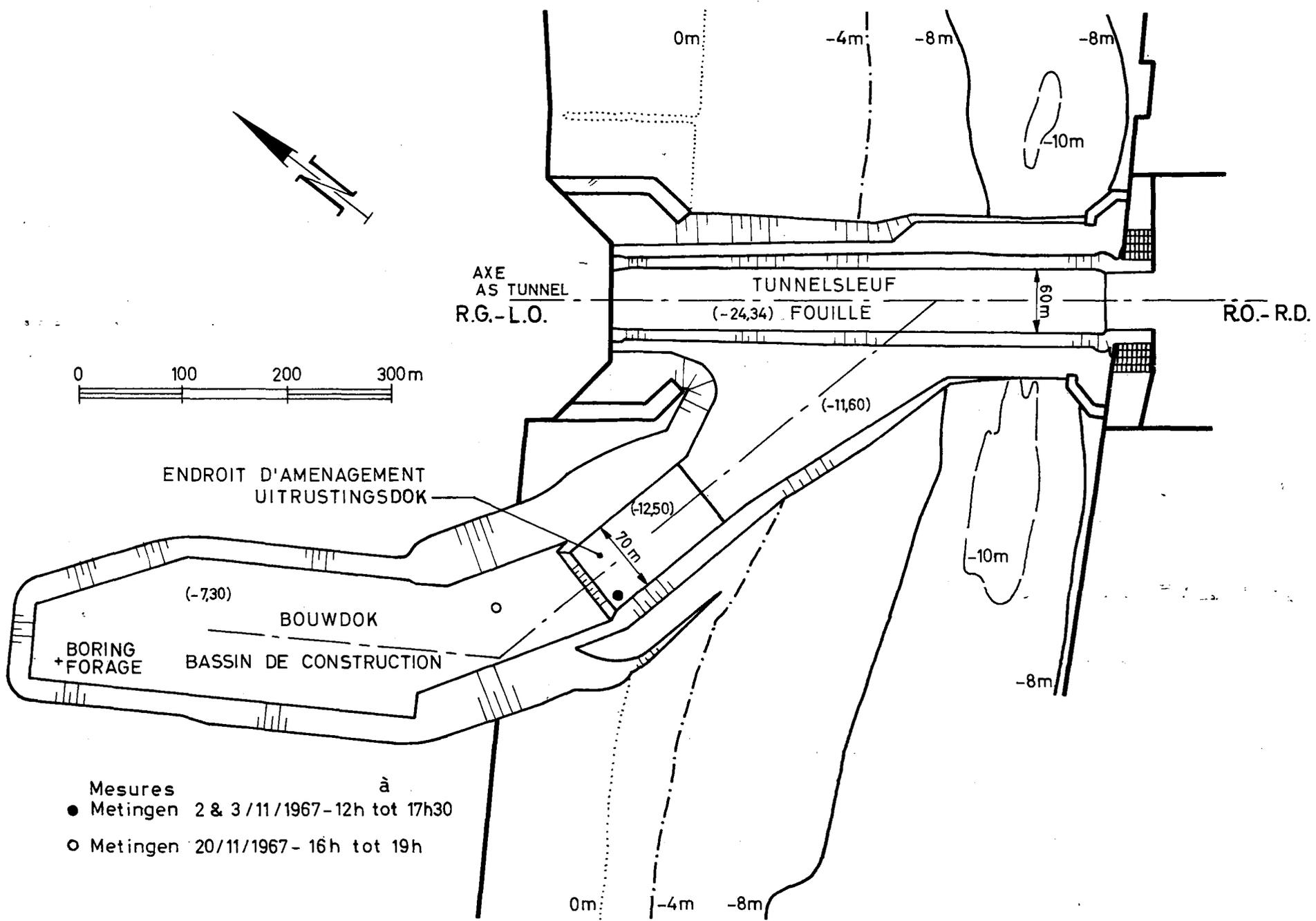
En été la salinité et sa variation sont importantes à E3 comme à Zandvliet . Les rythmes d'envasement y sont élevés.

INVLOED VAN HET ZOUTGEHALTE OP DE SEDIMENTATIE (Toegangseul Zandvlietsluis)
 INFLUENCE DE LA SALINITE SUR LA SEDIMENTATION (Chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet)



VERKLARING - LEGENDE

Monsternummer Echantillon n°	Gedistilleerd water Eau distillée (cc)	Zee water Eau de mer (cc)	Geleidbaarheid Conductivité (ms)
1	20,00	0,00	0,045
2	19,90	0,10	0,26
3	19,75	0,25	0,54
4	19,50	0,50	1,01
5	19,00	1,00	1,90
6	18,00	2,00	3,60
7	16,00	4,00	6,60
8	12,00	8,00	12,80
9	4,00	16,00	24,00
10	0,00	20,00	29,00



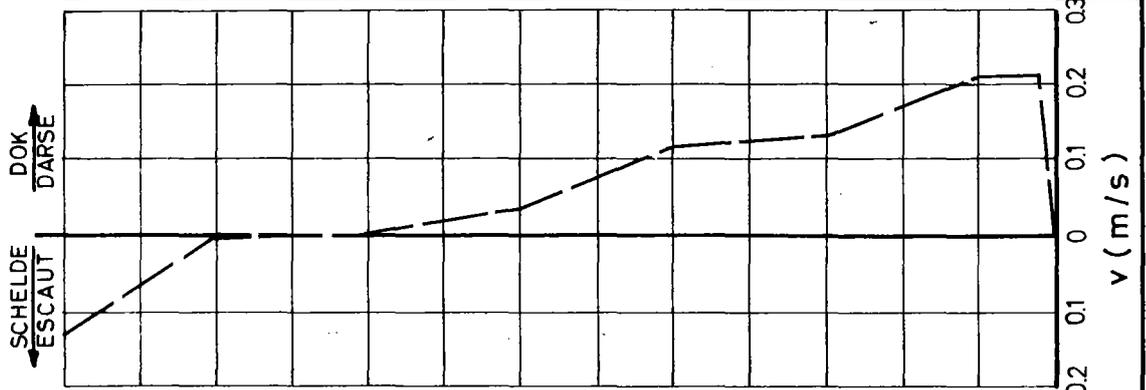
- Mesures à
- Metingen 2 & 3/11/1967 - 12h tot 17h30
 - Metingen 20/11/1967 - 16h tot 19h

DARSE
DOK E3

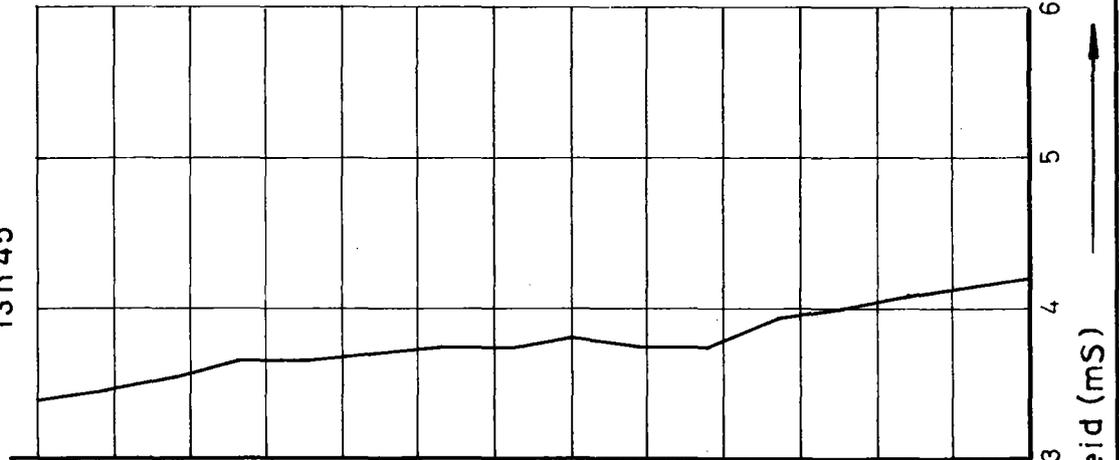
Mesures vitesses et salinité
Metingen snelheid en zoutgehalte
2/11/67

Bijlage II
Annexe II
Fig. 46

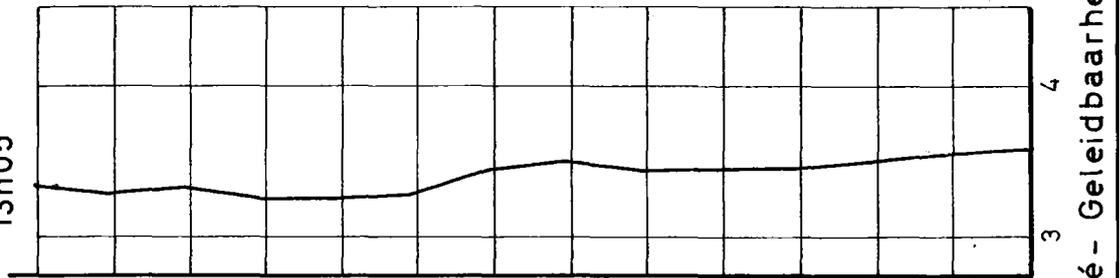
13h35



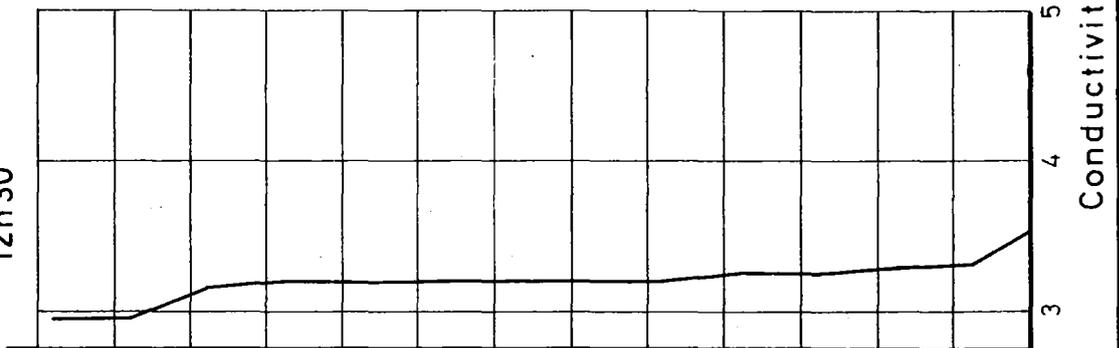
13h45



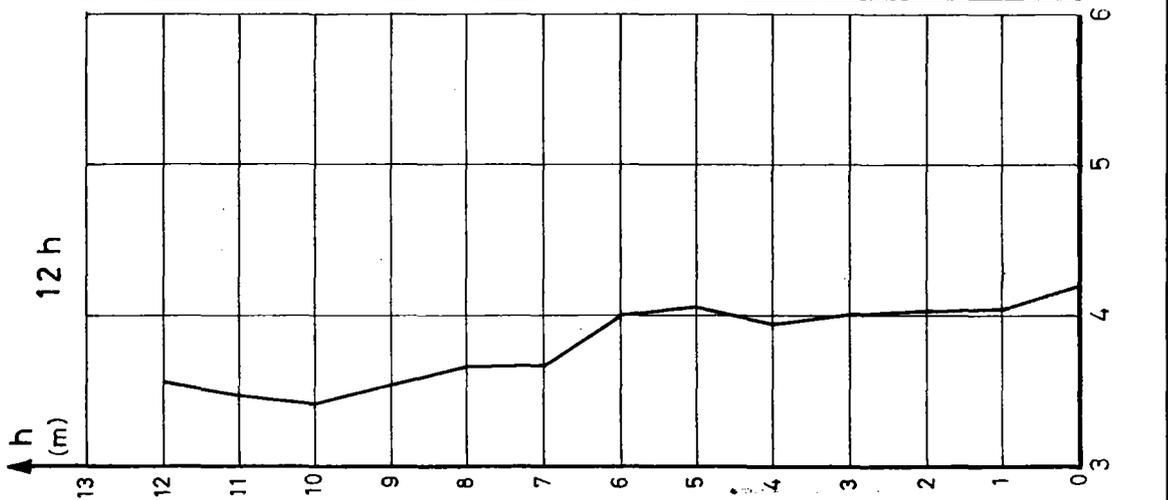
13h05

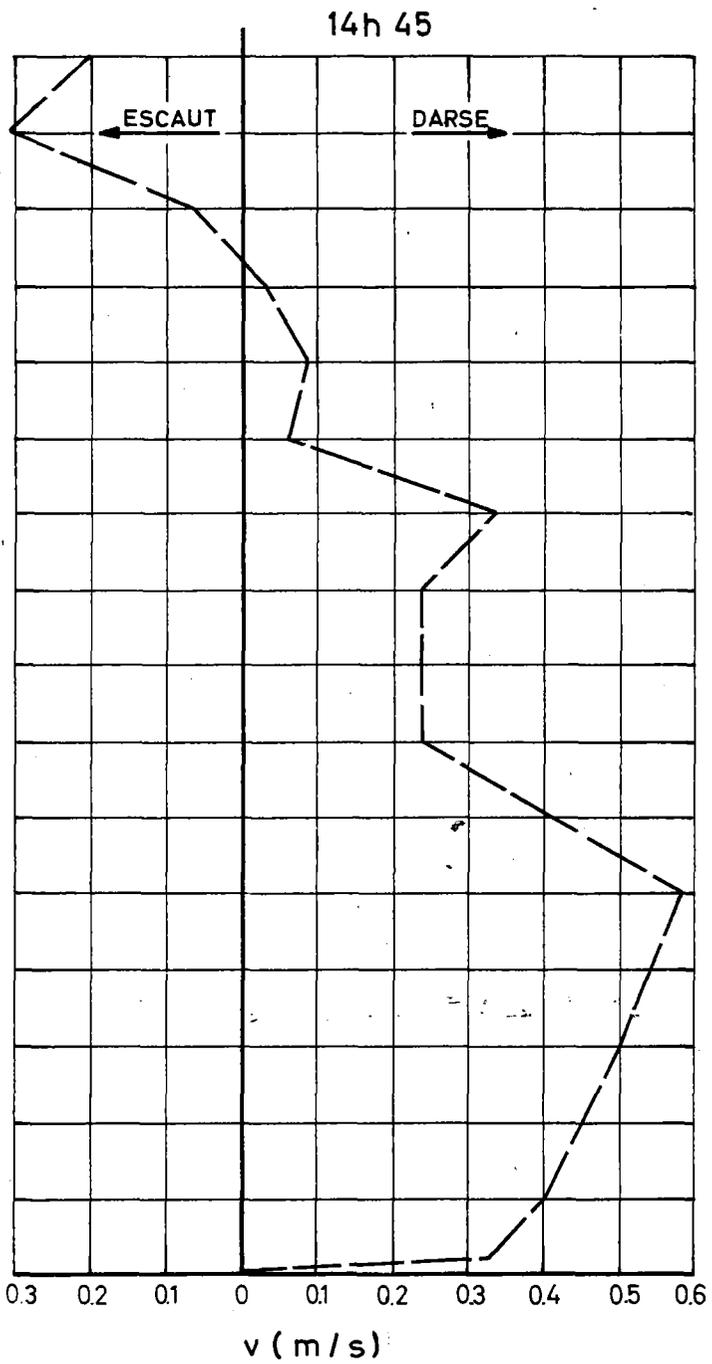
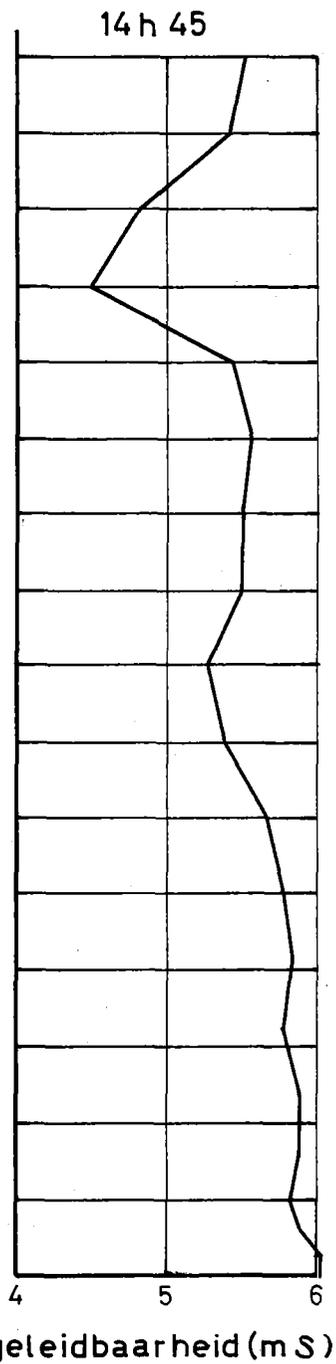
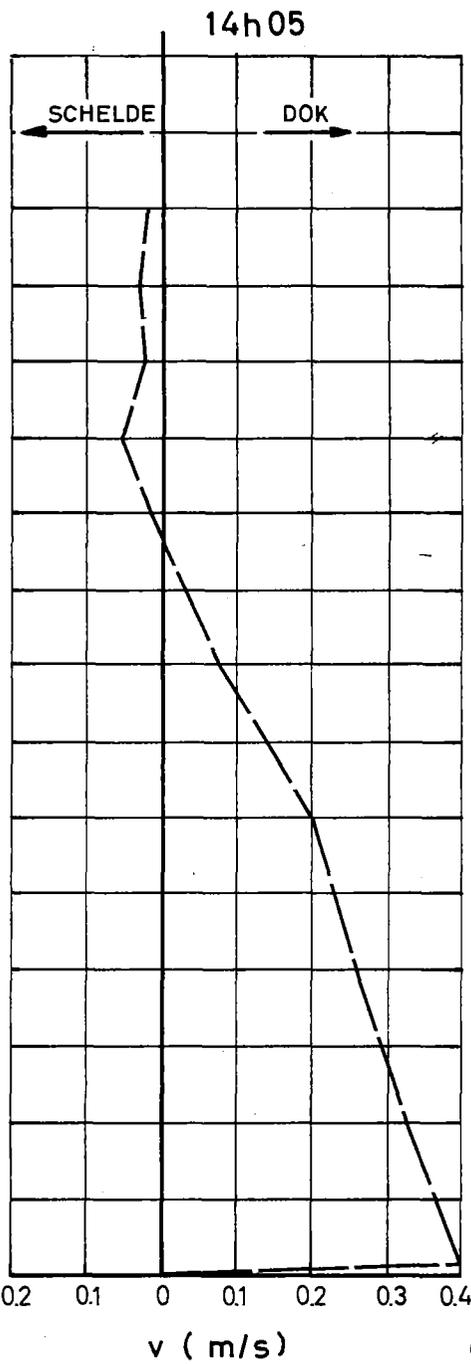
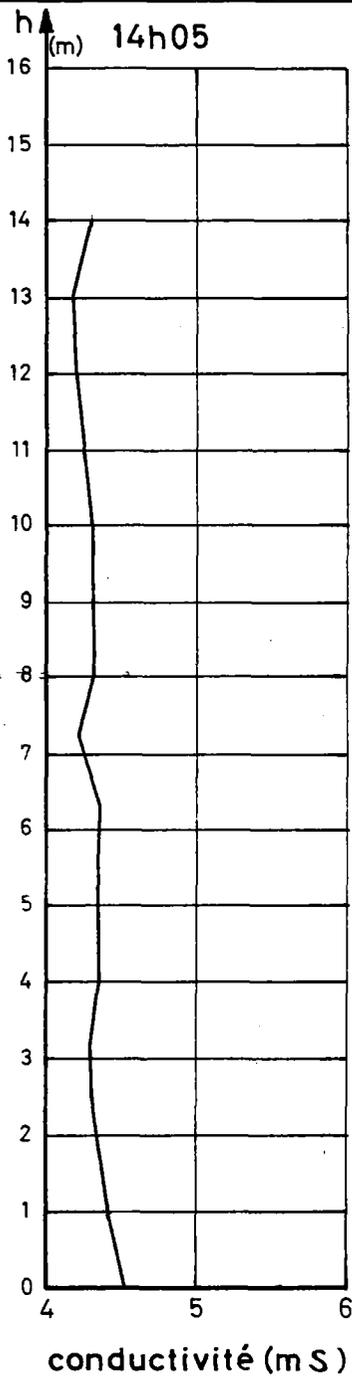


12h30



12 h





DARSE
DOK
E3

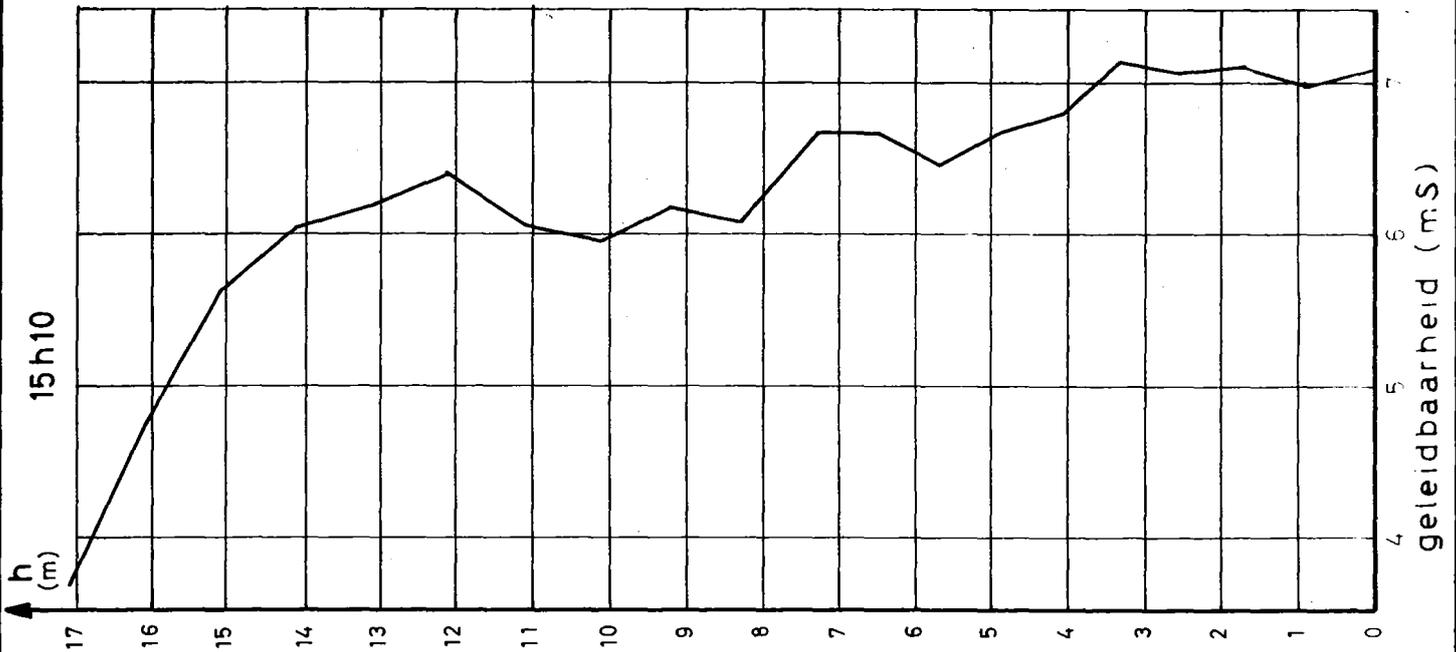
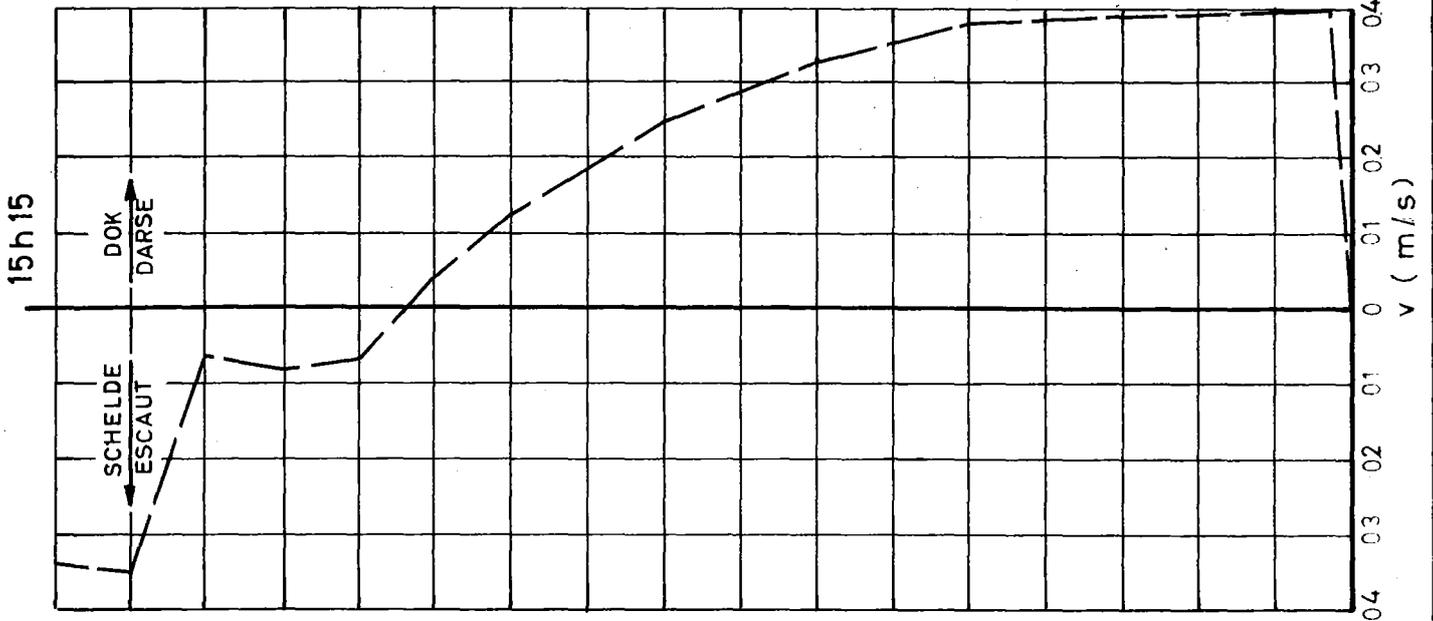
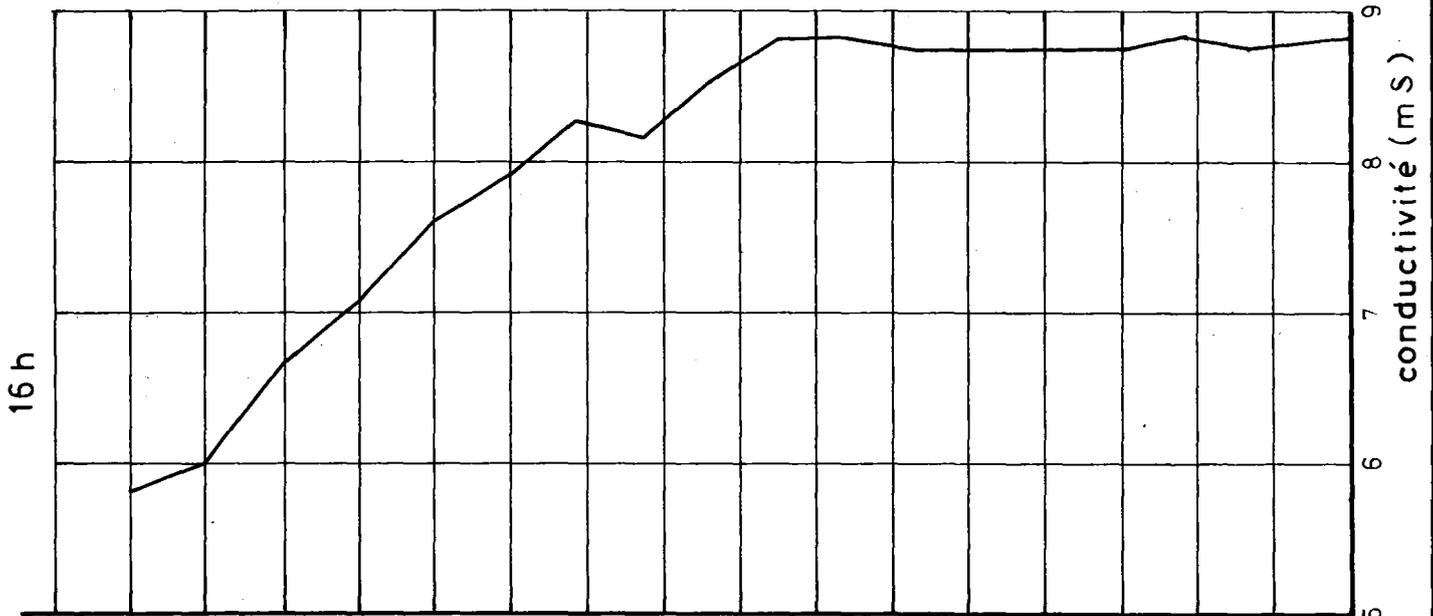
Mesures vitesses et salinité
Metingen snelheid en zoutgehalte
2 / 11 / 67

Bilage II
Annexe II
Fig. 47

DARSE
DOK E3

Mesures vitesses et salinité
Metingen snelheid en zoutgehalte
2 / 11 / 67

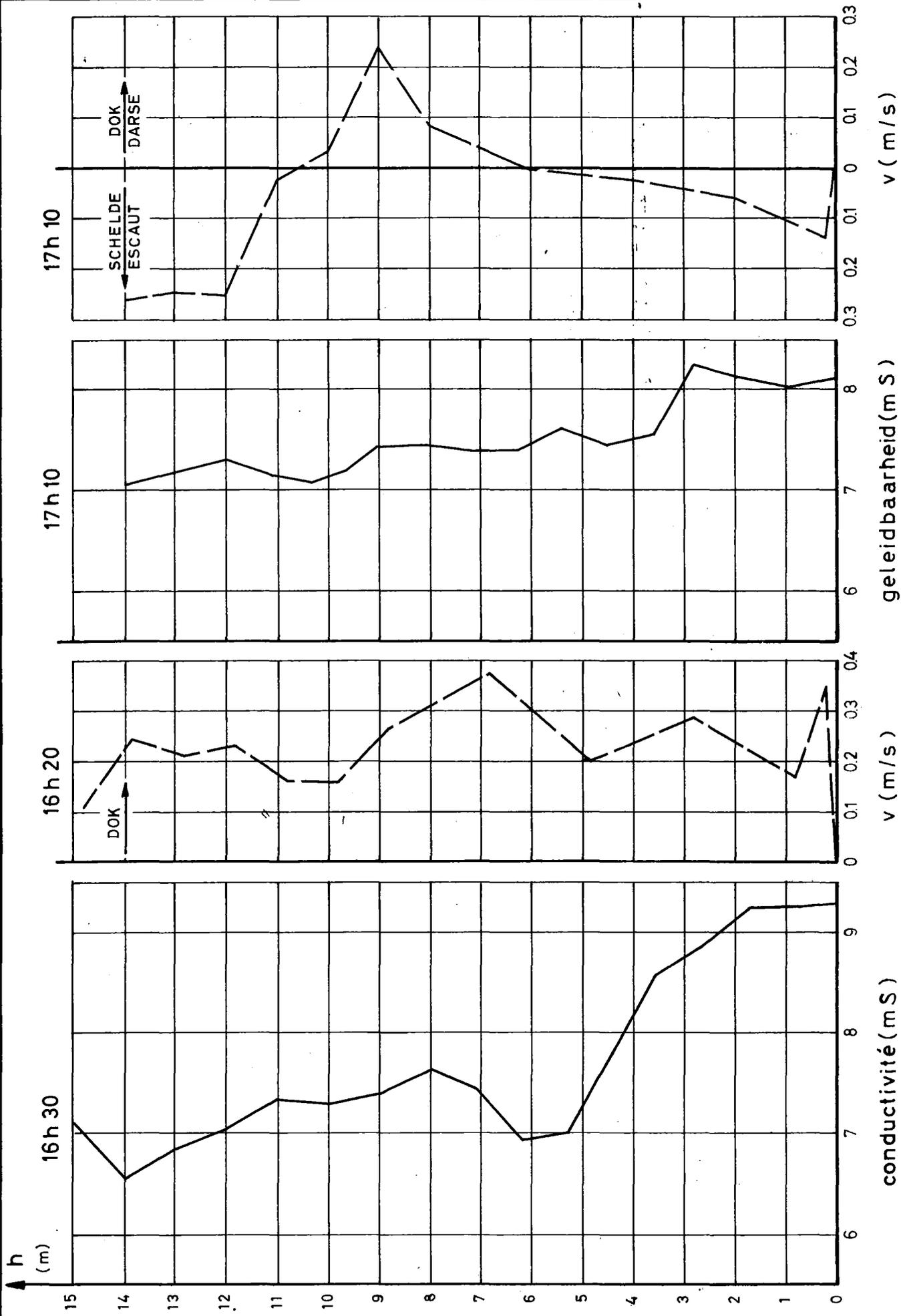
Bijlage II
Annexe II
Fig. 48



DARSE
DOK E3

Mesures vitesses et salinité
Metingen snelheid en zoutgehalte
2/11/67

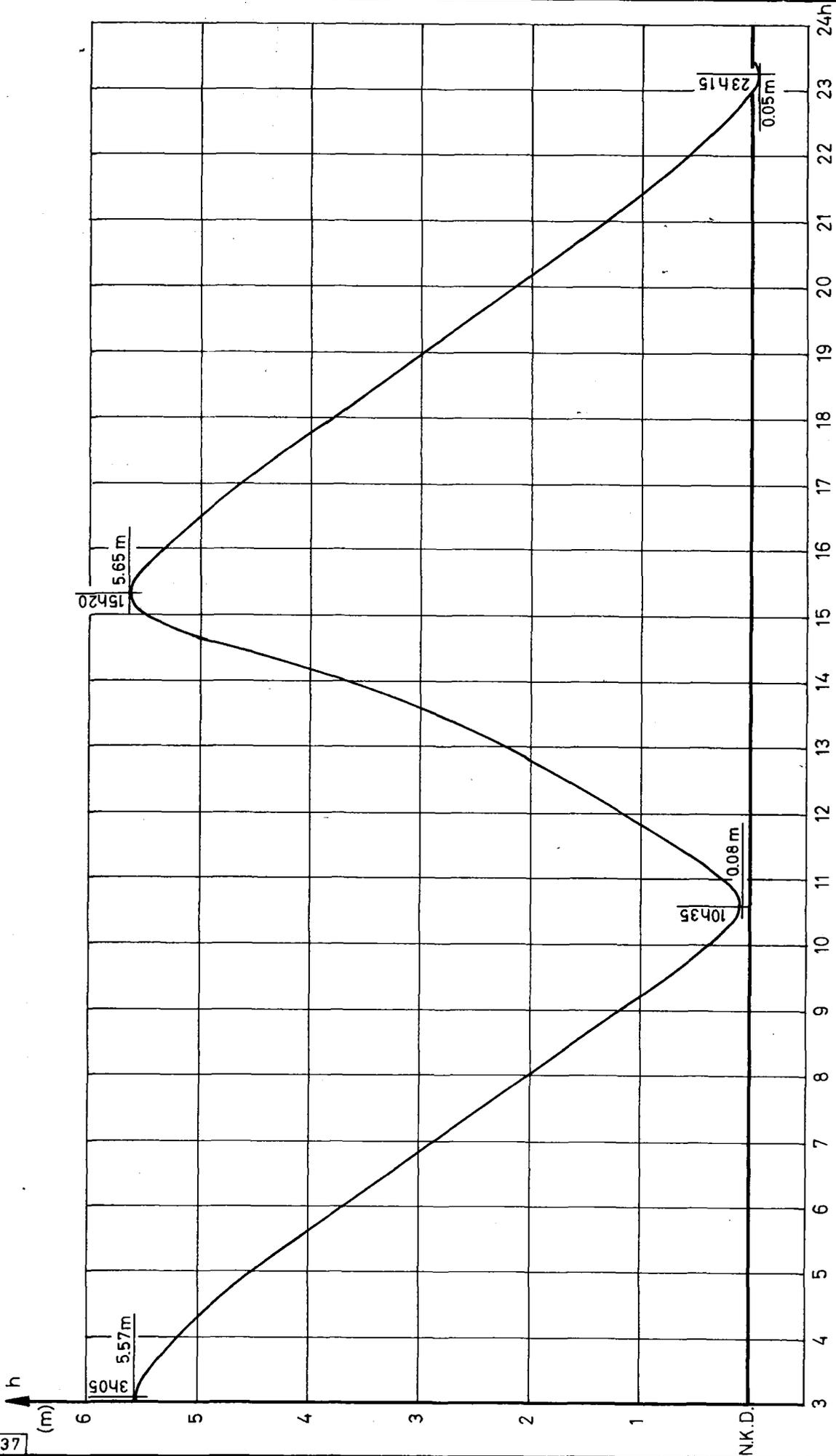
Bijlage II
Annexe II
Fig. 49

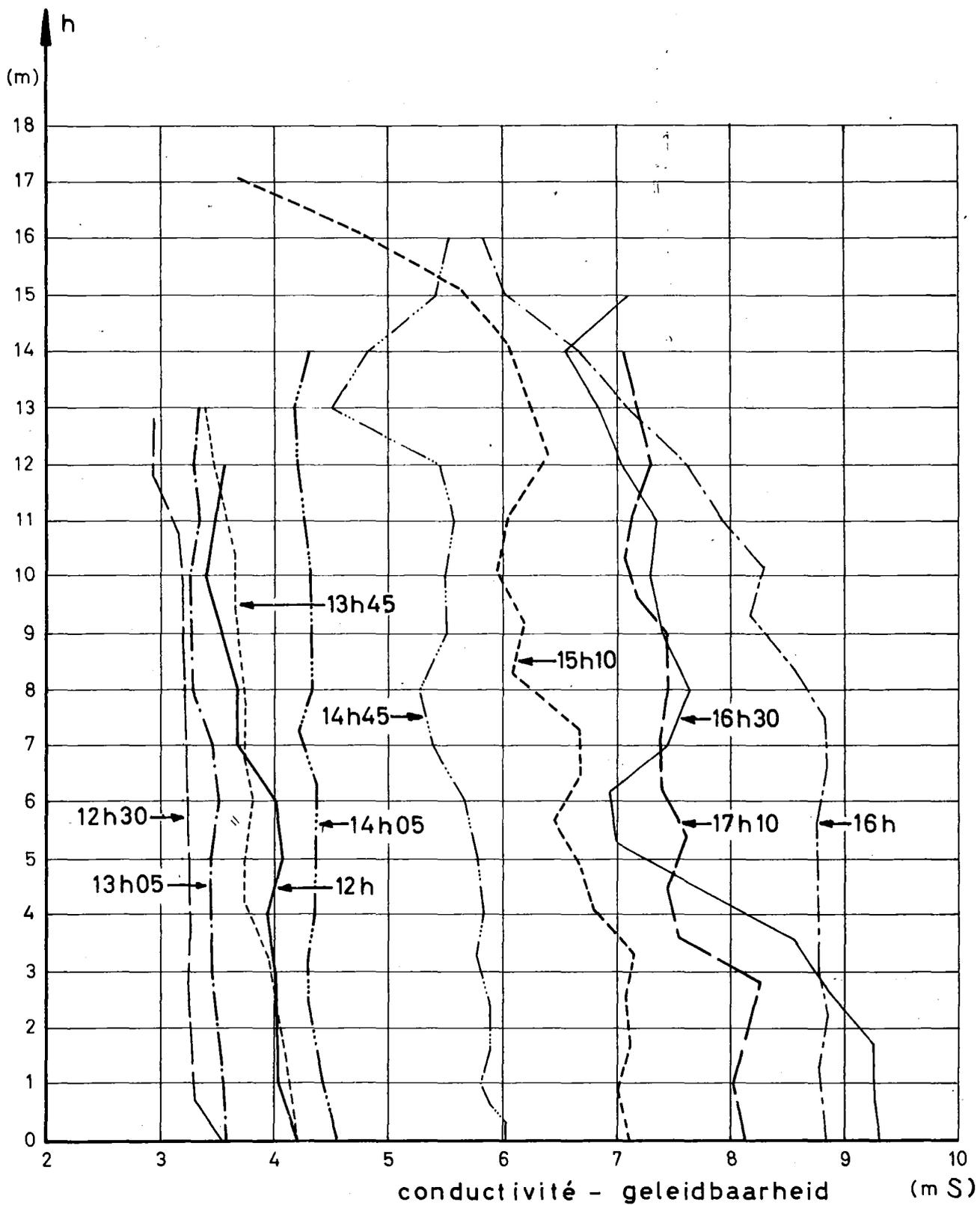


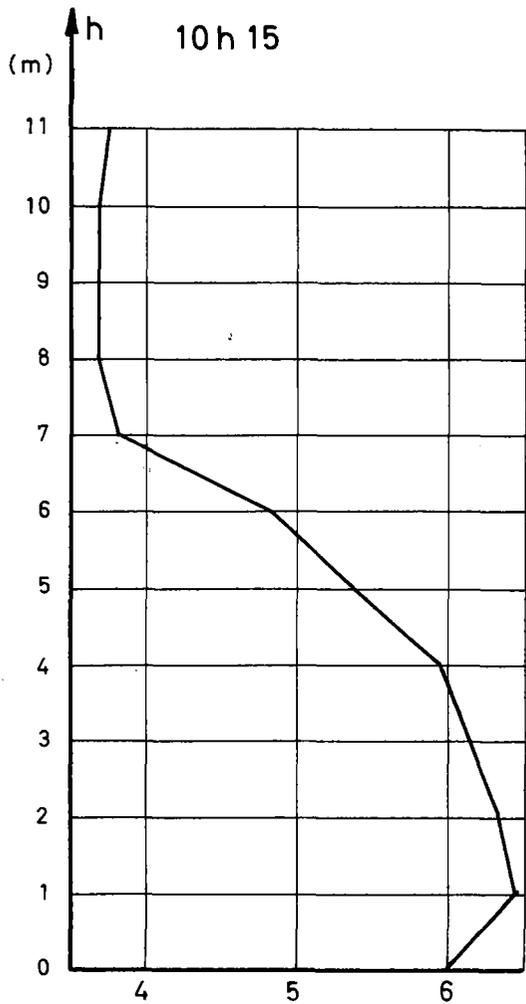
DARSE
DOK E3

COURBE DE MAREE
GETIJKROMME
2 / 11 / 67

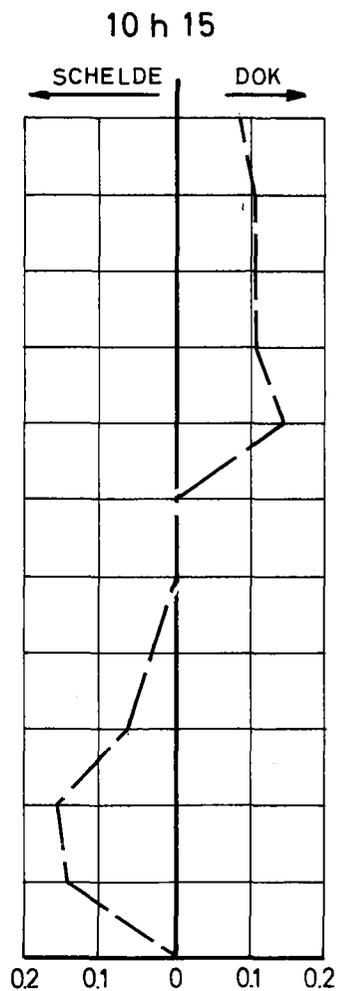
Bijlage II
Annexe II
Fig. 50



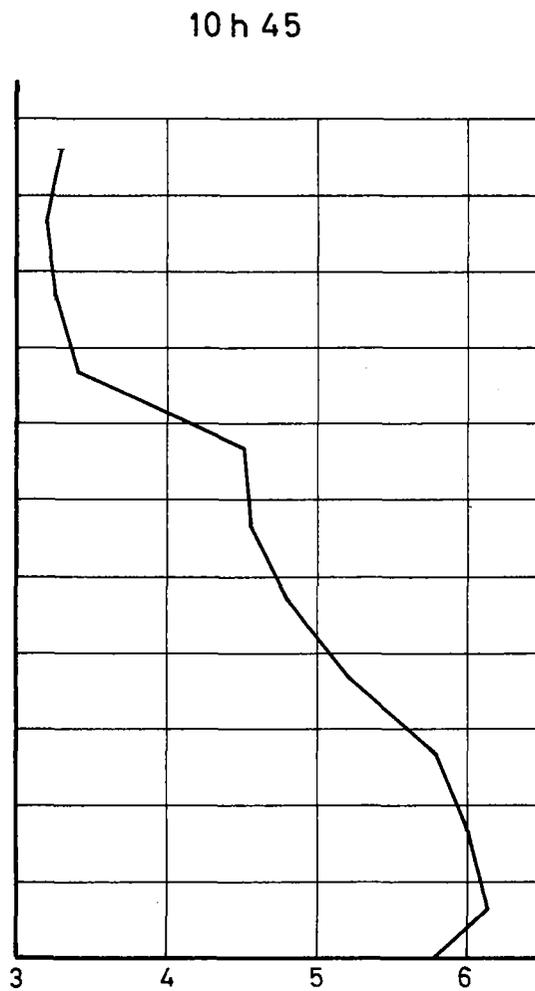




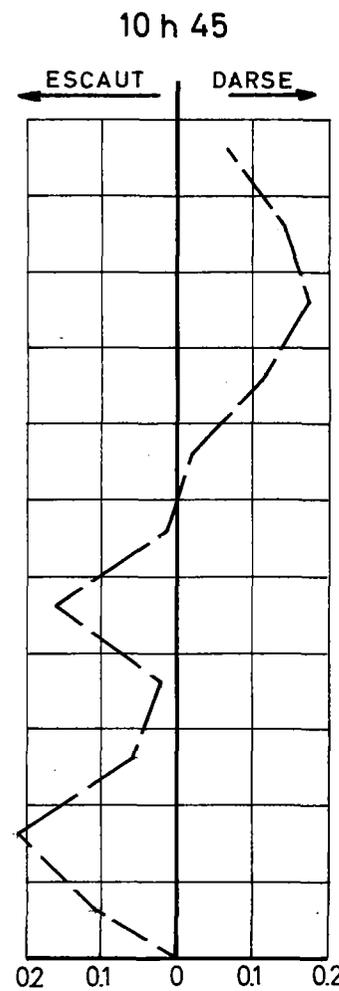
conductivité (mS)



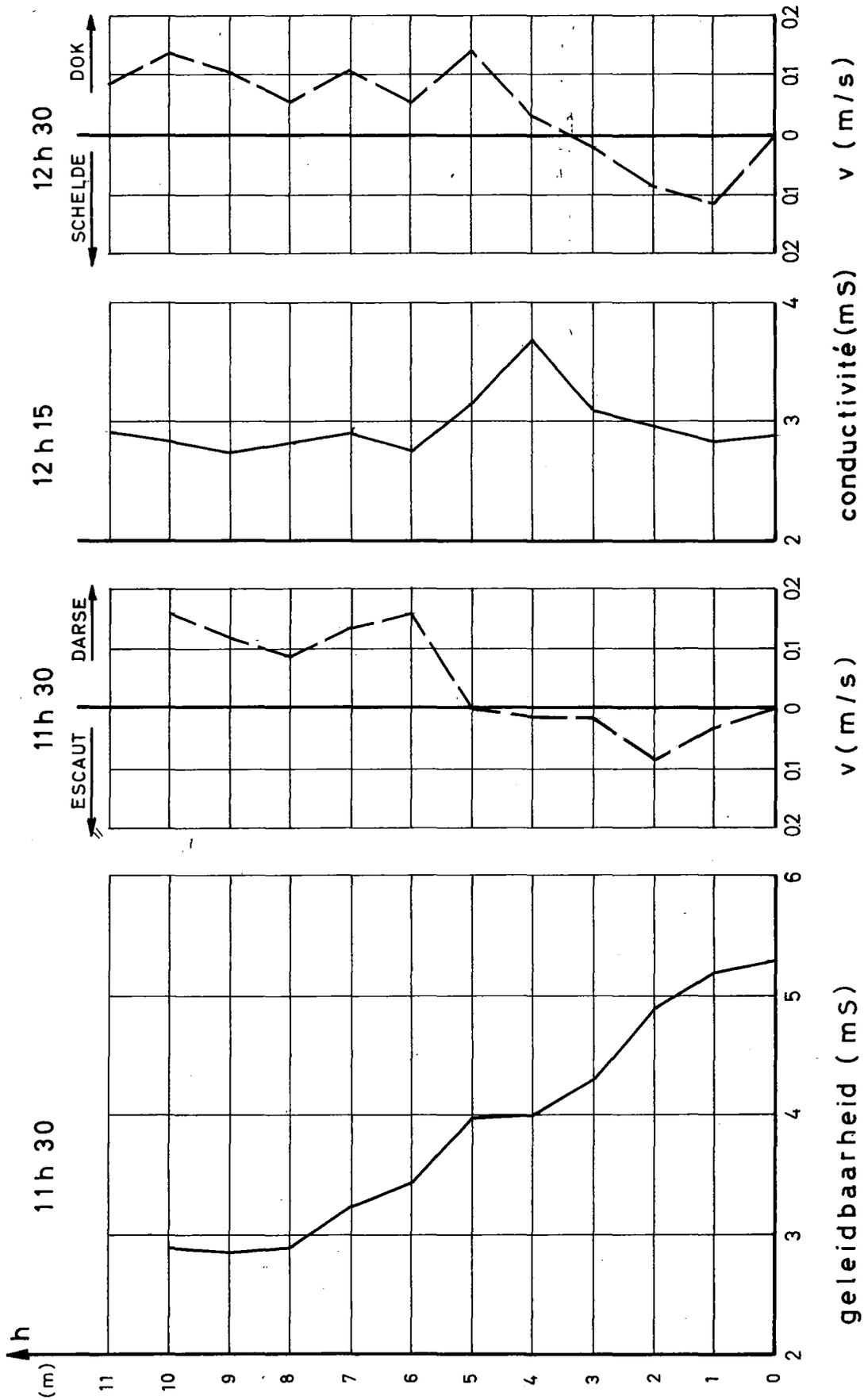
v (m/s)

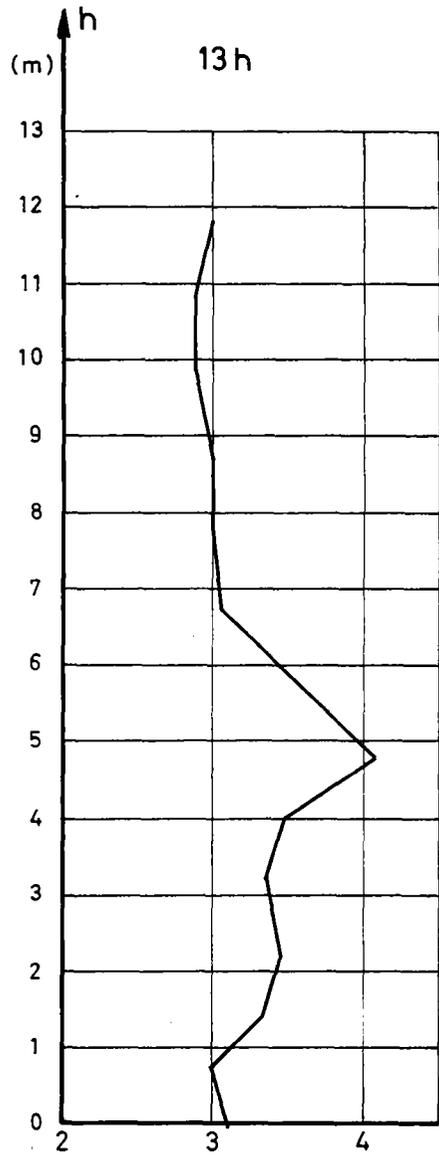


geleidbaarheid (mS)

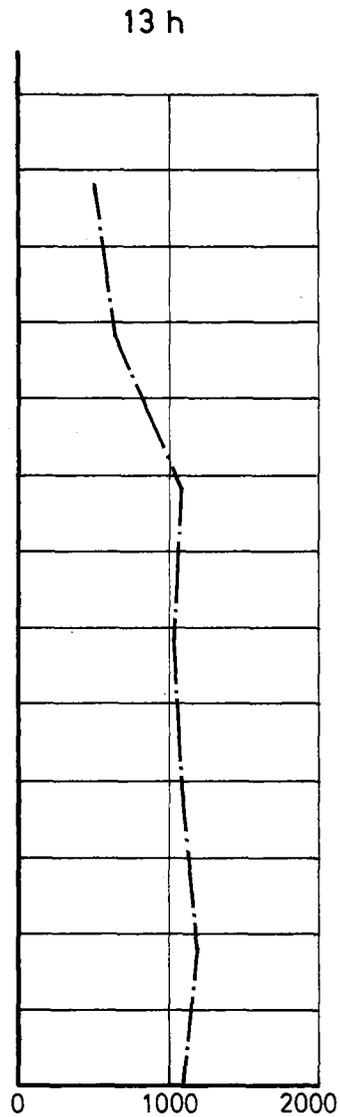


v (m/s)

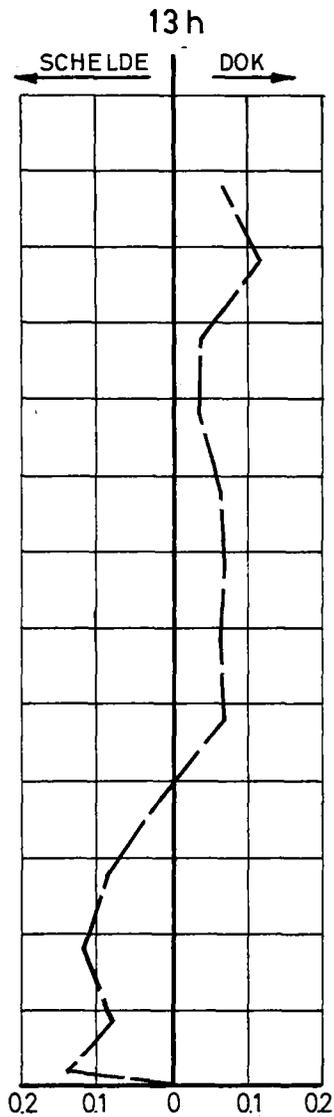




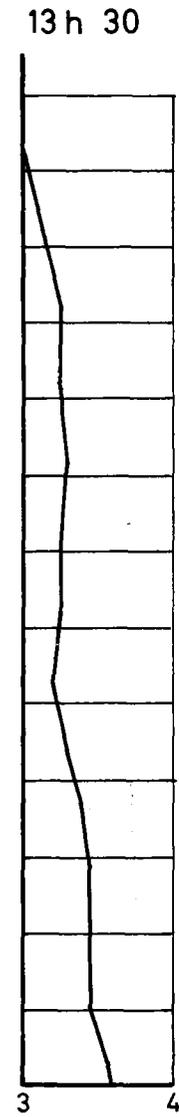
geleidbaarheid (m S)



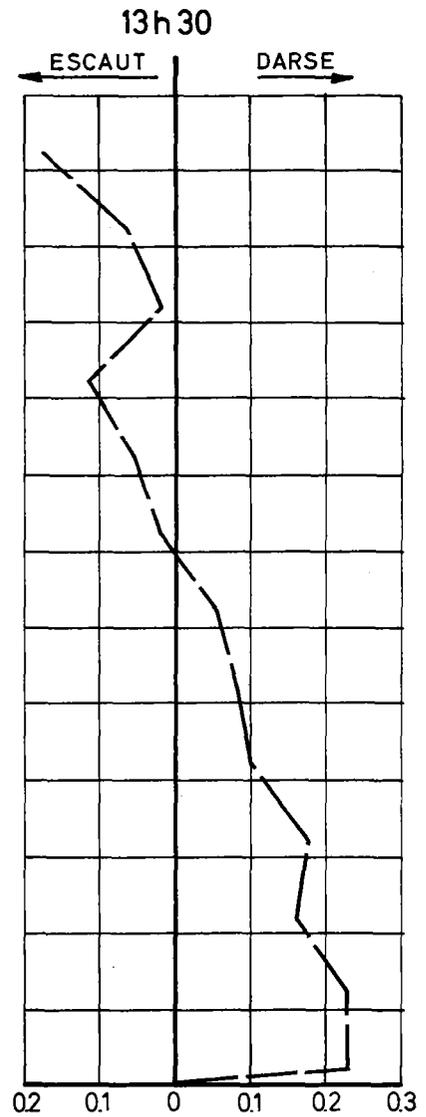
troebelheid (mgr/l)
turbidité



v (m/s)

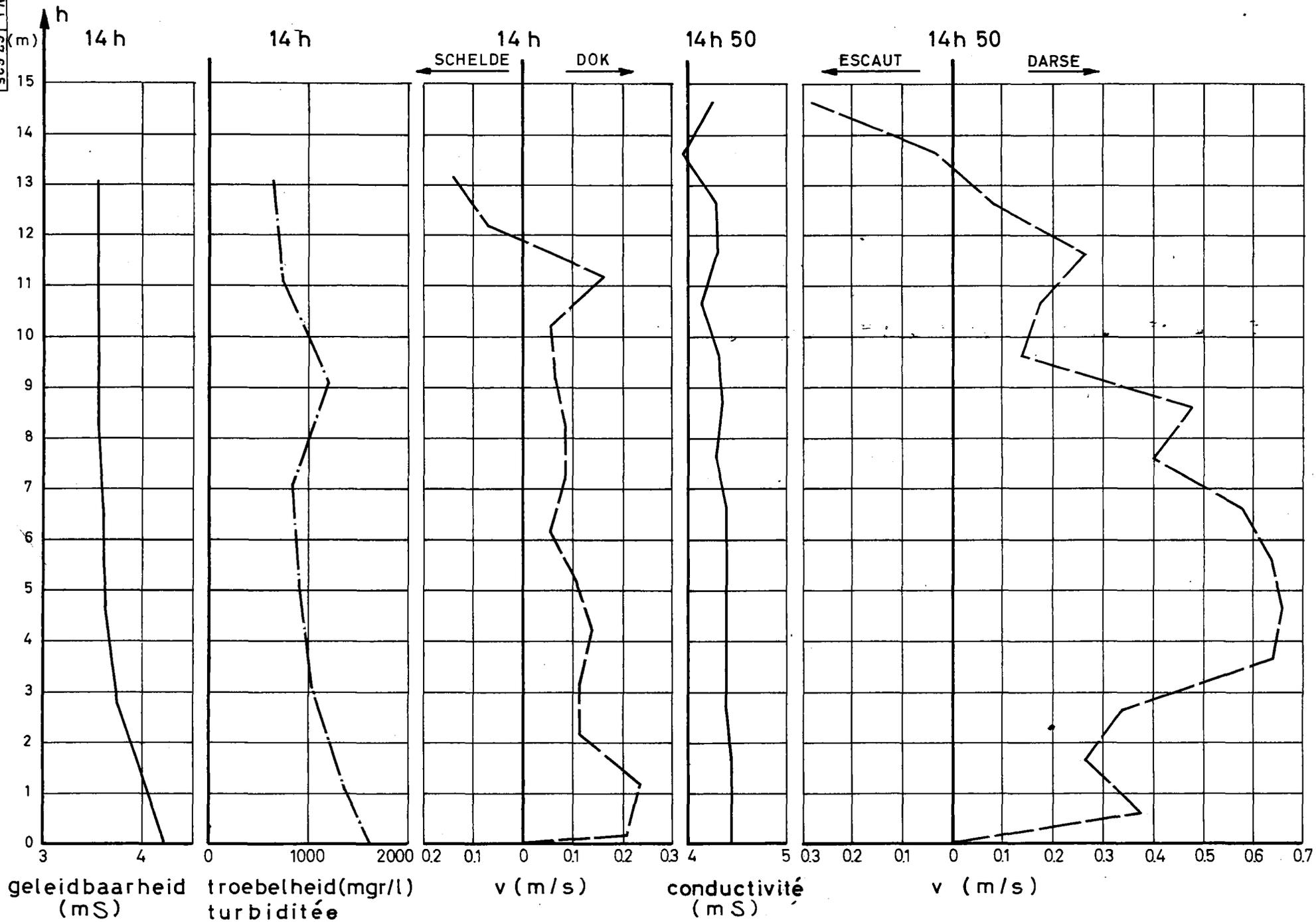


conductivité
(m S)



v (m/s)

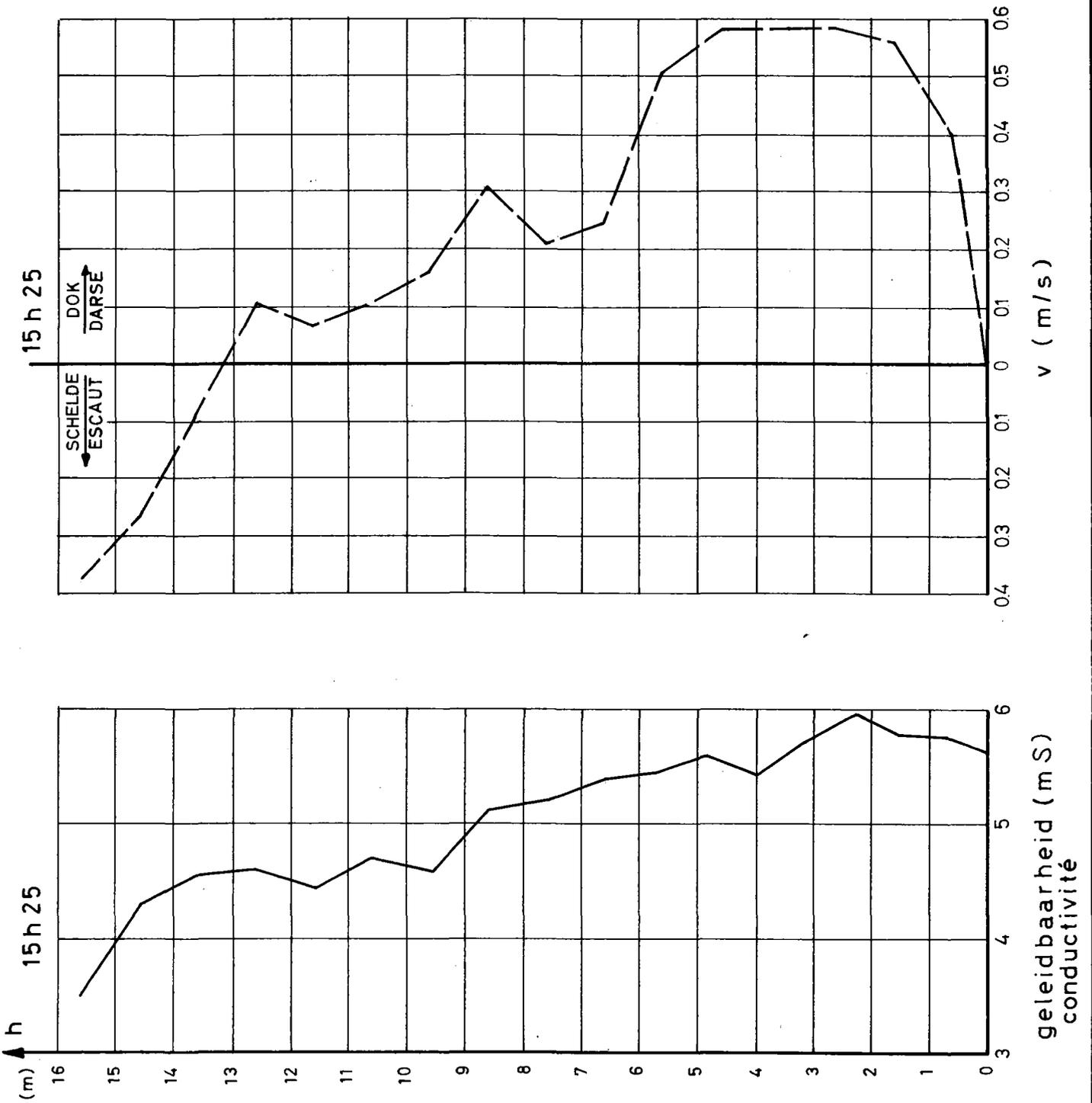
W.L. 67.635

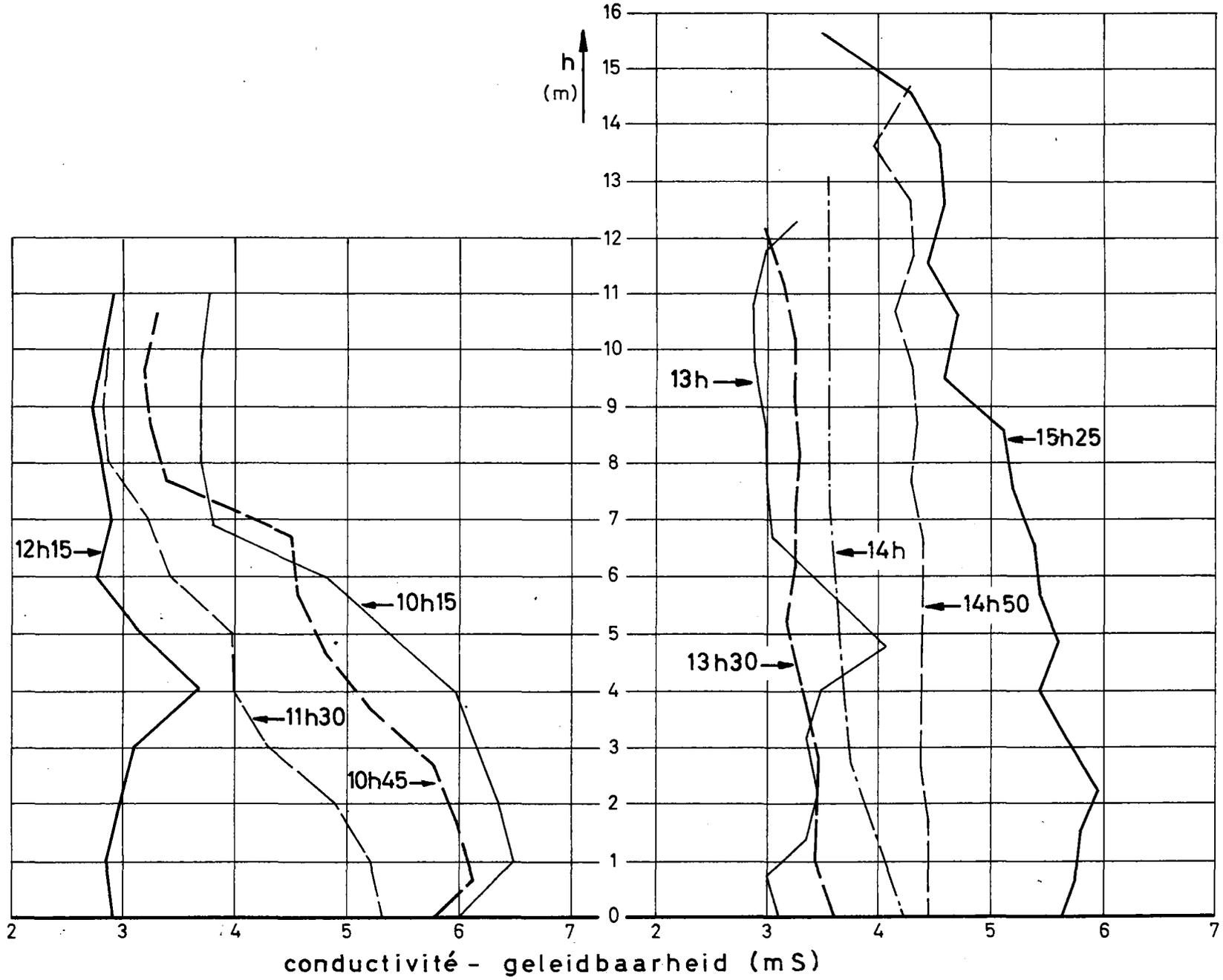


DARSE
DOK
E3

Mesures vitesses et salinité
Metingen snelheid en zoutgehalte
3/11/67

Bilage II
Annexe II
Fig. 55

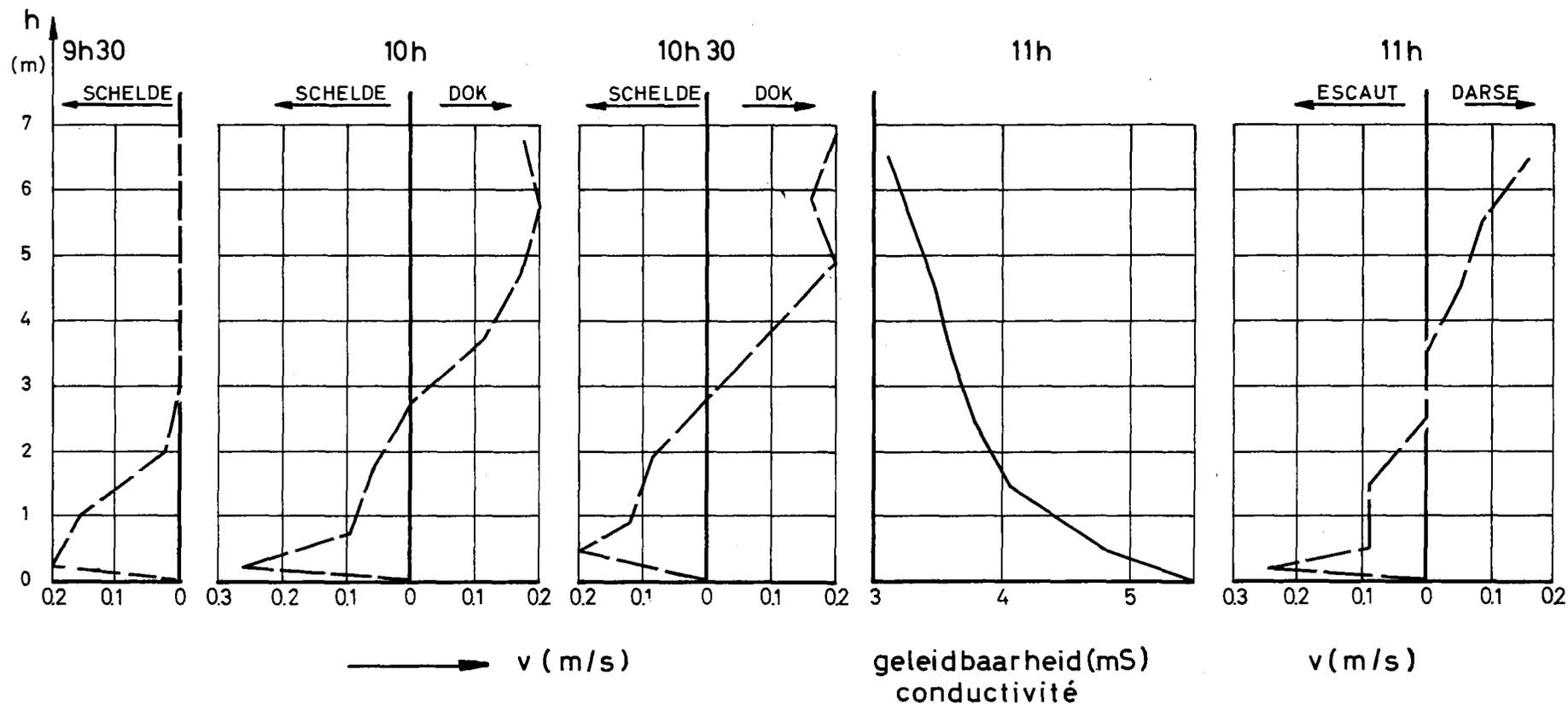


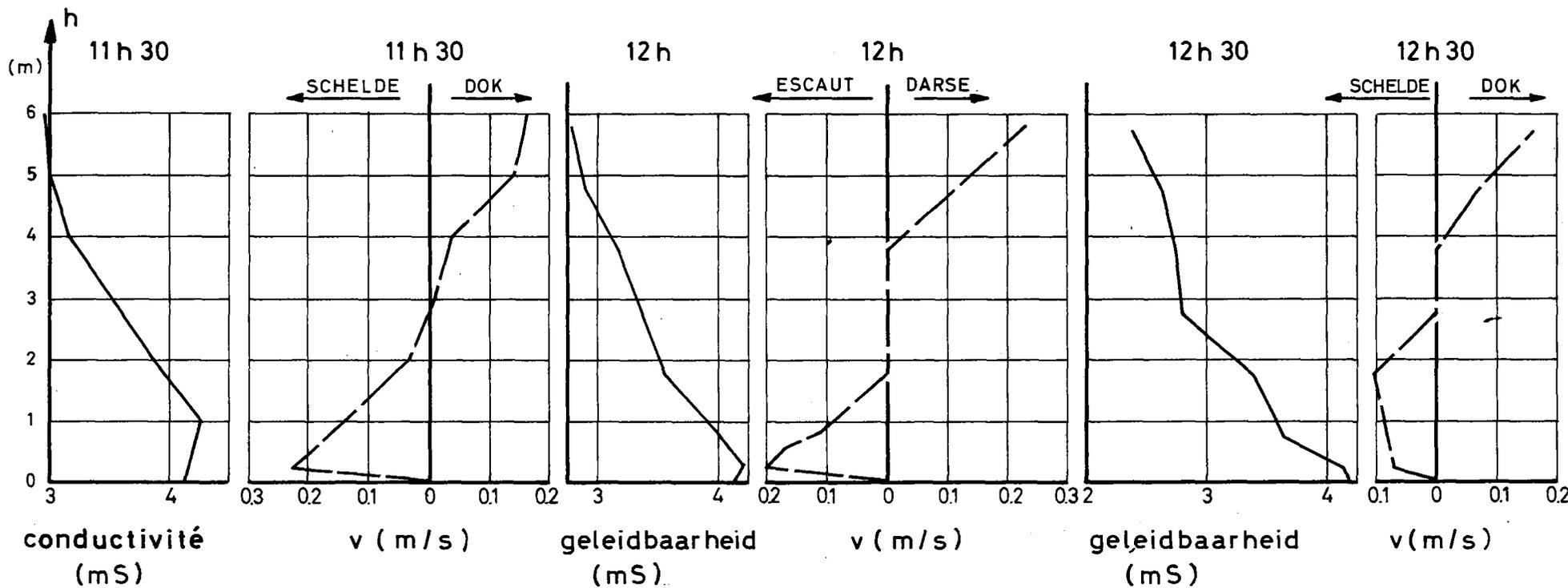


DARSE E3
DOK

Mesures de salinité
Zoutgehaltemetingen
3 / 11 / 67

Bijlage II
Annexe II
Fig. 57

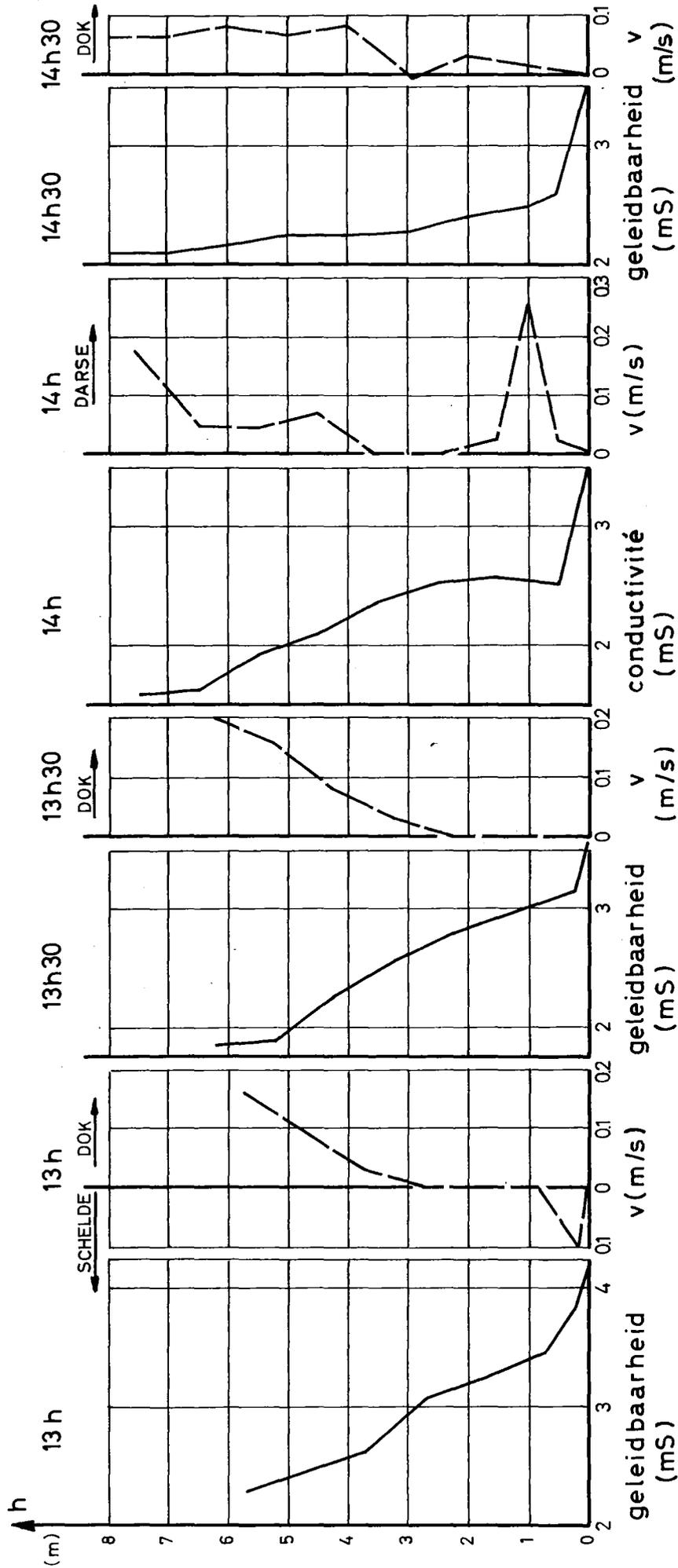


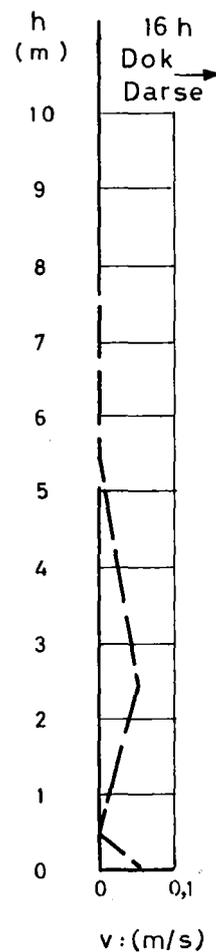
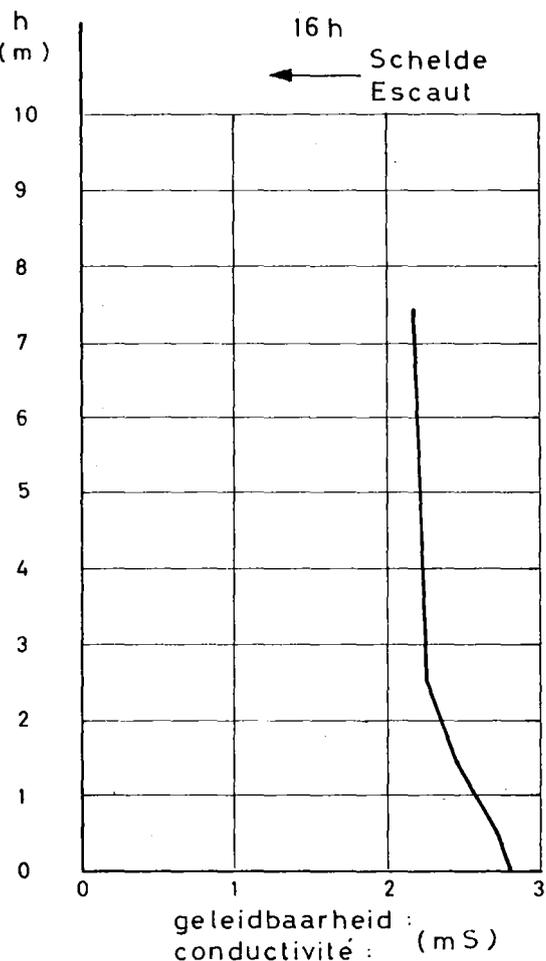
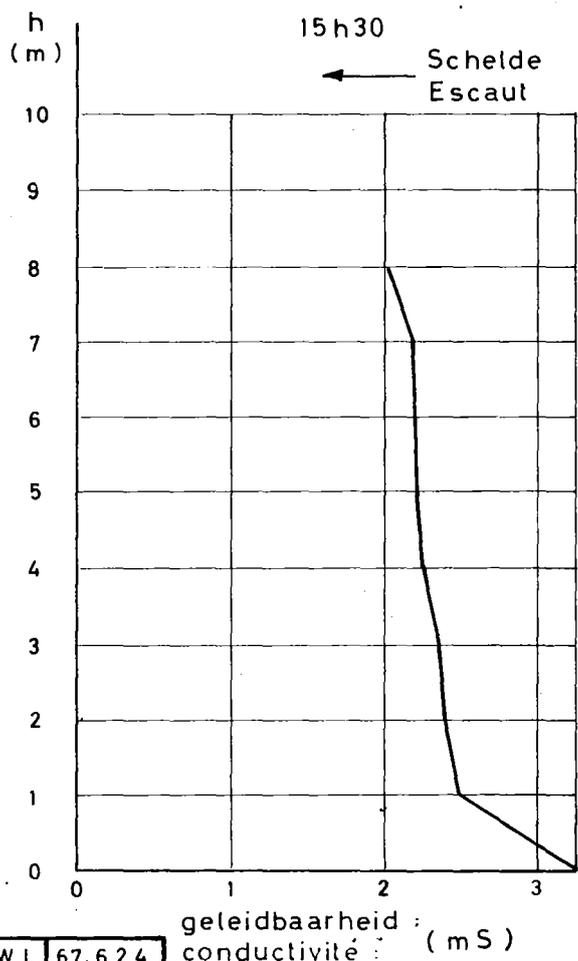
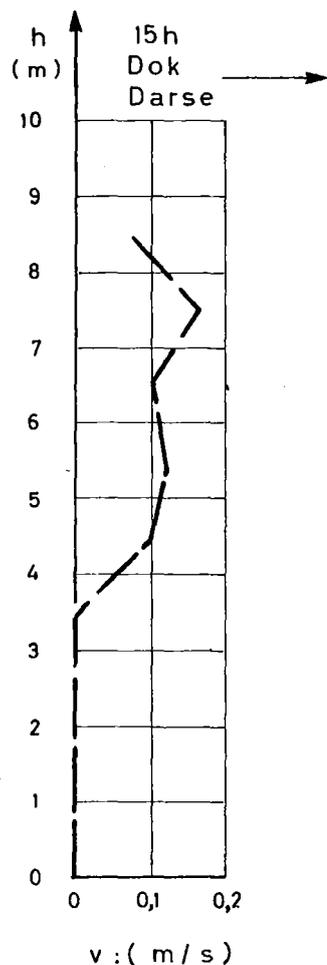
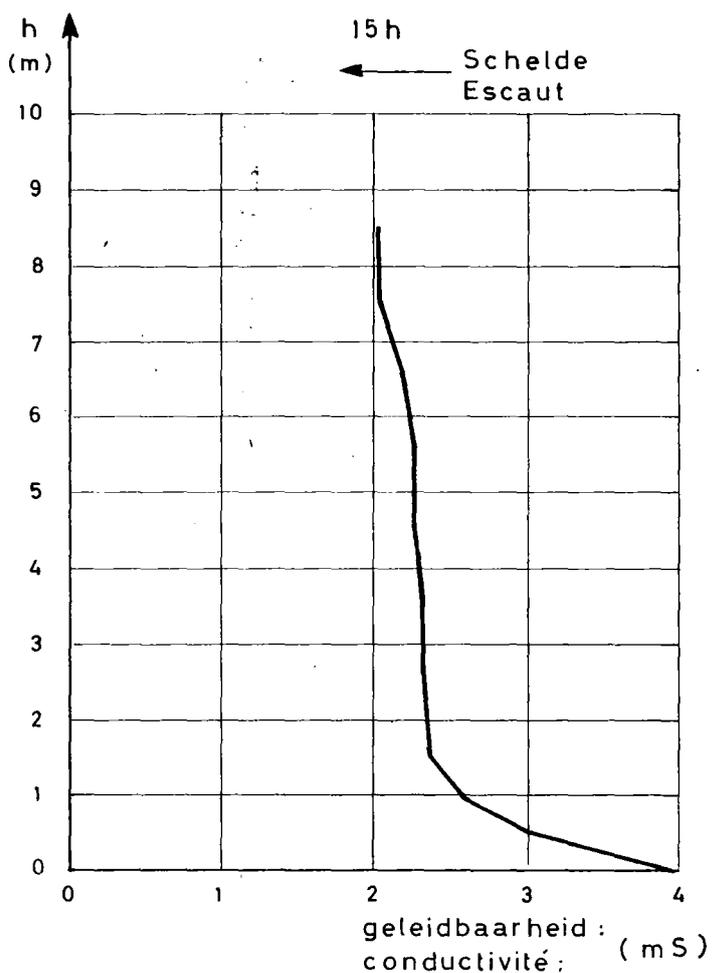


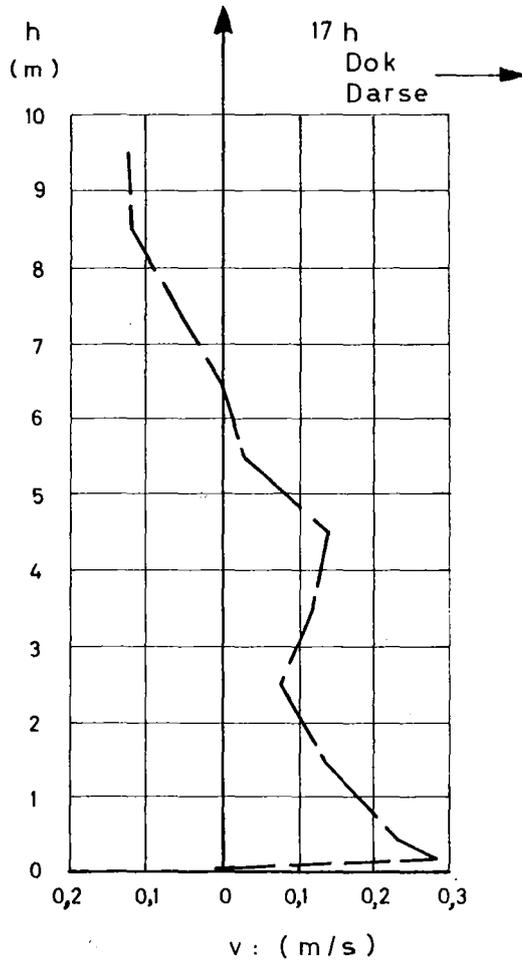
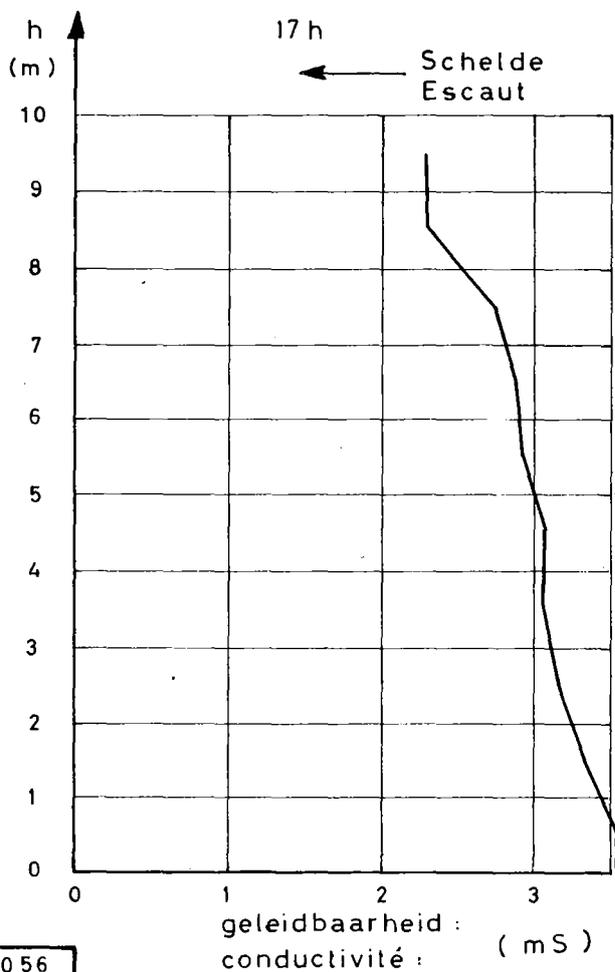
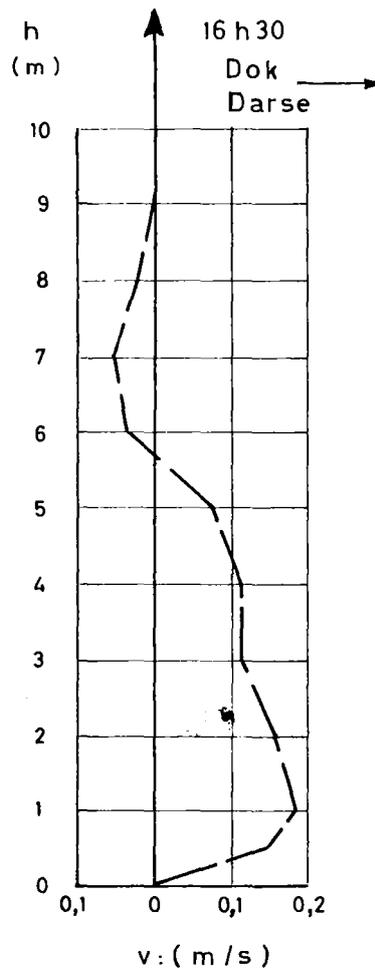
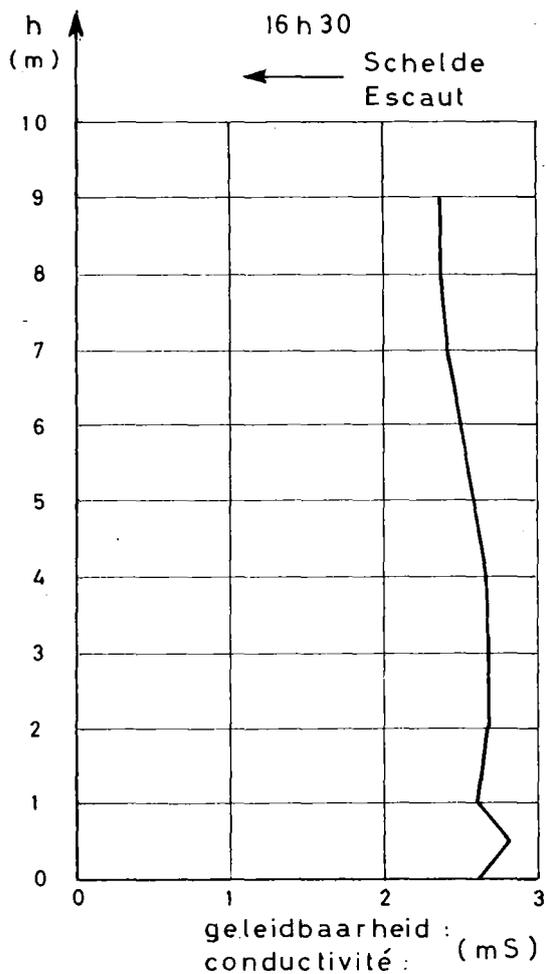
DARSE
DOK E3

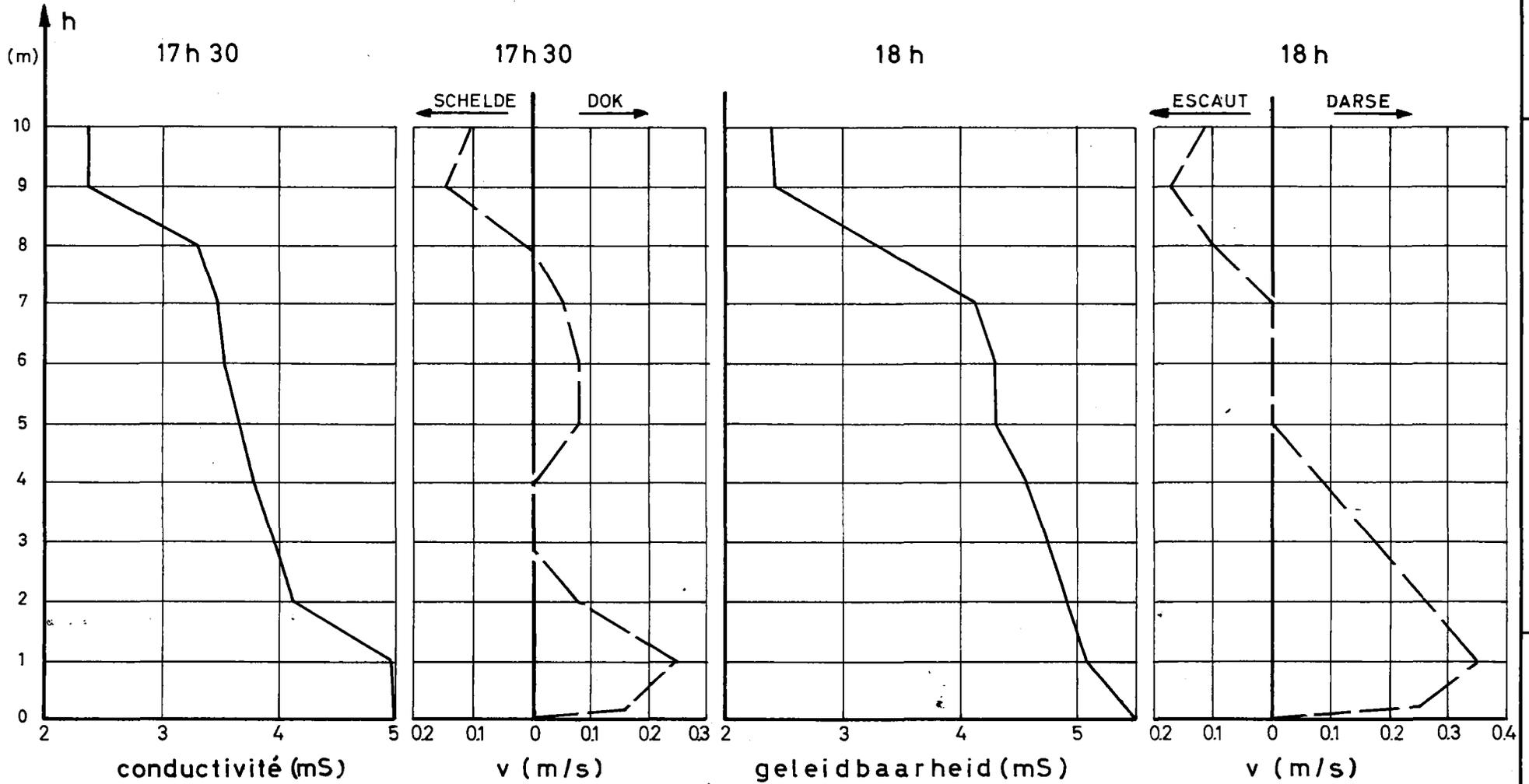
Mesures vitesses et salinité
Metingen snelheid en zoutgehalte
20/11/67

Bijlage II
Annexe II
Fig.60









DARSE
DOK
E3

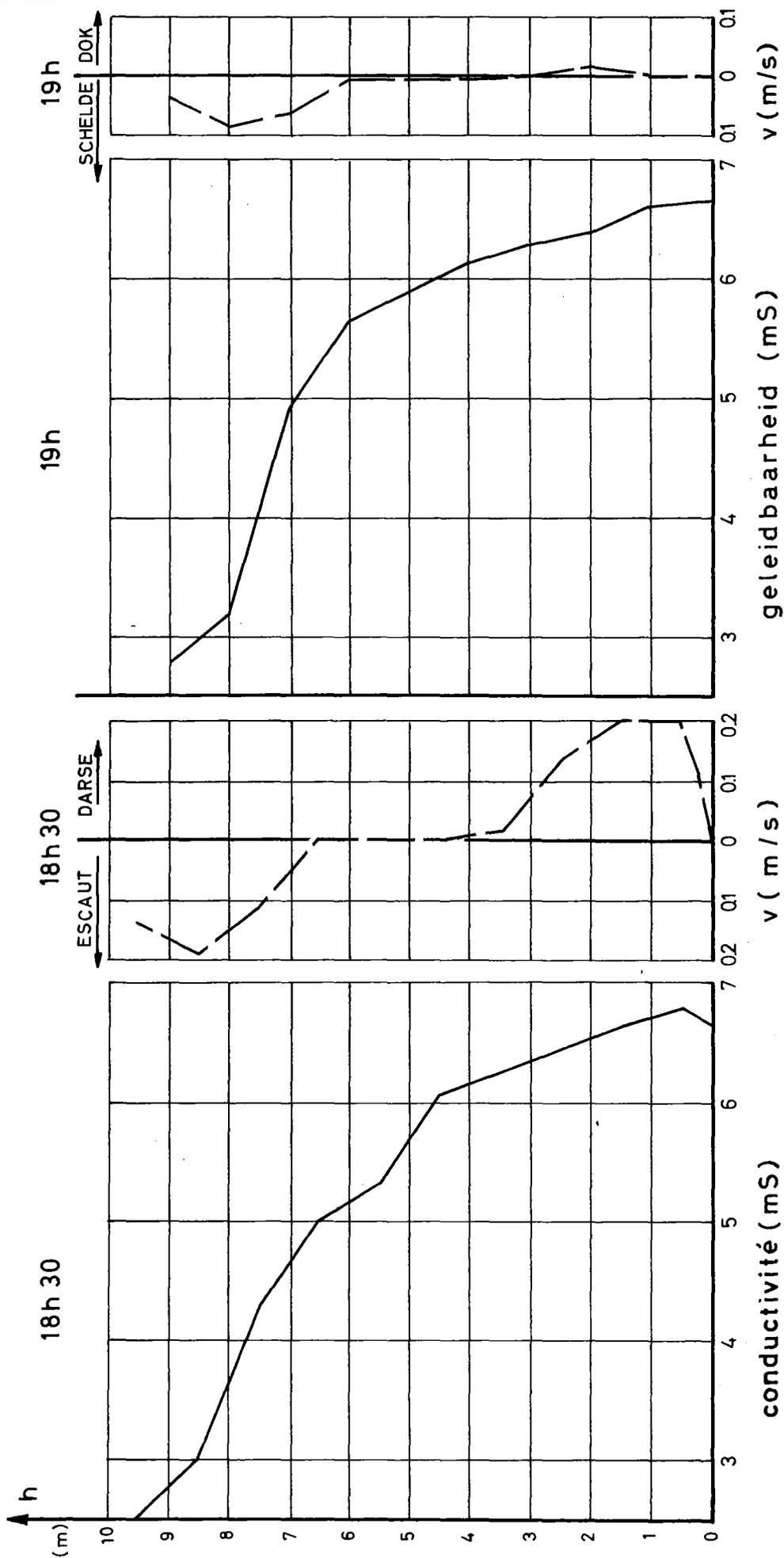
Mesures vitesses et salinité
Metingen snelheid en zoutgehalte
20/11/67

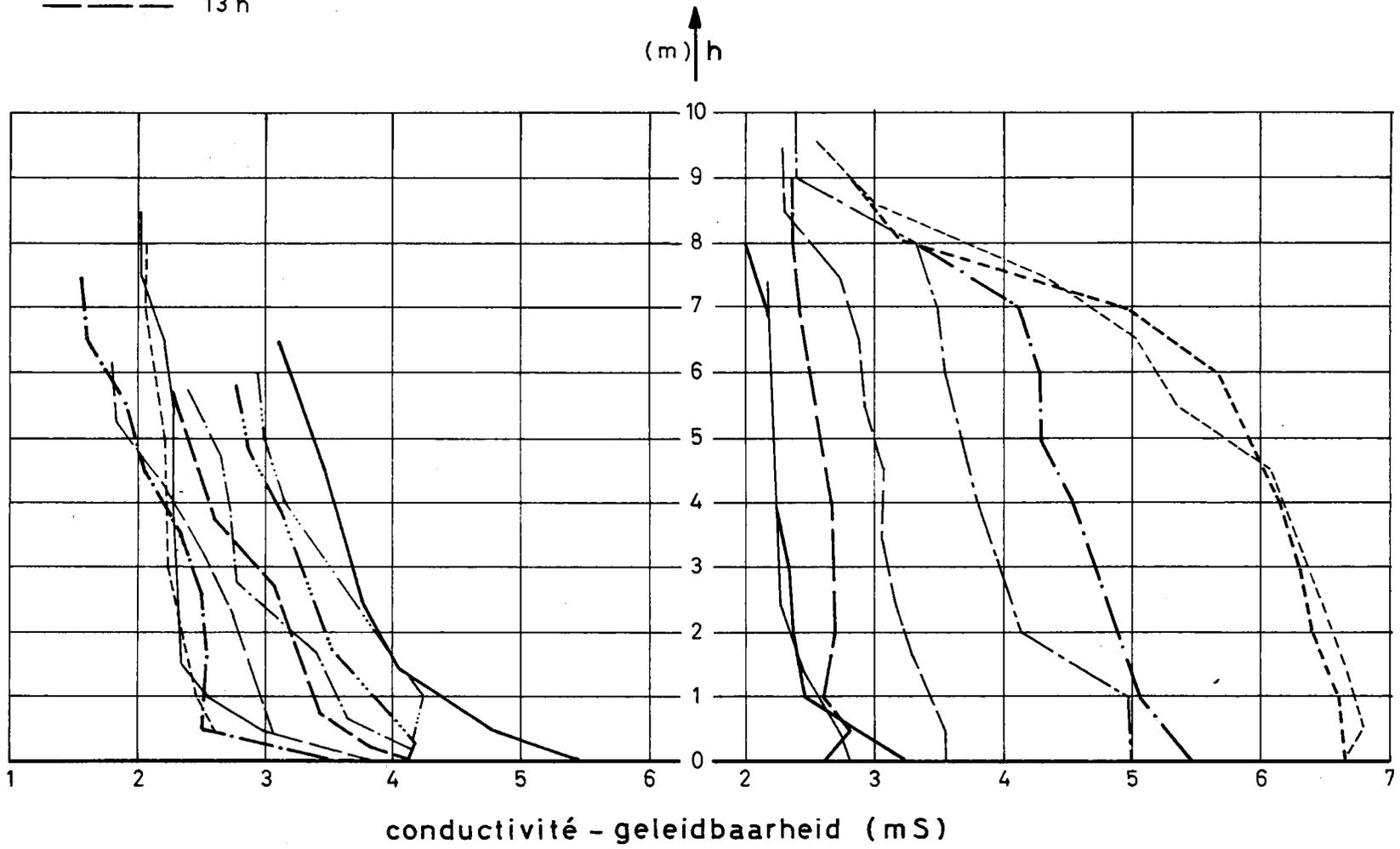
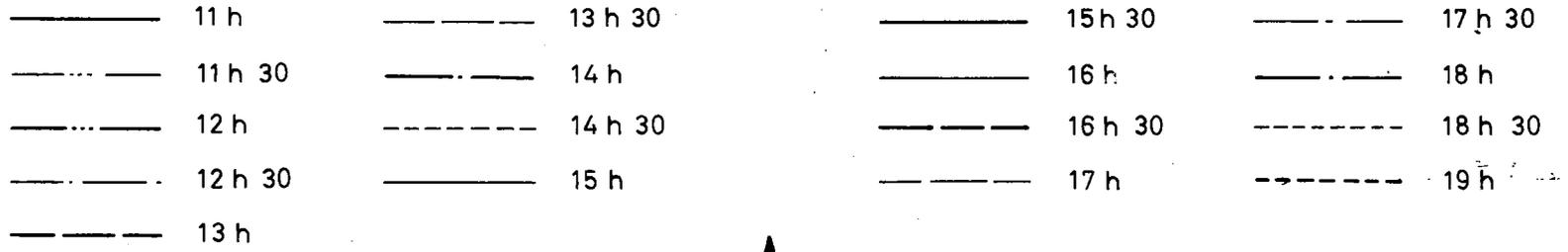
Bilage II
Annexe II
Fig. 63

DARSE
DOK E3

Mesures vitesses et salinité
Metingen snelheid en zoutgehalte
20/11/67

Bijlage II
Annexe II
Fig. 64

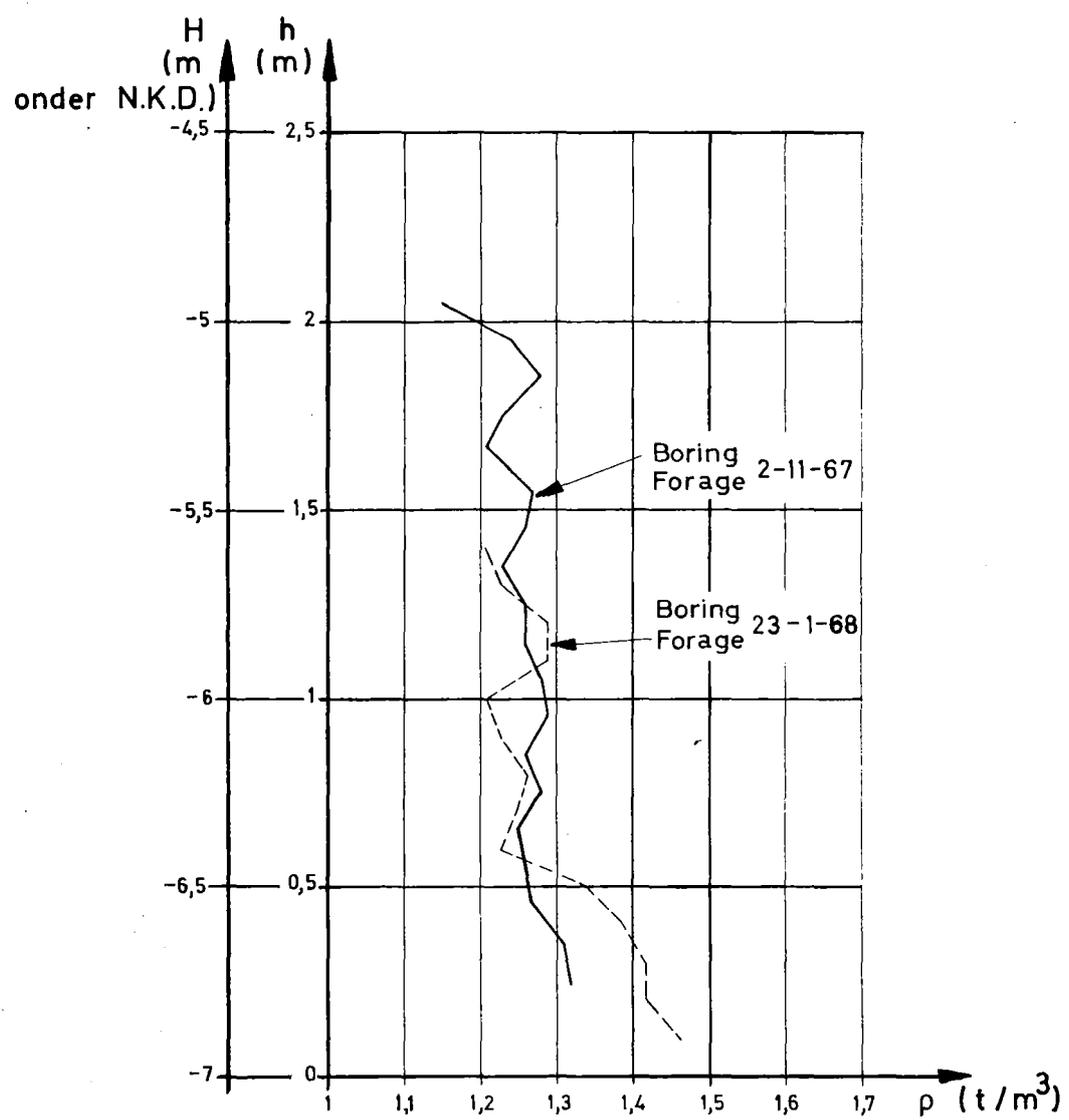




DARSE
DOK
E3

Mesures de salinité
Zoutgehaltemetingen
20 / 11 / 67

Bilage II
Annexe II
Fig. 65



LE PROBLEME DE LA MESURE DE LA GRANULOMETRIE DES
SEDIMENTS ET SUSPENSIONS.

L'Escaut transporte des sédiments dont la nature et les dimensions sont fort différentes. Les sables sont constitués principalement de grains de quartz et de calcite dont les diamètres atteignent quelques millimètres. Les vases par contre contiennent outre le quartz et la calcite, des argiles et des matières organiques. Le diamètre des particules les plus fines est inférieur au micron.

Les sédiments étant transportés dans l'eau, leur vitesse de chute dans l'eau est le facteur le plus important en sédimentologie.

On peut cependant définir la grandeur d'une particule par d'autres dimensions telles que :

- une longueur
- une surface
- un volume

La forme de la particule a également une grande importance .

Rappelons que la vitesse de chute d'une particule isolée dans un fluide est donnée par la loi de Stokes.

$$u = \frac{1}{18\eta} (\rho_s - \rho_l) g D^2$$

où u = vitesse de chute
 η = viscosité cinématique
 ρ_s = poids spécifique du solide
 ρ_l = poids spécifique du fluide
 D = diamètre fictif de la particule, appelé parfois
diamètre de Stokes.

Cette loi est valable si la concentration en solides est faible.
Si cette concentration devient importante, il faut la faire intervenir.
Cela se traduit par une réduction de vitesse de chute (J 1).

$$u_\epsilon = u \times \epsilon^\sigma$$

ou ϵ = porosité de la suspension

= 1 - concentration en volume du solide dans le
fluide.

 σ = coefficient fonction des caractéristiques des particules.
Doit être déterminé expérimentalement.

1. Méthodes de détermination de granulométries de sédiments.

Passons en revue les différentes méthodes utilisées pour
faire une analyse granulométrique.

a. Tamisage.

Les particules tombent aussi loin qu'elles le peuvent
au travers d'une série de tamis dont les ouvertures des mailles
diminuent de haut en bas.

Les résultats sont exprimés en pourcentage (en poids) de particules de dimension supérieure à l'ouverture de chaque tamis.

La méthode du tamis mesure des longueurs.

Le tamisage se fait à sec ou mouillé.

La durée du tamisage, les dimensions des fils du tamis, la qualité des tamis ont une influence sur l'exactitudes des résultats en particulier pour des particules de formes irrégulières.

b. Microscopie.

Les particules d'un sédiment, grossies par un microscope peuvent être mesurées et comptées. En général on mesure les longueurs suivant deux axes de la particule. La profondeur est estimée. Cette estimation est plus facile avec un microscope stéréoscopique. Pour des particules sphériques la mesure est précise.

Une analyse nécessite le comptage d'au moins quelques centaines de grains. Si la granulométrie est fort étendue et les grains de formes différentes il faut compter des milliers de grains.

Le microscope est principalement utilisé pour contrôler d'autres méthodes.

c. Tube à accumulation visuelle.

Les particules tombent d'un même niveau dans un tube rempli d'eau. Sur le fond se formera un sédiment stratifié, les

particules les plus grosses étant au fond. L'accumulation est mesurée en fonction du temps.

La méthode est rapide, économique et donne des résultats précis pour la détermination d'une courbe granulométrique d'un sable, exprimée en vitesse de chute.

d. Tube à base à prélèvement.

Le tube est rempli d'une suspension homogène. Des échantillons du sédiment déposé et de l'eau sont prélevés à des intervalles réguliers. Le sédiment est séché et pesé.

La méthode est précise pour des échantillons de limons et d'argiles.

e. Pipette.

Un cylindre est rempli d'une suspension. A des intervalles de temps réguliers de petits échantillons de suspension sont prélevés à une distance fixe de la surface. La profondeur et le temps donnent la vitesse de chute, ce qui détermine la dimension maximum de particule au moment de prélèvement. A partir d'une série de prélèvements qui représentent tous une dimension de particule différente, on déduit la concentration en sédiment plus fin que celui des prélèvements.

f. Centrifugeuse.

La détermination de la granulométrie des silts ou des argiles à l'aide de méthodes de sédimentation peuvent être accélérées en centrifugeant la suspension.

g. Compteur électronique (Coulter Counter).

Cet appareil a été conçu initialement pour le comptage des globules de sang, mais il est actuellement utilisé dans un grand nombre d'industries

Les particules sont maintenues en suspension dans un électrolyte. Dans cette suspension plonge un tube en verre, également rempli d'électrolyte, percé d'un trou cylindrique calibré.

Deux électrodes de platine se trouvent de part et d'autre de cet orifice. Un courant électrique constant passe de l'une à l'autre.

La différence de potentiel qui s'établit entre les électrodes est fonction de la résistivité de l'électrolyte et de la géométrie de l'orifice.

Pour la mesure on fait passer un volume de suspension connu par l'orifice. Chaque fois que celui-ci est traversé par une particule, sa géométrie change. On obtient ainsi une variation de potentiel aux bornes des électrodes. On peut montrer que la variation de résistance provoquée par le passage d'une particule vaut.

$$\begin{aligned} \Delta R &= R - R_0 \\ &= \frac{\rho_0 V}{A^2 \left(\frac{1}{1 - \rho_0/\rho} - \frac{1}{A} \right)} \end{aligned}$$

./..

où R = résistance de l'électrolyte avec une particule dans l'orifice.

R_0 = résistance de l'électrolyte sans particule.

ρ_0 = résistivité de l'électrolyte.

ρ = résistivité effective de la particule.

V = volume de la particule.

A = surface de l'orifice mesurée perpendiculairement à son axe.

a = surface perpendiculaire à l'axe de l'orifice d'un cylindre droit équivalent à la particule.

Des essais ont montré que les termes ρ_0/ρ et $\frac{a}{A}$ varient peu. Pour un électrolyte et un orifice donnés la variation de résistance est proportionnelle au volume de la particule.

L'appareil Coulter Counter compte les particules passant par l'orifice. Electroniquement on peut soustraire du signal provoqué par le passage d'une particule une différence de potentiel réglable, appelée seuil. Chaque seuil correspond à un volume de particule. L'appareil ne compte que les particules supérieures au seuil.

Pour passer à la courbe granulométrique il faut connaître la densité du solide.

Pour un orifice ne sont comptées que les particules ayant une dimension entre 2 et 40% du diamètre de l'orifice. Le Coulter Counter n'est utilisé que pour les silts et les argiles.

h. Sédimentographe.

Le sédimentographe mesure une variation d'absorption de rayons x par une suspension qui décante.

L'échantillon est contenu dans une éprouvette. Le rayonnement x qui le traverse est absorbé en fonction de la composition chimique et de la concentration en matière solide. Si la composition chimique est constante pour chaque fraction granulométrique, l'absorption est proportionnelle à la concentration.

L'appareil est conçu de telle manière que la courbe enregistrée soit la courbe granulométrique.

Le sédimentographe n'est utilisable que pour des silts et des argiles.

i. Balance de sédimentation.

La balance de sédimentation se compose d'une balance de précision au bras de laquelle est suspendu un vase cylindrique. Le cylindre plonge dans la suspension, dont la température est maintenue constante à l'aide d'un bain thermostatisé.

On mesure au cours du temps la variation de poids apparent du cylindre et du sédiment qui se dépose au fond du vase.

On peut montrer que le poids lu à la balance (p_a) est relié au poids réel de solide sédimenté (p_r) par la relation

./..

$$p_a = p_r \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} + \frac{V_o}{V_l} + P$$

où

ρ_s = poids spécifique du solide

ρ = poids spécifique de la suspension

V_o = volume du cylindre

V_l = volume interne du cylindre

P = poids apparent du cylindre à l'instant initial.

Connaissant la hauteur de chute, on en déduit la variation de poids en fonction des vitesses de chute, dont on déduit la courbe granulométrique. La balance de sédimentation n'est utilisable que pour les silts et les argiles.

k. Methode de sédimentation par absorption de lumière.

La lumière traversant une suspension est absorbée par les particules. On peut montrer que :

$$S_w = \left(\frac{4}{cl} \right) \log I_o/I_s$$

où S_w = surface spécifique par gramme de solide.

I_o = intensité de la lumière en l'absence de particules.

I_s = intensité de la lumière transmise au travers de la suspension.

c = concentration en particules (gr/cc).

l = longueur du milieu absorbant.

./..

La méthode par absorption de lumière donne la courbe granulométrique en surfaces de particules.

2. Comparaison des méthodes d'analyse granulométrique.

Le tableau ci-joint compare les durées d'analyse, les dimensions et concentrations que l'on peut étudier, la précision et le coût de la mesure.

Si on exclut d'office la microscopie comme trop chère et trop longue, on voit que pour l'étude des suspensions de l'Escaut on peut retenir le Coulter Counter, le sédimentographe, la balance de sédimentation, et la méthode par absorption de lumière, compte tenu des diamètres rencontrés.

La microscopie sera néanmoins utilisée comme méthode de contrôle pour les autres méthodes.

L'étude des sédiments sableux se fait facilement par tamisage et dans le tube à accumulation visuelle.

Les méthodes utilisées doivent être adaptées au but poursuivi. Si on désire connaître la granulométrie des suspensions, il est important de mesurer celles-ci dans leur état floclé. S'il s'agit de comparer un sédiment et la suspension qui sédimente au-dessus de lui il faut comparer les diamètres des particules et non plus les flocons.

COMPARAISON DES METHODES D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE.

Méthode	Temps moyen d'analyse	Dimensions des particules (microns)	Concentration minimum (ppm)	Précision estimée	Coût (FB)
Tamissage	1 heure	44 ou plus	-	± 25 %	200
Microscope	8 heures	10 ou plus	illimitée	± 10 %	1500 ou plus
Microscope électronique	30 heures ou plus	0,01 - 10	illimitée	± 10 %	5000 ou plus
Tube à accumulation visuelle	1/3 heure	62-1000	200	± 10 %	100
Tube à base mobile	4 heures	2 - 100	300	± 40 %	750
Pipette	8 heures ou plus	1 - 62	1000	± 10 %	500
Centrifugeuse	3/4 heure	1 - 62	200	± 10 %	500
Compteur électronique	1 heure	1 - 100	illimitée	± 10 %	750
Sédimentographe	2 heures	1 - 100	2000	± 15 %	1000
Balance de sédimentation	8 heures ou plus	1 - 62	10	± 10 %	500
Absorption de lumière	8 heures ou plus	1 - 62	200	± 25 %	300

La floculation gêne considérablement la mesure. Nous avons essayé de mesurer avec le Coulter Counter les flocons de suspensions immédiatement après leur prélèvement. Les courbes obtenues montrent l'importance de la rapidité de la mesure. Or la mesure à bord d'un bateau est un tour de force et n'est certes pas recommandable pour un appareil de laboratoire fragile.

Après le stockage des échantillons d'eau, les suspensions doivent être redispersées avant une mesure. Or cette dispersion peut se faire de différentes manières, donnant lieu à la formation de flocons différents.

Seuls des ultrasons et des peptisants dispersent les suspensions sous forme de particules.

Il est intéressant de connaître la formation des flocons dans l'eau de l'Escaut sans adjonction de peptisant.

Le Coulter Counter permet une mesure très rapide. En partant de la suspension dispersée aux ultrasons, l'analyse, à des intervalles de temps réguliers, mesure la cinétique de la floculation. L'influence de la salinité, de la turbulence et d'autres facteurs physico-chimiques peuvent être examinés. Rappelons que le Coulter Counter mesure des diamètres particules. Il n'est donc pas possible de transposer ces diamètres en vitesses de sédimentation, car la densité des flocons n'est pas connue.

La méthode de la balance de sédimentation est longue. Il faut que la floculation ne varie pratiquement plus au cours de la manipulation.

Si on désire éliminer l'influence de la floculation au cours de la sédimentation, on disperse préalablement les échantillons aux ultrasons et on maintient le solide en suspension jusqu'à ce que la floculation soit réalisée.

La courbe enregistrée est la courbe granulométrique des flocons exprimée en vitesse de Stockes, ce qui est une donnée très utile dans l'étude des processus de sédimentation.

Le sédimentographe est à première vue un appareil séduisant. Il présente cependant de nombreux inconvénients.

L'absorption de rayons X est fonction de la composition chimique du sédiment. Or les différentes fractions granulométriques n'ont pas les mêmes compositions chimiques ce qui fausse la mesure.

Les sédiments étant principalement constitués de quartz et d'aluminosilicates qui ont un faible pouvoir absorbant, il faut utiliser des concentrations élevées en matières solides, ce qui amène une modification des phénomènes de floculation et de sédimentation. La loi de Stokes n'est en effet valable que pour de faibles concentrations en solides

La méthode par absorption de lumière est valable pour des sédiments dont tous les grains absorbent totalement la lumière, ce qui n'est pas toujours le cas. Les grains de quartz par exemple n'absorbent que peu de lumière.

Le mesure de la surface des particules peut être intéressante dans l'étude de la floculation. En effet, on peut espérer connaître

la densité des flocons à partir d'analyses faites à la balance de sédimentation et par la méthode par absorption de lumière.

3. Conclusions.

L'analyse des sables ne pose que peu de problèmes, les méthodes et leurs erreurs étant bien connues.

L'analyse des sédiments vaseux et des suspensions est rendue difficile à cause de la floculation. Il n'existe pas une, mais des méthodes permettant chacune de mesurer une autre grandeur. Les méthodes d'analyse ne sont pas encore bien établies. Le compteur électronique et la balance de sédimentation présentent le plus de possibilité.

Il serait intéressant que soit conçu un appareil de terrain permettant une mesure rapide des flocons dans les suspensions. Le compteur électronique pourrait servir de base à un tel appareil.

La balance de sédimentation peut être utilisée dans un endroit situé à terre près de l'endroit de prélèvement. Les ennuis dus au stockage sont ainsi éliminés.

Les sédiments renfermant des grains allant du micron à quelques centaines de microns doivent être divisés en deux fractions qui sont étudiées séparément. Au cas où les méthodes à utiliser mesurent des dimensions différentes telles qu'une longueur et une vitesse de chute, il se pose le problème de raccorder les deux courbes granulométriques. Ce problème n'a pas encore obtenu de solution satisfaisante.