

ECOLE POLYTECHNIQUE
FEDERALE DE LAUSANNE
INSTITUT DU GENIE
DE L'ENVIRONNEMENT
(Suisse)

ECOLE INTER-ETATS
D'INGENIEURS DE
L'EQUIPEMENT RURAL
DE OUAGADOUGOU
(Haute-Volta)

2 5 5.1

8 3 F I

PROGRAMME DE SPECIALISATION
EN GENIE SANITAIRE
RAPPORT DE
RECHERCHE - DEVELOPPEMENT

LA FILTRATION LENTE SUR SABLE

ETUDIEE SUR UNE INSTALLATION PILOTE
PAR
AMADOU HAMA MAIGA

Lausanne, octobre 1983

255.1-83FI-3450

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

DÉPARTEMENT DU GÉNIE RURAL
ET GÉOMÈTRES

Institut du génie de l'environnement (IGE)

CH (Ecublens)
CH - 1015 Lausanne
Téléphone (021) 47 27 15
Télex 24 478

W H O
Centre International de Référence
Case Postale 140

2260 AC LEIDSCHENDAM
Pays-Bas

V/réf

N/réf

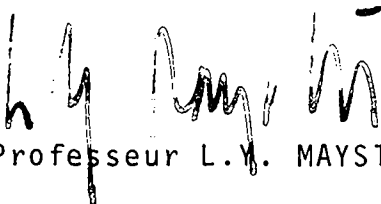
LYM/mc

Lausanne, le 30 novembre 1983

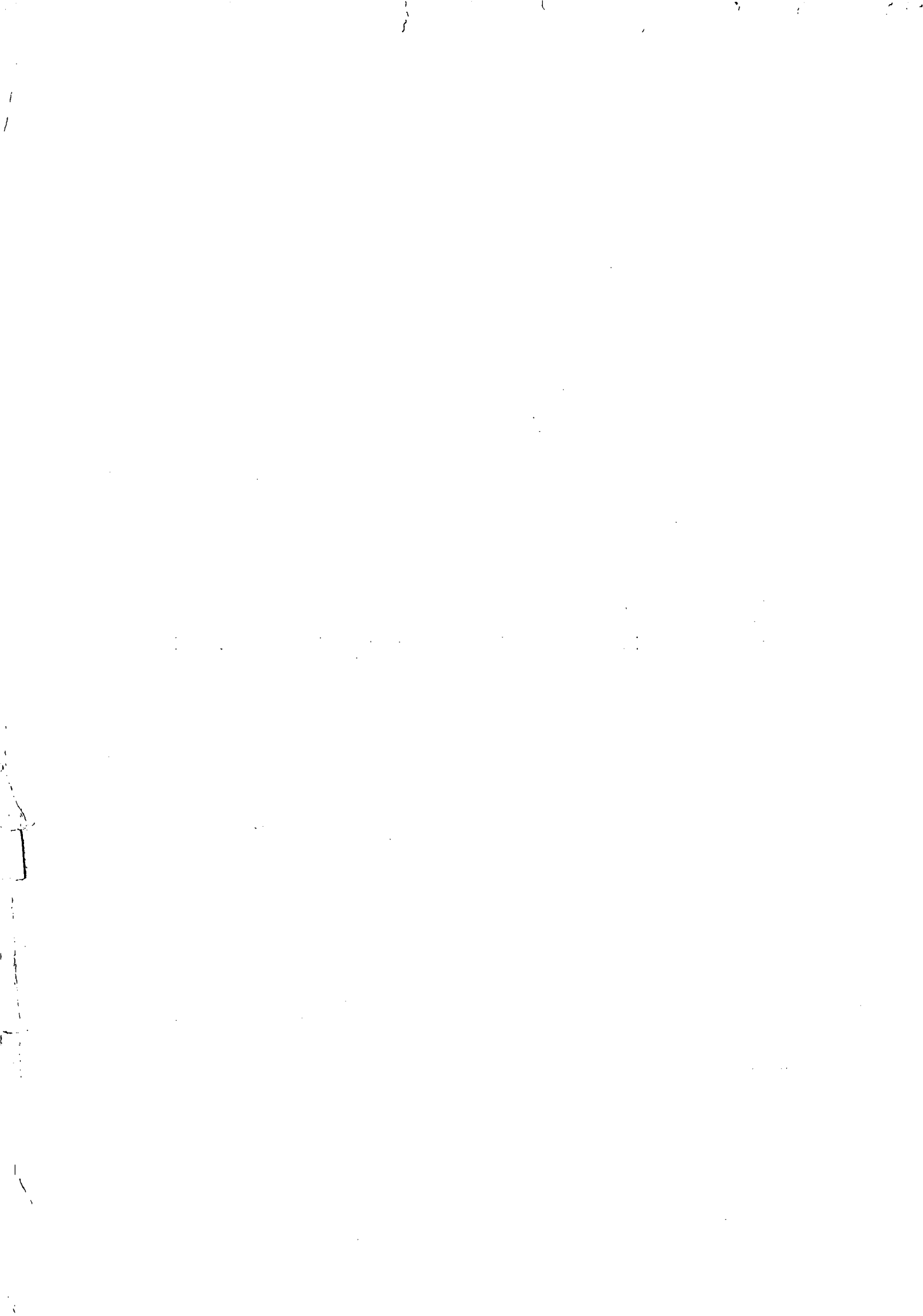
Messieurs,

J'ai le plaisir de vous adresser ci-joint un exemplaire du travail de M. A. MAIGA sur la filtration lente sur sable.

Je vous remercie de l'appui que vous avez donné à M. Maiga dans son travail et vous présente, Messieurs, l'expression de mes sentiments distingués.


Professeur L.Y. MAYSTRE

Annexe : 1 rapport



ECOLE POLYTECHNIQUE
FEDERALE DE LAUSANNE
INSTITUT DU GENIE
DE L'ENVIRONNEMENT
(Suisse)

KD 4615

ECOLE INTER-ETATS
D'INGENIEURS DE
L'EQUIPEMENT RURAL
DE OUAGADOUGOU
(Haute-Volta)

PROGRAMME DE SPECIALISATION
EN GENIE SANITAIRE
RAPPORT DE
RECHERCHE - DEVELOPPEMENT

LA FILTRATION LENTE SUR SABLE

ETUDIEE SUR UNE INSTALLATION PILOTE
PAR
AMADOU HAMA MAIGA

LIBRARY, INTERNATIONAL REFERENCE
CENTRE FOR COMMUNITY WATER SUPPLY
AND SANITATION (ICWS)
PO BOX 173 3000 AD The Hague.
Tel. (070) 814011 ext. 141/142

RN: 04615 3450
LO: 255.1 83FI

Lausanne, octobre 1983

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
1. GENERALITES SUR LA FILTRATION	1
1.1. HISTORIQUE	1
1.2. DIFFERENTS TYPES DE FILTRE	3
1.2.1. Les filtres lents à sable	3
1.2.2. Filtres rapides	4
1.2.3. Filtres sous pression	5
1.2.4. Microtamisage	5
1.2.5. Filtration sur charbon activé	6
1.2.5.1. Sous forme de poudre	6
1.2.5.2. Filtres à charbon activé	7
2. THEORIE DE LA FILTRATION LENTE	8
2.1. INTRODUCTION	8
2.2. PURIFICATION DANS UN FILTRE LENT	8
2.3. MECANISMES DE LA FILTRATION LENTE	10
2.3.1. Mécanismes de transport	10
2.3.1.1. Criblage ou tamisage	10
2.3.1.2. Sédimentation	10
2.3.1.3. A ces processus s'ajoutent	12
2.3.2. Mécanismes de fixation	12
2.3.2.1. Attraction électrostatique	12
2.3.2.2. Adhèrence	12
2.3.3. Mécanisme de purification	13
2.4. EFFETS DES ALGUES	14
2.5. HYDRAULIQUE DE LA FILTRATION	14
3. PARAMETRES D'EXPERIMENTATION	16
3.1. CHOIX DES VITESSES DE FILTRATION	16
3.2. CHOIX DE LA GRANULOMETRIE DU SABLE	16
3.3. CHOIX DE L'EPAISSEUR DU SABLE FILTRANT	17
3.3.1. Détermination de la granulométrie des sables	19
3.3.2. Caractéristiques des sables	21
3.3.2.1. Sable no 1	21
3.3.2.2. Sable no 2	22
3.3.2.3. Sable no 3	22
3.4. HAUTEUR D'EAU SURNAGEANTE	22

	<u>Page</u>
4. CHRONOLOGIE	24
5. BIBLIOGRAPHIE CONSULTEE	25
6. MATERIEL D'EXPERIMENTATION	26
6.1. MESURE DES DEBITS ET CHOIX DU DIAMETRE DES COLONNES	26
6.1.1. Production d'eau filtrée	26
6.1.2. Mesure des débits et choix du diamètre	27
6.2. CHOIX DU NOMBRE DE COLONNES	28
6.2.1. Volumes de sable	28
6.2.2. Nombre de colonnes	28
6.3. RECONSTITUTION DU SABLE SUISSE	29
6.4. CONSTRUCTION DU MATERIEL	29
6.4.1. Colonnes	29
6.4.2. Structure de support en bois	30
6.4.2.1. Description	30
6.4.2.2. Confection	30
6.4.3. Distribution de l'eau sur les colonnes	30
6.4.4. Trop-pleins	31
6.4.5. Réglage du débit et mesure des pertes de charge	31
7. CHOIX DU SITE EXPERIMENTAL	33
7.1. ESSAI PRELIMINAIRE A L'IGE	33
7.2. ESSAI SUR LE TOIT DU "PARMENTIER"	35
7.3. LA CHAMBERONNE	36
8. EXPERIENCES A LA CHAMBERONNE	37
8.1. CONDITIONS EN PRESENCE	37
8.2. PRISE D'EAU	37
8.3. POMPE D'ALIMENTATION	37
8.4. TUYAUTERIES D'ALIMENTATION EN EAU	38
8.4.1. Aspiration	38
8.4.2. Refoulement	38
8.5. EVACUATION DES EAUX EN EXCES	38

	<u>Page</u>
8.6. MESURES ET ANALYSES	38
8.6.1. Choix des paramètres	38
8.6.1.1. Hydraulique	38
8.6.1.2. Qualité de l'eau	39
8.6.1.2.1. Physico - chimie	39
8.6.1.2.2. Bactériologie	39
8.6.2. Méthodes d'analyse et matériel utilisé	39
8.6.2.1. Physico - chimie	39
8.6.2.2. Bactériologie	40
8.6.3. Programme et fréquence d'analyses	40
8.6.3.1. Temps de parcours d'une particule d'eau	40
8.6.3.2. Programme d'analyses	41
8.6.3.2.1. Jour J	41
8.6.3.2.2. Jour (J + 1)	41
8.6.3.3. Répartition dans la semaine	41
9. RESULTATS EXPERIMENTAUX	42
9.1. TABLEAU DES ANALYSES EFFECTUEES DU 27 MAI AU 13 SEPTEMBRE 1983	42
9.2. RAPPELS DES CARACTERISTIQUES DES COLONNES	43
9.3. COLMATAGE DES COLONNES	44
9.3.1. Pertes de charges totales	44
9.3.2. Pertes de charge partielles	45
9.4. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES	46
9.4.1. Turbidité	46
9.4.2. Couleur	46
9.4.3. Température	46
9.4.4. pH	47
9.4.5. Dureté totale	47
9.4.6. Alcalinité	48
9.4.7. Sulfates	48
9.4.8. Chlorures	49
9.4.9. Les ions ammonium	49
9.4.10. Les Nitrites	49
9.4.11. Nitrates	50
9.4.12. Fer total	51
9.4.13. Orthophosphates	51
9.5. PARAMETRES BACTERIOLOGIQUES	51
9.5.1. Réduction des germes totaux	51
9.5.2. Elimination des coliformes totaux	52

	<u>Page</u>
10. CONCLUSION	53
10.1. QUALITE DE L'EAU	53
10.2. HYDRAULIQUE DE LA FILTRATION LENTE	54
10.3. AUTRES REMARQUES	55
11. REMERCIEMENTS	56

P R E F A C E

Monsieur Amadou Hama MAIGA, né en 1956, de nationalité malienne, a suivi le programme de spécialisation en génie sanitaire organisé conjointement par l'Ecole Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Equipement Rural de Ouagadougou (Haute-Volta) et par l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse), en 1981.

Grâce à la générosité de la Ville de Lausanne qui a bien voulu lui accorder 4 mois de bourse, M. MAIGA a fait un stage dans divers services du Service des Eaux de la Ville de Lausanne, durant 4 mois, de juillet à octobre 1982.

Au vu de son très bon travail et de sa grande motivation, M. MAIGA s'est vu octroyer une bourse supplémentaire d'un an pour effectuer une recherche-développement à l'Institut du Génie de l'Environnement de l'EPFL. Cette recherche doit, selon les exigences du programme de spécialisation, concerner un travail expérimental entrepris selon les règles scientifiques, sur un sujet technique d'utilité pratique, pour les pays de la zone sahelienne.

Après avoir discuté avec les services compétents de son pays, M. MAIGA a proposé l'étude de la filtration lente sur lit de sable.

L'installation expérimentale a été en partie fabriquée par les ateliers du Service des Eaux de la Ville de Lausanne, auquel nous adressons notre reconnaissance.

M. MAIGA a effectué son travail de décembre 1982 à octobre 1983 à Lausanne. Il a présenté avec succès son mémoire intitulé "La filtration lente sur sable, étudiée sur une installation pilote", en foi de quoi un certificat lui est délivré. Son mémoire est publié par l'Institut du Génie de l'Environnement.

M. MAIGA a dû concevoir, construire et exploiter l'installation pilote, composée de 8 colonnes de filtration \varnothing 100 mm, procéder aux analyses et interpréter les résultats.

Ecublens,
31.10.83

Professeur L.Y. MAYSTRE

I. GENERALITES SUR LA FILTRATION

1.1. HISTORIQUE

La filtration est l'une des techniques les plus anciennes et de loin la plus appliquée dans les opérations de traitement de l'eau, qu'elle soit à usage industriel ou domestique.

C'est en 1804 qu'un écossais, du nom de John Gibb, a conçu et construit pour la première fois un filtre à sable expérimental pour sa blanchisserie de Daisley. Produisant plus d'eau "traitée" qu'il n'en avait besoin, il commença à en vendre le surplus à la population. Par la suite, lui-même et d'autres techniciens perfectionnèrent cette méthode, à tel point qu'en 1829 fut construite pour la première fois une installation de filtration de l'eau, destinée à la consommation de la ville de Londres, sous la direction d'un nommé James Simpson. Depuis, cette méthode de traitement commença à se proliférer dans le monde industrialisé de l'Europe de l'époque. Elle a prouvé son efficacité par suite de nombreuses épidémies qui ont ravagé certaines populations consommant de l'eau non filtrée et épargnant pendant la même période d'autres populations consommant la même eau, mais filtrée. C'est le cas de l'épidémie de choléra de 1892, dont près de la moitié de la population de Hambourg a été victime, consommant les eaux de l'Elbe à l'état brut, et dont est sortie indemne la population d'Altona, procédant à la filtration de ces eaux.

Des suites des découvertes de Pasteur et autres, des examens biologiques sur plusieurs échantillons ont donné des résultats confirmant l'amélioration de la qualité bactériologique de l'eau après filtration. Cette technique fut alors largement adoptée comme moyen de "traiter" l'eau avant consommation, et gagna du terrain tout en s'améliorant au fil du temps grâce aux progrès techniques. Il s'en est suivi la naissance des filtres rapides et la transformation dans la plupart des cas de la filtration seulement en une étape du traitement de l'eau après la décantation et d'autres stades de pré-traitement et avant la stérilisation et d'autres stades de post-traitement.

De nos jours encore, la filtration demeure une étape indispensable dans une chaîne de traitement d'eau potable, à l'exception d'eau souterraine captée en forages, puits ou sources, et jugée de qualité assez bonne pour se passer de celle-là.

L'utilisation du "filtre biologique" ou "filtre à sable lent" pour obtenir de l'eau de haute qualité n'est toujours pas dépassée. Des villes comme Amsterdam, Anvers, Londres, Springfield (USA) et diverses agglomérations de Suède et du Japon, continuent à utiliser ces filtres datant de longtemps ou d'époque récente, ou même en construisent. En Suisse, les villes de Zürich et St. Gall utilisent toujours leurs filtres lents construits à la fin du siècle dernier comme éléments de leur chaîne de traitement d'eau potable.

1.2. DIFFERENTS TYPES DE FILTRE

La filtration consiste en la traversée d'un milieu filtrant par un liquide chargé d'éléments dont on veut le débarrasser, le milieu filtrant ne laissant passer que le liquide et retenant les éléments indésirés, soit de par sa nature (adsorption), soit par la faiblesse de la taille des voies de passage (tamisage). Dans le cas qui nous concerne, le liquide est l'eau et les éléments indésirés sont l'ensemble des particules colloïdales, dissoutes ou en suspension, qu'elle contient à l'état brut, la rendant impropre à la consommation. Quant au milieu filtrant, il peut être de nature diverse et fonctionner de diverses manières.

On distingue :

1.2.1. Les filtres lents à sable

C'est la première technique de filtration qui fut mise en oeuvre. Le filtre lent consiste en un bassin à ciel ouvert, le plus souvent rectangulaire, contenant du sable servant de matériau filtrant. La couche de sable, d'épaisseur allant de 0,7 m à 1,5 m, est surmontée d'une couche d'eau de 0,7 m à 3 m, s'écoulant en traversant le sable sous l'action de la pesanteur. L'eau filtrée est recueillie au fond du bassin à l'aide d'un système de drainage. Le nom de "filtre lent" vient du fait que la vitesse de percolation est très faible, de l'ordre de 0,1 à 0,5 m/h, par opposition aux filtres rapides. Le diamètre des grains de sable va de 0,10 mm à 2,0 mm et même plus dans certains cas avec une granulométrie assez étalée. Il est donc possible d'utiliser le sable de la plupart des carrières sans tri. La taille réduite des grains et la faiblesse des vitesses dans ces filtres font qu'ils ne sont pas seulement de simples tamis destinés à retenir les particules dont les dimensions excèdent les pores laissés entre les grains, mais ils éliminent aussi les particules colloïdales, les substances dissoutes, les bactéries et autres germes, ainsi que les goûts et odeurs. On obtient ainsi de l'eau d'une qualité physico-chimique et bactériologique pure. Cette qualité est obtenue grâce à un développement simultané de phénomènes physiques et d'épuration biologique à la surface et dans le lit filtrant; d'où le nom de "filtre biologique" souvent donné à ces filtres. Ces phénomènes seront examinés plus en détail dans la suite.

1.2.2. Filtres rapides

Comme les filtres lents, les filtres rapides sont constitués de bassins à ciel ouvert, contenant le sable filtrant sur une épaisseur d'environ 0,7 m. à 1,5 m. C'est un sable gabarité d'une granulométrie assez uniforme, avec un coefficient d'uniformité des grains voisin de 1, ou en tout cas inférieur à 1,8 et une taille effective variant de 0,4 mm à 1,2 mm selon le degré de traitement désiré et la qualité de l'affluent.

Le sable doit être choisi avec grand soin, exempt d'argiles, de poussière, de racines et autres impuretés. Donc l'utilisation de sable tout-venant comme dans le cas de la filtration lente est exclue. La couche d'eau surmontant le sable et provoquant la percolation est d'une hauteur de 0,8 à 2 m et exceptionnellement de 3 m. Le filtrat est recueilli au fond par l'intermédiaire de systèmes de drainage. Le nom de "filtres rapides" vient de l'importance des vitesses d'environ 20 à 50 fois plus élevées que celles des filtres lents. Ces vitesses de 2 à 25 m/h. engendrent des durées de traversée du matériau filtrant trop courtes pour permettre d'autres phénomènes d'épuration que de type physique. Il en découle une réduction de la surface de filtration, donc de la grandeur des ouvrages. Les vitesses courantes sont de 2 à 10 m/h.

Lorsque la vitesse est plus élevée, on utilise surtout le vocable de "filtres dégrossissants" ou "dégrossisseurs" étant donné la limitation de leur efficacité. Ils servent dans ce cas d'ouvrages de pré-traitement.

Les filtres rapides reçoivent généralement de l'eau pré-traitée provenant de décanteurs pour achever l'opération entamée par ces derniers. Ils jouent alors un rôle essentiellement de tamisage éliminant les flots résiduels. Dans certains cas, ils servent même de lits de contact pour achever la coagulation et la clarification de l'eau avant qu'elle n'atteigne le fond du filtre lorsque cette opération a été médiocrement faite dans les ouvrages précédents. Il s'ensuit un très rapide colmatage des pores laissés par les grains de sable entre eux, une diminution progressive de la vitesse apparente d'écoulement, mais une augmentation de la vitesse réelle, d'où une augmentation des pertes de charge à tel point que le débit désiré n'est plus obtenu. Il peut arriver que l'adhésion des particules de colmatage soit très faible et que l'augmentation des pertes de charge, créant aussi un accroissement des effets de frottement, provoque l'arrachement de ces particules qui descendent en aval de proche en proche pour se retrouver dans le filtrat.

Pour remédier à ces différentes conséquences, on procède à une régénération ou recyclage (décolmatage par élimination des particules) du lit filtrant.

- Lavage des filtres rapides :

Dans la plupart des cas, la régénération ou recyclage se fait par un envoi simultané d'air et d'eau déjà filtrée sous pression en contre-courant (de bas en haut) après arrêt de l'entrée d'eau brute et de la sortie de l'eau filtrée. C'est par l'intermédiaire du système de drainage que remontent ces deux fluides assurant l'un le brassage du sable, l'autre son rinçage. Pour cela, le système de drainage est très souvent constitué de plancher en béton équipé de busulures recueillant par leur tête de forme cylindrique et munie de rainures l'eau filtrée et la restituant par leur queue au bassin d'eau filtrée. C'est aussi par la queue que remonte l'eau de lavage qui est diffusée par les têtes des busulures. La fréquence de lavage d'un lit de filtre rapide à sable va de deux fois par jour à une fois par trois jours, ou même une fois par semaine selon la qualité de l'eau à filtrer.

1.2.3. Filtres sous pression

Contrairement aux deux premiers cas de filtres énumérés (écoulement gravitaire dans des bassins à ciel ouvert), les filtres sous pression sont constitués de coques d'acier fermées, équipées de systèmes de drainage et dans lesquelles est chargé le sable filtrant. Elles sont horizontales ou verticales et fonctionnent avec une pression de l'ordre de 10 atm. La vitesse de filtration étant du même ordre de grandeur que pour les filtres dits "rapides", la perte de charge est quasiment négligeable. Ce qui fait que le système de pompage double (avant et après traitement) peut être évité. Le traitement se limite pratiquement à une opération de tamisage. C'est pourquoi il n'est généralement utilisé que dans l'industrie.

1.2.4. Microtamisage

Les micro-tamis sont différents des autres types de filtre, en ce sens que la filtration ne se fait pas par traversée d'une couche de matériau poreux mais de tamis à fils d'acier inoxydables et mailles très fines (0,025 mm environ). Cependant, ils réduisent considérablement la turbidité, éliminent les matières en suspension grossières et même les micro-organismes. En exemple, le plancton peut être réduit de 50 à 95 %. Ils sont constitués d'unités cylindriques préfabriquées, variant de 0,75 m de diamètre pour 0,6 m de long à 3 m de diamètre pour 3 m. de long et peuvent traiter de 7 à 45 m³ d'eau par jour

avec une perte de charge de 15 cm. environ. Leur nettoyage se fait par pulvérisation continue d'eau sous 0,3 atm à 0,7 atm et dans certains cas jusqu'à 2 atm de pression avec un volume d'eau à peine égal à 2 % du volume traité.

1.2.5. Filtration sur charbon activé

Le charbon activé est fabriqué à partir de bois, pâte à papier, lignite, tourbe, résidus ligneux, houille, charbon bitumeux, os, déchets et coques combinés suivant 2 stades:

- Le premier consiste en une pyrolyse du matériau de base pour obtenir du charbon de bois par carbonisation à 500°C en milieu oxydant. A ce stade, on obtient un matériau absorbant dont la surface spécifique est de l'ordre de 10 m²/g.
- Le deuxième consiste en une activation du charbon ainsi obtenu soit
 - . par procédé thermique en l'oxydant à 1000°C dans une atmosphère dont le pouvoir oxydant est réduit par injection de CO₂ ou de vapeurs d'eau.
 - . par procédé chimique en carbonisant les produits volatils résiduels issus du premier stade par chauffage en présence de chlorure de zinc ou d'acide phosphorique.

Après le deuxième stade, on obtient du charbon de 600 à 1500 m² de surface par g. Il se présente sous forme de granulés ou de poudre.

1.2.5.1. Sous forme de poudre

Il est mélangé avec l'eau brute avant sédimentation comme suspension aqueuse avec un taux moyen de 20 g/m³ d'eau. Avec son pouvoir adsorbant des matières en suspension et de plusieurs matières dissoutes dont les hydrocarbures, il favorise la formation des floccs et rend plus complet le fonctionnement des décanteurs.

1.2.5.2. Filtres à charbon activé

Sous forme de granulés, le charbon activé est utilisé comme matériau filtrant. Les filtres à charbon activé sont identiques des points de vue construction et fonctionnement aux filtres rapides à ciel ouvert. Comme milieu filtrant, ils combinent l'avantage des processus d'épuration normaux des filtres et le pouvoir adsorbant exceptionnel du charbon activé. A ce titre, ils sont très indiqués lorsqu'on a à faire à des eaux superficielles très polluées.

On l'utilise comme élément d'une série d'ouvrages de traitement ou en double couche de matériaux dans un filtre, surmonté de sable. La vitesse de filtration est généralement du même ordre de grandeur que celle des filtres dits rapides.

2. THEORIE DE LA FILTRATION LENTE

2.1. INTRODUCTION

Un filtre lent est composé des éléments suivants :

- Un réservoir d'eau brute (surnageante) maintenant une charge et une réserve d'eau au dessus du matériau et assurant la pression nécessaire à la percolation à travers le filtre.
- Un lit de milieu filtrant assurant les processus de traitement. Ce milieu, le plus souvent du sable, peut être aussi du concassé ou tout autre matériau grenu.
- Un système de drainage de l'eau filtrée, par la base du filtre, et qui sert en même temps de support au matériau.
- Un système de commandes (vannes par exemple) servant à régler la vitesse de l'écoulement, la maintenance du niveau de l'eau brute à une valeur donnée pour la qualité du fonctionnement, etc.

Les trois premiers éléments sont réunis en un seul bassin filtrant à ciel ouvert de section souvent rectangulaire avec 2 à 4 m. de profondeur à parois verticales ou rarement inclinées. Ces parois peuvent être faites en béton ou en maçonnerie selon les conditions en présence. Le système de drainage par la base peut être fait d'un faux plancher en béton poreux ou de drains jointés, entourés et couverts de gravier gabarité supportant le matériau filtrant et retenant les grains fins.

2.2. PURIFICATION DANS UN FILTRE LENT

La filtration lente sur sable diffère des autres types de filtration par le fait qu'elle doit assurer à l'eau une qualité physiquement et bactériologiquement saine et cela souvent sans faire appel à d'autres stades de traitement. Elle ne consiste donc pas seulement en une opération de tamisage à travers le sable, mais aussi en une épuration biologique et biochimique. L'échantillon d'eau brute qui entre dans le bassin filtrant subit d'abord une opération de sédimentation de certaines des particules qui le chargent et une agglomération d'autres lors de son séjour de 3 à 12 h. dans l'eau surnageante (selon la vitesse

et la hauteur d'eau) avant pénétration dans le lit filtrant. Il fonctionne donc comme un décanteur.

Sous l'influence de la lumière solaire, des algues poussent et absorbent les nutriments contenus dans l'eau brute tels que les nitrates, le dioxyde de carbone, les phosphates en les transformant en parois cellulaires et en oxygène. Ce dernier se dissolvant au fur et à mesure de sa formation dans l'eau pour agir sur les impuretés organiques. Parvenu à maturité, il se forme à la surface de sable un mince film visqueux en grande partie d'origine organique, appelé "membrane biologique" ou "Schmutzdecke" ou "peau filtrante". Ce film, extrêmement actif, est composé d'algues filamenteuses, protozoaires, rotifères, bactéries et autres formes de vie animale ou végétale. C'est ce film qui, par les divers organismes qui le composent, piège, digère et désagrège les matières organiques contenues dans l'eau. Les algues mortes de l'eau qui surmonte le lit et les bactéries vivantes de l'eau brute sont les unes et les autres consommées à l'intérieur de ce film. Il se forme des sels minéraux simples. En traversant cette membrane, les composés azotés se trouvent oxydés et les nitrites dégradés. La couleur est partiellement éliminée et une proportion très importante des particules en suspension sont retenues. L'eau pénètre ensuite dans le lit filtrant qu'elle traverse en percolant par les interstices entre les grains. Cette percolation se faisant avec une vitesse extrêmement faible permet la rétention des particules en suspension ou colloïdales qui ont résisté jusqu'ici, par des phénomènes physiques de tamisage et d'adsorption par les grains.

L'opération de dégradation biologique due aux micro-organismes se nourrissant des impuretés et les uns des autres, commencée sur la "Schmutzdecke" se poursuit et se complète dans la partie supérieure de la couche de sable.

A mesure que la profondeur augmente, la nourriture de ces micro-organismes devient rare et par conséquent leur population diminue. Aux environs de 40 cm de profondeur, il ne subsiste plus que quelques bactéries utilisant l'oxygène dissous dans l'eau pour extraire les ultimes nutriments existants à l'état de solutés.

Ainsi, après environ 50 à 60 cm de profondeur, l'eau se trouve débarassée de presque toutes les matières en suspension, colloïdales ou dissoutes et ne contient plus que quelques sels minéraux simples relativement inoffensifs en solution. Non seulement tous les organismes nuisibles sont éliminés, mais aussi les nutriments dissous qui pourraient favoriser leur développement. L'eau ainsi traitée peut être pauvre en oxygène et riche en dioxyde de carbone; inconvénient auquel on peut remédier en l'aérant.

2.3. MECANISMES DE LA FILTRATION LENTE

L'ensemble des forces et des processus physiques et biologiques intervenant dans l'épuration par les filtres lents peuvent être groupés dans trois types de mécanismes :

- mécanismes de transport,
- mécanismes de fixation,
- mécanismes de purification.

2.3.1. Mécanismes de transport :

Les particules contenues dans l'eau sont mises en contact avec le sable selon les processus suivants :

2.3.1.1 Criblage ou tamisage

Il consiste en la rétention des particules dont le diamètre est supérieur à l'espace laissé par les grains entre eux. Ce tamisage est d'autant plus poussé que les grains sont de petite taille et de forme anguleuse.

Dans le cas d'un sable uniforme de diamètre effectif 150 μm , les tailles les plus petites des interstices sont de l'ordre de 20 μm . Le tamisage ne permet donc pas la rétention des colloïdes (diamètre $< 1\mu\text{m}$) ni des bactéries (taille $< 15\mu\text{m}$).

Dans la pratique, le tamisage est amélioré par la "Schmutzdecke" et aussi par l'agglomération des colloïdes rendue possible par la faiblesse de la vitesse.

2.3.1.2. Sédimentation

La couche de sable se comporte aussi comme un bassin de sédimentation, la surface de sédimentation étant le total des petites surfaces des grains orientées vers le haut. Un volume V de sable ordinaire de porosité P de diamètre d des grains présente une surface totale S .

soit : s = surface d'un grain, v = volume d'un grain.

$$\frac{s}{v} = \frac{d^2}{d^3} \times 6 \qquad \frac{s}{v} = \frac{6}{d}$$

Si V est le volume spécifique du sable (sans les vides), on aura :

$$V = V' (1-P) \rightarrow S = \frac{6V}{d} = \frac{6 V' (1-P)}{d}$$

Pour 1 m³ de sable à grains sphériques et uniformes de 0,25 mm de diamètre et 0,38 de porosité, la surface sera :

$$S = 14'880 \text{ m}^2, \text{ soit environ } 15'000 \text{ m}^2.$$

sachant que plus des 3/4 des surfaces unitaires des grains sont orientées vers le bas et les côtés et que les grains sont posés les uns sur les autres, il s'en suit que la valeur réelle de la surface efficace à la sédimentation est de l'ordre de 1'000 à 1'500 m² pour 1m³ de sable. L'efficacité de la sédimentation est fonction donc d'une part de la charge surfacique qui est le rapport entre le débit de filtration et la surface de sédimentation et d'autre part de la vitesse de sédimentation des particules qui est fonction de leur grosseur et de la viscosité de l'eau.

Selon Stokes, la vitesse de sédimentation dans un régime laminaire (cas rencontré dans un filtre par la faiblesse de la vitesse) est donnée par :

$$v = \frac{1}{18} \frac{g}{\nu} \frac{\Delta \ell}{\ell} d^2 \quad \text{avec}$$

ν = viscosité cinématique de l'eau

d = diamètre des particules

ℓ = masse volumique de l'eau

$\ell + \Delta \ell$: masse volumique des particules en suspension.

Exemple : A 10°C, la viscosité de l'eau est de $1,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Les matières en suspension ont une masse volumique voisine de celle de l'eau. On peut poser $\Delta \ell = 0,01$.

Une vitesse de filtration de 0,2 m/h, et une surface de sédimentation de 1000 m² par m³ de sable donnent une charge surfacique V' de $0,2 \cdot 10^{-4} \text{ m/h}$. Dans ce cas, l'élimination des particules organiques par sédimentation se limite à :

$$d^2 \times 1,5 \times 10^{-3} \times 0,01 > 0,2 \cdot 10^{-3} \quad d > 4 \mu\text{m}$$

Les particules plus petites ne sont pas éliminées par sédimentation.

2.3.1.3. A ces processus s'ajoutent :

- Les forces d'inertie et centrifuges éjectant les particules contre les grains.
- L'attraction massique, efficace seulement lorsque les particules sont très proches des grains, en les maintenant contre ces derniers.
- La force d'attraction électrostatique et électrocinétique (forces de Coulomb) qui sont négligeables aussi si la distance est élevée et permet de maintenir les particules contre les grains de charge électrique opposée.

2.3.2. Mécanismes de fixation

Une fois qu'elles sont en contact avec les grains, les particules sont maintenues en place par les forces suivantes :

2.3.2.1. Attraction électrostatique (forces de Coulomb) :

Ce phénomène ayant son origine aux différences de charges électriques pouvant exister entre particules et grains de sable, est très complexe. Le sable quartz porte une charge négative en raison de sa structure cristalline et attire par conséquent des anions comme les cristaux de carbonate et les flocons d'hydroxyde de fer et d'aluminium. Par contre, les particules colloïdales d'origines animales, y compris les bactéries de charges négatives, sont repoussées. On comprend donc la raison pour laquelle un filtre à sable propre ne les élimine pas.

2.3.2.2. Adhérence :

A la maturation du filtre, les particules d'origine organique retenues à la surface du filtre et sur les grains pris individuellement dans la partie supérieure créent un terrain de prolifération d'organismes produisant un matériau visqueux connu sous le nom de "zooglee", composé de bactéries actives, de leurs déchets, de leurs cellules mortes et des matières organiques partiellement assimilées.

La zooglee forme un film gélatineux, visqueux, collant à la surface de la "Schmutzdecke" et des grains de sable, film sur lequel les particules provenant de l'eau adhèrent. Elles sont assimilées et deviennent une partie du film de la zooglee.

2.3.3. Mécanisme de purification

Il s'effectue en deux processus :

- oxydation biologique (microbiologique)
- oxydation chimique.

Au sein de la "Schmutzdecke" et de la zooglee, les bactéries foisonnent sélectivement en se nourrissant de matières organiques déposées. Elles oxydent une partie de leur nourriture pour obtenir l'énergie nécessaire à leur métabolisme (désassimilation), transforment une partie de cette nourriture en matériel cellulaire nécessaire à leur croissance (assimilation). Ainsi, les substances organiques mortes sont-elles converties en matières vivantes. Les produits de désassimilation sont entraînés par l'eau et serviront à plus grande profondeur à d'autres organismes.

L'activité bactérienne décroît à mesure qu'on va en profondeur, due à la rareté des matières organiques (nourriture). A plus de 30 à 40 cm de profondeur, il se passe des activités biochimiques qui transforment les produits de dégradations microbiologiques, les amino-acides par exemple en ammoniac, nitrites, nitrates (nitrification). Ces produits de nitrification sont ensuite dégradés par l'oxygène dissous. Ainsi, la totalité des matières organiques dégradables présentes dans l'eau brute est progressivement désagrégée et convertie en eau, dioxyde de carbone et sels minéraux simples (minéralisation).

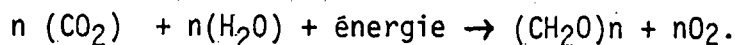
Dans un filtre lent, abondent à chaque profondeur des bactéries spécifiques avec effets bien donnés. Une variation soudaine de la vitesse ou de la charge d'eau tend à rompre cet équilibre et par conséquent à détériorer la qualité du filtrat.

Si la teneur en oxygène est voisine de 0, il se produit une décomposition anaérobique engendrant la production de H_2S , NH_3 et d'autres substances génératrices de mauvais goûts et odeurs et aussi des sels de fer et de manganèse en solution. De faibles températures font tomber aussi l'activité des protozoaires et des nématodes qui dévorent les bactéries. Ainsi, le métabolisme (destruction) des bactéries intestinales se ralentit et leur chance de survie et d'être entraînées dans l'effluent, augmente.

A plus fortes températures, les micro-organismes sécrètent des substances qui agissent comme des poisons sur ces bactéries intestinales. Il s'en suit une réduction du nombre des *Eschiacari coli* et surtout d'organismes pathogènes de 100 à 1000 fois.

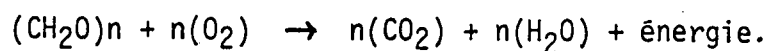
2.4. EFFETS DES ALGUES

Sous l'influence de la lumière solaire, les algues contenues dans l'eau surnageante des filtres se prolifèrent en produisant de l'oxygène dissous et du matériel cellulaire selon la réaction



L'énergie susmentionnée est fournie par oxydation des matières organiques.

En période nocturne, c'est plutôt l'inverse de cette réaction qui se déroule, cause de déclin des algues.



La domination de la première ou de la deuxième réaction est fonction des temps d'ensoleillement, de la nature et de la quantité des algues dans l'eau brute, ainsi que de la quantité et de la nature des matières organiques qui y sont présentes.

- Un très grand développement de ces algues peut précipiter le colmatage du filtre.
- Un très faible développement rend le milieu pauvre en oxygène dissous et donc propice à la formation de gaz indésirables comme le H_2S , le NH_3 , le CO_2 et des substances comme l'éther.

Un certain équilibre est donc nécessaire pour un meilleur rendement de l'épuration.

2.5. HYDRAULIQUE DE LA FILTRATION

Tous les processus (physiques, bactériologiques ou chimiques) qui interviennent dans l'épuration par filtration lente exigent pour un meilleur rendement des vitesses d'écoulement et des diamètres de grains faibles. L'écoulement de l'eau est laminaire et obéit donc à la loi de Darcy :

$$H = \frac{v}{K} \times e$$

H : pertes de charge en m.

K : perméabilité en m/h.

v : vitesse de filtration en m/h

e : épaisseur du milieu filtrant.

K peut être trouvé par la formule empirique suivante :

$$K = 150 (0,72 + 0,028 T) \frac{p^3}{(1-p)^2} \varphi^2 ds \text{ en m/h}$$

T = température en degrés celcius

φ = facteur de forme allant de 0,65 à 1 selon que les grains de sable soient allongés, anguleux, roulés ou sphériques.

ds = diamètre spécifique des grains, c'est-à-dire la taille d'un grain provenant d'un sable imaginaire uniforme dont le poids total représente la même surface que l'échantillon. Ceci est utilisé surtout dans le cas des filtres rapides exigeant un sable assez uniforme. Dans le cas des filtres lents, le sable est aussi et surtout caractérisé par son diamètre efficace d_{10} correspondant à celui du tamis, laissant passer 10 % en poids du matériau et son coefficient d'uniformité $U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$; le facteur caractéristique $\psi = \frac{ds}{d_{10}}$.

Pour $1 < U < 2$ on a $ds = d_{10} (1 + 2 \log U) = \psi d_{10}$

NB : un tamis, dont l'ouverture des mailles est s, laisse passer un diamètre d qui peut lui être supérieur selon la forme de l'ouverture des mailles. Pour le filtre lent, on utilise souvent des tamis à mailles carrées, avec fils entrecroisés. Le rapport $\frac{d}{s}$ varie de 1,05 à 1,2 selon la forme des grains avec une valeur courante de 1,10. La formule précédente devient alors, en remplaçant par leur valeur ds et d_{10} :

$$K = 180 (0,72 + 0,028 T) \frac{p^3}{(1-p)^2} \varphi^2 \psi^2 s_{10}^2$$

où :

s_{10} = ouverture des mailles d'un tamis imaginaire à mailles carrées qui laisserait passer 10 % du matériau.

Pour une porosité de 38 %, une température de 10°C, $U = 2$, $\varphi = 0,9$ pour des grains presque sphériques, $K = 1$ m/h pour $s_{10} = 0,15$ mm et 6 m/h pour $s_{10} = 0,35$ mm.

3. PARAMETRES D'EXPERIMENTATION

3.1. CHOIX DES VITESSES DE FILTRATION

L'expérience a prouvé que les vitesses de filtration doivent rester dans la fourchette de 0,1 à 0,4 m/h pour prétendre à une bonne épuration avec les sables ordinaires.

- Une vitesse plus élevée réduirait la durée de contact entre l'eau et les grains du matériau, donc les chances de rétention des matières en suspension, colloïdales ou dissoutes, ainsi que des micro-organismes et surtout le processus biologique de dégradation des matières organiques. Dans ces cas, une désinfection ou stérilisation serait nécessaire pour garantir la qualité de l'eau.
- Une vitesse plus faible améliorerait la qualité, mais nécessiterait de très grandes surfaces pour obtenir les débits nécessaires.

Cette expérience ayant pour but de voir jusqu'à quel point s'effectue le traitement de l'eau par la seule action de la filtration lente, on choisit les 2 vitesses raisonnables de 0,10 m/h et 0,25 m/h. La limite inférieure $v_1 = 0,1$ m/h correspond au cas le plus favorable garantissant la qualité dans la pratique. La vitesse $v_2 = 0,25$ m/h étant la moyenne des extrêmes, nous place dans le cas le plus courant et cela est nécessaire en ce sens que l'eau ne subit ni pré-traitement, ni post-traitement.

3.2. CHOIX DE LA GRANULOMETRIE DU SABLE

La possibilité d'utiliser du sable tout venant dans beaucoup des cas est un des avantages des filtres lents sur les filtres rapides qui exigent une uniformité plus complète des grains. Dans la pratique, un coefficient d'uniformité de 1,5 à 3,5 est conseillé; exceptionnellement une valeur de 4 est tolérée.

Dans cette expérience, le coefficient d'uniformité de 2,16 qui caractérise les 2 sables (no 1 et 2) apportés du Mali, reste donc dans les normes. Avec les diamètres efficaces (d_{10}) de 0,30 mm et 0,60 mm, ils représentent les 2 types de sable les plus courants dans les carrières des berges du fleuve Niger.

Ils seront complétés dans l'expérience par du sable extrait des carrières du lac Léman à Lausanne, nommé "sable no 3".

L'utilisation de ce dernier ayant le même diamètre efficace et la même répartition granulométrique que le no 1, permettra de faire une comparaison entre le comportement de 2 sables ne différant que par leur origine.

3.3. CHOIX DE L'ÉPAISSEUR DU SABLE FILTRANT

Dans la pratique, le choix de l'épaisseur du lit filtrant est régi par les facteurs suivants :

- Juste au dessous de la peau filtrante (membrane biologique) se trouve la zone d'activité biologique dans laquelle foisonnent les bactéries. Cette zone, qui est un terrain de poursuite des phénomènes commencés sur le film, est de l'ordre de 30 cm d'épaisseur.
- A plus grande profondeur, il se produit des réactions chimiques d'oxydation minérale où les matières organiques libérées du cycle biologique bactérien précédent se trouvent dégradées chimiquement. Cette zone d'activité biochimique est de 40 cm d'épaisseur au maximum.

En résumé, l'expérience a montré que l'épaisseur maximum nécessaire de la couche de sable d'un filtre lent est de 70 cm environ; valeur tenant compte d'un sable grossier, une vitesse de filtration jugée élevée et une eau brute de teneur en matières organiques élevées.

- Le nettoyage des filtres lents se faisant par raclage de leur surface jusqu'à environ 1 à 2 cm de profondeur, correspondant à l'épaisseur de la membrane filtrante, de la zooglee et de la couche de sable la plus colmatée. On ajoute généralement 50 cm ou plus à l'épaisseur nécessaire à la filtration. Cette dernière valeur correspondant au total des épaisseurs raclées à la surface par nettoyage de 1,65 cm par intervalles de 2 mois sur 5 ans.

Les filtres lents sont donc exécutés avec une épaisseur du lit de sable d'environ 1,2 m à 1,40 m et exceptionnellement jusqu'à 1,80 m selon la qualité de l'eau brute, la granulométrie du sable, la vitesse de filtration et la durée d'utilisation entre 2 recharges de sable souhaitée.

Dans le cas de cette expérience, on se trouve dans les conditions suivantes :

- La turbidité, la concentration en algues et en matières organiques ainsi que de micro-organismes de l'eau de la Sorge ne sont pas excessives. La vitesse d'encrassement ne devra donc pas être élevée.
- La durée de l'expérimentation d'environ 6 mois ne devrait pas permettre plus de 2 nettoyages (raclage de la surface) du lit filtrant.
- La faiblesse des valeurs des vitesses d'expérimentation choisies et de la taille effective des grains du matériau font que l'épaisseur nécessaire excluant des cas d'épuration incomplète est réduite.

Compte tenu de ces aspects, une épaisseur du lit de sable de 70 cm semble suffisante et est retenue pour cette expérience, permettant un décapage de la surface sur une profondeur de 1 à 2 cm 5 ou 6 fois selon la situation qu'on aura en cours d'expérimentation.

3.3.1. Détermination de la granulométrie des sables

SABLE no 1 640 g d'échantillon

Diamètre mm	Poids partiels refus g	% partiels refus	% cumulés refus	% cumulés passants
3,15	1,18	0,184	0,184	99,816
2,00	4,77	0,745	0,929	99,071
1,00	44,19	6,905	7,834	92,166
0,80	46,82	7,315	15,149	84,851
0,63	76,50	11,953	27,102	72,898
0,50	131,00	20,468	47,57	52,43
0,315	230,22	35,972	83,542	16,458
0,1	105,05	16,414	99,956	0,044
<0,1	0,25	0,039	99,995	0,005

SABLE no 2 825 g d'échantillon

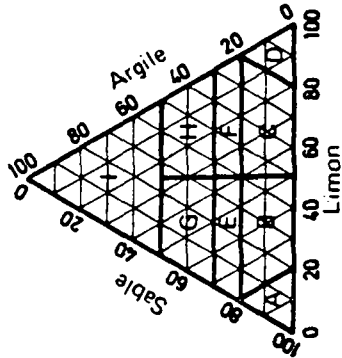
Diamètre mm	Poids partiels ref. g	% partiels refus	% cumulés refus	% cumulés passants
3,15	12,30	1,491	1,491	98,509
2,00	62,70	7,600	9,091	90,909
1,00	376,00	45,575	54,666	45,334
0,50	135,20	16,387	71,053	28,247
0,63	89,18	10,810	81,863	18,137
0,50	64,66	7,837	89,7	10,3
0,315	61,74	7,484	97,184	2,826
0,10	23,14	2,804	99,988	0,012
<0,10	0,08	0,010	99,998	0,002

DIAGRAMME DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE

COMMUNE : LIEU :	DATE : OPERATEUR :
---------------------	-----------------------

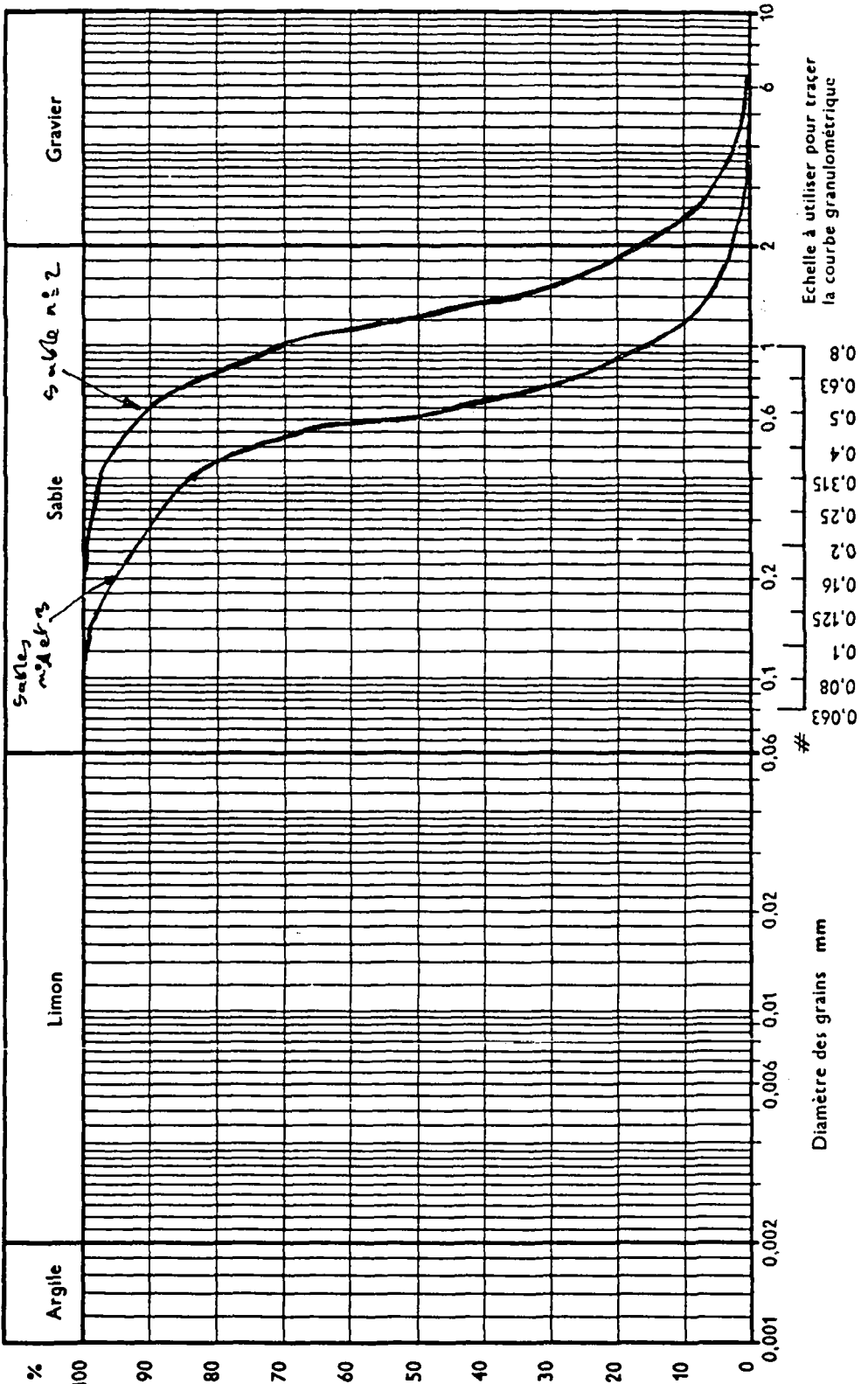
ECHANTILLON N° : PROFIL N° :	PROFONDEUR : DATE DE PRELEVEMENT :
---------------------------------	---------------------------------------

TAMISAGE N° :	ANALYSE A L'AREOMETRE N° :
---------------	----------------------------



CLASSIFICATION USCS

A Sable	F Limon argileux	
B Sable limoneux	G Argile avec sable	
C Limon avec sable	H Argile limoneuse	
D Limon	I Argile	
E Sable argileux		



3.3.2. Caractéristiques des sables

3.3.2.1. Sable no 1 (sable roulé du fleuve Niger (Mali))

Sphéricité $\varphi = 0,9$; porosité 0,30 (30 %).

- Diamètre des grains pour lequel il y a un passage des 10 % ou un refus des 90 % : diamètre efficace :
 $d_{10} = 0,30$ mm.

- Diamètre des grains pour lequel il y a un passage des 60 % ou un refus des 40 % :
 $d_{60} = 0,65$ mm.

- Coefficient d'uniformité $U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0,65}{0,30} = 2,16$

- Diamètre spécifique d_s :

$$d_s = d_{10} (1 + 2 \log U) = 0,3 (1 + 2 \log 2,16) = 0,5 \text{ mm}$$

correspond au diamètre d'un matériau imaginaire uniforme ($U = 1$) dont le poids présente la même surface totale que le matériau considéré.

- Facteur caractéristique ψ :

$$\psi = \frac{d_s}{d_{10}} = \frac{0,5}{0,3} = 1,65$$

- Ouverture moyenne des mailles carrées du tamis laissant passer 10 % du matériau : s_{10}

$$s_{10} = 0,23 \text{ mm (voir courbe granulométrique).}$$

3.3.2.2. Sable no 2 (sable roulé du fleuve Niger (Mali))

Sphéricité $\psi = 0,9$ porosité 30 %.

Diamètre efficace $d_{10} = 0,65$ mm

Diamètre $d_{60} = 1,40$ mm

Coefficient d'uniformité $U = 2,15$

Diamètre spécifique $d_s = 1,08$ mm

Facteur caractéristique $\Psi = 1,66$

Ouverture moyenne des mailles carrées laissant passer 10 % en poids du matériau = $s_{10} = 0,50$ mm (voir courbe granulométrique).

3.3.2.3. Sable no 3 (sable roulé du lac Léman)

A l'état naturel, ce sable a une granulométrie allant de 0,1 mm à plus de 3 mm, avec une répartition très différente de celle des sables no 1 et no 2.

Il est donc reconstitué pour la même granulométrie et la même taille des grains que le sable no 1, par tamissage et en référence à la courbe granulométrique de ce dernier.

3.4. HAUTEUR D'EAU SURNAGEANTE

Par son volume, l'eau surnageante constitue un réservoir assurant une période d'attente à l'eau brute pendant laquelle s'effectue une agglomération et une oxydation des particules en suspension.

Par sa hauteur, elle constitue une charge provoquant l'écoulement gravitaire à travers le lit en vaincant la résistance hydraulique. Les dépôts d'impuretés dont est chargée l'eau brute à la surface du filtre et dans les interstices des grains, augmente cette résistance à la percolation. Ces pertes de charge s'accroissent au fur et à mesure que le filtre fonctionne, réduisant donc le débit d'autant plus rapidement que l'eau brute est chargée ou que la taille des grains est petite. La résistance maximale admissible (qui s'oppose à la charge d'eau au dessus du milieu filtrant) est souvent limitée à 1,00 m à 1,50 m dans la conception normale des filtres lents. Dans certains cas, cette valeur peut être portée à 2,00 m dans le but, non évident, de

prolonger l'intervalle entre 2 nettoyages successifs (l'accroissement des pertes de charge étant plus élevée vers cette limite qu'en début de fonctionnement du filtre).

Dans notre expérience, la valeur choisie est de 0,8 m. Cela est d'autant plus justifié que la durée d'expérimentation d'environ 6 mois et le désir d'effectuer 2 à 3 nettoyages n'exigent pas une plus grande valeur.

4. CHRONOLOGIE

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la 2ème partie d'un programme de spécialisation en Génie sanitaire organisé conjointement par l'E.I.E.R. de Ouagadougou et l'IGE de l'EPF Lausanne. Il consiste en un travail de recherche expérimentale pouvant être profitable aux pays en développement.

J'ai alors retenu l'idée de faire des essais sur le traitement de l'eau de boisson par "filtration lente". Ce travail a débuté le 1er décembre 1982 et s'est déroulé de la manière suivante :

- Décembre 1982 :

- . Discussions avec les responsables de la Direction de l'Hydraulique et ceux de la Société Energie du Mali s'occupant les uns des investissements et les autres de gestion des installations de distribution d'eau.
- . Contact avec des responsables du laboratoire des Travaux Publics au Mali; visite de carrières d'extraction de sable et collecte de 2 échantillons de 20 kg; analyse granulométrique de ces échantillons.

- Janvier à Mai 1983 :

- . Recherche et lecture d'ouvrages traitant de la filtration lente.
- . Discussions avec des responsables des services des eaux de Lausanne, Zürich et Saint-Gall et visite d'installations.
- . Conception, fabrication et montage du matériel d'expérimentation.

- Avril à septembre 1983 :

- . Expériences.

5. BIBLIOGRAPHIE CONSULTEE

La filtration lente est l'une des techniques de traitement d'eau les moins traitées dans les ouvrages contemporains. Le seul ouvrage disponible traitant réellement de cette technique a été édité par l'OMS en 1975 et s'intitule "Filtration lente sur sable" des auteurs L. HUSMAN et W.E. WOOD. La plupart des autres sont des ouvrages traitant des techniques d'alimentation en eau potable en général et ne consacrant que de quelques lignes à 2 pages à la filtration lente, se contentant le plus souvent d'évoquer leur simplicité d'exécution et d'exploitation.

- Technique et contrôle du traitement des eaux de
Charles R. COX. OMS 1967
- Traitement des eaux publiques industrielles et privées de
C. GONELLA et H. GUERREE. Eyrolles 1978
- Hydraulique urbaine - Tome 1 de
A. DUPONT. Eyrolles 1974
- Alimentation en eau des agglomérations de
P. KOCH. Dunod 1969
- La filtration lente sur sable
CIR La Haye 1981

Des filtres lents construits au siècle dernier fonctionnent encore dans les chaînes de traitement d'eau à St-Gall et à Zürich. Mais ils ne fonctionnent que physiquement puisque dans les 2 cas, ils sont précédés d'une préchloration, une filtration rapide sur sable, une ozonisation, une filtration sur charbon actif et suivis de postchloration.

6. MATERIEL D'EXPERIMENTATION

A défaut d'effectuer les expériences sur une station pilote constituée de bassins à ciel ouvert en maçonnerie ou en béton comme dans le cas réel des ouvrages de traitement, le choix a été porté sur du matériel à l'échelle de laboratoire; étant donné que les paramètres les plus importants responsables des phénomènes d'épuration ne dépendent pas de la grandeur de l'ouvrage. Ce sont :

- la vitesse de filtration
- l'épaisseur de la couche de sable
- la granulométrie du sable
- les phénomènes naturels : qualité de l'eau à filtrer, conditions atmosphériques, etc.

Le rôle de bassin de filtration est joué par des colonnes en PVC rigide montées sur une structure de supports en bois.

6.1. MESURE DES DEBITS ET CHOIX DU DIAMETRE DES COLONNES

6.1.1. Production d'eau filtrée

Le débit Q est donné par :

$$Q = v \cdot \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{où } Q \text{ en cm}^3/\text{h.}$$

v = vitesse en cm/h.

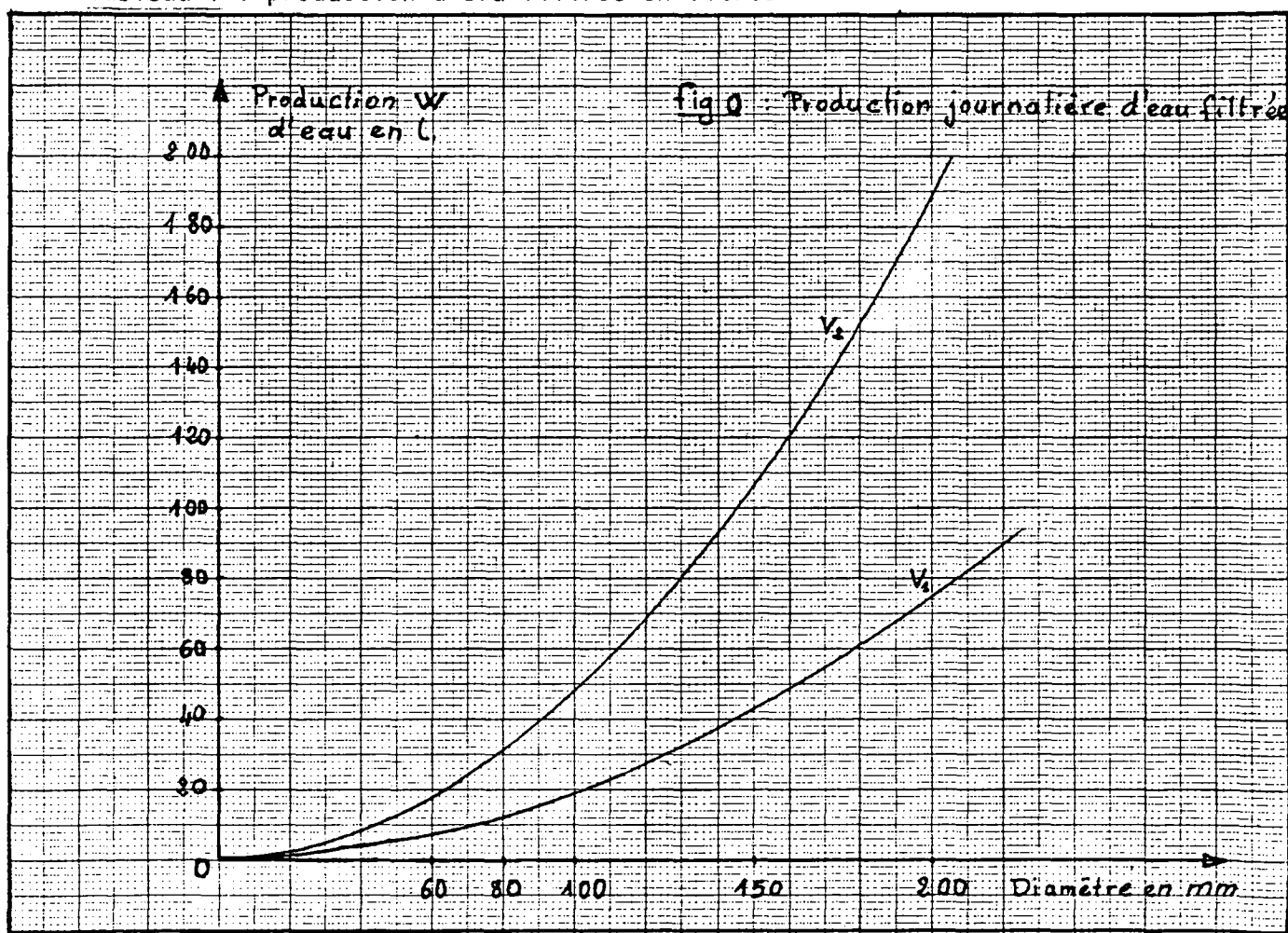
D = diamètre de la colonne en cm

$\frac{\pi D^2}{4}$ = section de la colonne = surface de filtration

W = $Q \times 24$ = volume journalier filtré

Diamètre mm	$v_1 = 0,10 \text{ m/h}$			$v_2 = 0,25 \text{ m/h}$		
	10 mm	heure	24 h	10 mm	heure	24 h
60	0,047	0,283	6,79	0,118	0,707	16,97
80	0,083	0,503	12,07	0,208	1,257	30,17
100	0,130	0,785	18,85	0,327	1,963	47,12
150	0,294	1,767	42,41	0,736	4,419	106,03
200	0,523	3,142	75,40	1,309	7,854	188,50

Tableau 1 : production d'eau filtrée en litres



6.1.2. Mesure des débits et choix du diamètre

Les débits horaires étant très faibles, il serait difficile de contrôler l'écoulement avec ces valeurs.

L'eau filtrée sera donc collectée dans des bidons servant de jaugeurs de débits journaliers dont la valeur permet d'apprécier les pertes de charge dans les colonnes et par conséquent le réglage nécessaire pour le maintien de la vitesse de filtration.

Le volume recueilli après 10 minutes permet d'effectuer un réajustement approximatif de débit. Ce qui nécessite au moins une sortie en goutte à goutte de l'eau filtrée. Le volume journalier doit être d'un poids facilement maniable par un homme pour permettre une vidange quotidienne des bidons de collecte. Le tableau et le graphique de la figure 6 montrent que le diamètre de 100 mm semble le meilleur pour ces exigences pour que les colonnes soient les mêmes dans les 2 cas de vitesse. D'où le choix de 4 bidons de 20 l. et 4 de 60 l. respectivement pour ces 2 cas de vitesse.

6.2. CHOIX DU NOMBRE DE COLONNES

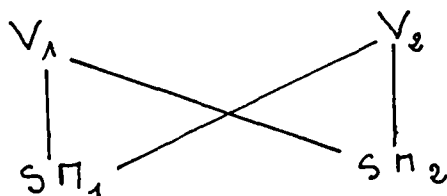
Ce choix est assorti du fait qu'il y a 2 vitesses de filtration, 2 types de sable et 2 granulométries différentes.

6.2.1. Volumes de sable

- Epaisseur par colonne : 70 cm
- Section : $78,54 \text{ cm}^2$ pour 100 mm de diamètre
- Volume du sable par colonne : $70 \times 78,54 = 5497,8 \text{ cm}^3 = 5,5 \text{ l.}$
- Densité approximative du sable : 1,6
- Masse de sable : $1,6 \times 5,5 = 8,8 \text{ kg}$ par colonne

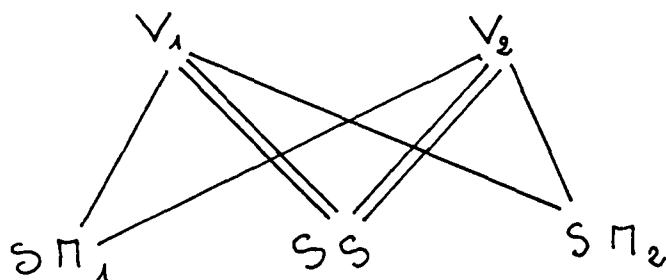
6.2.2. Nombre de colonnes

A partir des 2 échantillons de 20 kg de sable apportés du Mali, le nombre de colonnes possible est limité à 4.



Combinaisons avec
2 sables et 2 vitesses.

Afin d'avoir dans certains cas 2 colonnes identiques à tout point de vue pour en comparer les résultats, un troisième sable appelé "sable suisse" (s.s.) d'une granulométrie identique au SM_1 sera inclus dans l'expérience. Ce qui permet en combinaison de porter le nombre de colonnes à 8, nombre qui est assez pour permettre un contrôle régulier de l'ensemble.



Combinaisons avec
3 sables et 2 vitesses.

6.3. RECONSTITUTION DU SABLE SUISSE (S.S.)

Le sable suisse tel qu'il est disponible a une granulométrie assez étalée couvrant les deux sables SM_1 et SM_2 . La quantité étant suffisante à l'état naturel, un tamisage au laboratoire a permis, à partir d'un échantillon de 80 kg, de reconstituer une quantité de 40 kg avec la même granulométrie que le sable SM_1 . Ce qui permet de faire une comparaison entre 2 sables ne différant que par leur origine. A partir du pourcentage de refus du tamis qui a permis de dresser la courbe granulométrique de SM_1 et du poids total de 40 kg recherché, le poids total du refus de chaque tamis a été recherché et reconstitué, puis le mélange effectué à l'aide d'un malaxeur.

6.4. CONSTRUCTION DU MATERIEL

6.4.1. Colonnes (voir figures 1, 2 et 3)

- Matière : tuyaux en PVC rigide offrant des facilités de travail, résistants, bon marché et assez légers.
- La colonne est faite en 3 éléments superposés. Leur assemblage est fait au moyen de brides par serrage, de boulons. L'élément supérieur de 0,8 m représente la charge et le réservoir d'eau brute, l'élément intermédiaire le lit filtrant et l'élément inférieur le réservoir d'eau filtrée.

- L'étanchéité entre les brides est assurée par un joint en rondelle de caoutchouc.
- Les opérations de nettoyage de la surface du sable en cas de colmatage sont facilitées par un simple démontage de l'élément supérieur.
- Le drainage de l'eau filtrée et le support du sable filtrant sont assurés par un disque en plastique rigide d'un diamètre égal au diamètre extérieur de la colonne et muni de perforations assez petites pour éviter l'entraînement du sable.

6.4.2. Structure de support en bois

6.4.2.1. Description

Deux structures identiques en bois confectionnées pour supporter les 8 colonnes par groupes de 4. Une structure est faite de 2 plaques de 2 m x 0,3 m x 0,04 m en position verticale reliées par deux traverses de 1,50 m x 0,03 m x 0,04 m (voir figure 4) en position horizontale dont l'une à la base pour supporter les colonnes et l'autre au milieu (à 1 m de la base) juste en-dessous des brides d'assemblage (voir figures 5, 7). Cette dernière traverse est munie de fentes permettant l'entrée et le calage de la colonne afin de lui éviter des balancements (voir figure 4). A sa crête, la structure est surmontée d'une barre en bois de 1,50 m x 0,06 m x 0,06 m horizontalement et servant de support pour le tuyau de distribution d'eau brute aux colonnes et également de support supérieur aux contre-plaques de lectures piézométriques, les traverses en étant d'autres au milieu et en bas (voir figures 2, 4, 5 et 6).

6.4.2.2. Confection

Ces structures ont été entièrement fabriquées à l'IGE avec du matériel de menuiserie d'amateur permettant ainsi d'éviter des pertes de temps et de grandes dépenses qu'engendreraient leur fabrication par un atelier spécialisé.

6.4.3. Distribution de l'eau sur les colonnes

L'eau est distribuée sur les 8 colonnes à l'aide d'une conduite de tuyau en plastique flexible de 10 mm de diamètre (voir figures 5, 6 et 7). Un té de répartition permet d'avoir à l'arrivée de l'eau à filtrer deux branches de 2 m desservant chacune à l'aide de petits tés en plastique dur un groupe de 4 colonnes. Sur chaque petit té est monté un petit bout de tuyau flexible de 6 mm de diamètre plongeant dans le tuyau à alimenter et muni d'une pince jouant le rôle de vanne pour le réglage du débit d'arrivée.

6.4.4. Trop-pleins

La charge d'eau sur le sable est maintenue constante par l'arrivée d'un débit d'eau brute supérieur au débit de filtration et par un déversoir pour l'évacuation des eaux en excès et des corps flottants. Ce rôle de déversoir est joué par un trou exécuté sur la paroi de la colonne à 3 cm de sa crête (voir figures 1, 3 et 7). Le tuyau de trop-plein est en plastique flexible de 10 mm de diamètre relié au déversoir par un embout en plastique rigide lui-même prolongeant le trou et solidaire de la paroi par collage.

6.4.5. Réglage du débit et mesure des pertes de charge

- L'eau, après avoir traversé le sable remonte le long d'une conduite en plastique flexible de 10 mm de diamètre jusqu'à un té en plastique rigide situé à son extrémité et servant de déversoir de sortie. Le niveau de ce déversoir est réglable grâce à une pince qui le maintient sur une tige en acier ayant une position verticale stable le long de laquelle celle-là peut coulisser. Ainsi, on peut agir sur la différence de niveau entre l'amont et l'aval du filtre (voir figures 3 et 8).

$$Q = v \cdot S \quad \text{et} \quad v = K \frac{H}{e} \quad \text{ou}$$

Q = débit, S = section, v = vitesse, K = perméabilité,
H = pertes de charge, e = épaisseur du lit.

A mesure que le filtre fonctionne, la perméabilité K diminue par colmatage du sable. La valeur de v est maintenue constante par augmentation de H en abaissant le niveau de sortie (le niveau d'entrée étant constant).

- La position verticale des tiges d'acier est obtenue par vissage sur un disque en fonte de 20 cm de diamètre et 10 kg environ (voir figure 3).
- Dès que le niveau de sortie correspond à celui de la surface du sable, c'est-à-dire la perte de charge égale à la charge d'eau brute, il devient impératif de nettoyer le filtre. En effet, l'essentiel des pertes de charge se déroulant sur le film biologique à la surface, l'abaissement du niveau de sortie en-dessous du niveau de cette surface crée un écoulement plus rapide de l'eau sous ce film provoquant une disparité dans l'écoulement général. Il se formera une zone de basse pression sous le film avec formation de poches d'air par libération de l'oxygène dissout dans l'eau, d'où détérioration de la membrane.

- Afin de suivre l'évolution des pertes de charge dans le temps, d'une part entre l'entrée et la sortie et d'autre part entre différents niveaux de la couche de sable filtrant, 4 piézomètres sont montés sur la colonne (voir figures 1, 3 et 8).
 - . Piézomètre A : donne la cote piézométrique de l'eau surnageante (à l'entrée du filtre)
 - . Piézomètre B : la cote piézométrique à 8 cm en-dessous de la surface (juste en-dessous du film biologique)
 - . Piézomètre C : à 35 cm de la surface soit au milieu de la couche de sable
 - . Piézomètre D : à la sortie du sable.

Ces piézomètres sont faits de tubes en plastique rigide transparents de 10 mm ou 8 mm de diamètre et sont montés sur un contre-plaqué recouvert de papier à graduations millimétriques et maintenu en position verticale sur la structure de support, ce qui facilite la lecture sur les piézomètres (figure 8).

7. CHOIX DU SITE EXPERIMENTAL

7.1. ESSAI PRELIMINAIRE A L'IGE

Cet essai avait pour but de visualiser les phénomènes hydrauliques de l'écoulement sur une colonne d'eau préliminaire, en attendant la fabrication du matériel d'expérimentation.

La colonne utilisée est en PVC rigide de 80 mm de diamètre en un seul élément. Elle est alimentée en eau de ville (eau du robinet) avec 0,8 m de charge d'eau et 0,7 m de couche de sable.

Le débit est donné par $Q = vS$ ou

v = vitesse

S = section = 50,265 cm² (80 mm)

La vitesse v est variable selon la perméabilité K du sable.

$$v = K \cdot \frac{H}{e} \quad \text{ou}$$

H = perte de charge

e = épaisseur du sable

L'expérience consiste à déterminer la perméabilité K en fonction de la température et à faire la comparaison de cette valeur avec celle donnée par K' selon la formule empirique usuelle

$$K' = 150 (0,72 + 0,028 T) \frac{p^3}{(1-p)^2} \psi^2 ds \quad \text{ou}$$

T = température en degré Celcius

P = porosité du sable = 30% pour la sable SM₁ utilisé dans l'essai (valeur déterminée par mesure au laboratoire)

ψ = sphéricité des grains = 0,9

ds = diamètre spécifique des grains = 0,5 mm

No d'ordre	Temps mn	Q l/h	v m/h	H cm	K m/h	T °C	K' m/h	K' - K m/h
1	60	2,00	0,398	6,5	4,28	21 ⁰⁷	4,44	0,16
2	65	1,846	0,367	6,2	4,14	21 ⁰⁶	4,43	0,29
3	65	1,846	0,367	6,1	4,07	21 ⁰³	4,40	0,33
4	60	2,00	0,398	6,6	4,22	22 ⁰²	4,49	0,27
5	70	1,714	0,341	5,7	4,18	21 ⁰⁷	4,44	0,26
6	79	1,518	0,302	5,0	4,23	22 ⁰²	4,42	0,26
7	75	1,60	0,318	5,6	3,97	21 ⁰	4,38	0,41
8	82	1,463	0,291	5,6	3,64	20 ⁰⁵	4,33	0,69
9	86	1,395	0,277	4,7	4,12	21 ⁰⁵	4,42	0,30
10	111	1,081	0,215	3,1	4,85	22 ⁰⁹	4,56	-0,29
11	120	1,00	0,199	3,7	3,76	19 ⁰³	4,22	0,46
12	98	1,22	0,243	4,6	3,69	19 ⁰⁵	4,24	0,55
13	131	0,913	0,181	3,2	3,96	20 ⁰⁷	4,35	0,39
14	117	1,024	0,203	3,8	3,74	19 ⁰²	4,21	0,47
15	122	0,979	0,195	3,55	3,84	19 ⁰⁵	4,24	0,40

Tableau de valeurs trouvées à l'essai de l'IGE.

On remarque que les valeurs K' données par la formule empirique bien que très proches de celles tirées de l'essai leur sont supérieures.

L'observation de leurs différences montre qu'il y aurait une zone de température de validité de cette formule où les valeurs de K et K' seraient égales.

Cependant, il faut observer ces remarques avec une grande prudence, car :

- La quasi-constance de la température qui a régné durant l'essai n'a pas rendu possible la vérification de ce fait et éventuellement l'établissement d'une formule plus proche des limites de validité plus larges.
- La porosité a été mesurée avec une méthode simplifiée et la sphéricité ψ estimée seulement par appréciation oculaire.
- La température est relevée à 10 à 20 cm en profondeur de l'eau sur-nageante. Elle pourrait être différente à l'intérieur du lit fil-trant.

Tempé- ra- tures	1902	1903	1905	2005	2007	210	2103	2105	2106	2107	2202	2209
Différence K'-K	0,47	0,46	0,40	0,69	0,39	0,41	0,33	0,30	0,29	0,26	0,26	-0,29

Différence K' - K selon l'essai

7.2. ESSAI SUR LE TOIT DU "PARMENTIER"

La première idée consistait à utiliser l'eau industrielle de ventilation des locaux de l'EPFL à Ecublens pompée du Léman.

C'est ainsi que la construction du matériel d'expérimentation achevée, il est monté dans un local technique de ventilation sur le toit du bâtiment C.M. de l'EPFL, juste au-dessus du restaurant "Le Parmentier". La conduite de distribution d'eau brute aux colonnes a été branchée sur une prise effectuée sur le tuyau d'arrivée d'eau brute.

Une analyse effectuée sur cette eau brute a donné les résultats suivants :

Turbidité en unités formaziens (U.F.)	= 0
Couleur en unités Platino-cobalt (Pt. Co)	= 10
Fer total en mg/l	= 0
Orthophosphates en mg/l de PO ₄	= 0,2
Nitrites en mg/l de NO ₂	= 0
Ammoniaque en mg/l de NH ₄	= 0
Dureté totale en degrés français (dOF)	= 14,4
Germes totaux par 10 ml	= 30

Ces concentrations sont pratiquement celles d'une eau dite potable, ce qui est d'ailleurs normal étant donné que l'aspiration de cette eau se fait à plus de 300 m au large de la côte du lac avec une profondeur de plus de 50 m et une hauteur de plus de 20 m du fond. Ceci nécessite donc la recherche d'une source d'eau plus polluée.

7.3. LA CHAMBERONNE

Le captage des eaux de cette rivière est bien adapté :

- Par sa proximité de l'EPFL (à 20 mn de marche).
- Les eaux sont assez polluées sous l'influence de plusieurs déversoirs d'orage dans les réseaux de Lausanne ouest, Ecublens, Chavannes.
- Mise à l'abri des installations par la disponibilité de place dans un bâtiment servant de station de relevage des eaux usées de la commune de Saint-Sulpice sur la STEP de Vidy.

8. EXPERIENCES A LA CHAMBERONNE

8.1. CONDITIONS EN PRESENCE (voir figure 9)

- Le débit et la qualité de l'eau de la rivière sont très variables, allant d'un torrent boueux et chargé de feuilles mortes et d'autres débris en période de pluies à un écoulement très lent d'eau assez transparente après 3 jours sans pluie.
- Hauteur maximum de l'eau au droit de la prise d'eau = 1,10 m
- Hauteur minimum = 0,27 m
- Différence de niveau entre le fond de la rivière et le plancher du local = 1,5 m. Il est donc nécessaire d'avoir une pompe pour alimenter les colonnes en eau aspirant au moins à cette hauteur.
- Différence de niveau entre le plancher et la barre horizontale supportant sur la structure la conduite de distribution d'eau aux colonnes = 2 m (refoulement).

8.2. PRISE D'EAU (voir figure 9)

Elle est faite d'un petit flacon cylindrique de 9,5 cm de longueur et 4,5 cm de diamètre en plastique rigide, percé de petits trous à l'aide d'un clou pour jouer le rôle de crépine. Cette crépine est maintenue à 20 cm du fond du cours d'eau par montage sur un bloc de pierre ramassé sur les lieux.

8.3. POMPE D'ALIMENTATION

- Hauteur géométrique nécessaire = 3,5 m.
- Débit total de filtration = 11 l/h pour les 8 colonnes. Il est nécessaire d'avoir un débit très supérieur pour assurer un fonctionnement continu des déversoirs et d'une manière visuelle.

La pompe dont les caractéristiques suivent semble bien indiquée :

- Pompe SOCSIL MONO Type CD 22 R4 en fonte et parties rotatives en acier outil.
 - . stator en caoutchouc synthétique
 - . rotor en acier durci
 - . débit à 333 tr/min. = 110 l/h à 118 l/h, soit 10 fois le débit de filtration
 - . hauteur d'aspiration = 5 à 6 m
 - . branchements = aspiration en bout de pompe

- . pression au milieu verticale
- . flasques de raccords CD 22 = 3/4"

Le tout monté sur plaque de base avec éléments d'entraînement suivants : 1 réducteur - moteur 3 x 380 V, 0,37 W, 333 tr/min.

8.4. TUYAUTERIES D'ALIMENTATION EN EAU

8.4.1. Aspiration

Cette conduite longue de 12 m est faite d'un tuyau renforcé de 8 mm de diamètre, un tuyau en plastique flexible courant ne pouvant être utilisé car l'aspiration l'aplatirait.

8.4.2. Refoulement

La conduite de refoulement est un tuyau en plastique ordinaire de 10 mm de diamètre et longue de 7 m.

8.5. EVACUATION DES EAUX EN EXCES (voir figure 7)

L'eau en excès se déversant des colonnes est conduite par un tuyau flexible en plastique de 10 mm de diamètre dans un collecteur général. Ce dernier long de 2,10 m est posé à même le plancher et est fait d'un tuyau en PVC rigide de 80 mm de diamètre (voir figure 7). Il est maintenu en pente par surélévation de sa tête de départ à l'aide d'un support et draine toutes les eaux en excès vers le bassin d'aspiration des pompes de la station de relevage de la Chamberonne.

8.6. MESURES ET ANALYSES

8.6.1. Choix des paramètres

8.6.1.1. Hydraulique

- Etude de l'évolution de la perte de charge à travers le lit de sable du début à la fin de service de chaque colonne :
 - . Entre l'entrée et la sortie
 - . Entre différents niveaux du lit
- Comparaisons de la rapidité de colmatage entre colonnes.

8.6.1.2. Qualité de l'eau

Les paramètres les plus à même d'être modifiés par l'action de la filtration sont sélectionnés et sont analysés sur l'eau brute et le filtrat de chacune des 8 colonnes.

8.6.1.2.1. Physico - chimie

- | | |
|-------------------|------------------------------|
| - Turbidité | - Sulfates |
| - Couleur | - Dureté totale |
| - Conductivité | - Dureté calcique |
| - pH | - Dureté magnésique |
| - Fer total | - Alcalinité |
| - Manganèse | - Nitrates (NO_3) |
| - Orthophosphates | - Nitrites (NO_2) |
| - Chlorures | - Ammonium (NH_4) |

8.6.1.2.2. Bactériologie

L'analyse bactériologique se limite à la numération des germes totaux et des coliformes.

8.6.2. Méthodes d'analyse et matériel utilisé

8.6.2.1. Physico - chimie

Toutes les analyses physico-chimiques sont faites avec du matériel de la mallette "HACH" donnant les concentrations des paramètres par colorimétrie. La méthode consiste en la précipitation des ions recherchés par des corps chimiques appropriés qui sont préparés et stabilisés, soit en solution dans des flacons, soit en poudre dans des gélules. C'est la capacité qu'ont ces précipités d'absorber le rayonnement émis par le spectrophotomètre dont est doté la mallette qui définit la concentration des ions recherchés. A chaque paramètre correspond une longueur d'onde de la lumière à absorber.

N.B. Certains paramètres sont déterminés par titration et lecture digitale sur le titrateur après réduction de l'effet des ions recherchés marqués par un changement de couleur (exemple : dureté, alcalinité, etc.).

L'utilisation de ce matériel très peu encombrant et portatif donne l'avantage d'opérations simples et rapides permettant alors de suivre l'évolution de toutes les 8 colonnes.

8.6.2.2. Bactériologie

Les analyses bactériologiques sont faites à l'aide d'un troussseau portatif constitué de :

- Un petit incubateur pour favoriser le développement de l'ensemencement
- Des boîtes de pétri pour l'ensemencement
- Des milieux nutritifs pour les germes totaux et pour les coliformes dans des ampoules
- Des papiers filtres pour comptage bactérien
- Du nécessaire pour la filtration de l'échantillon sur le papier filtre : entonnoir, support poreux de filtre, réservoir sous le filtre et pompe pour créer le vide dans ce réservoir afin d'accélérer la filtration
- Alcool à brûler, brûleur à gaz et allumettes pour avoir un milieu aseptique
- Les prélèvements et mesures quantitatives sont faits avec les flacons en verre et pipettes de la mallette "HACH".

8.6.3. Programme et fréquence d'analyses

8.6.3.1. Temps de parcours d'une particule d'eau

- Longueur totale de parcours en colonne : 1,87 m
- Longueur de tuyau entre la sortie de la colonne et le té déversant d'eau filtrée : 2,5 m (diamètre du tuyau = 1 cm)

Pour $v_1 = 0,1$ m/h

- temps t_1 de passage dans la colonne :

$$t_1 = \frac{1,87}{0,1} = 18,7 \text{ heures}$$

- temps t_2 de parcours de la sortie au té déversant (temps mis pour atteindre le bidon de collecte)

$$t_2 = 0,25 \text{ heure} = 15 \text{ mn.}$$

- temps total $T_1 = 18,7 + 0,25 = 18,95 \approx 19$ heures

Pour $v_2 = 0,25$ m/h

$T_2 = 7,6$ heures = 7 heures 36 mn.

8.6.3.2. Programme d'analyses

8.6.3.2.1. Jour J

- A partir de 8 h : prélèvement et analyse d'eau brute
- A partir de 15 h : prélèvement et analyse d'eau filtrée pour les colonnes 3, 4, 7 et 8 ayant la vitesse $v_2 = 0,25$ m/h.

8.6.3.2.2. Jour (J + 1)

- A partir de 8 h : prélèvement et analyse de l'eau filtrée pour les colonnes 1, 2, 5 et 6 ayant la vitesse $v_1 = 0,10$ m/h.

8.6.3.3. Répartition dans la semaine

- Physico-chimie : lundi et mardi
- Bactériologie : mercredi et jeudi
- Les relevés hydrauliques (cotes piézométriques) ont lieu tous les jours.

N.B. Les échantillons prélevés pour les analyses physico-chimiques sont différents de ceux pour l'analyse bactériologique qui ne sont prélevés et analysés que 2 jours plus tard.

9. RESULTATS EXPERIMENTAUX

9.1. TABLEAU DES ANALYSES EFFECTUEES DU 27 MAI AU 13 SEPTEMBRE 1983

Les chiffres 1, 2, 3, 21 correspondent aux semaines d'analyse.

X = analyse faite mais non utilisée dans le rapport

0 = analyse non faite

● analyse faite et utilisée dans le rapport

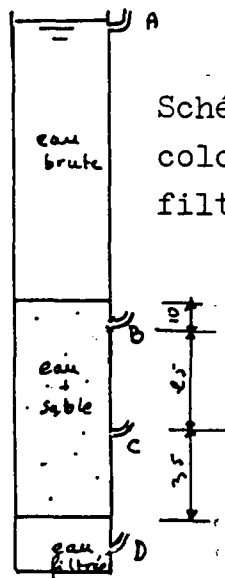
Paramètres	1er service				2ème service					3ème service *					4ème service				5ème service		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Turbidité	●	●	●	●	●	●	●	●	●	X	X	X	X	X	●	●	●	●	●	●	●
Couleur	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0	X	X	X	X	●	●	●	●	●	●	●
pH	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0	0	0	0	0	●	●	●	●	●	●	●
Alcalinité	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	●	●	●	0	0	0
Dureté tot.	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0	X	X	X	X	●	●	●	●	●	●	●
Dureté Ca.	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0	0	X	X	X	●	●	●	●	●	●	●
Dureté Mg.	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0	0	X	X	X	●	●	●	●	●	●	●
Sulfates	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0	X	X	X	0	●	●	●	●	●	●	●
Ammonium	●	●	●	●	●	●	●	●	●	X	0	0	0	0	●	●	●	●	●	●	●
Nitrites	●	●	●	●	●	●	●	●	●	X	0	0	0	0	●	●	●	●	●	●	●
Nitrates	●	●	●	●	●	●	●	●	●	X	0	0	0	0	●	●	●	●	●	●	●
Chlorures	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	●	●	●	●	●	●
Fer total	●	●	●	●	●	●	●	●	●	X	X	0	X	X	●	●	●	●	●	●	●
Manganèse	●	●	●	●	0	0	0	0	0	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ortho-PO ₄	●	●	●	●	●	●	●	●	●	X	X	X	X	X	●	●	●	●	●	●	●
Germes tot.	0	0	0	0	●	●	●	●	●	X	0	0	0	0	●	●	●	●	●	●	●
Colif. tot.	0	0	0	0	●	●	●	●	●	X	0	0	0	0	●	●	●	●	●	●	●

Tableau : 9.1.

* Batterie de la mallette HACH défectueuse

9.2. RAPPELS DES CARACTERISTIQUES DES COLONNES

- C₁ = vitesse $v_1 = 0,1$ m/h
sable malien SM₂ (gros sable)
- C₂ = vitesse v_1 ; sable malien SM₁ (sable fin)
- C₃ = vitesse $v_2 = 0,25$ m/h; sable malien SM₁
- C₄ = vitesse v_2 ; sable malien SM₂
- C₅ = vitesse v_1 ; sable suisse SS
- C₆ = vitesse v_1 ; sable suisse SS
- C₇ = vitesse v_2 ; sable suisse SS
- C₈ = vitesse v_2 ; sable suisse SS



Schémas d'une
colonne de
filtration.

Piézomètres :

A = eau surnageante

B = 10 cm en-dessous de la surface
du sable

C = milieu du lit filtrant

D = sortie du filtrat

9.3. COLMATAGE DES COLONNES

9.3.1. Pertes de charges totales

Elles correspondent à la différence de niveau entre les piézomètres A et D (A-D). Le tableau 9.2. donne ces pertes de charges selon les colonnes et la durée de service pendant le 1er service allant du 27 mai au 13 juin 1983. La turbidité moyenne de l'eau brute était de 30 UF avec des pointes dépassant 80 UF en cas d'orage.

Durée de service en jours	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
1	1,0	2,5	6,5	4,2	2,8	2,8	7,0	7,0
2	1,1	3,2	12,0	5,7	3,9	3,9	11,8	12,2
4	3,7	8,8	18,0	7,5	10,0	10,4	18,0	20,1
8	6,2	25,8	50,8	11,0	30,5	29,6	48,8	52,2
9	8,5	29,8	60,9	17,5	36,5	35,9	57,8	59,9
10	11,3	37,2	72,0	24,0	42,8	42,2	67,0	69,3
11	14,8	45,1	84,2	30,7	49,6	48,2	76,5	78,8
12	17,3	51,2		36,6	55,7	54,4		
13	21,1	57,5		42,8	62,2	61,0		
14	24,0	64,2		49,2	68,9	67,7		
15	27,0	71,8		55,6	76,7	75,5		
16	30,1	79,4		62,0				
17	33,1			68,4				
18	35,9			75,7				

Tableau 9.2. : Pertes de charge totales en cm, 1er service

Le tableau 9.2. et les graphiques 9.1., 9.2., 9.4. et 9.5 permettent de faire une comparaison entre les colonnes :

- On remarque qu'il n'y a pratiquement pas de différence dans l'évolution du colmatage
 - . entre colonnes identiques à tout point de vue (C₅ et C₆ par exemple)
 - . entre colonnes de même vitesse et même granulométrie, mais d'origine différente (C₃ et C₇ par exemple).

- Pour des eaux de surface courantes de turbidité voisine de 30 UF, la durée de service est relativement faible :
 - . de l'ordre de 10 jours pour la vitesse v_2 et le sable fin
 - . de l'ordre de 2 semaines pour la vitesse v_1 et le sable fin ainsi que pour la vitesse v_2 et le sable grossier
 - . environ un mois pour la vitesse v_1 et le gros sable
- Lorsque la turbidité de l'eau brute descend autour de 10 UF (graphique 9.2.), les durées de service sont respectivement de 2 semaines et 3 semaines pour les 2 premiers cas.

9.3.2. Pertes de charge partielles

- Entre A et B (A-B)
- Entre A et C (A-C)
- Entre A et D (A-D)

Le tableau 9.2. donne la valeur de ces pertes de charge partielles dans 3 colonnes sélectionnées représentant les cas minimum, moyen et maximum.

Durée de service en jours	C ₂			C ₃			C ₄		
	A-B	A-C	A-D	A-B	A-C	A-D	A-B	A-C	A-D
1	0,3	1,3	2,5	0,8	2,9	6,5	0,6	1,9	4,0
2	0,9	2,0	3,2	5,7	8,0	12,0	2,2	3,6	5,7
4	6,5	7,6	8,8	12,3	14,4	18,0	3,8	5,3	7,5
8	23,5	24,6	25,8	47,5	48,6	50,8	7,1	8,7	11,0
11	42,8	43,9	45,1	78,4	80,6	84,2	26,8	28,4	30,7
15	69,4	70,5	71,8				51,6	53,3	55,6
18							71,7	73,4	75,7

Tableau 9.3. : Pertes de charge partielles en cm, 1er service

Le tableau 9.3. et les graphiques 9.7. et 9.8. montrent que l'essentiel des pertes de charge se déroule sur la surface du sable au niveau du film biologique = (A-B) presque égal à (A-D) après 4 jours de service.

Les figures 9.9. et 9.10. montrent que l'augmentation de la perte de charge à partir de 10 cm en-dessous de la surface du sable est négligeable et est d'autant plus faible par unité de longueur que l'on descend en profondeur de la couche de sable.

9.4. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

9.4.1. Turbidité : exprimée en UF (unités formaziennes).
Norme CEE 1975 = 5 UF.

Durée de service en jours	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
1	6	4	6	8	4	3	6	6
4	0	2	4	4	2	2	4	3
11	2	2	1	2	0	0	5	0

Tableau 9.4. : Turbidité des filtrats en UF, 1er service

Le tableau 9.4. et les graphiques 9.11. et 9.12. montrent que la turbidité de l'eau est pratiquement éliminée par tous les filtres depuis leur mise en service, aussi élevée que soit la turbidité de l'eau brute.

9.4.2. Couleur : exprimée en unités platino-cobalts
Norme CEE 1975 = 20 U Pt. CO.

Comme la turbidité, la couleur est aussi presque entièrement éliminée dans tous les cas de filtres depuis la mise en service. Ceci est probablement dû au fait que la couleur de l'eau brute provient des particules responsables de la turbidité et donc éliminée avec celles-ci (voir graphiques 9.13. et 9.14.).

9.4.3. Température : Norme CEE 1975 = 25°C

La température de l'eau recueillie est fonction de celle de l'air ambiant de la salle; le dispositif de sortie de l'eau filtrée ne permettant pas d'en mesurer la température avant qu'il n'y ait équilibre avec l'atmosphère de la salle.

9.4.4. pH : La valeur du pH est restée quasiment constante; une légère baisse de 0,1 à 0,2 unités constatée dans certaines mesures pourrait provenir d'erreurs de dosages ou d'appréciations.

9.4.5. Dureté totale : exprimée en degrés français $1^{\circ}\text{F} = 10 \text{ mg/l Ca Co}_3$
Norme CEE 1975 = 35°F

Le tableau 9.5. donne la valeur de la dureté totale en degrés français mesurée pendant le 1er service des filtres. La dureté de l'eau brute était comprise entre 24,5 et 25 $^{\circ}\text{F}$.

Durée de service en jours	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₇
2	24,5	25,0	24,5	24,0	25,0
8	25,0	24,5	24,5	26,0	25,5
13	25,0	24,5	25,0	24,8	25,2

Tableau 9.5. : Dureté du filtrat en d $^{\circ}$ français

Le tableau 9.6. donne la valeur de la dureté totale de chaque filtrat pour différentes valeurs de l'eau brute tirées des analyses effectuées durant ces expériences.

Durée de service en jours	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
33,8	29,0	28,6	30,0	31,5	28,5	28,6	30,5	30,0
29,4	25,0	27,2	27,2	26,0	25,0	26,0	27,0	26,5
28,5	26,2	27,0	27,0	27,5	28,0	28,0	28,0	27,5
25,0		25,0	24,5	25,0	24,8	23,9	25,2	24,7

Tableau 9.6. : Dureté totale en d $^{\circ}$ français

L'observation des tableaux 9.5. et 9.6. et de leurs graphiques 9.15. et 9.16. montre que pour des valeurs de dureté de l'eau brute supérieures à 28°F, il y a une légère diminution de la dureté totale et qu'à partir de 25°F, elle reste pratiquement constante. Les courbes qui se confondent pour toutes les colonnes en-dessous de 25°F (graphique 9.16.) pourraient donc être prolongées par extrapolation suivant les trait-tillés.

9.4.6. Alcalinité : exprimée en mg/l de Ca Co₃.

Les résultats des analyses effectuées montrent que l'alcalinité non plus ne varie pas dans la concentration où elle se trouve, dans l'eau brute utilisée. La valeur de l'alcalinité à la phénol-phtaléïne étant nulle, l'alcalinité totale est égale à celle du méthyl-orange. Ce qui veut dire que l'alcalinité est due seulement à des hydrogénocarbonates encore appelés bicarbonates (HCO₃⁻)

Paramètres	Eau brute	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
Dureté totale	250	250	245	245	260	255	255	260
Alcalinité	195	190	185	220	200	190	190	195

Tableau 9.7. : Comparaison de l'alcalinité en mg/l de Ca Co₃ et la dureté totale en mg/l de Ca Co₃
à titre d'exemple, résultats d'analyses du 15.08.83

La dureté totale étant supérieure à l'alcalinité, il en ressort que cette dernière est due seulement à des bicarbonates de calcium et de magnésium puisque les composés de sodium et de potassium ne participent pas à la dureté. On peut donc penser que les filtres lents n'éliminent pas les substances alcalines naturelles des eaux de surface qui sont en solution. Ce qui explique la nécessité d'utilisation de produits coagulants dans les usines de traitement.

9.4.7. Sulfates : exprimés en mg/l de SO₄
Norme CEE 1975 = 250 mg/l

Durant tous les essais, la concentration en ions sulfates est restée identique entre l'eau brute et le filtrat. Ceci est probablement dû à la faiblesse de la teneur qui est de l'ordre de 40 à 45 mg/l.

9.4.8. Chlorures : exprimés en mg/l d'ions Cl^-
Norme CEE 1975 = 200 mg/l

Comme les sulfates, la concentration très faible de 10 à 20 mg/l en chlorures de l'eau brute est peut-être à l'origine de sa constance après la traversée des filtres.

9.4.9. Les ions ammonium : exprimés en mg/l de NH_4
Norme CEE 1975 = 0,5 mg/l

Le tableau 9.8. donne en exemple le résultat des analyses effectuées pendant le 2ème service des colonnes de filtration (du 23 juin au 15 juillet).

Durée de service en jours	Eau brute	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
1	0,14	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05
6	0,16	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,04
13	0,20	0,01	0,04	0,04	0,02	0,01	0,04	0,02

Tableau 9.8. : teneur ions NH_4^+ en mg/l

Ce tableau montre donc que l'élimination des ions NH_4^+ est effective depuis le début du service et ne dépend presque pas de la durée.

Le graphique 9.20. tracé à partir des résultats des analyses effectuées durant les expériences montre que pour les concentrations en ions ammonium de l'eau brute inférieures à 1 mg/l rencontrées dans ces analyses, les filtres lents les réduisent à environ 0,04 mg/l soit complètement dans tous les cas de colonnes.

9.4.10. Les Nitrites : exprimés en mg/l d'ions NO_2^-
Norme CEE 1975 = 0,1 mg/l

Le tableau 9.9. donne les concentrations en nitrites en mg/l des filtrats pour différentes concentrations de l'eau brute rencontrées durant les essais.

Date	Eau brute	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
18.08	0,25	0,02		0,04	0,03	0,04		
4.07	0,20	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
28.06	0,16	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,04
12.07	0,10	0,05		0,04	0,06	0,02		

Tableau 9.9. : teneurs en NO₂⁻ en mg/l

Comme les ions ammonium, les nitrites sont complètement éliminés pour les concentrations dans l'eau brute inférieures à 0,30 mg/l rencontrées dans ces expériences.

9.4.11. Nitrates : exprimés en mg/l de NO₃⁻
Norme CEE 1975 = 50 mg/l

Le tableau 9.10. donne les résultats des analyses effectuées le 6 juin à titre d'exemple.

Paramètres	Eau brute	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
NH ₄	0,52	0,04	0,04	0,04	0,05	0,02	0,02	0,04	0,00
NO ₂	0,18	0,06	0,02	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02
NO ₃	11	12,3	13,6	13,6	12,3	13,6	13,6	13,6	13,6

Tableau 9.10. : valeurs en mg/l

Il y a donc formation de NO₃ (nitrates) au détriment des ions NH₄⁺ et NO₂⁻ par oxydation ne dépendant pas forcément de la vitesse de filtration ou de la granulométrie.

9.4.12. Fer total : exprimé en mg/l de Fe.
Norme CEE 1975 = 0,2 mg/l

Le graphique 9.21. tracé à partir des résultats représentatifs que sont ceux des analyses du 4ème service des filtres (du 9 au 26 août) montre qu'après un jour de service, le filtre atteint sa maturité d'élimination du fer.

Ce graphique (9.21.) et le graphique 9.22. tracé à partir du résultat de toutes les analyses effectuées montrent que pour une concentration en fer inférieure ou égale à 1 mg/l rencontrée dans cette expérience, les filtres lents la réduisent jusqu'à environ 0,04 mg/l dans tous les cas de vitesse, de granulométrie et d'origine de sable étudiés.

9.4.13. Orthophosphates : exprimés en mg/l de PO_4^-
Norme CEE 1975 = 0,3 mg/l de P,
soit 0,95 mg/l de PO_4^- .

Le graphique 9.23. tracé à partir des résultats des analyses du 1er service des colonnes montre qu'à la première mise en service, l'élimination des phosphates est très importante (de l'ordre de 60 à 85%, selon la vitesse et la granulométrie). Après 4 jours de service, le sable semble se saturer en ions PO_4^- et laisse passer pratiquement 80 à 90% de ces ions contenus dans l'eau brute.

Le graphique 9.24. tracé à partir du 2ème service confirme ceci et aussi le fait que le nettoyage de la couche superficielle du sable n'améliore que très peu et pour une courte durée l'élimination des phosphates.

9.5. PARAMETRES BACTERIOLOGIQUES

9.5.1. Réduction des germes totaux : exprimés en nombre par 10 ml d'eau
Norme CEE ?

Durée de service en jours	Eau brute	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
1	1500	200	180	250	180	180	220	210
6	1400	30	30	50	20	10	40	30
13	1300	10	15	20	5	8	10	15
17	1100	10	15	20	5	8	10	15
21	1000	5		10	5	8		

Tableau 9.11. : Germes totaux en nombre par 10 ml (2ème service)

On remarque sur ce tableau et son graphique 9.26. qu'après 5 jours de service, les filtres sont à maturité biologique dans tous les cas de colonnes et et réduisent de 95% les germes totaux indicateurs de pollution.

Les résultats des analyses faites lors de cet essai prouvent que, parvenus à maturité, les filtres lents dans tous les cas de vitesse et de granulométrie réduisent presque totalement les germes totaux quelle que soit leur concentration dans l'eau brute.

9.5.2. Elimination des coliformes totaux : exprimés en nombre dans 100 ml d'eau
Norme CEE 1975 = 5 dans 100 ml

Le graphique 9.27. tracé à partir des résultats du 2ème service des colonnes montre qu'à la mise en service, la réduction des coliformes est déjà de plus de 95% et qu'après 5 jours de service environ, les filtres sont à maturité due au développement du film biologique à la surface du sable.

Ainsi dans tous les cas de colonnes, les germes coliformes sont éliminés presque complètement quelle que soit leur concentration dans l'eau brute comme on peut le lire dans le tableau 9.12. ci-dessous.

Date	Eau brute	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
18.08	12000	< 1		3	2	1		2
22.08	7800	2		3	< 1	< 1		
4.07	7000	< 1	< 1	5	2	2	< 1	3
8.07	6500	< 1	2	4	1	< 1		

Tableau 9.12. : nombre de coliformes totaux par 100 ml

On remarque que la colonne C₄ avec une vitesse de 0,25 m/h et un sable grossier donne des résultats moins satisfaisants, à la limite de la norme CEE 1975.

10. CONCLUSION

10.1. QUALITE DE L'EAU

En se référant aux résultats obtenus dans ces expériences, on peut énoncer avec peu de risques qu'avec une vitesse inférieure à 0,3 m/h dans les filtres lents :

- la turbidité est presque complètement éliminée depuis la mise en service du filtre, aussi trouble que soit l'eau à filtrer
- la couleur est aussi éliminée de la même manière surtout lorsqu'elle est due aux matières responsables de la turbidité
- le fer est presque entièrement éliminé (jusqu'à environ 0,05 mg/l) pour une teneur à l'origine voisine de 1 mg/l dans l'eau à filtrer
- les filtres lents semblent inefficaces pour l'élimination des phosphates; on a constaté dans ces expériences qu'à partir d'une eau brute ayant une teneur moyenne de 0,8 mg/l de PO_4 , la diminution était d'à peine 10% de cette teneur
- le pH semble insensible à l'action de la filtration lente
- les filtres lents semblent très efficaces dans la destruction des ammoniums et des nitrites; la concentration de ces ions qui était au maximum de 1 mg/l et 0,3mg/l respectivement dans l'eau brute est ramenée à environ 0,04 mg/l
- ils s'avèrent inefficaces pour l'élimination des substances alcalines naturelles de l'eau (hydrogène-carbonates)
- les filtres lents sont très bien indiqués pour le traitement biologique, car ils réduisent les germes totaux de 90% au début de service à 95% après leur maturité par formation à la surface du sable de la couche biologique après 5 à 6 jours de service; les germes coliformes sont eux aussi éliminés de 95% au début du service à environ 99,9% à la maturité du filtre.

Compte tenu de la faiblesse de leurs concentrations dans l'eau brute utilisée dans ces expériences, les résultats obtenus ne permettent pas de juger de l'efficacité des filtres lents dans l'élimination des chlorures et des sulfates et surtout du manganèse qui n'était pas décelable dans l'eau brute.

L'élimination des nitrites et des ammoniums s'accompagne de formation de nitrates dont la valeur dans ces essais était d'environ 13,6 mg/l. Il serait intéressant de déterminer jusqu'à quelle teneur ces nitrates peuvent se former et persister dans le filtrat.

10.2. HYDRAULIQUE DE LA FILTRATION LENTE

Ces expériences ont montré que pour une turbidité d'environ 30 UF qui est une valeur minimale pour les eaux de surface agitées, la durée de service pour 80 cm de charge d'eau et 70 cm de sable filtrant est d'environ :

- . 10 jours pour une vitesse de 0,25 m/h et un sable fin
- . 15 jours pour une vitesse de 0,25 m/h et un sable grossier
- . 20 jours pour une vitesse de 0,1 m/h et un sable fin
- . 25 jours pour une vitesse de 0,1 m/h et un sable grossier

pendant que pour obtenir de bons résultats dans la qualité bactériologique, il faut environ 5 jours pour permettre au film biologique de se former.

Il en ressort qu'on ne disposera plus que de 5 à 10 jours de service avec une qualité acceptable.

Ce qui se traduit dans la pratique par des arrêts trop fréquents pour le nettoyage des filtres d'où des charges d'exploitation trop élevées.

On pourrait penser qu'en augmentant la charge d'eau surnageante sur le filtre, on pourrait prolonger la durée de vie du filtre. Mais l'observation de l'allure des courbes de colmatage montre que par extrapolation, la durée de service pour un filtre de sable fin avec 0,1 m/h passerait de 20 jours pour une charge de 0,8 m à 21 jours pour 1,0 m et 25 jours pour 2,0 m pendant qu'avec 0,25 m/h elle passerait respectivement de 10 jours à 11 et 14 jours.

La solution ne pourra donc résider dans l'augmentation de la charge d'eau engendrant plus d'investissements dans la construction des bassins de filtration, mais plutôt dans l'amélioration de la turbidité de l'eau brute avant les filtres par un prétraitement. Ce dernier peut être fait par décantation ou par filtration très rapide (dégrossissante) ou les 2 en série pour ramener la turbidité à moins de 10 UF afin de laisser à la filtration lente un rôle presque exclusivement biologique.

10.3. AUTRES REMARQUES

Vu leur simplicité d'exécution et d'entretien, les filtres lents semblent bien indiqués dans les techniques de traitement d'eau dans les pays défavorisés économiquement, leur inconvénient majeur qui réside dans la nécessité de grands espaces n'étant pas un handicap dans ces pays, surtout lorsqu'il s'agit d'alimenter en eau des zones rurales.

Cependant, il ne faut pas perdre de vue que aussi complet que le traitement biologique soit dans les filtres lents, il persiste toujours dans l'eau quelques substances organiques qui favoriseraient le développement ultérieur de germes surtout lorsque l'eau circule dans un réseau de distribution exposé à des contaminations comme c'est souvent le cas dans les pays économiquement défavorisés. La filtration lente devra alors être accompagnée d'une stérilisation par addition de composé chloré par exemple afin de prévenir ces éventuelles contaminations. On sait que si la dose de chlore nécessaire pour stériliser une eau dans le système classique avec filtration rapide est de 0,8 mg/l; les 0,6 mg/l doivent neutraliser les corps organiques, les ammoniums, les ions ferreux et ferriques, etc. et seulement 0,2 mg/l de chlore résiduel pour maintenir la stérilisation.

Les filtres lents éliminant une très forte proportion de ces corps et substances et parfois même complètement, la dose nécessaire du produit stérilisant sera beaucoup plus faible.

Dans un projet de traitement il est absolument indispensable d'effectuer des expériences sur au moins une année en étudiant toutes les alternatives possibles de vitesses, granulométries, épaisseurs du lit filtrant, prétraitements nécessaires aussi bien du point de vue qualité qu'économique et social pour prendre des décisions et concevoir les ouvrages.

11. REMERCIEMENTS

Je remercie Messieurs FALQUET,
REVELLY,
PASCHE,
ROTHEN,

et avec eux tout le personnel du Service des Eaux de Lausanne en place à Lutry, pour leurs conseils. Je leur exprime ma profonde gratitude pour avoir mis à ma disposition l'essentiel du matériel d'expérimentation.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur MAULAZ et le personnel de la STEP de Vidy, ainsi qu'au Syndic de la Commune de Saint-Sulpice, qui ont mis à ma disposition la station de relevage de la Chamberonne ayant servi de local pour les expériences.

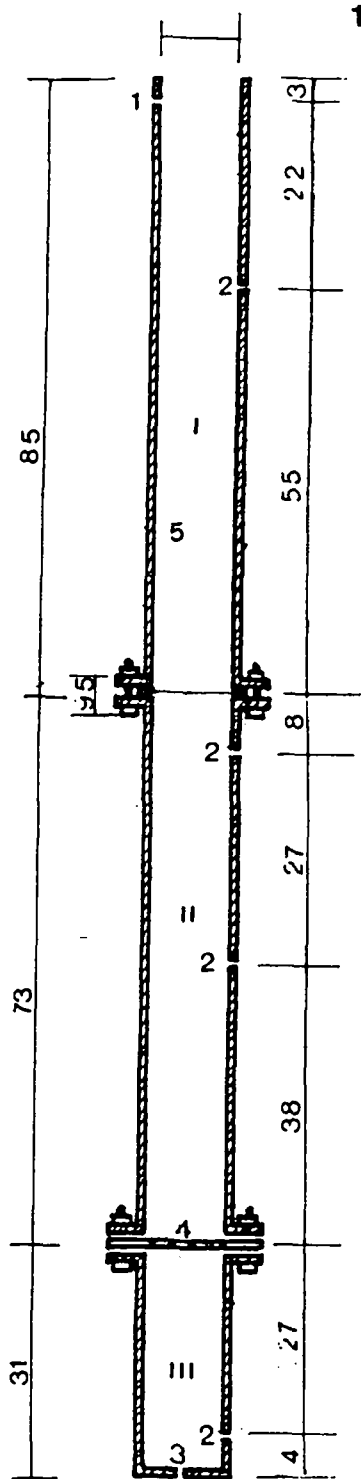
Mes remerciements enfin au Professeur L.Y. MAYSTRE et à Monsieur Thierry ROTHEN qui ont directement participé à ce travail et avec eux tout le personnel de l'IGE de l'EPFL avec qui j'ai passé cette année.

Lausanne, octobre 1983

Amadou Hama MAIGA

fig : 1 Coupe longitudinale d'une colonne.

1:10



- I: déversoir.
- 2: orifices pour piézomètres.
- 3: sortie eau filtrée.
- 4: suport poreux du sable.
- 5: colonne.
- 6: joint en caoutchouc.
- I-: zone eau brute.
- II-: zone de sable+eau.
- III-: zone eau filtrée.

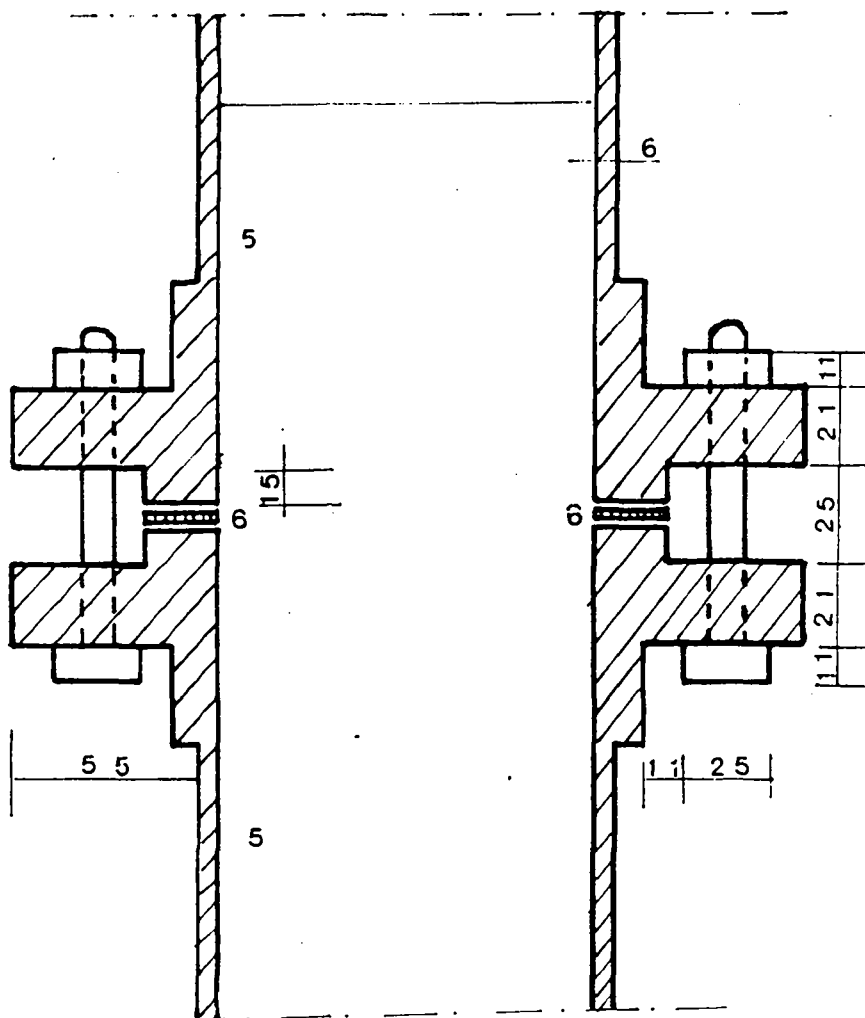
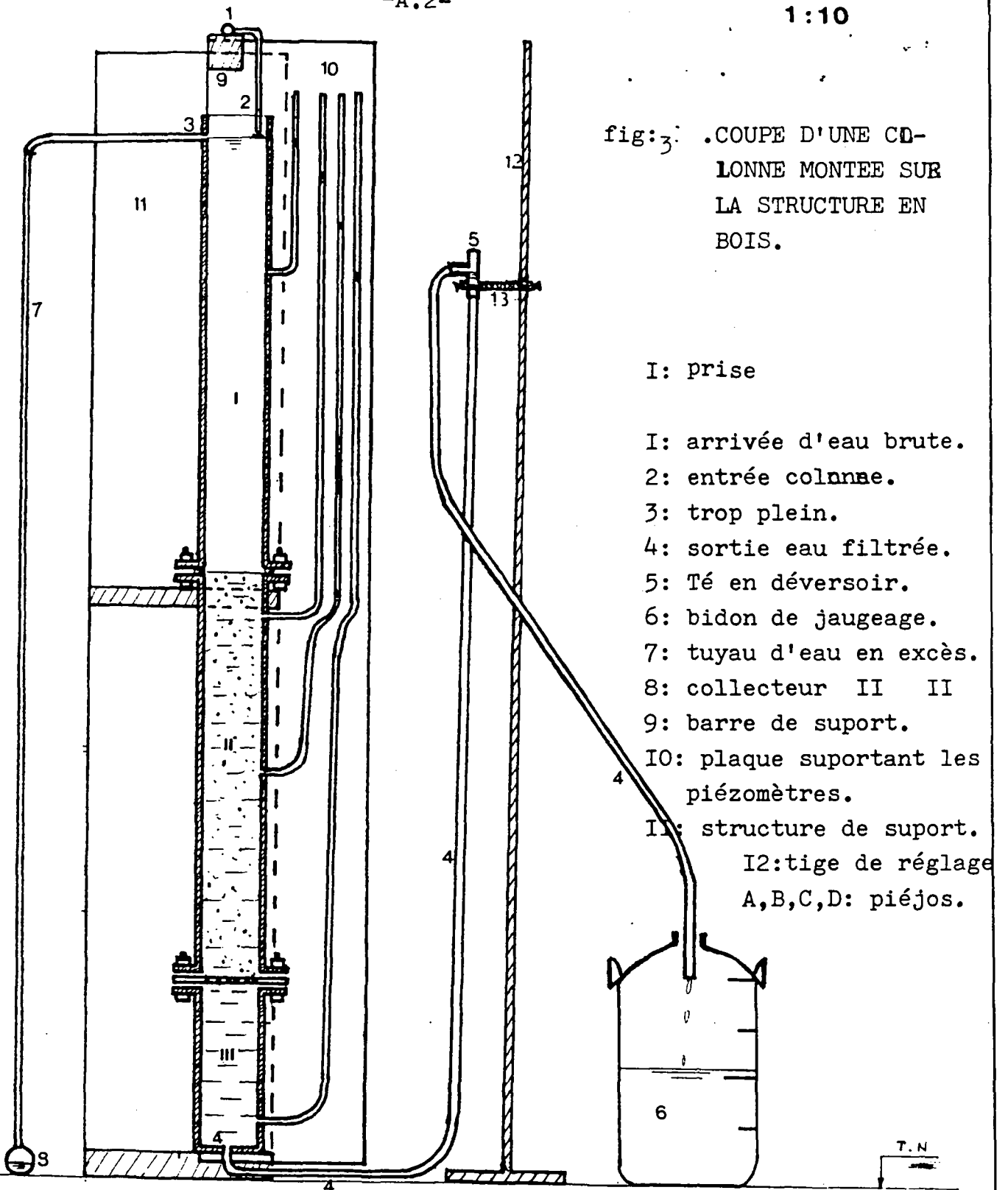


fig : 2

1:2

Détail bride d'assemblage.

fig:3: .COUPE D'UNE COLONNE MONTÉE SUR LA STRUCTURE EN BOIS.



I: prise

I: arrivée d'eau brute.

2: entrée colonne.

3: trop plein.

4: sortie eau filtrée.

5: Té en déversoir.

6: bidon de jaugeage.

7: tuyau d'eau en excès.

8: collecteur II II

9: barre de support.

10: plaque suportant les piézomètres.

11: structure de suport.

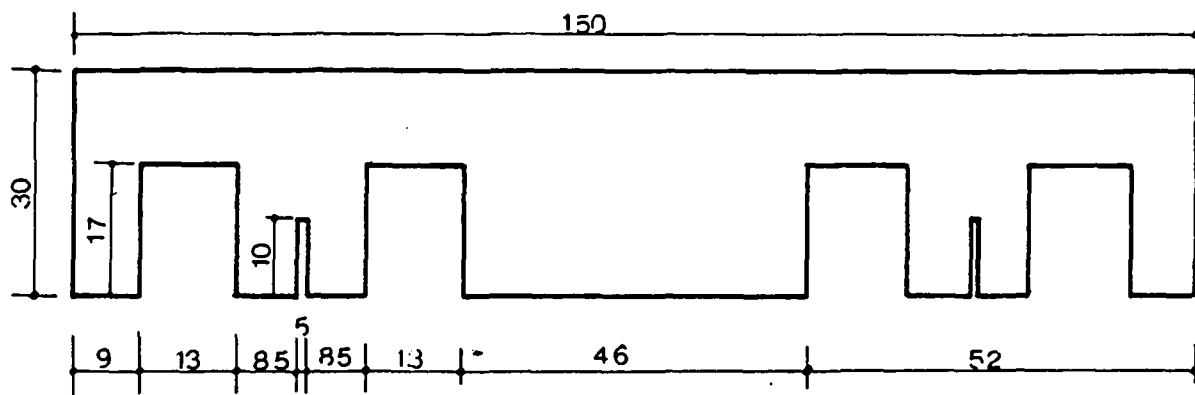
12:tige de réglage

A,B,C,D: piéjos.

T.N

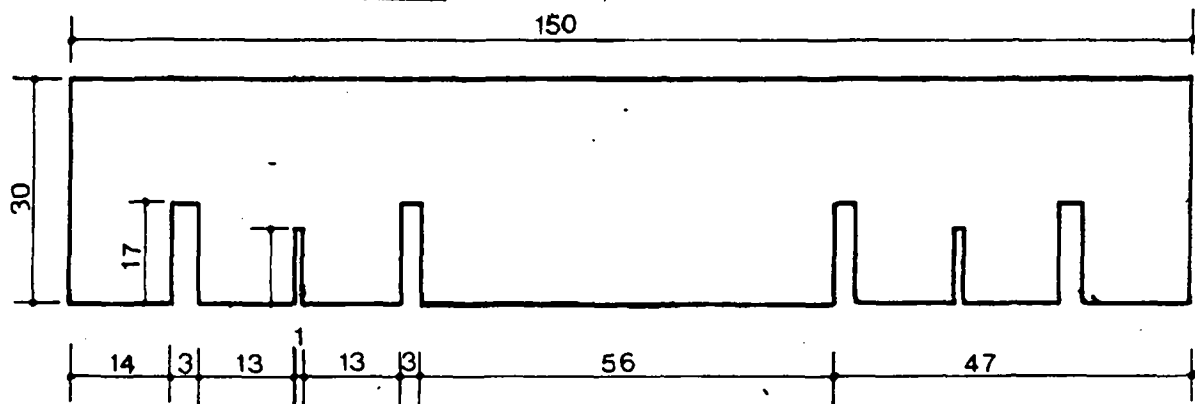
Vue en plan de la traverse centrale

fig 4a



Vue en plan de la traverse de base.

fig 4b : Vue en plan de la traverse de base.



-A.4-

Détail A.

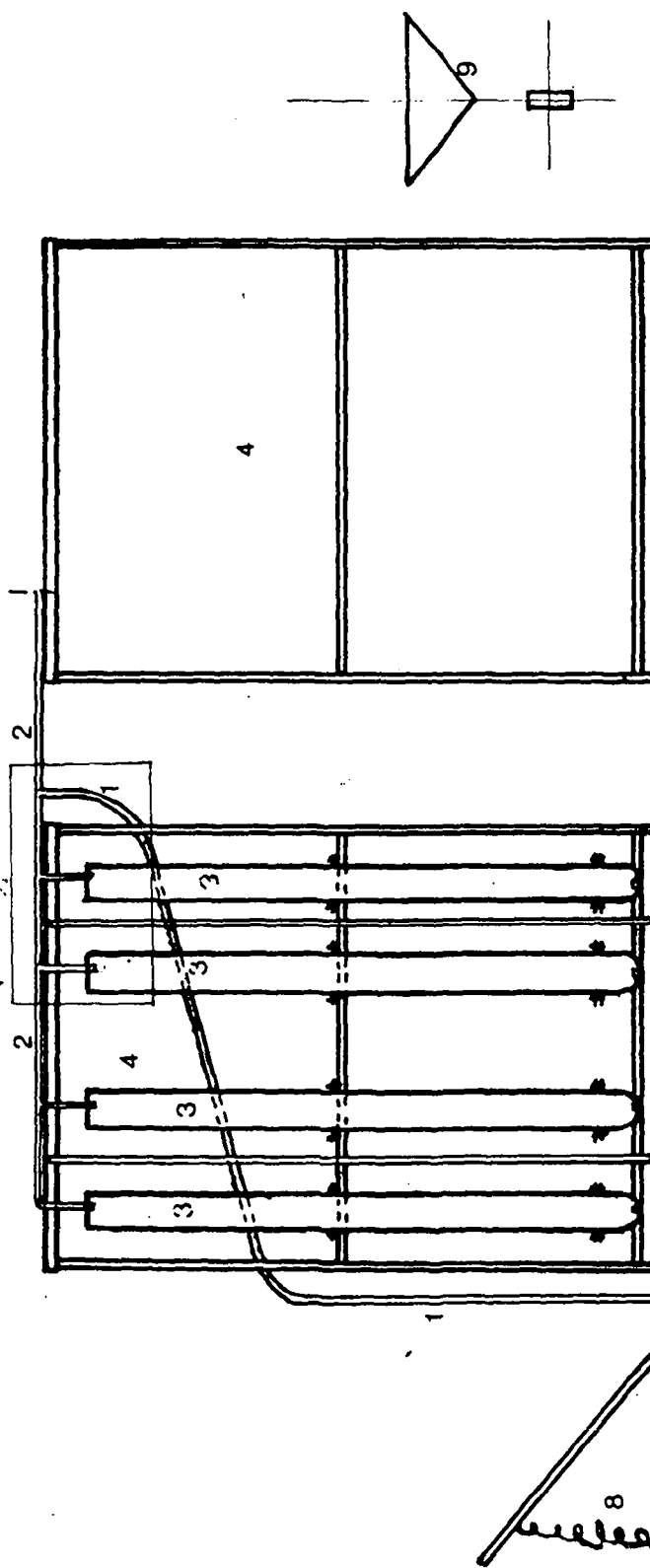


fig : 5
 :25
 le en
 ce des
 installa-
 ns.

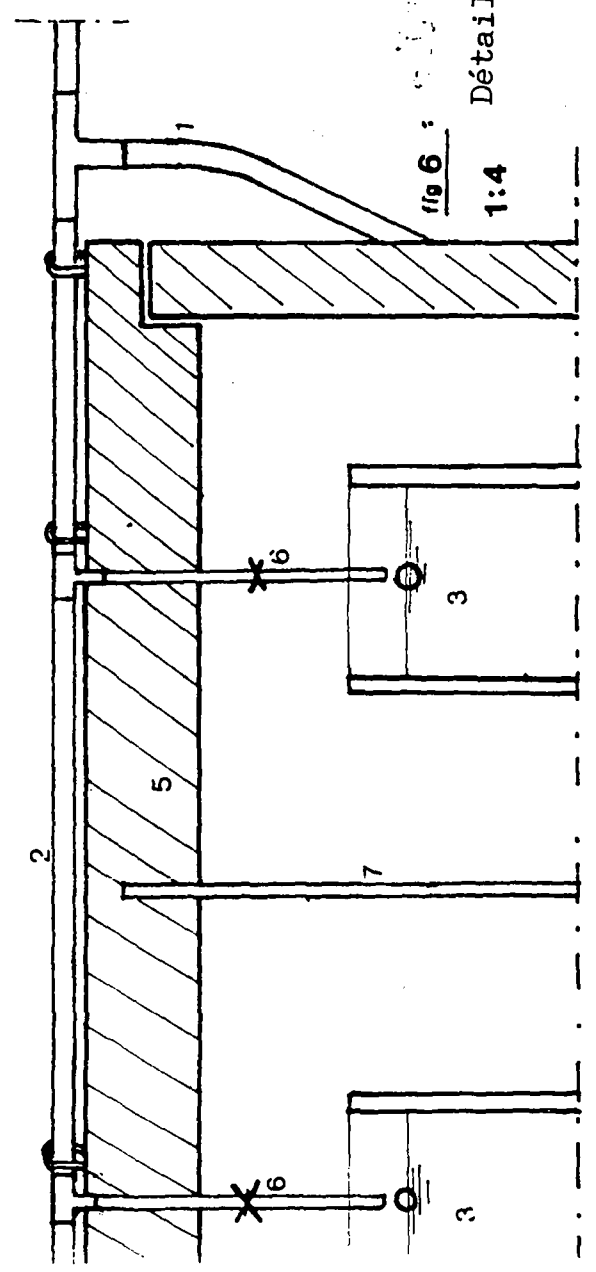
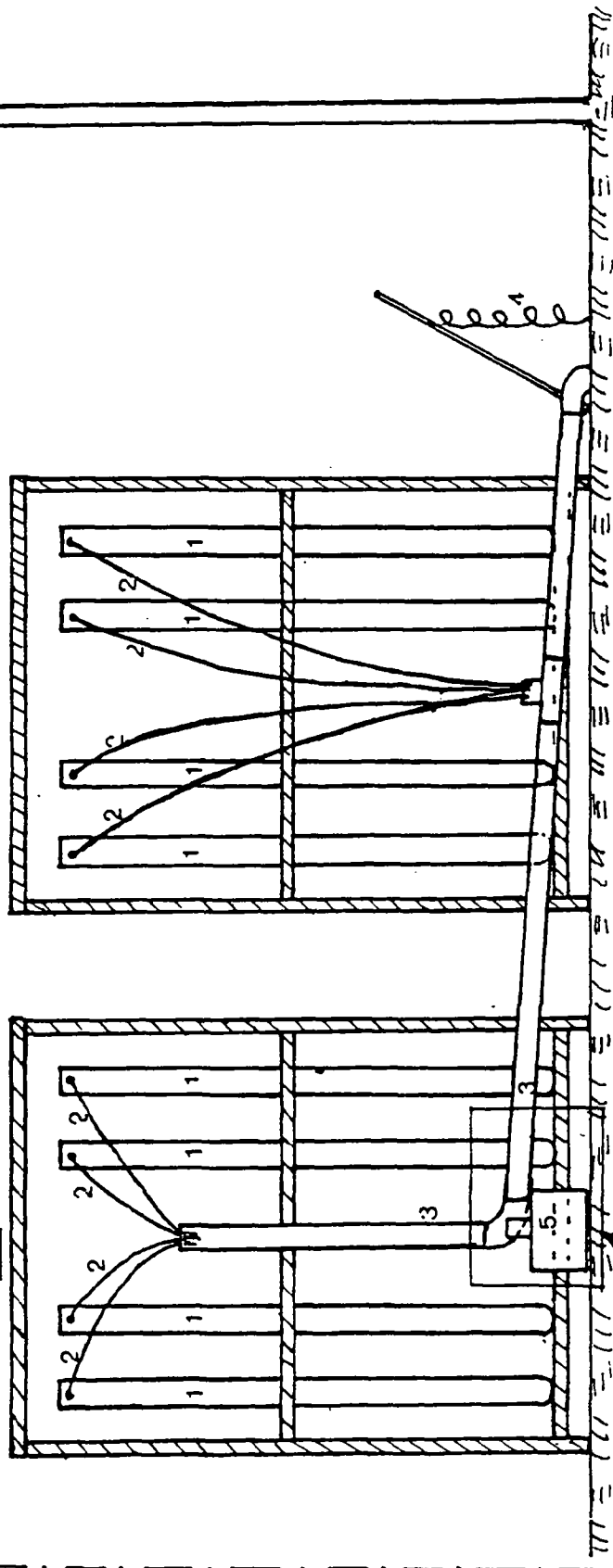


fig 6 :
 1:4 Détail: A.

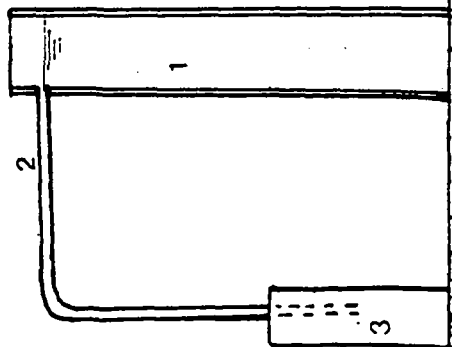
- 1: tuyau de refoulement.
- 2: tuyau de distribution.
- 3: colonnes.
- 4: structure de support.
- 5: barre de support.
- 6: alimentation colonnes.
- 7: contre-plaqué pour piézos

-A.5-
Vue de derrière des installations.

fig:7 1:25

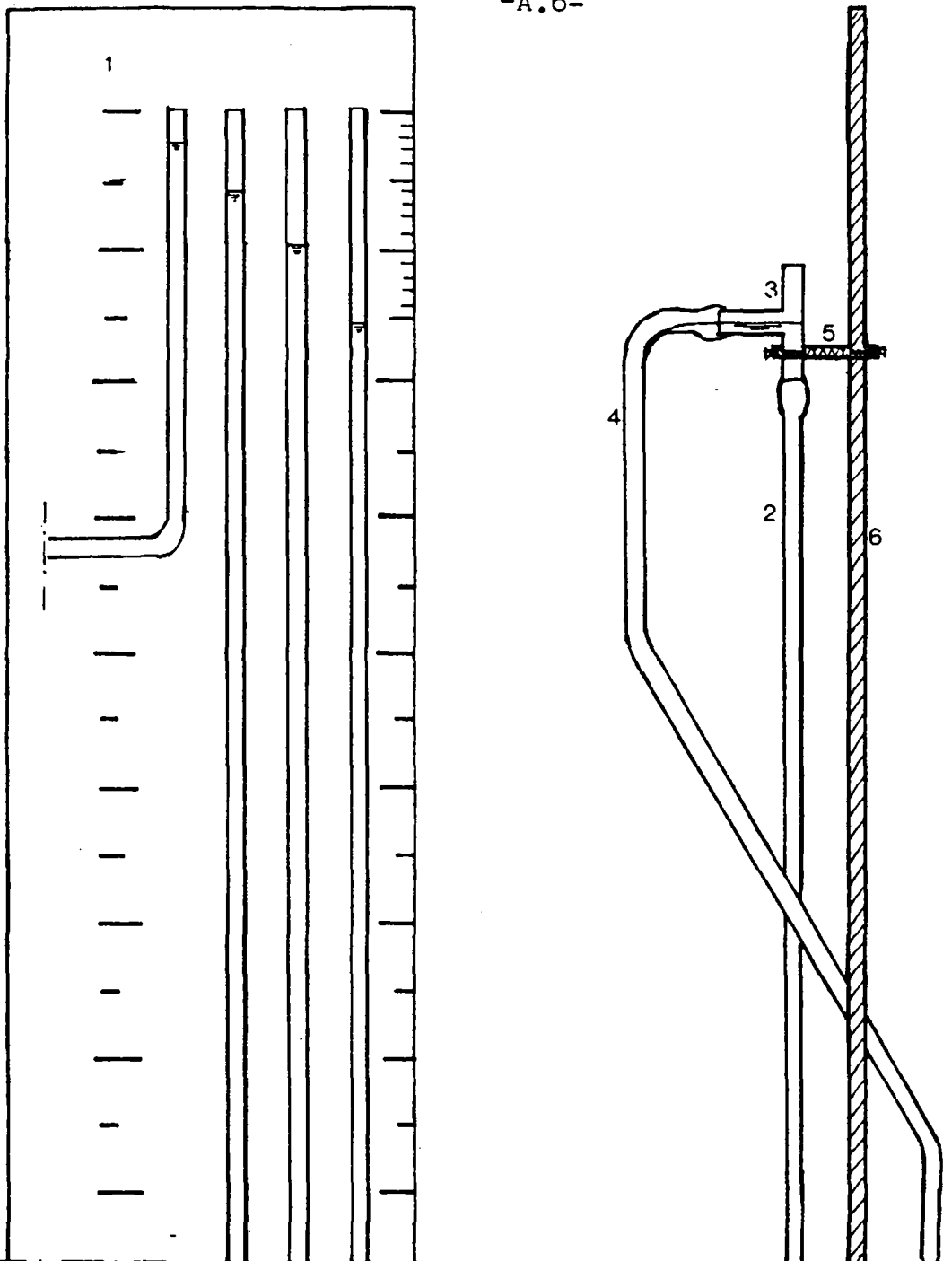


Détail B.



- I: colonnes.
- 2: tuyaux d'eau déversée.
- 3: collecteur d'eau en excès.
- 4: trappe.
- 5: support en bois pour la pente du collecteur.

E. 1:10
Détail B.

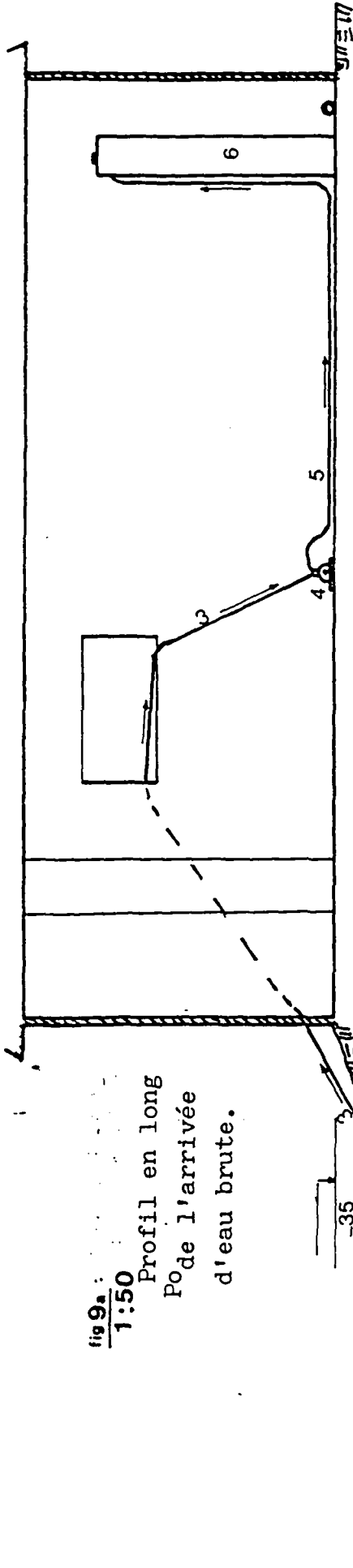
**fig:8**

1:5 Piézomètres et régulation
du débit.

- 1: contre-plaqué supportant les piézomètres.
- 2: remontée d'eau filtrée.
- 3: té déversant.
- 4: descente d'eau filtrée.
- 5: pince de support.
- 6: tige de support.
- A,B,C,D: piézomètres.

fig 9a :
1:50

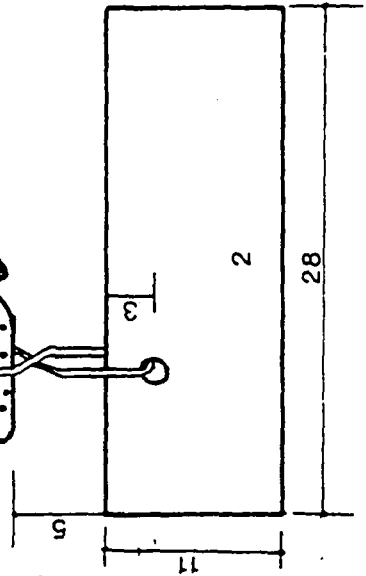
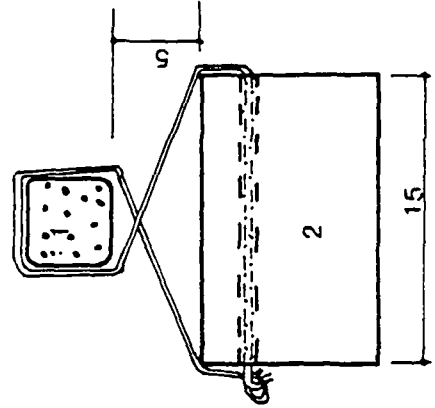
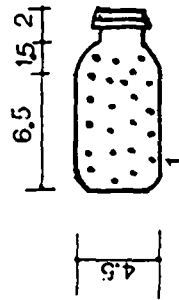
Profil en long
Po de l'arrivée
d'eau brute.



- I: crépine.
- 2: pierre de support.
- 3: tuyau d'aspiration.
- 4: pompe.
- 5: tuyau de refoulement.
- 6: support en bois des colonnes.

fig 9b

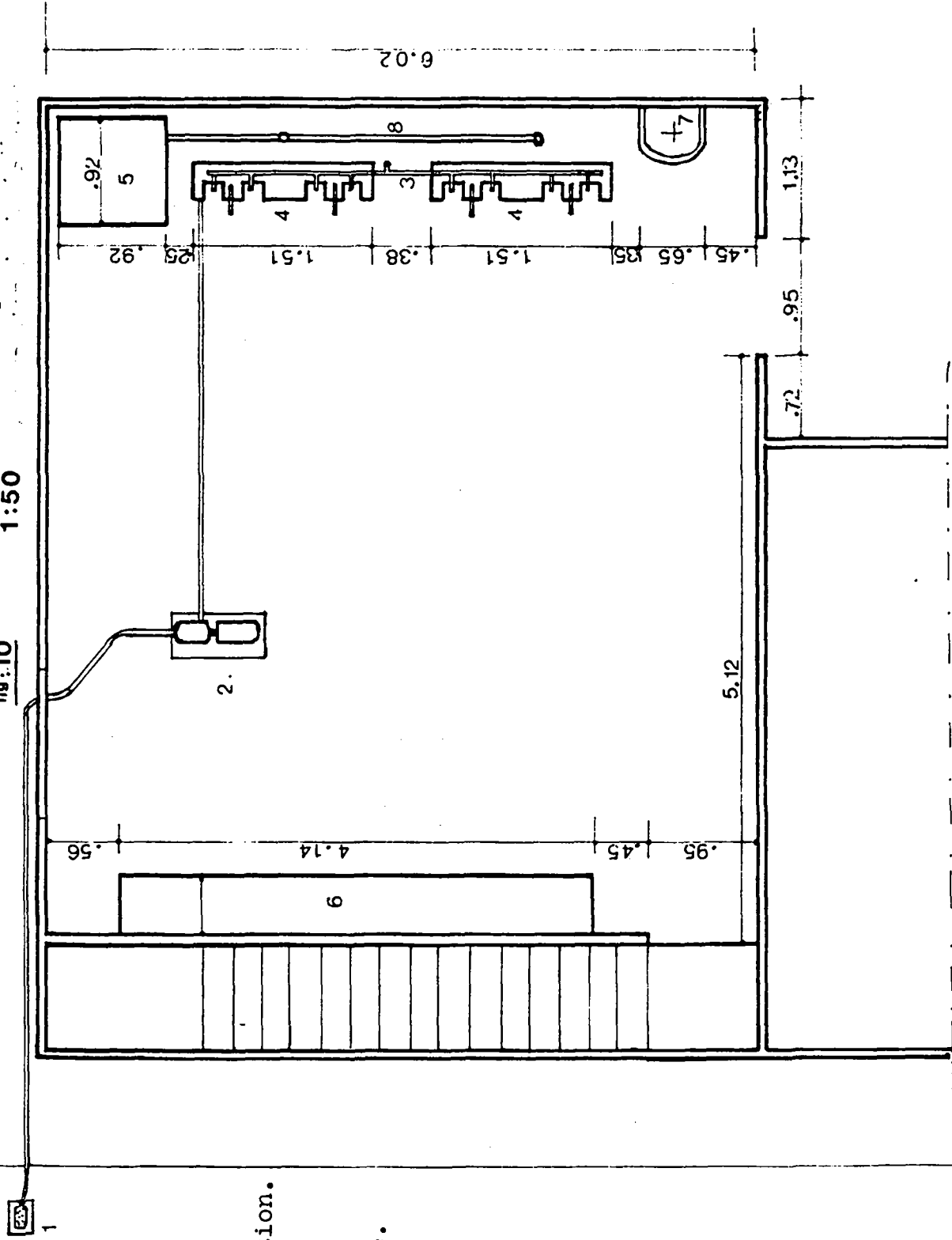
1:4
Détail-crépine



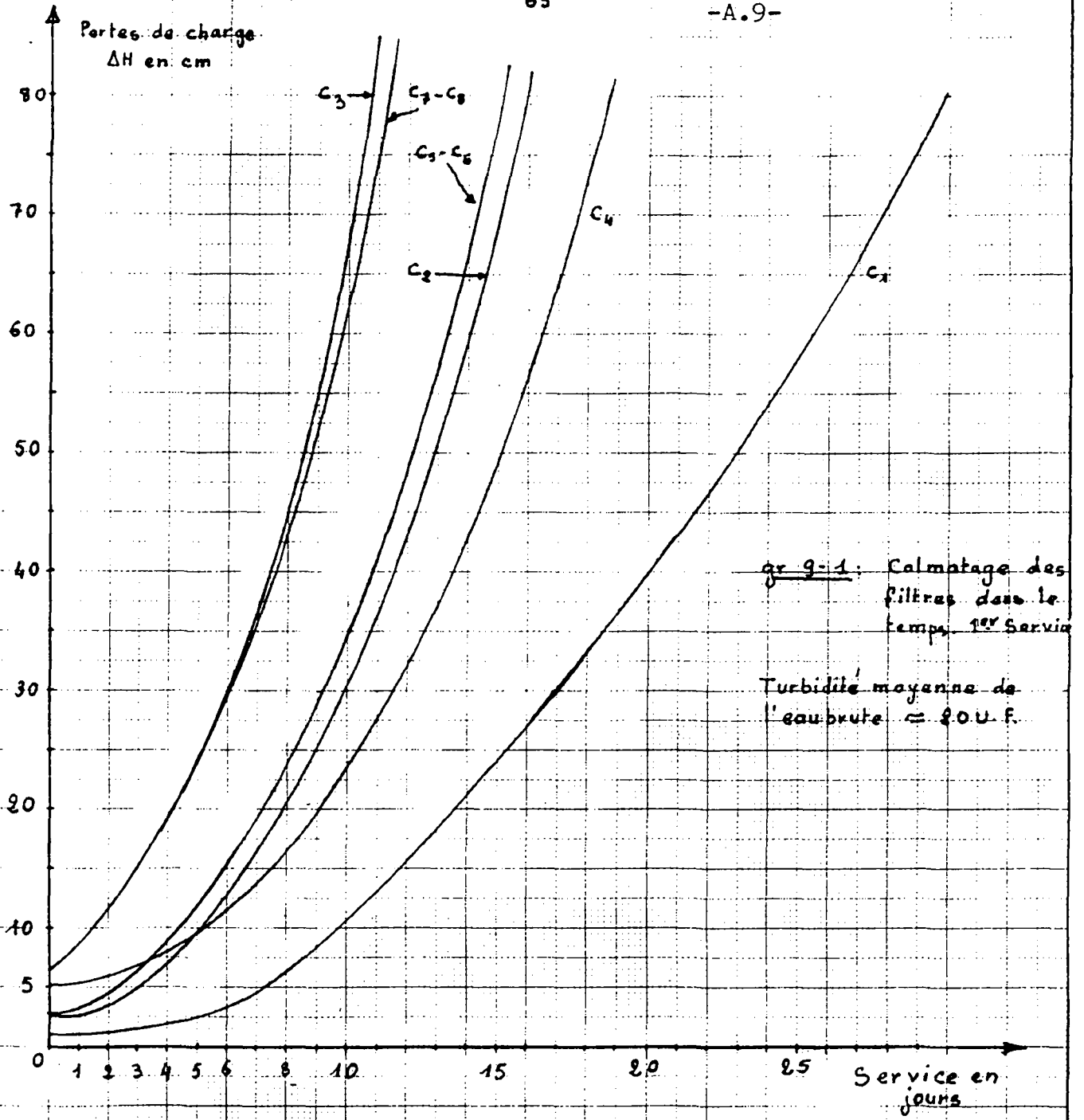
-A.8-

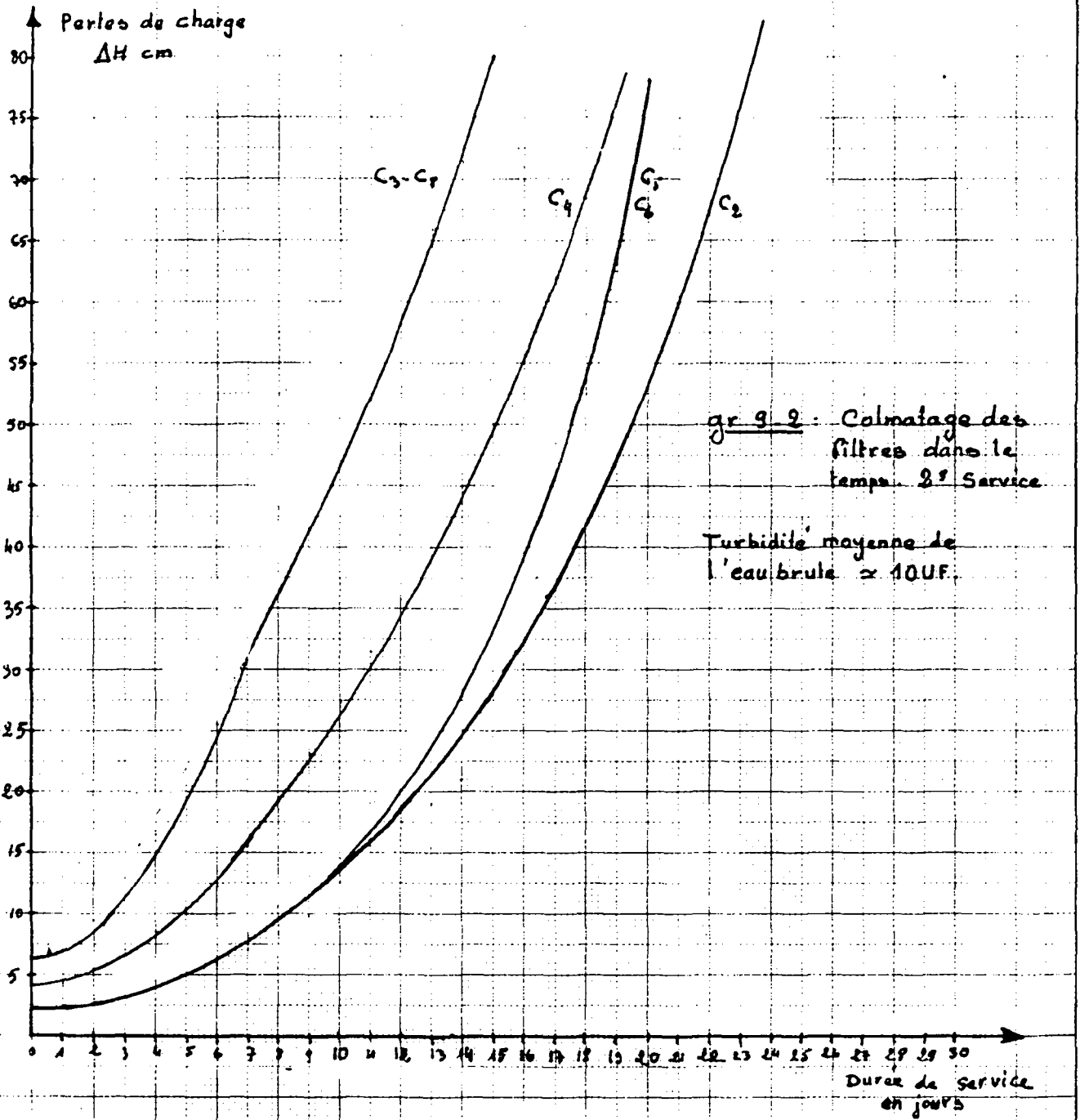
Vue en plan des installations.

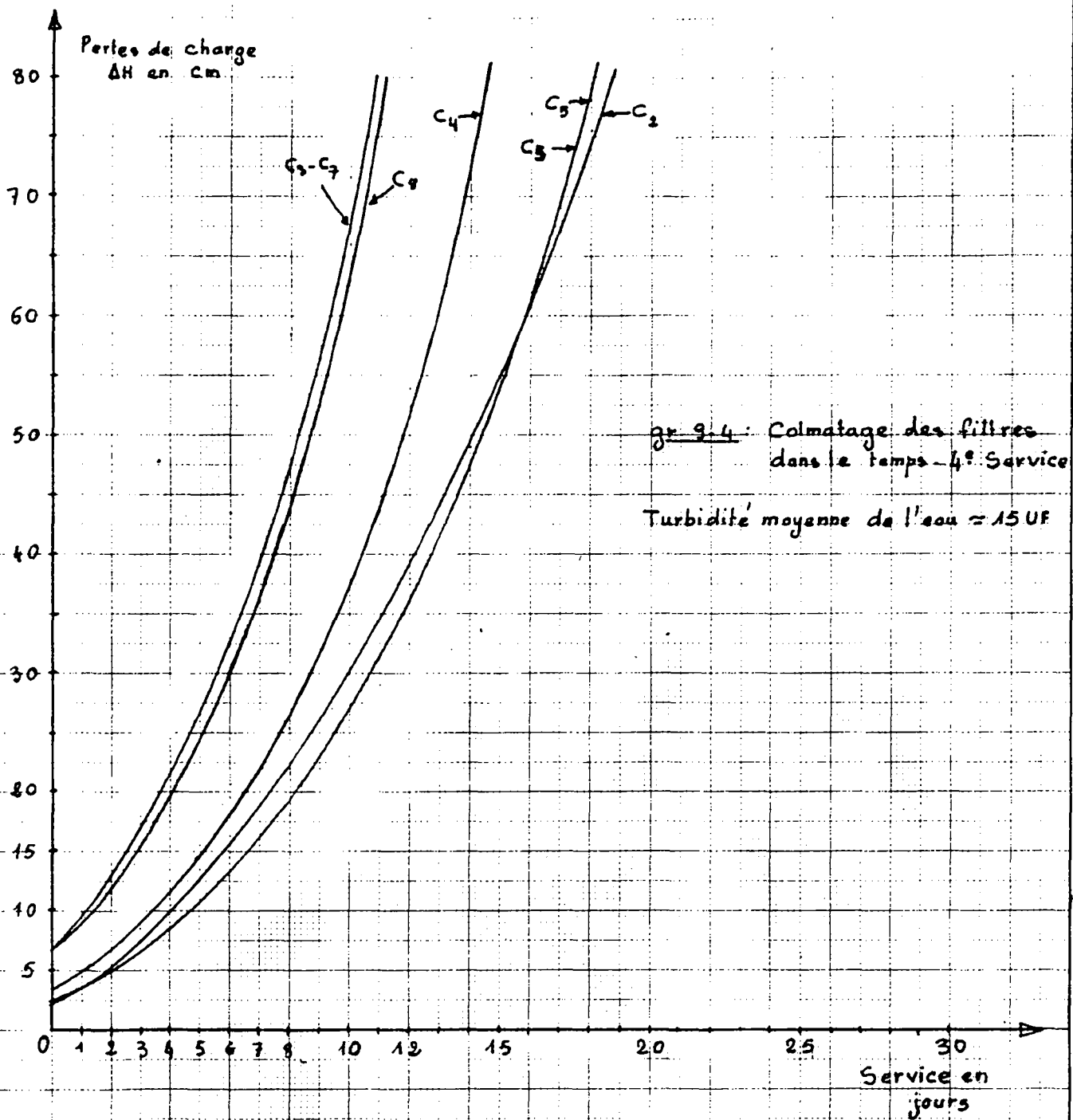
fig:10 1:50



- I: prise d'eau brute.
- 2: pompe.
- 3: tuyau de distribution.
- 4: structure.
- 5: trappe.
- 6: armoire électrique.
- 7: lavabo.

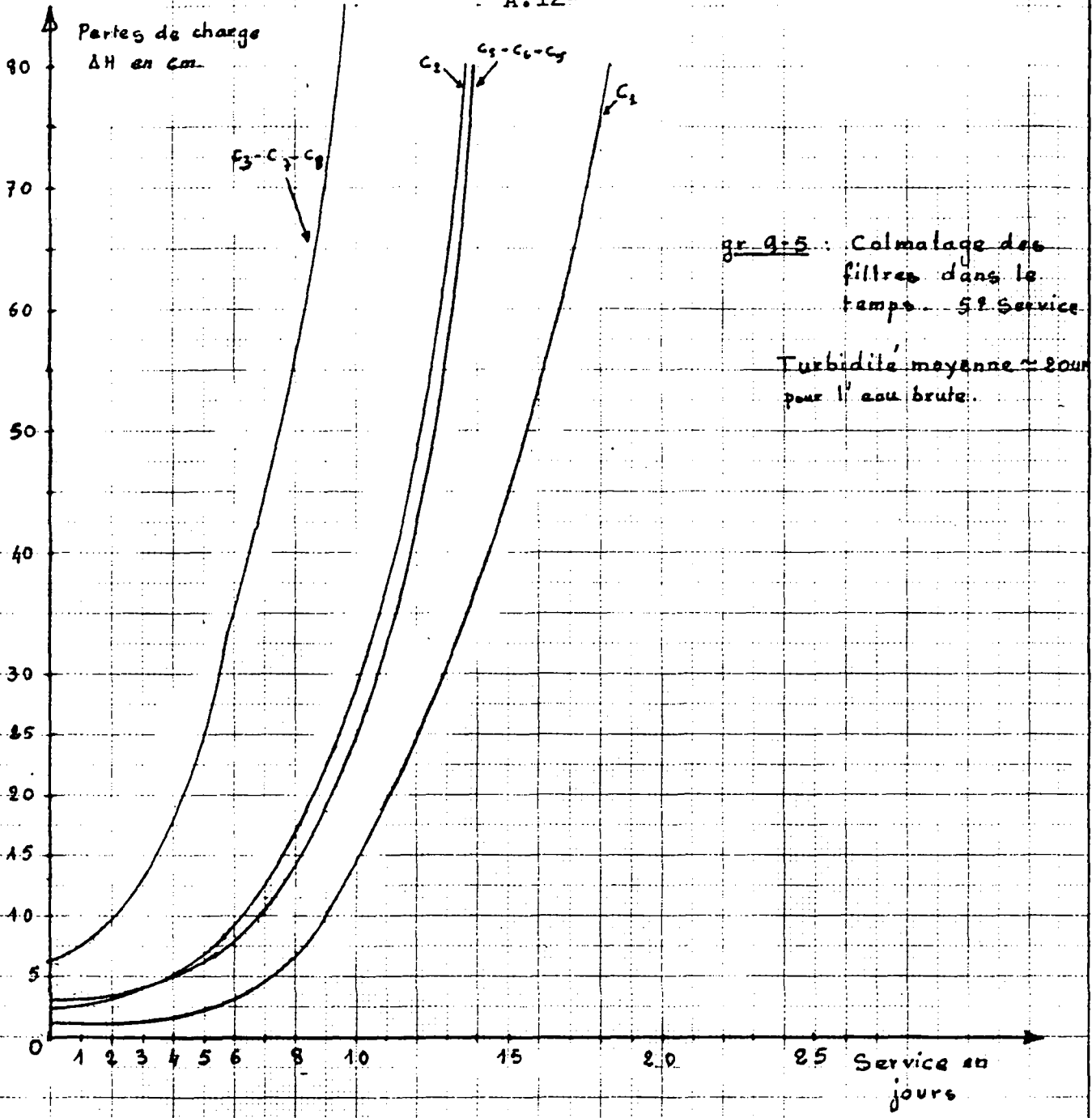






68

A.I2-



-A.13-

↑ Pertes de charge
en cm

Volume filtré en L.

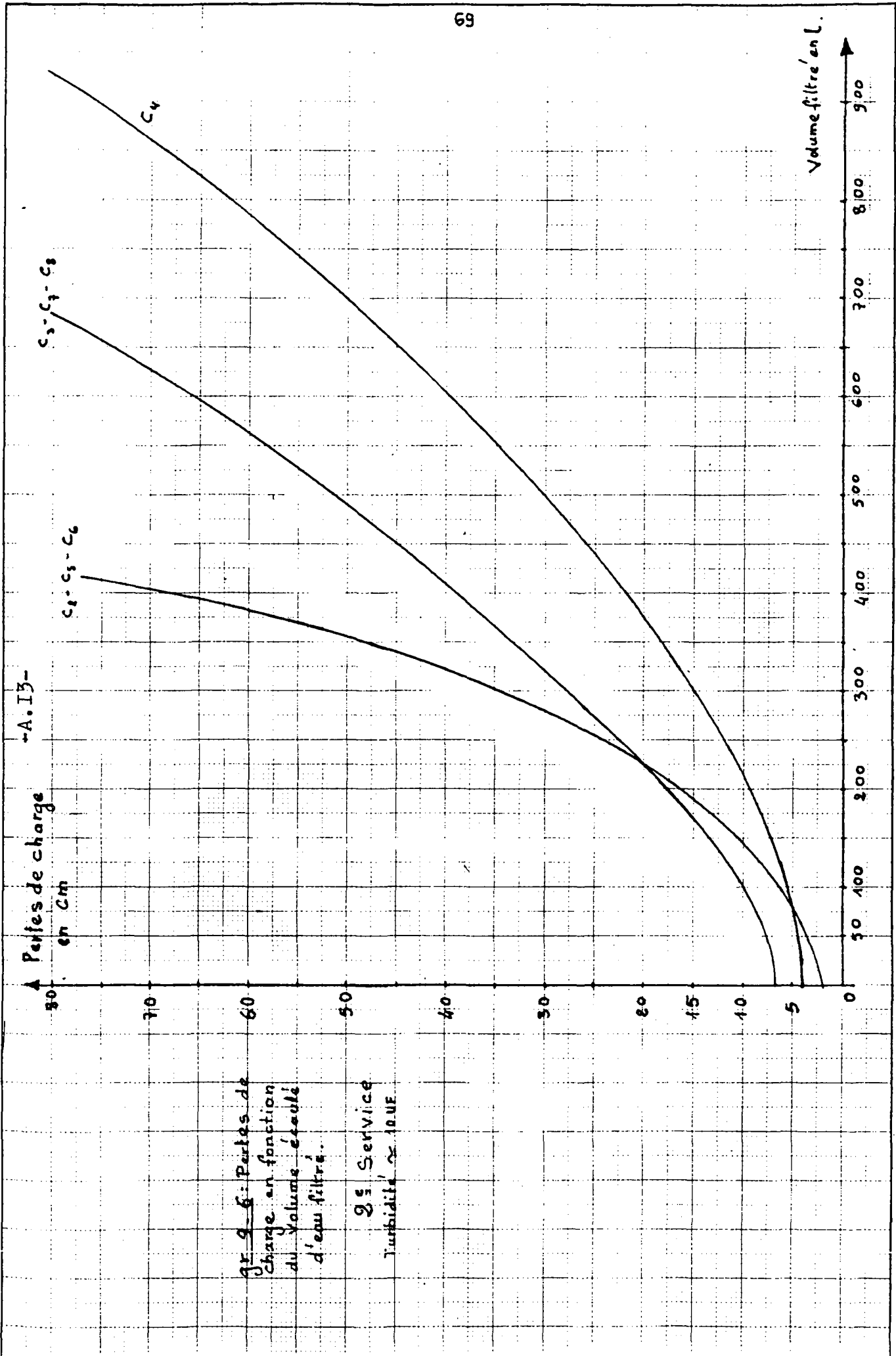
0 50 100 200 300 400 500 600 700 800 900

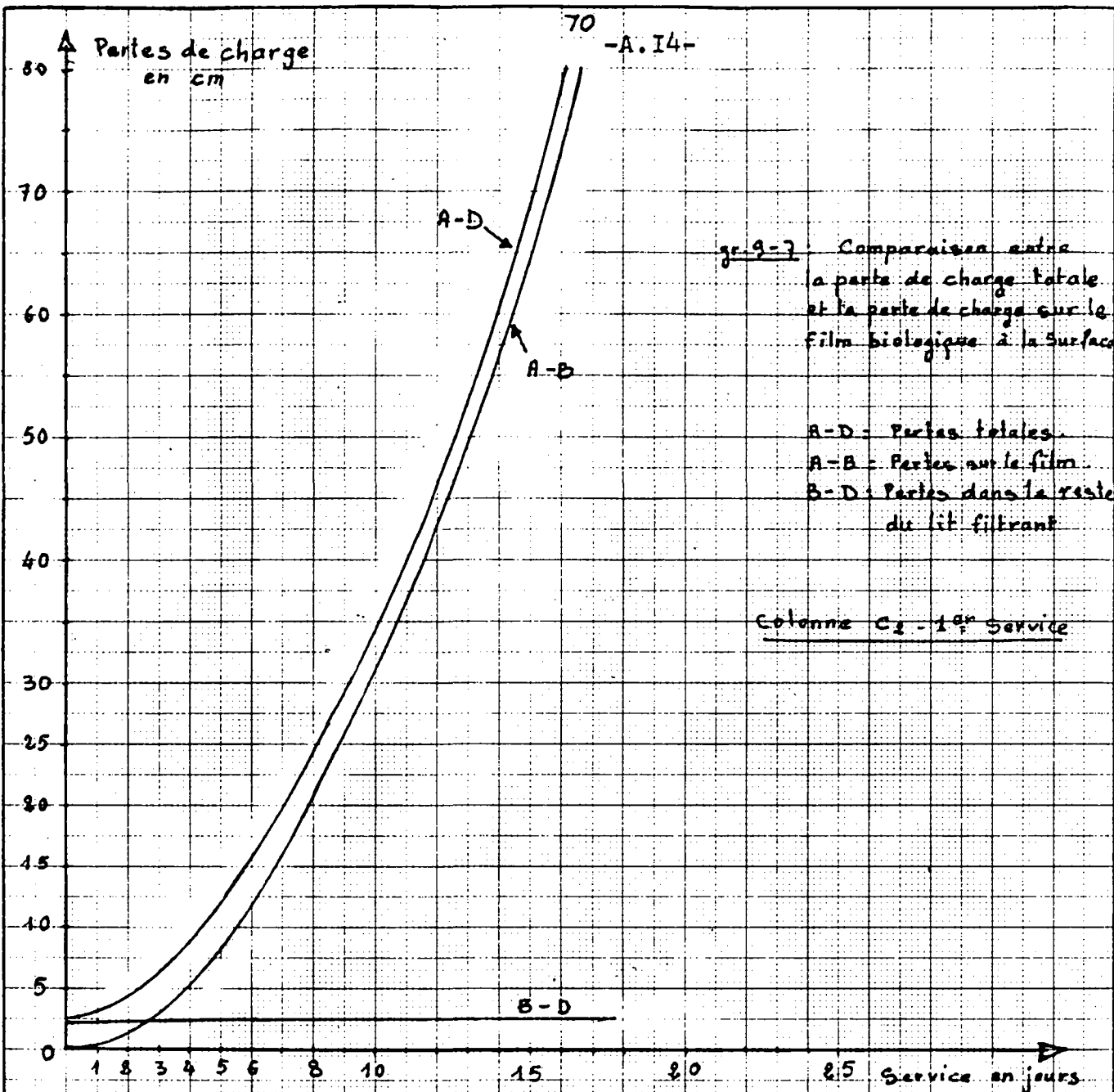
$C_2 - C_3 - C_6$

C_4

gr 9-6: Pertes de charge en fonction du Volume écoulé d'eau filtré.

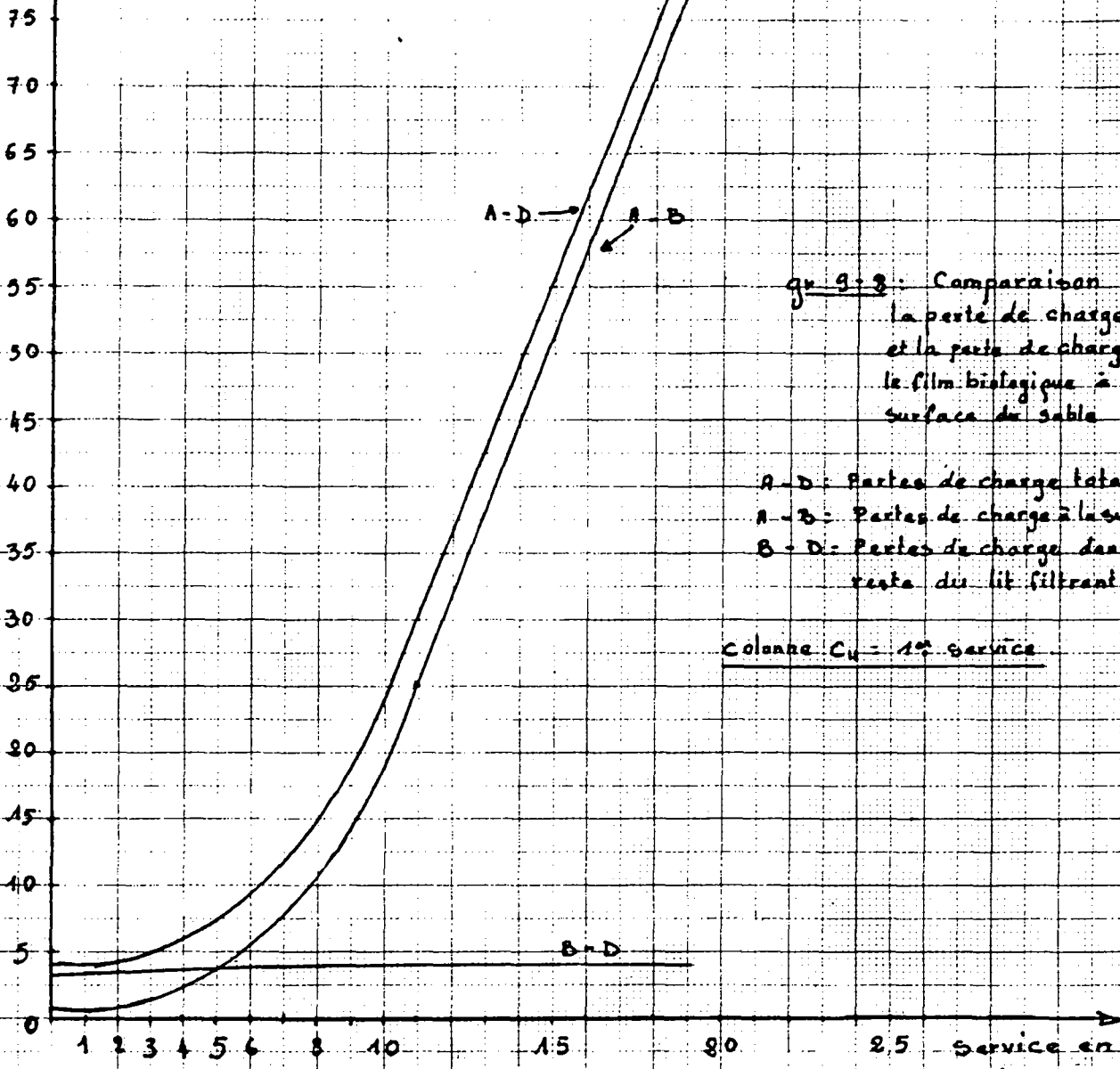
25 Service Turbidité & DUE





A

Pertes de charge
 ΔH en cm



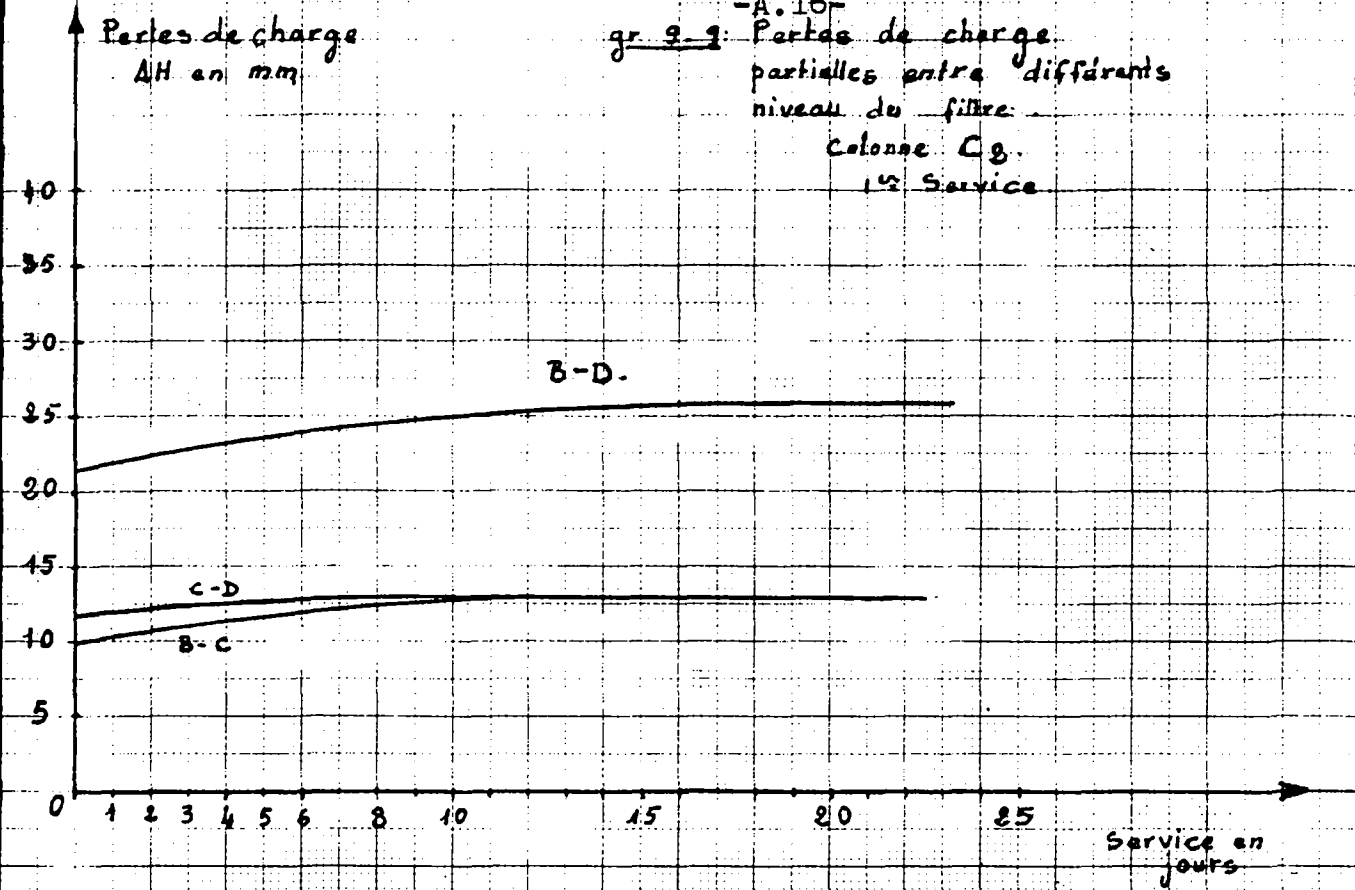
gr 9-3: Comparaison entre la perte de charge totale et la perte de charge sur le film biologique à la surface du sable

A-D: Pertes de charge totale
A-B: Pertes de charge à la surface
B-D: Pertes de charge dans le reste du lit filtrant

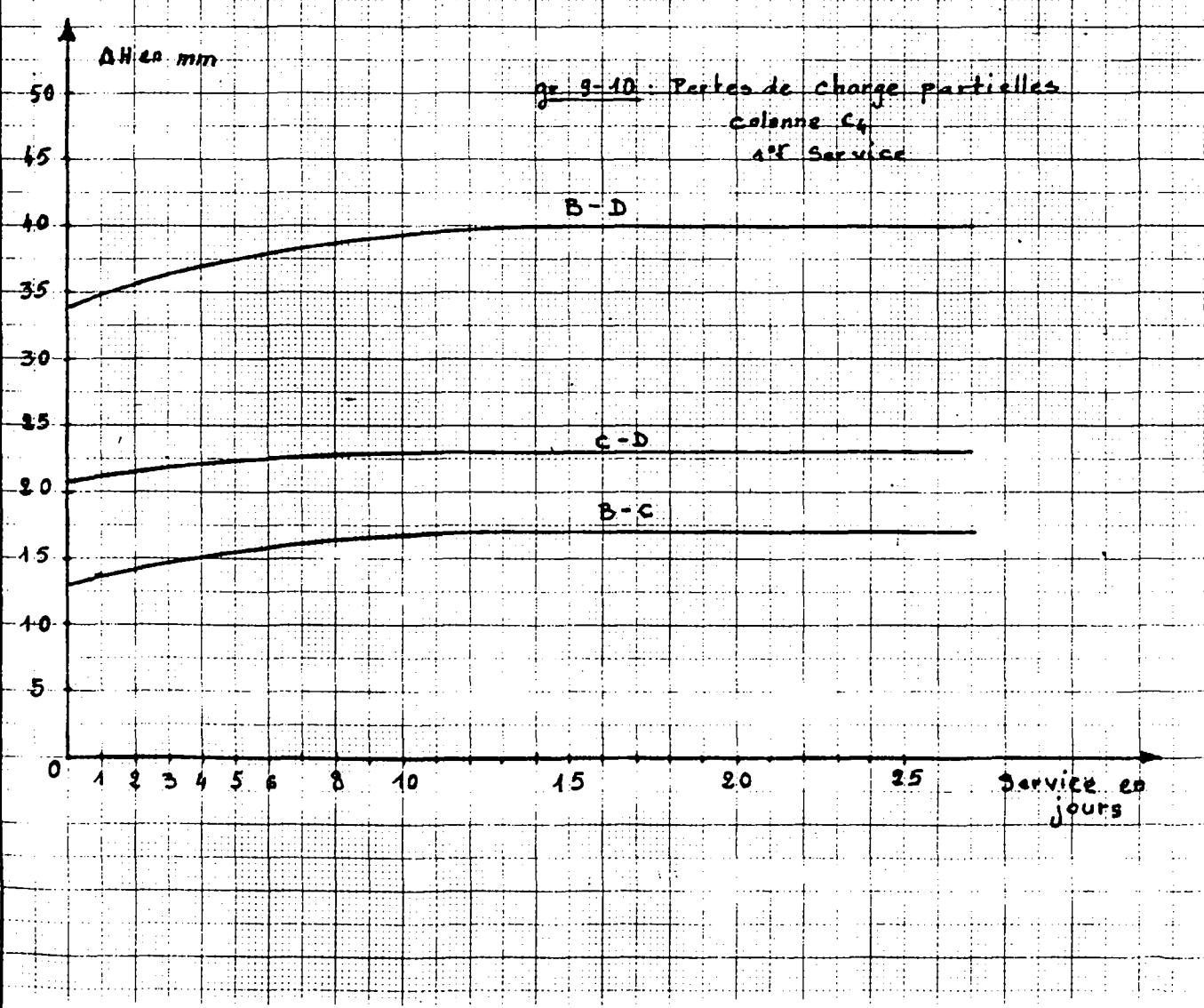
Colonne C₄ - 1^{er} service

Service en jours

gr 9-9: Pertes de charge partielles entre différents niveaux du filtre. Colonne C₃. 1^{er} Service



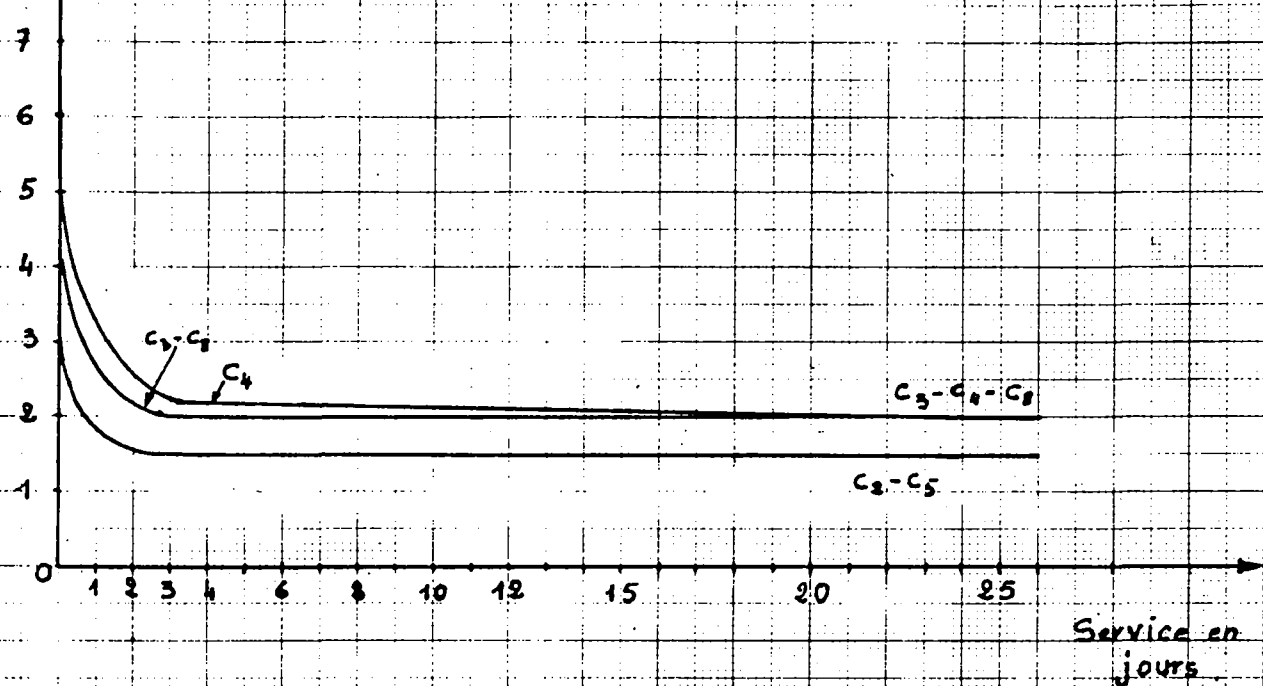
gr 9-10: Pertes de charge partielles Colonne C₄. 1^{er} Service



Turbidité de l'eau filtrée en U.F.

gr 9-11 - Diminution de la turbidité dans le temps.
Turbidité Eau brute ≈ 30 U.F.

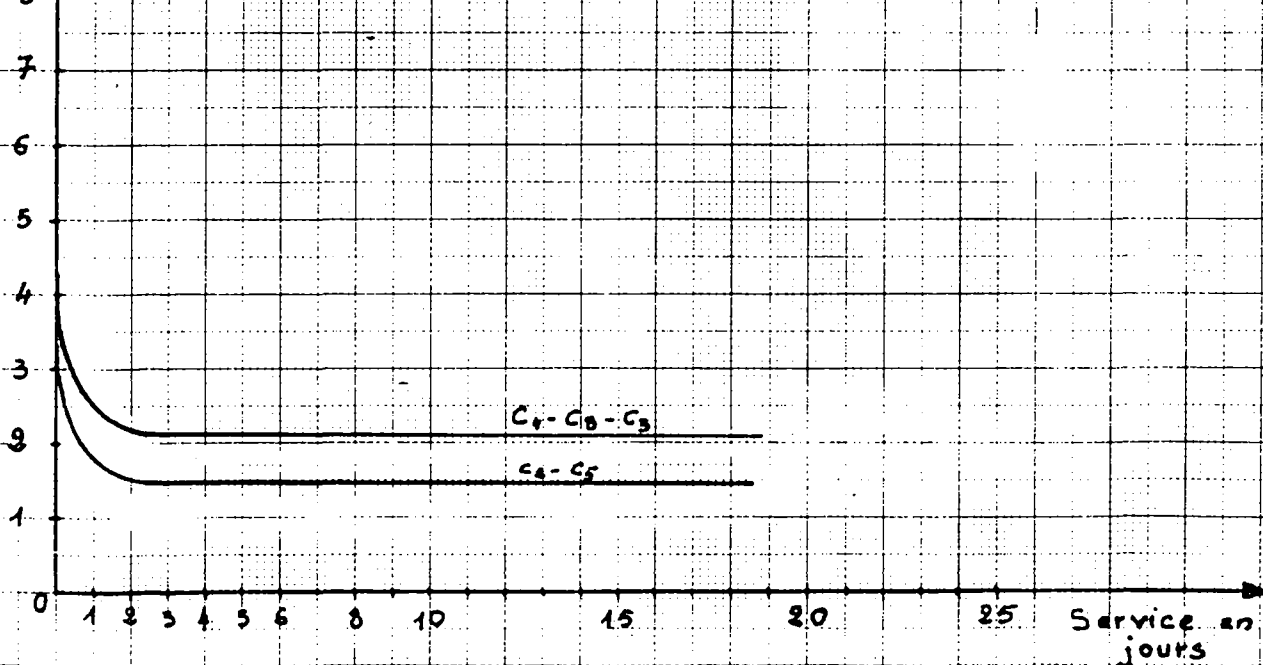
1^{er} Service

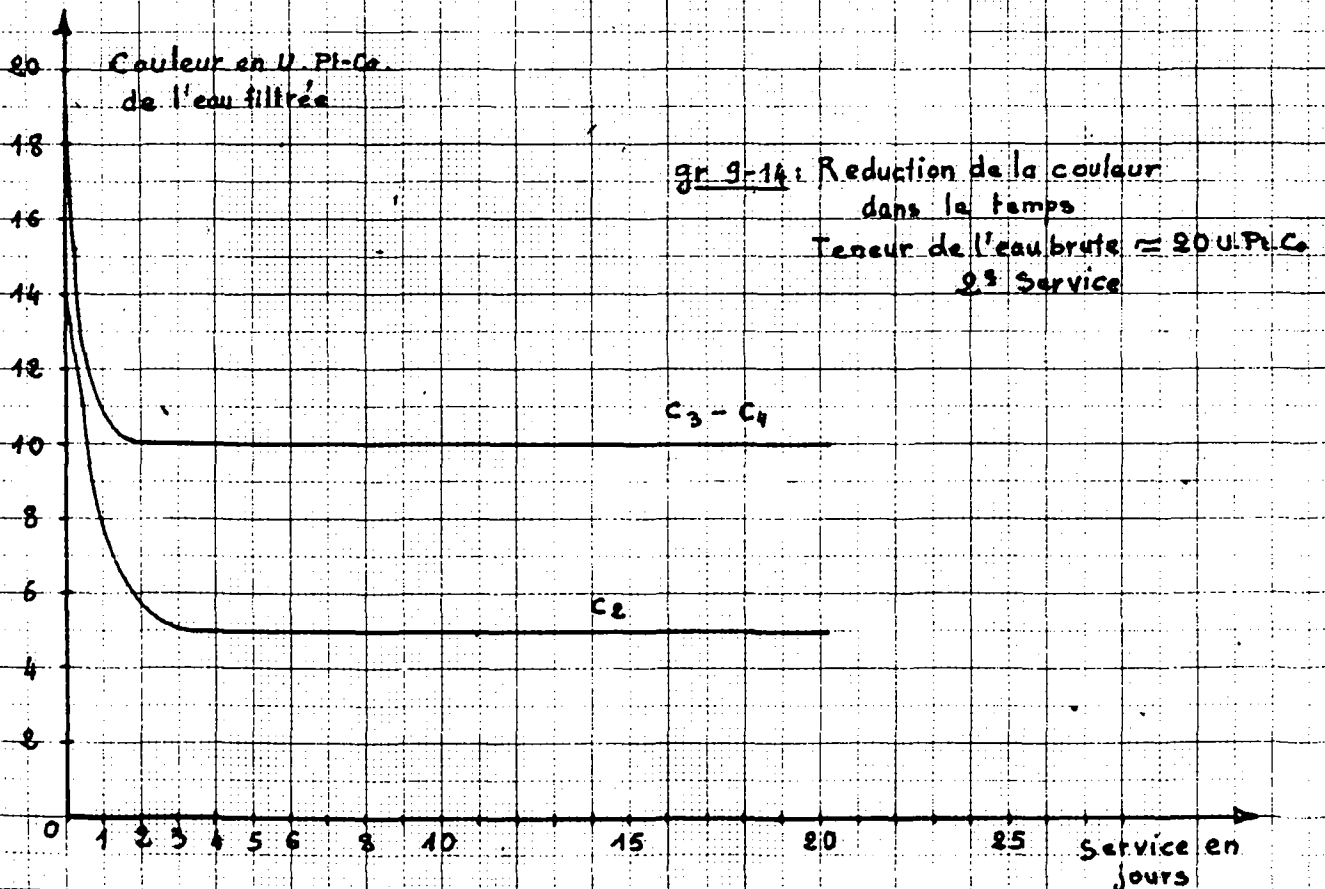
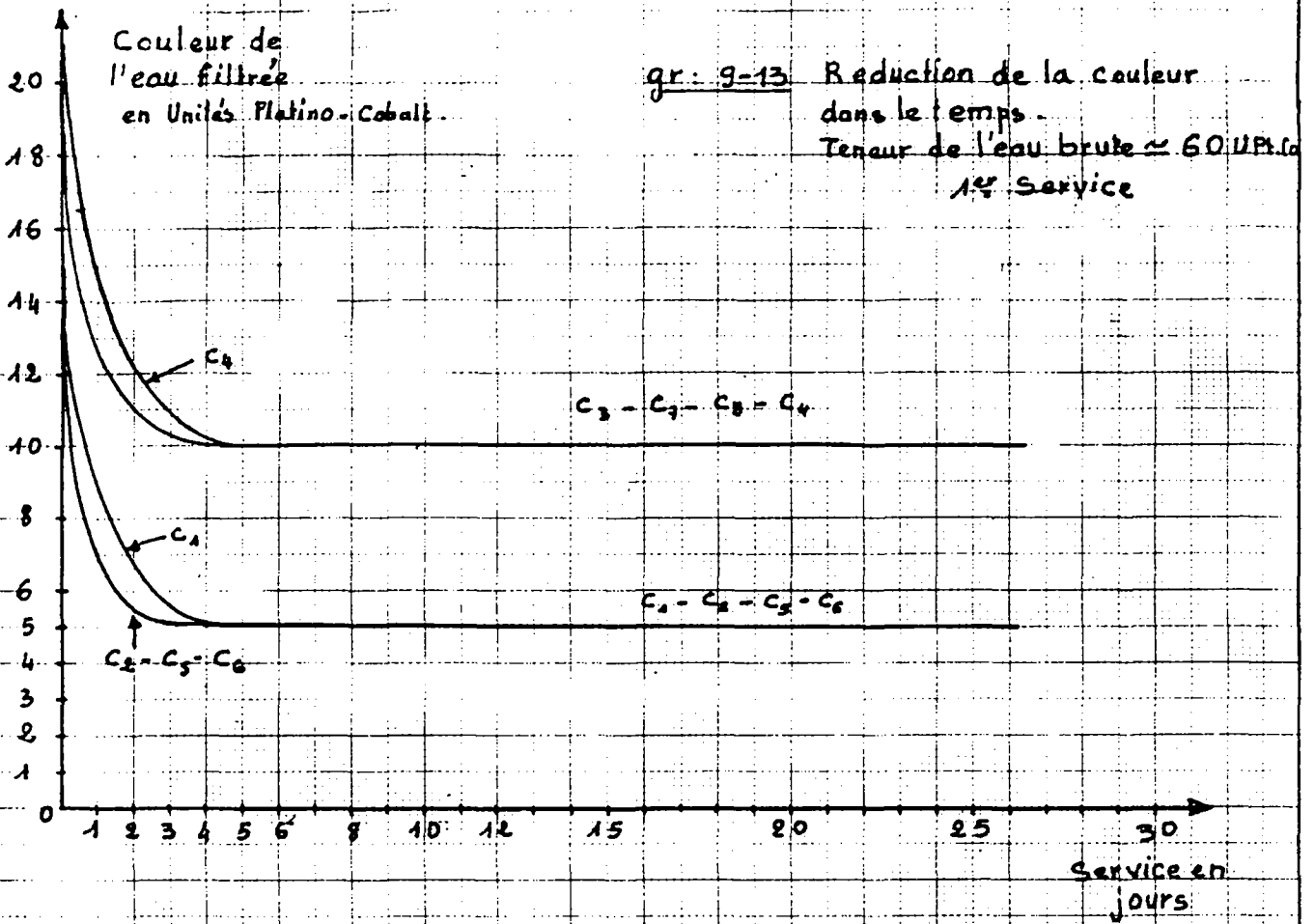


Turbidité de l'eau filtrée en U.F.

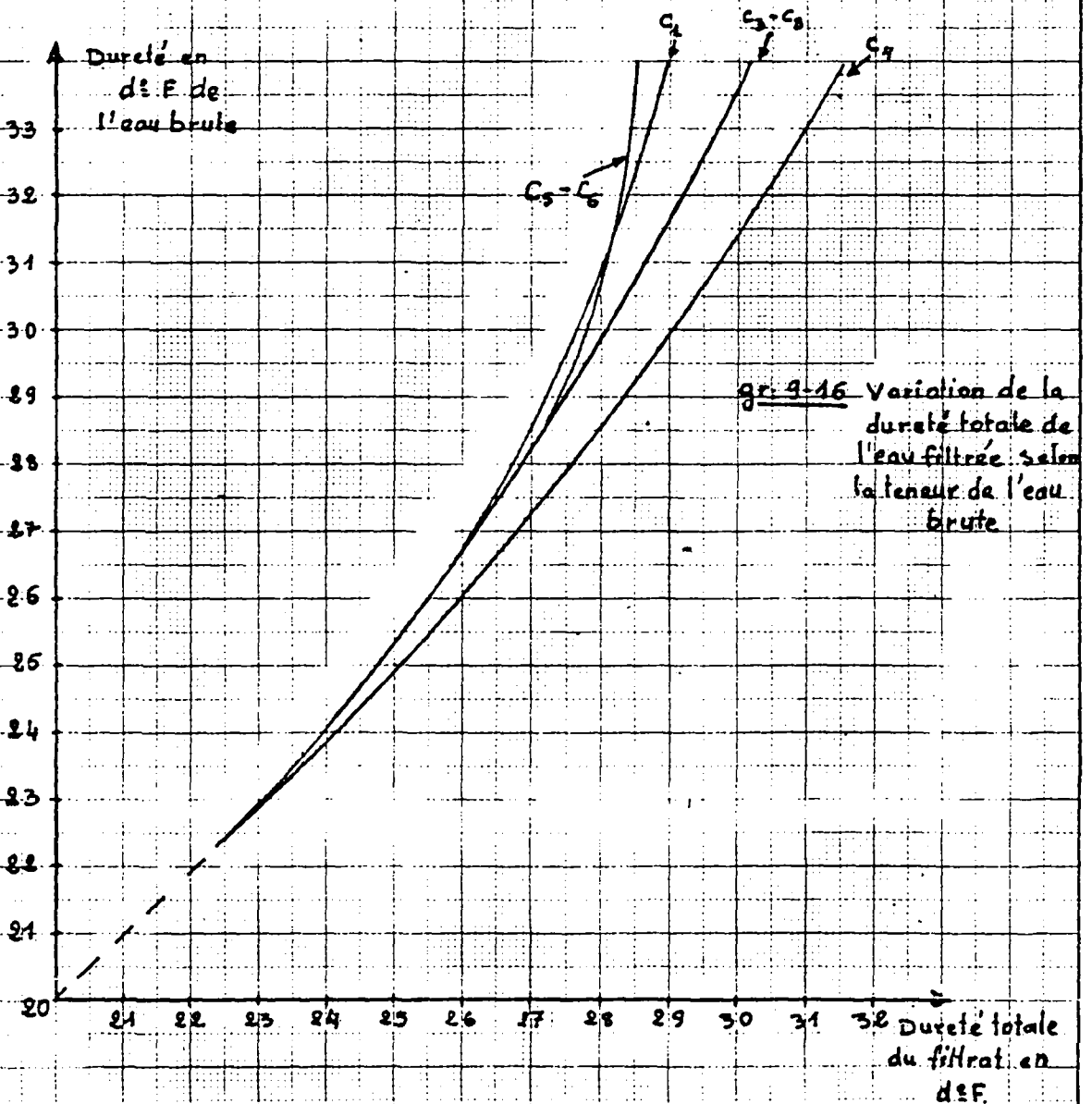
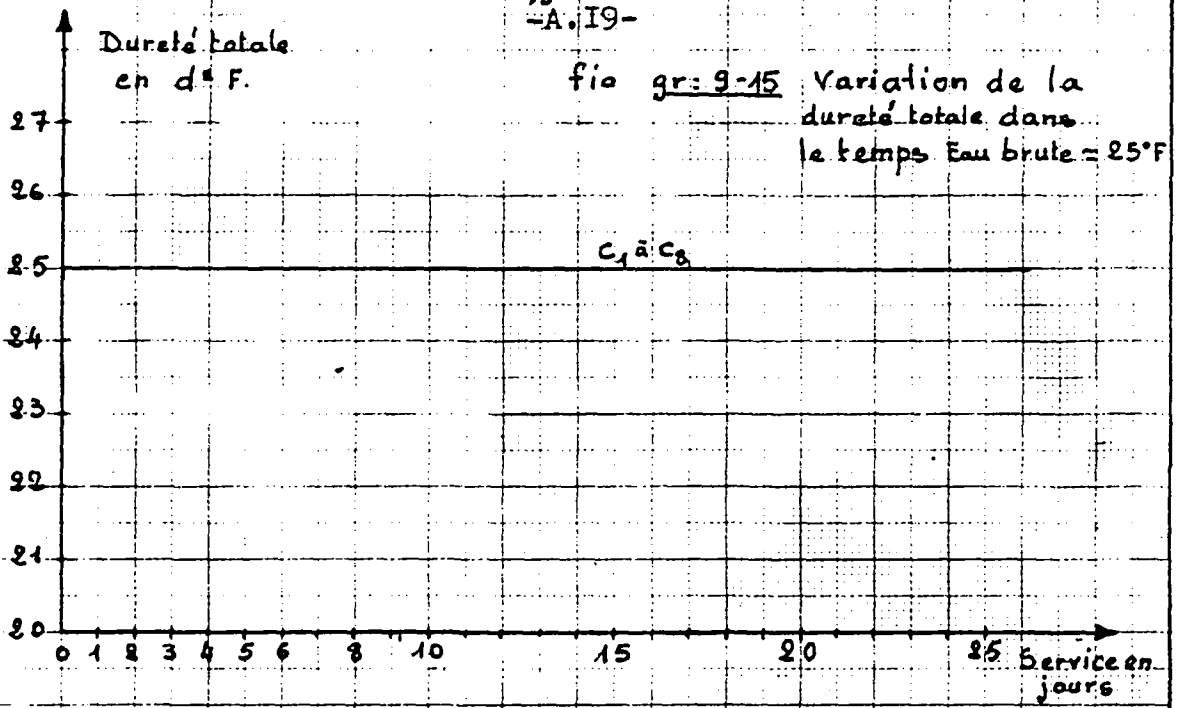
gr 9-12 - Diminution de la turbidité dans le temps.
Turbidité de l'eau brute ≈ 10 U.F.

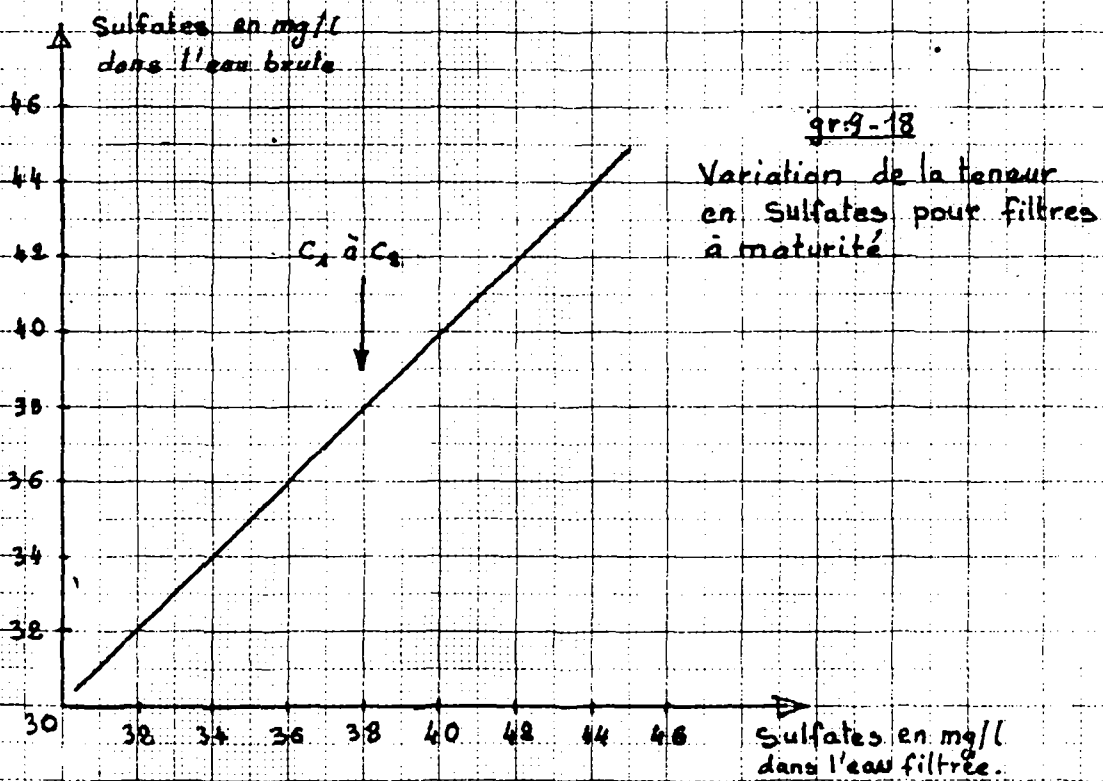
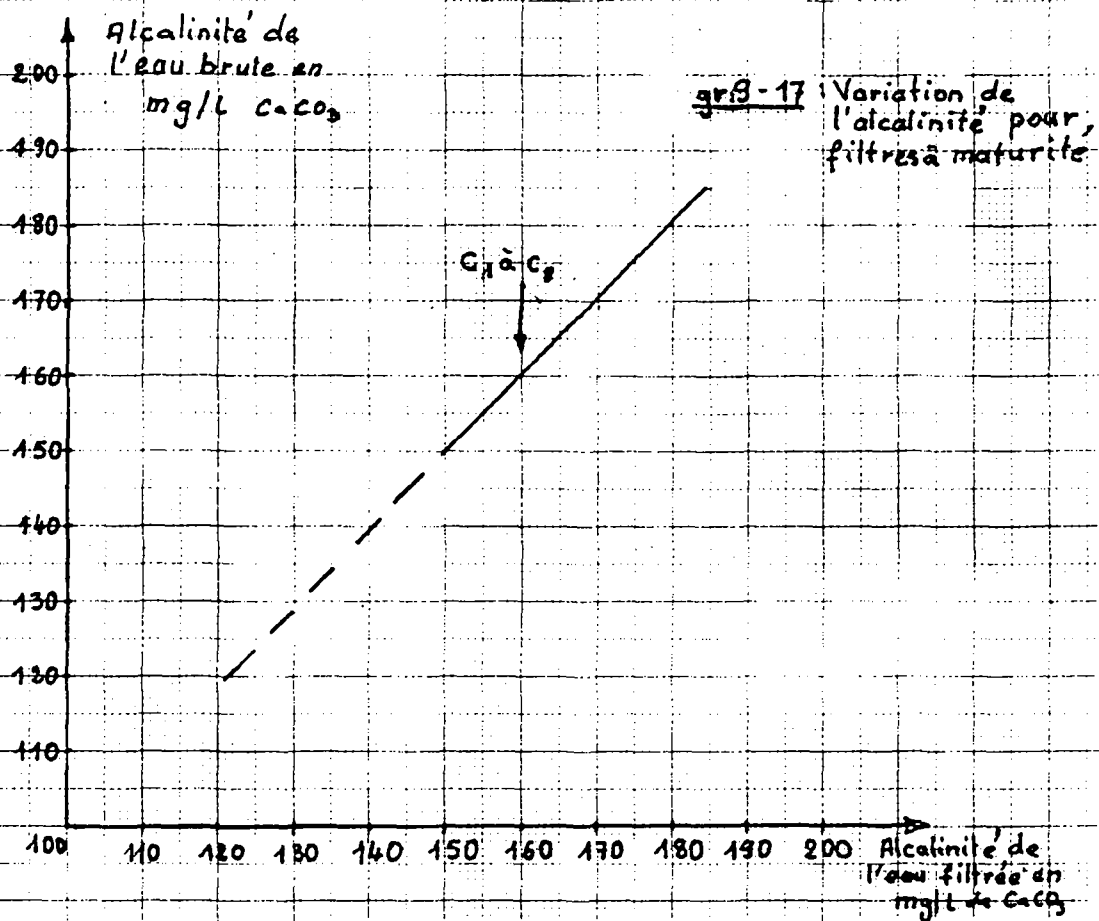
2^e Service



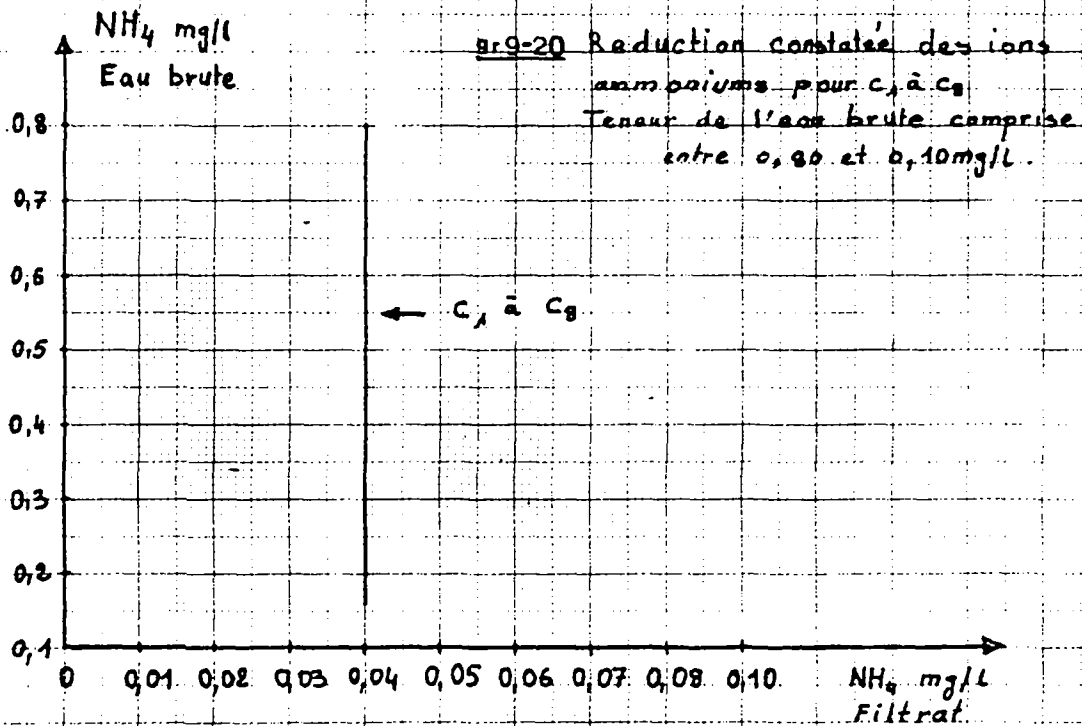
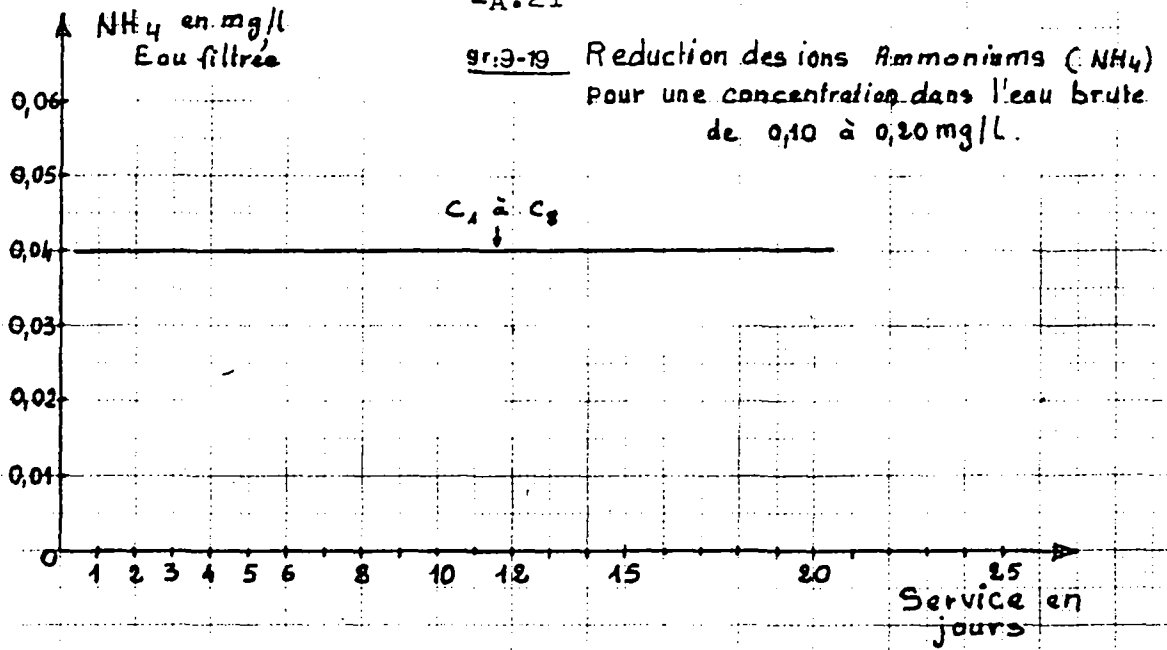


75
-A.I9-

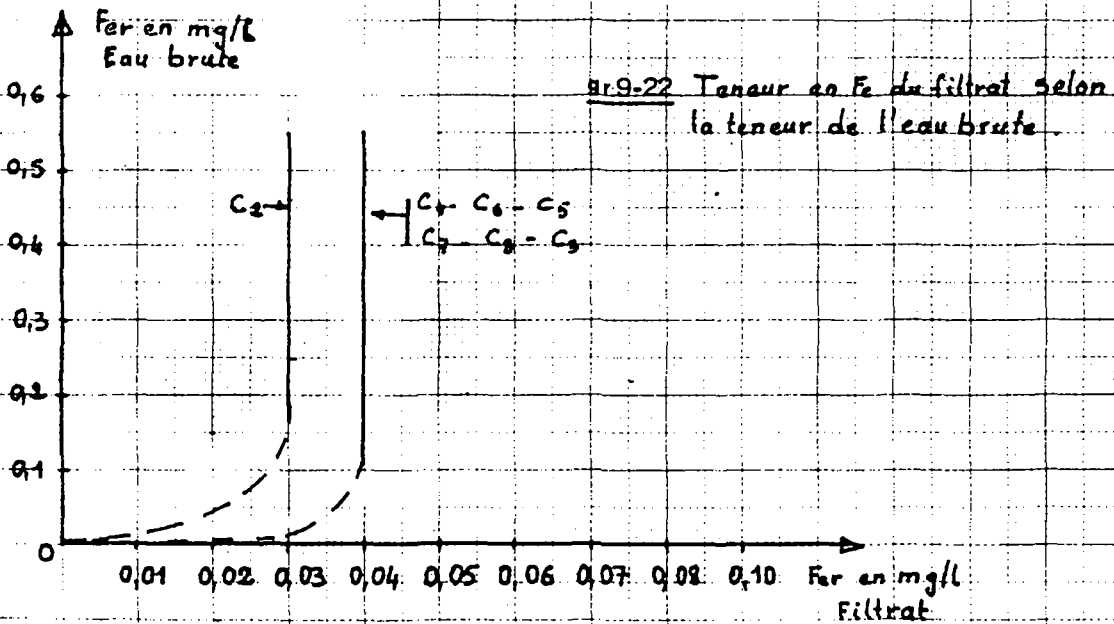
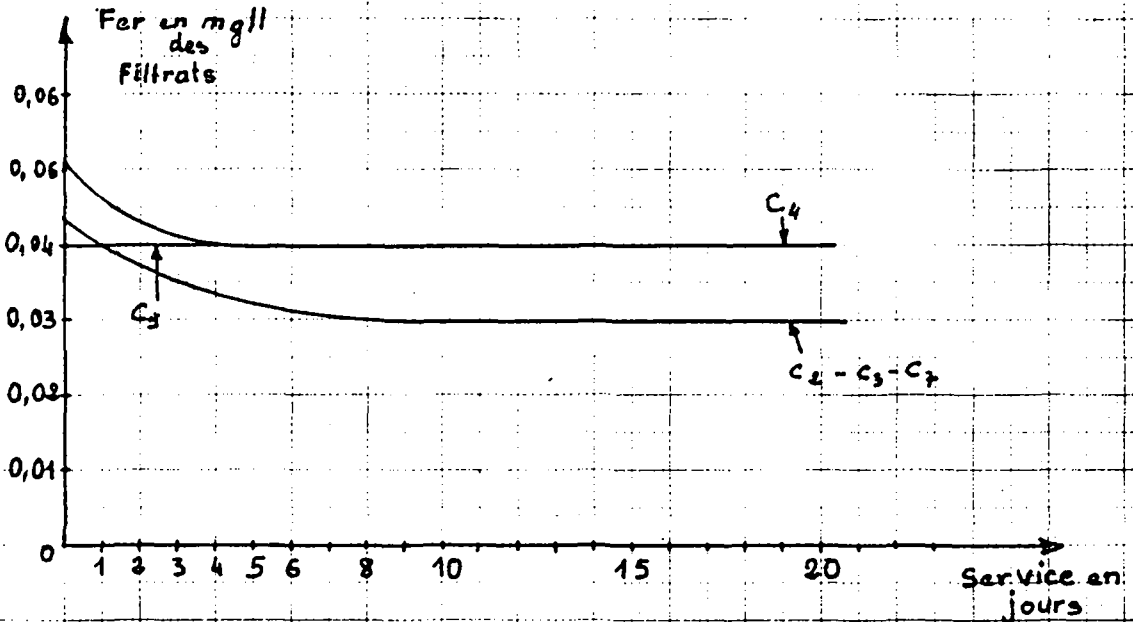


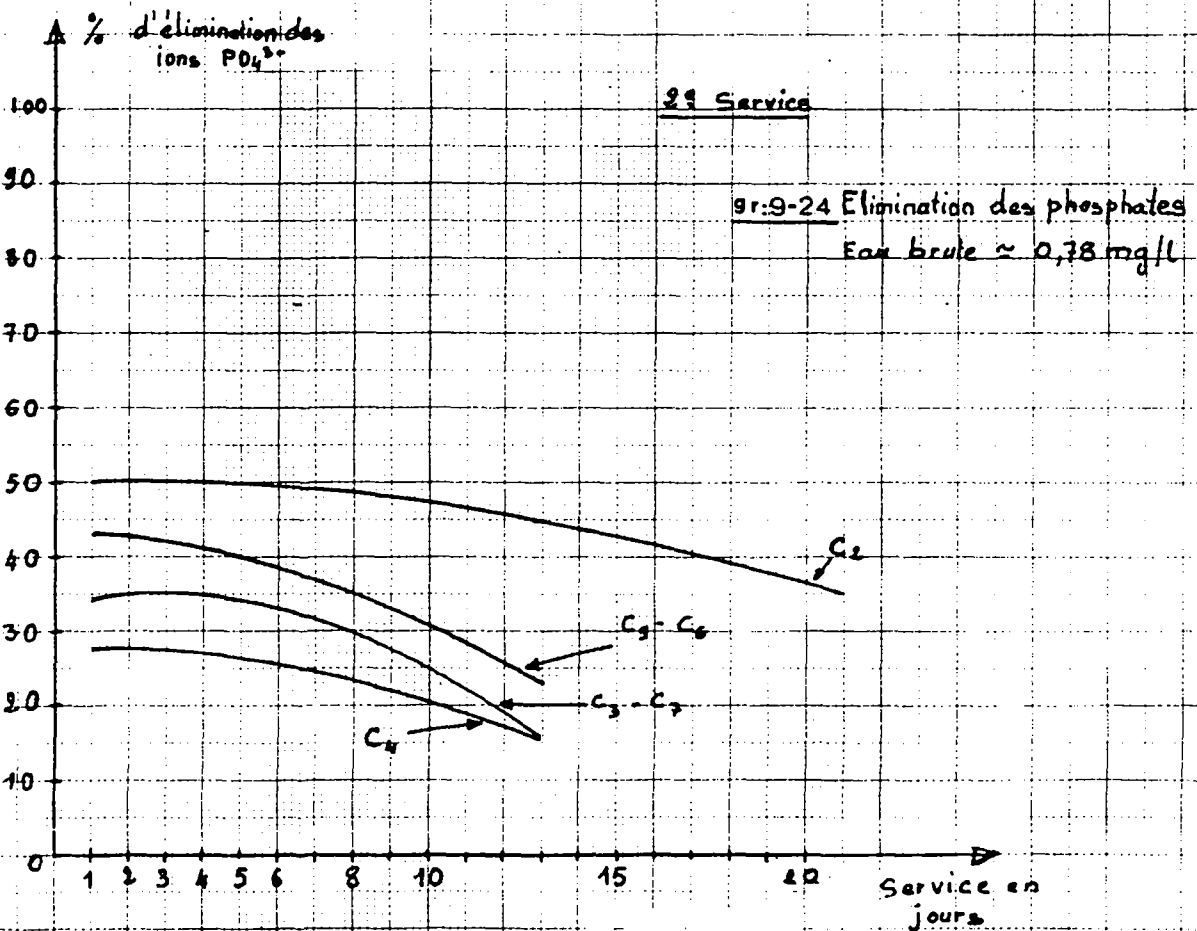
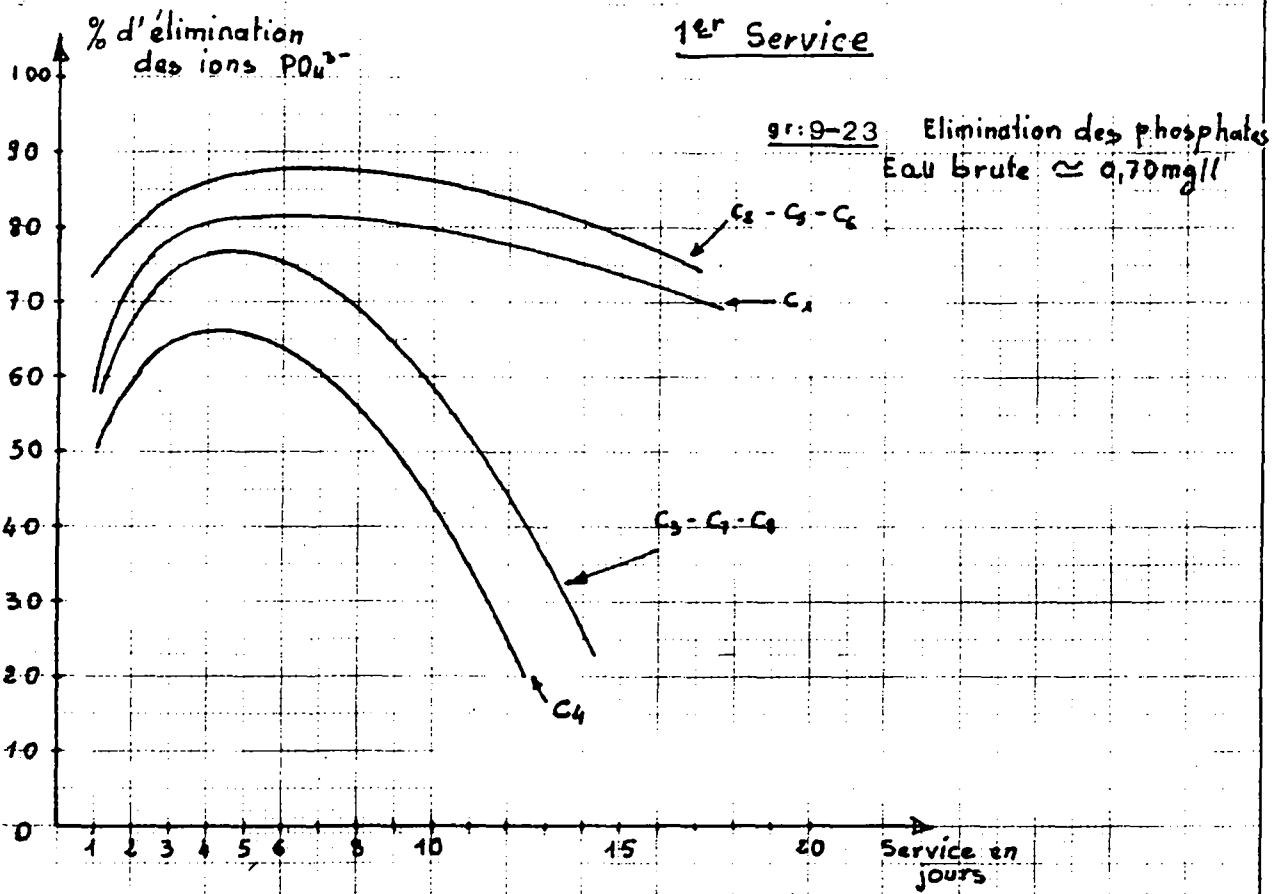


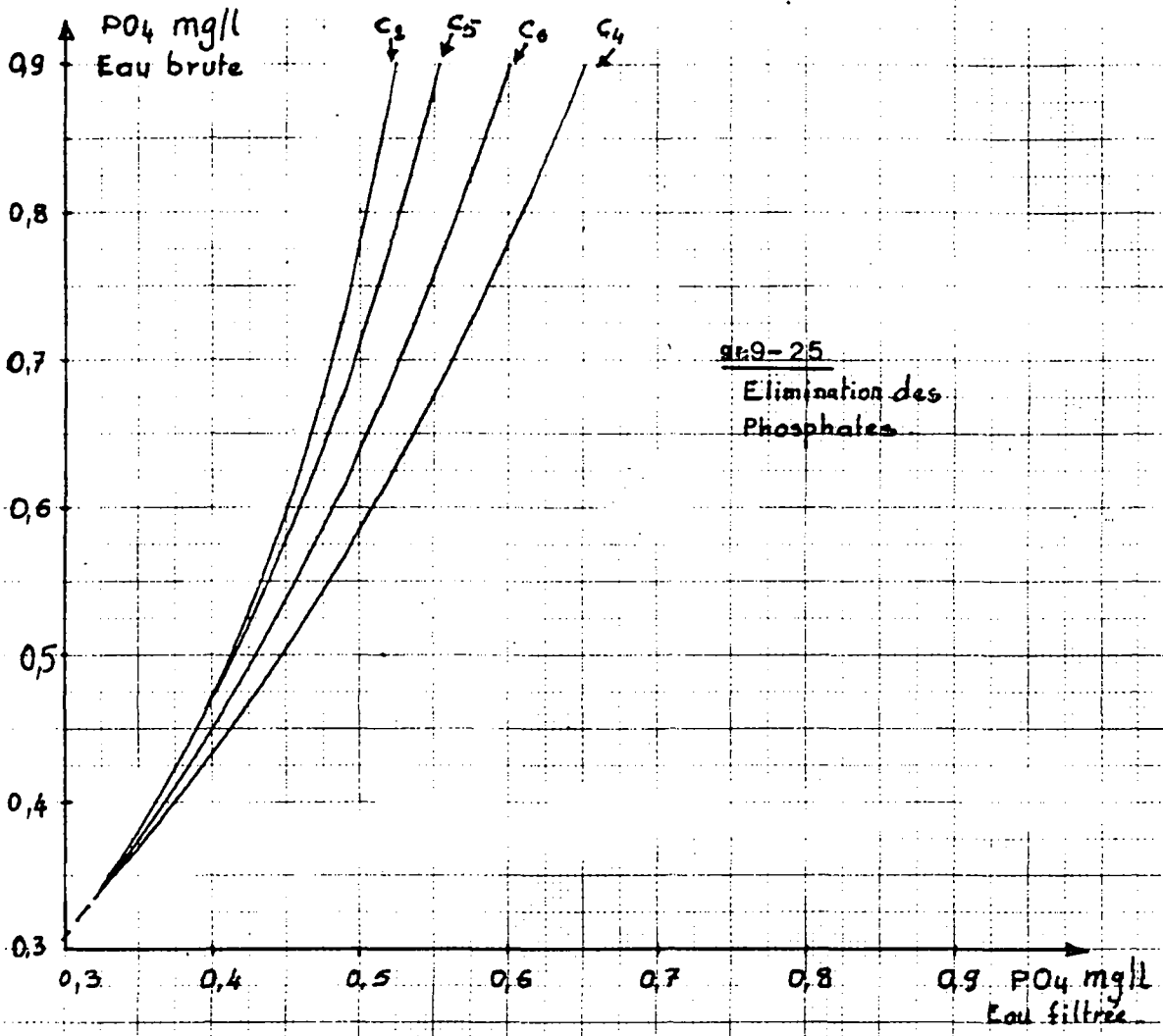
77
-A.2I-



9r9-21 Elimination du fer dans le temps
teneur eau brute $\approx 0,50$ mg/l.







-A.25-
germes totaux

