

CENTRE AGRHYMET  
NIAMEY

CENTRE ORSTOM  
DE NIAMEY

Jaugeages chimiques et tracages

COURS POUR LA FORMATION D'INGENIEUR  
DES TRAVAUX EN HYDROLOGIE

L. LE BARBE  
Ingénieur hydrologue  
à l'ORSTOM

Juillet 1990

## SOMMAIRE

- INTRODUCTION	3
- L'EQUATION DE LA DIFFUSION	4
1. échelles de la diffusion	
2. dégradation du traceur	
3. l'équation de la diffusion	
- PRINCIPES DES JAUGEAGES CHIMIQUES	15
1. jaugeages par intégration	
2. jaugeages à débit constant	
3. longueur de bon mélange	
- PRINCIPE DES TRACAGES	22
1. traçages de simulation	
2. traçages destiné à la détermination des paramètres d'un modèle de diffusion	
- PRESENTATION DE QUELQUES TRACEURS UTILISES EN HYDROLOGIE	25
1. les traceurs fluorescents	
2. le dichromate de sodium	
3. les autres traceurs	
- MODES OPERATOIRES	36
1. les démarches administratives préalables	
2. la reconnaissance du bien	
3. détermininstion du protocole	
4. les opérations de terrain	
5. les travaux au laboratoire	
6. analyse des résultats	
- INVENTAIRE DU MATERIEL ET DES PRODUITS A UTILISER	61
- BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE	64

## INTRODUCTION

Les jaugesages chimiques comme les traçages suivent la même méthode : on injecte un traceur, substance soluble dans l'eau et détectable à très faible concentration, et on effectue à l'aval des prélèvements où l'on dosera la quantité de traceur présent. L'objectif suivi dans le cas des jaugesages chimiques est d'en déduire le débit de la rivière, dans le cas des traçages de préciser la façon dont se disperse une substance soluble dans le cours d'eau.

Ce dernier point est très souvent lié à des problèmes de pollution. Il peut s'agir par exemple de définir le taux de pollution acceptable dans les rejets d'une usine située près d'une rivière. Ou bien de prévoir les mesures à prendre en cas de pollutions liées à des accidents envisageables. Les techniques de traçages ne sont pas cependant liées uniquement aux problèmes de pollution. Je prendrai pour exemple le programme de lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'Ouest. Ce programme vise à contrôler cette maladie en s'attaquant à son vecteur, une petite mouche (une simulie), en épandant des insecticides en amont des gîtes larvaires des vecteurs, situés dans les zones à courant relativement rapide des rivières. La définition des doses à épandre, et de leur lieu d'injection nécessite de pouvoir prévoir la façon dont l'insecticide se disperse dans les écoulements et pour ce faire, la technique des traçages à du être utilisée.

Il ne paraît pas possible de parler des traçages et des jaugesages chimiques sans analyser succinctement les mécanismes et les lois qui régissent la dispersion des substances dissoutes dans les rivières. Ce sera donc le premier chapitre de ce cours.

Nous en déduirons les principes des jaugesages chimiques et des traçages.

Nous présenterons ensuite les différents types des traceurs utilisés en hydrologie en détaillant leurs avantages et leurs inconvénients. Nous verrons également leur mode de dosage.

Puis nous détaillerons le mode opératoire à mettre en œuvre pour réaliser ces techniques.

Nous terminerons par un inventaire sommaire des matériels et des produits à utiliser.

## I'EQUATION DE LA DIFFUSION

1.

### ECHELLES DE LA DIFFUSION

Une molécule de traceur placé dans un écoulement va avoir une vitesse instantanée qui sera en règle générale différente de la vitesse moyenne de l'écoulement. Cette vitesse va en effet dépendre de l'endroit où la molécule se trouve dans la section et de la turbulence. Toutes les molécules de traceurs vont donc avoir des vitesses instantanées différentes, il va donc en découler un étalement du nuage du traceur : c'est ce que l'on appelle la dispersion.

Pour mieux comprendre intuitivement la façon dont se propage un traceur, nous allons nous placer dans 2 cas extrêmes : un écoulement laminaire (sans turbulence) et un écoulement infiniment turbulent.

Dans un écoulement laminaire, une molécule reste sur le fillet liquide où elle était initialement et va donc migrer toujours à la même vitesse. La dispersion va donc être uniquement fonction du champ des vitesses : les molécules placées à l'extrême bord de l'écoulement vont rester fixes, tandis que celles situées le plus loin des parois vont migrer les plus rapidement.  
Il va donc y avoir un étalement très important au cours du temps du nuage de traceur.

Dans un écoulement infiniment turbulent, chaque molécule peut de façon instantanée passer en tout point de la section. La vitesse d'une molécule sera donc la vitesse moyenne de l'écoulement.  
L'étalement du nuage de traceur sera donc beaucoup plus faible que dans le cas précédent.

De ces considérations (approximatives), qui sont vérifiées par les expériences de TAYLOR, on perçoit l'importance de la turbulence dans les phénomènes de dispersion. Dans les écoulements l'étalement du nuage de traceur sera d'autant plus important que la turbulence sera faible.

On peut quantifier théoriquement le brassage dans un écoulement par l'expression suivante

$$\Psi(T) = \frac{u'(t) + u'(t+T)}{(u'(t))^2}$$

et

$$TDIF = \int_0^\infty \Psi(T) dT$$

où

$u'(t) = u - V$  avec  $u$  vitesse instantanée d'un particule  
 $v$  vitesse moyenne de l'écoulement

TDIF est d'autant plus faible que l'écoulement est turbulent.  
TDIF est infini pour les écoulements laminaires.

Fischer a montré que pour les temps  $t$ , tels que

$$\int_0^t \Psi(T) dT \text{ converge et est égale } \int_0^\infty \Psi(T) dT,$$

les phénomènes de dispersion pouvoient être décrits par l'équation de la diffusion que nous verrons plus loin.

TDIF est appellé longueur de la diffusion est peut être estimé pour les rivières par l'expression suivante :

La<sup>2</sup>

$$TDIF = \frac{La}{R_h(g \cdot Rh \cdot I)^{1/2}} \quad (\text{à une constante multiplicative près}) \quad (1)$$

ou La = largeur de la rivière

Rh = rayon hydraulique

g = 9,81 m / s<sup>2</sup>

I = pente du lit de la rivière

On peut également définir une longueur de diffusion L DIF :

$$L DIF = V \cdot T DIF,$$

ou V est la vitesse moyenne de l'écoulement -

en admettant que  $R_h$  est peu différent du *tinant* d'eau  
on peut poser que

$$TDIF = \left[ \frac{La}{\frac{g \cdot Q \cdot I}{V}} \right]^{1/2} \quad \left. \right\} \quad (2)$$

et       $LDIF = \left[ \frac{La}{\frac{g \cdot Q \cdot I}{V}} \right]^{1/2}$

## 2. DEGRADATION DU TRACEUR

Le problème de la dispersion des traceurs dans les rivières ne se résume pas uniquement à un problème de transfert. Il faut pouvoir tenir compte également des différents processus de dégradation du produit injecté qui font qu'au cours du temps une partie disparaît. Dans ce qui suit, nous admettons que l'ensemble de ces processus obéit à la loi suivante :

$$\frac{dC}{dt} = -RC.$$

où C = la concentration du traceur

et R = coefficient de disparition du traceur.

## 3. L'EQUATION DE LA DIFFUSION

Nous limiterons l'étude au cas des écoulements monodimensionnels.

### 3.1. Cas des injections instantanées

Dans ce cas, l'équation de la diffusion s'écrit si  $C(x,t)$  est la concentration du traceur.

$$C(x,t) = \frac{M}{Q} \cdot \frac{I}{\sqrt{4 \pi D t}} \cdot \frac{x}{t} \cdot \exp \left( -\frac{Vx}{2D} \right) \cdot \exp \left( -\frac{x^2 - t^2 W^2}{4Dt} \right) \quad (3)$$

où x = distance au point d'injection (m)

t = temps écoulé depuis l'injection (s)

V = vitesse de propagation (m/s)

D = coefficient de diffusion ( $m^2/s$ )

$W = \sqrt{V^2 + 4RD}$  = vitesse apparente de la propagation (m/s)

R = coefficient de disparition du traceur ( $s^{-1}$ )

M = masse injectée (kg)

Q = débit ( $m^3/s$ )

l'expression (3) peut également s'écrire :

$$C(x, t) = \frac{M}{Q} \cdot \underbrace{\frac{1}{\sqrt{4 \pi D t}} \cdot \frac{x}{t} \cdot \exp \left[ -\frac{(x-Vt)^2}{4 D t} \right]}_{I} \cdot \exp (-Rt) \quad | (4)$$

II

où I représente l'équation de la diffusion sans disparition de produit

et II résulte de l'influence des phénomènes de dégradation

$$\text{si on pose : } L = \frac{D}{V}$$

$$T = \frac{D}{V^2}$$

et que l'on norme les distances par L et les temps par T

On obtient :

$$C = \frac{M}{Q} \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{4 \pi}} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{x^*}{t^* \sqrt{t^*}} \cdot \exp \left[ -\frac{(x - t^*)^2}{2 t^*} \right] \cdot \exp (-R.t) \right] \quad | (5)$$

$$\text{où } x^* = x / L$$

$$\text{et } t^* = t / T$$

L'expression entre crochets est appellée aussi réponse impulsionale, nous verrons par la suite pourquoi. Nous avons représenté sur la figure n° 1 les réponses impulsionales pour diverses valeurs de  $x / L$  et en négligeant la disparition du produit.

Quelques caractéristiques de ces courbes :

+ Date du maximum :

avec les mêmes notations que pour l'expression (3), le maximum apparaît au temps  $T_x$

REPONSE IMPULSIONNELLE  
POUR X VARIANT DE 5 A 10

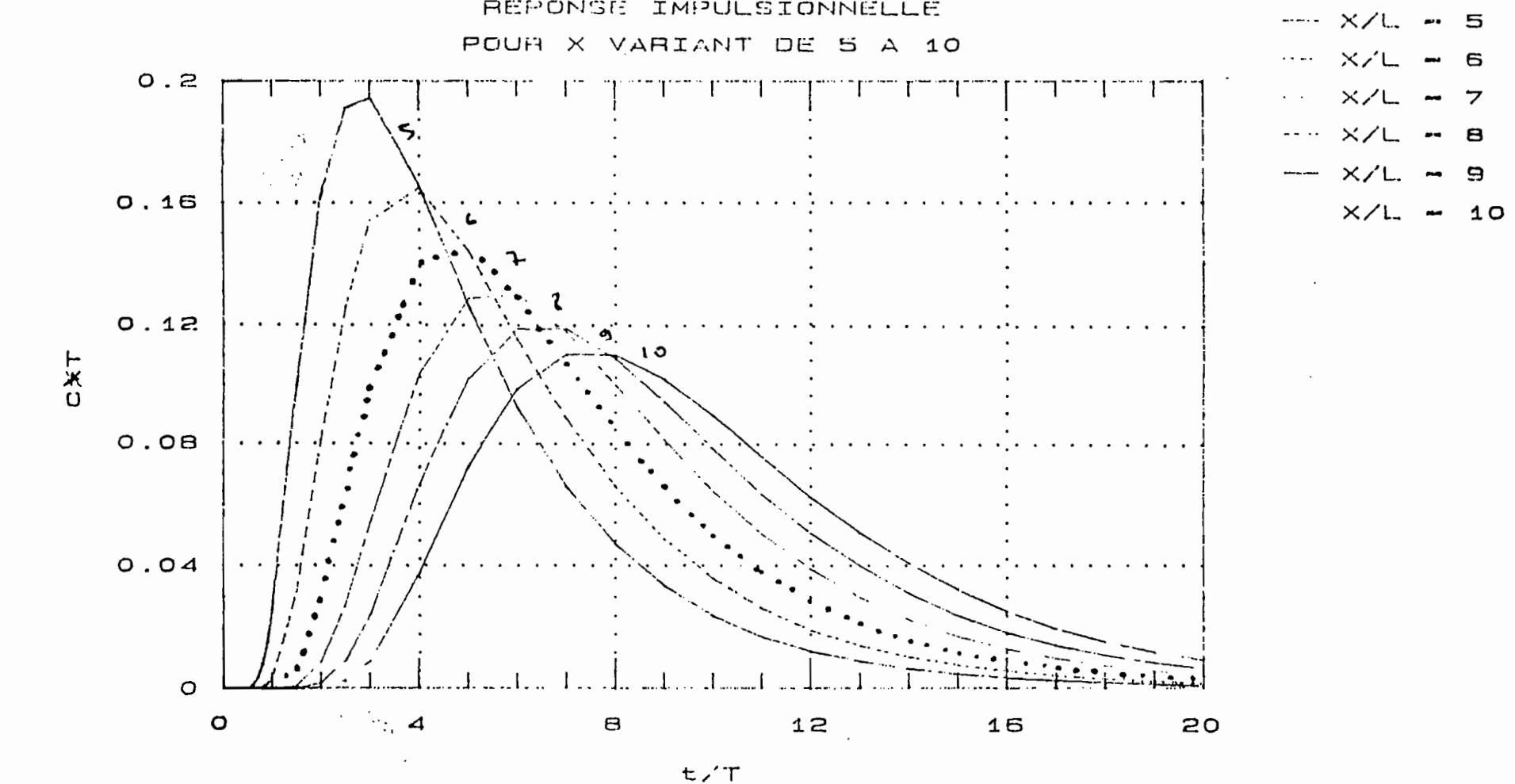


fig. 1

Tel que :

$$T_x = \frac{3 D}{w} \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{w^2 x^2}{9 D^2}} - 1 \right)$$

- si le produit  $4 R D$  est faible devant  $V^2$ ,  $w^2 \approx V^2$  et l'on peut écrire avec les mêmes notations que celles utilisées dans l'expression (5).

$$T_x^* = 3 \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{x^{*2}}{9}} - 1 \right)$$

dès que  $x^*$  est suffisamment grand

$$T_x^* \approx x^* - 3$$

#### + Dose

La dose est l'intégrale de  $\int_0^\infty C(x,t) \cdot d t$ ,

avec les notations de l'expression (3)

$$\text{Dose} = \frac{M}{Q} \cdot \exp \left( - \frac{R \cdot x \cdot R}{(V + W)} \right)$$

$$D_o(x) \approx \frac{M}{Q} \cdot \exp \left( - \frac{R \cdot x}{V} \right)$$

#### + temps moyen

$$T_M = \frac{1}{D_o(x)} \cdot \int_0^\infty t \cdot C(x,t) \cdot d t$$

toujours avec les mêmes notations :

$$\boxed{\begin{aligned} T_M &= \frac{x}{w} \\ T_M' &= \frac{x}{v} \end{aligned}}$$

. avec les notations de l'expression (5)

$$\boxed{T_M = \frac{x}{w}}$$

+ Variance :

$$V_T = \frac{1}{D_0(x)} \int_0^\infty (t - T_M)^2 \cdot C(x, t) \cdot dt$$

. avec les notations de l'expression (3) :

$$\boxed{\begin{aligned} V_T &= \frac{\Sigma D \cdot x}{w} \\ &\approx \frac{\Sigma D \cdot x}{v} \end{aligned}}$$

. avec les notations de l'expression (5) :

$$\boxed{V_T = \frac{\Sigma x}{w}}$$

### 3.2. Cas des injections quelconques

si  $C_i(t)$  est la forme de la courbe concentration temps à l'abcisse origine, la courbe concentration temps à l'abcisse  $x$  peut s'écrire sous la forme du produit de convolution suivant :

$$C(x, t) = \int_0^t C_i(T) \cdot e(t-T) dT \quad (6)$$

ou  $e(T)$  est la réponse impulsionnelle

et est égale à :

$e(t) = 0$  pour  $t < 0$

et pour  $t > 0$ ,

$$e(t) = \frac{i}{\sqrt{4 \pi D t}} \cdot \frac{x}{t} \cdot \exp \frac{Vx}{2D} \cdot \exp \frac{-(x-t-W)^2}{4Dt} \quad (7)$$

avec les mêmes notations que celles utilisées pour l'expression (3).

Un cas particulier est intéressant, il s'agit de celui des injections à débit constant.

#### Cas des injections à débit constant

On injecte dans une rivière de débit  $Q$ , une solution de concentration  $C_0$  avec un débit  $Q_0$  :

On a donc :

$$\text{Pour } t < T_i \quad C_i = \frac{C_0 Q_0}{Q}$$

$$\text{et pour } t > T_i \quad C_i = 0$$

$T_i$  étant la durée de l'injection

l'expression (6) devient alors :

Pour  $t < T_i$  :

$$C(x, t) = \frac{C_0 Q_0}{Q} \int_0^t e(t-T) dT \quad (8)$$

et pour  $t > T_i$  :

$$C(x, t) = \frac{C_0 Q_0}{Q} \left[ \int_0^t e(t-T) dT - \int_0^{t-T_i} e(t-T) dT \right] \quad (9)$$

avec  $\int_0^T e(T) dt = \frac{1}{2} \exp\left(\frac{Vx}{2D}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{Wx}{2D}\right) \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x-Wt}{2\sqrt{Dt}}\right)\right) + \exp\left(+\frac{Wx}{2D}\right) \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x+Wt}{2\sqrt{Dt}}\right)\right) \right\}$

$$\operatorname{erf} = \text{fonction d'erreur } \operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\pi} \int_0^u \exp\left(-\frac{v^2}{2}\right) dv$$

Du fait de l'allure en cloche des courbes d'expression (7) l'expression (8) tend vers un palier  $C_p$  tel que :

$$C_p = \frac{C_0 Q_0}{Q} \cdot \exp\left(-\frac{2 R_x}{(V + W)}\right)$$

$$C_p \approx \frac{C_0 Q_0}{Q} \exp\left(-\frac{R_x}{V}\right)$$

Si l'on peut négliger la dégradation du traceur :

$$C_p \approx \frac{C_0 Q_0}{Q}$$

et l'expression (10) peut s'écrire en reprenant les notations utilisées dans l'expression (5) :

$$\int_0^t e(t) dt = \frac{1}{2} \left( \operatorname{erfc} \frac{x-t}{2\sqrt{t}} + \exp(x) \cdot \operatorname{erfc} \frac{x+t}{2\sqrt{t}} \right) \quad (11)$$

$\operatorname{erfc} = \text{fonctions d'erreur complémentaire}$   
 $= 1 - \operatorname{erf}$

qu'il est souvent plus commode d'écrire de la façon suivante, déduite du fait que

$$\text{erfc}(u) = 2(1 - N(u\sqrt{2}))$$

ou  $N(u)$  est la loi normale

$$\int_0^t e(t).dt = (1-N\left(\frac{x-t}{\sqrt{2}}\right)) + \exp(x) \cdot (1-N\left(\frac{x+t}{\sqrt{2}}\right)) \quad (12)$$

Ces courbes sont facile à calculer à l'aide des logiciels où la loi normale est déjà programmée.  
On en a représenté quelques unes sur la figure (2). Ces courbes nous verrons par la suite, permettent de savoir combien de temps il faut attendre pour obtenir le palier de concentration.

#### Valeurs caractéristiques des courbes :

On peut caractériser, comme dans le cas des injections instantanées, les courbes d'expression (6) par leurs trois premiers moments, la dose, le temps moyen et la variance :

$$D(x) = D(0) \cdot \exp - \frac{Z.R.x}{(V+W)} \quad (13)$$

$$TM(x) = TM(0) + \frac{x}{W} \quad (14)$$

$$VT(x) = VT(0) + \frac{Z.D \cdot x}{W} \quad (15)$$

INTEGRA. DE 0 A T DE LA REPONSE IMPULSIO.  
POUR QUELQUES VALEURS DE X/L

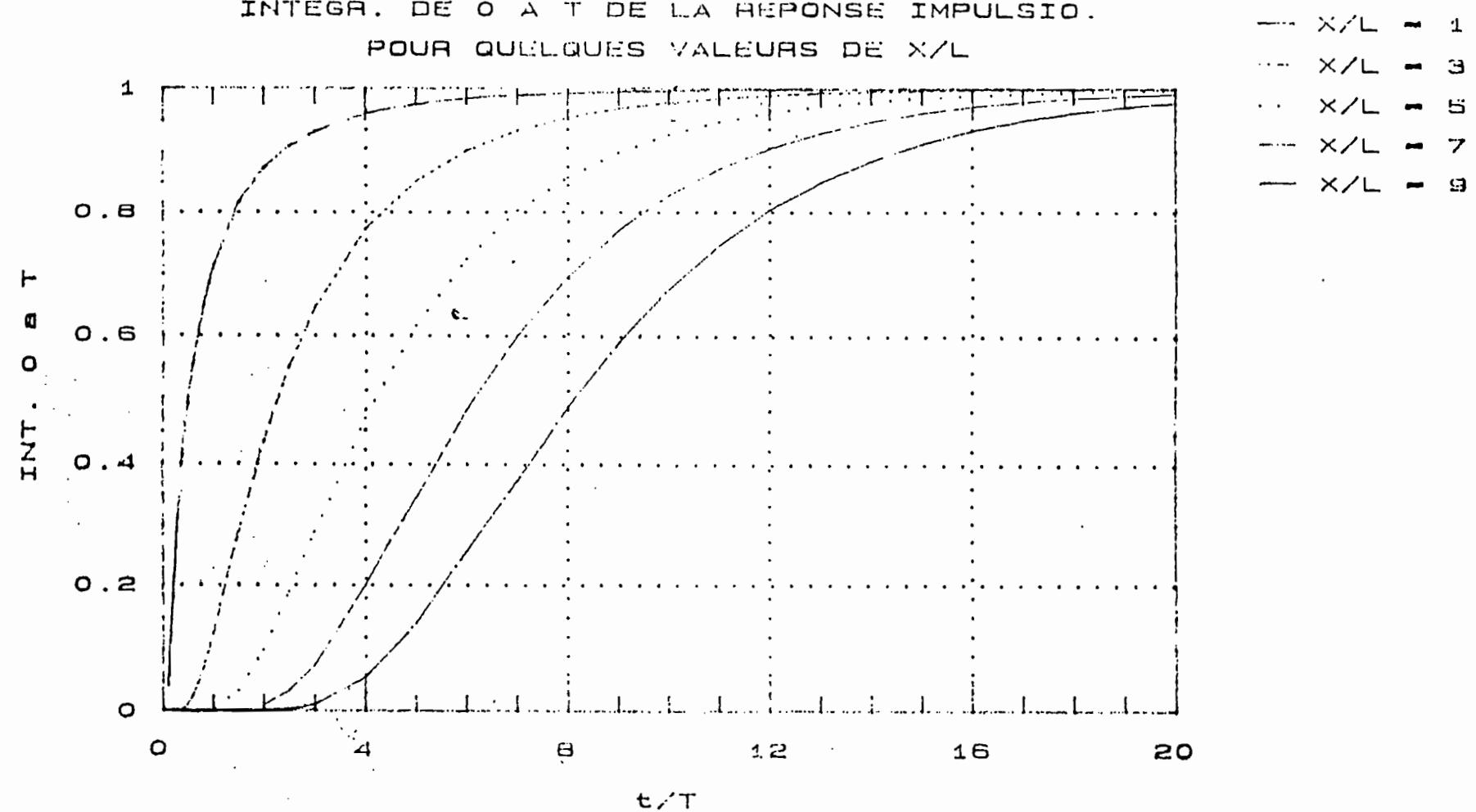


fig. 2

Où  $D_0(0)$ ,  $T_M(0)$  et  $VT(0)$  sont les trois premiers moments de la courbe concentration temps à l'origine.

Si la courbe initiale est celle d'une injection à débit constant telle que définie plus haut, nous avons :

$$D_0(0) = \frac{C_0 \cdot Q_0}{Q} \cdot T_i \quad (16)$$

$$T_M(0) = \frac{T_i}{2} \quad (17)$$

$$VT(0) = \frac{T_i^2}{12} \quad (18)$$

## PRINCIPES DES JAUGEAGES CHIMIQUES

Le but des jaugeages chimiques est de déterminer le débit de la rivière. Deux techniques sont couramment employées : les jaugeages par intégration où la masse de traceur est injectée de façon quasi instantanée et les jaugeages par injection à débit constant.

### 1. JAUGEAGE PAR INTEGRATION

Un certain volume  $S_0$  d'une solution ayant une concentration  $C_0$  est injecté de façon quasi instantanée dans la rivière.

Nous avons vu qu'à une distance  $x$  du point d'injection la dose peut s'écrire :

$$D_0(x) = \int_0^{\infty} C(x, t) dt$$

$$\approx \frac{M}{Q} = \exp \left( -\frac{R x}{V} \right)$$

$$M = \text{masse de produit} = \frac{C_0 S_0}{Q}$$

nous avons donc :

$$D_0(x) = \int_0^{\infty} C(x, t) dt = \frac{C_0 S_0}{Q} \cdot \exp \left( -\frac{R x}{Vt} \right)$$

Nous avons donc :

$$Q = \frac{C_0 \cdot S_0}{\int_0^{\infty} C(x, t) dt} \cdot \exp \left( -\frac{R x}{V} \right) \quad (a)$$

a) Si l'on peut négliger la disparition du produit, l'expression précédente devient :

$$Q = \frac{C_0 S_0}{\int_0^{\infty} C(x, t) dt}$$

il suffit de connaître à une section bien choisie la valeur de  $D_0(x)$  pour en déduire la valeur du débit.

b) Si l'on ne peut négliger la disparition du produit, on peut écrire l'expression (a) de la façon suivante :

$$\log \frac{Q \cdot D_0(x)}{C_0 S_0} = - \frac{R x}{V}$$

$$\log \frac{C_0 S_0}{D_0(x)} = \frac{R x}{V} + \log Q \quad (b)$$

il faut dans ces conditions, pouvoir connaître, à au moins 2 sections bien choisies, la valeur de  $D_0(x)$  pour préciser la droite (b) dont l'ordonnée à l'origine a pour valeur  $\log Q$  et pour pente  $R/V$  (fig. 3)

Dans un cas comme dans l'autre, il faut pouvoir préciser de façon expérimentale la valeur de la dose aux différentes sections de prélèvement.

3 méthodes sont envisageables (fig. n° 4)

- le prélèvement d'échantillons instantanés qui permettront de préciser la courbe  $C(x, t)$  et de l'intégrer.
- le prélèvement d'échantillons moyens sur une durée suffisamment longue. Le produit de la concentration de l'échantillon par le temps de prélèvement donne alors directement la valeur de la dose.
- le prélèvement d'une série continue d'échantillon moyen sur une durée fixe. La somme des concentrations multipliée par la durée de prélèvement est alors égale à la Dose.

Nous allons voir l'avantage et les inconvénients de ces différentes méthodes :

# DETERMINATION DU DEBIT

EN CAS DE DISSECTION DE TRANCHE

NON NEGIGEABLE

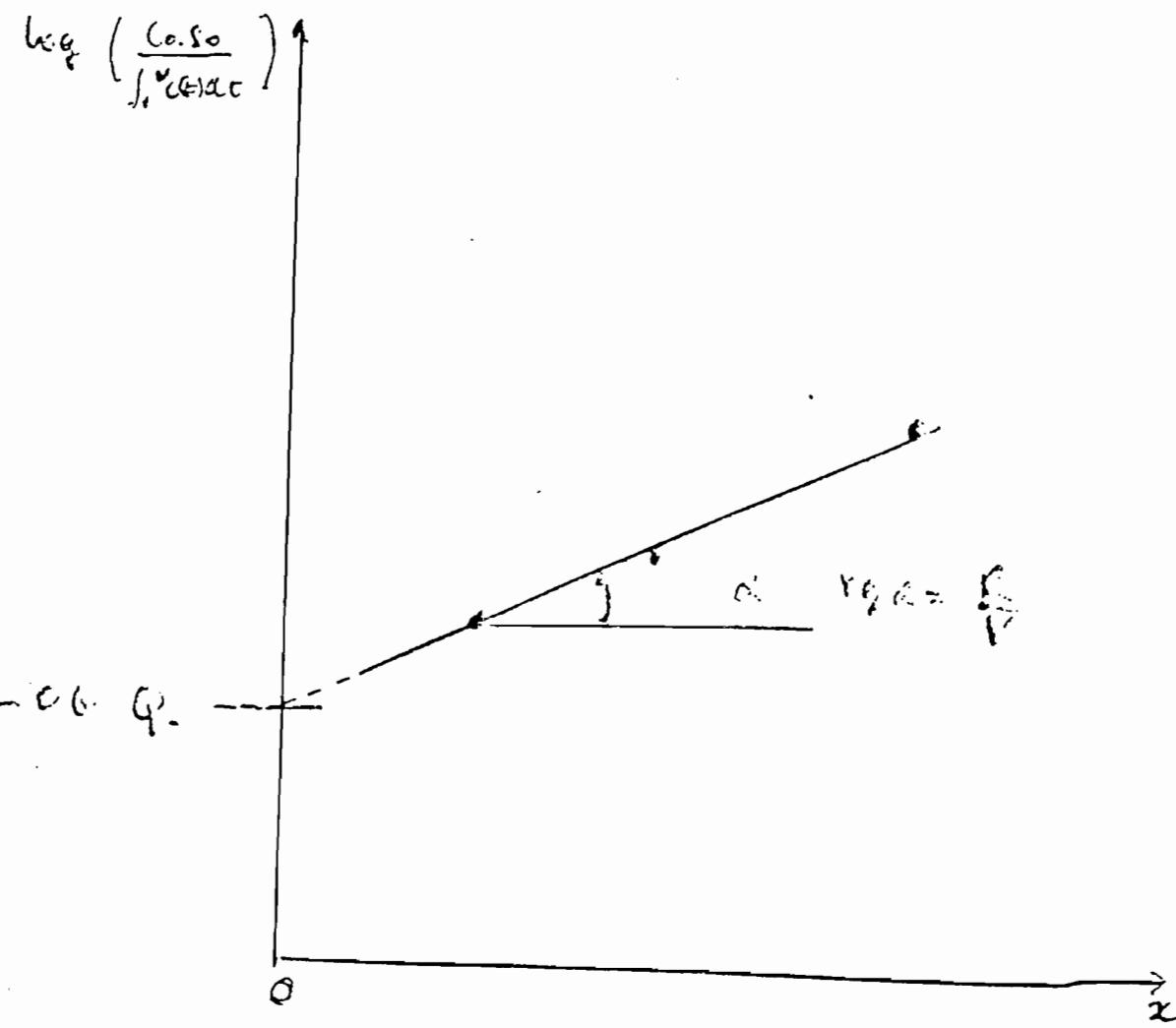
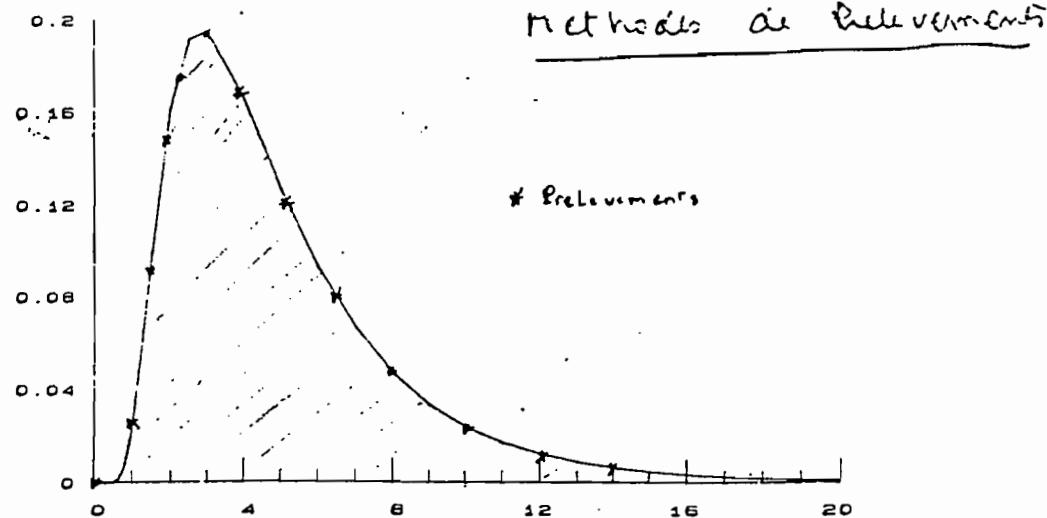
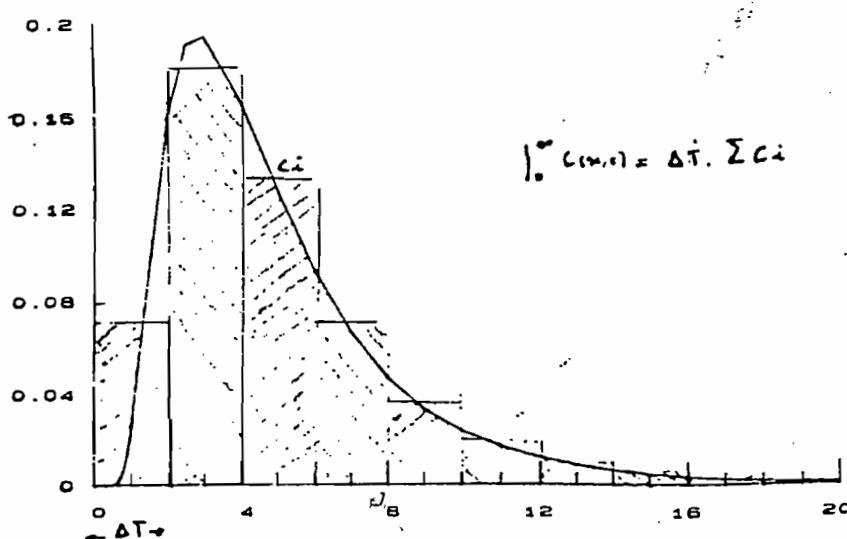
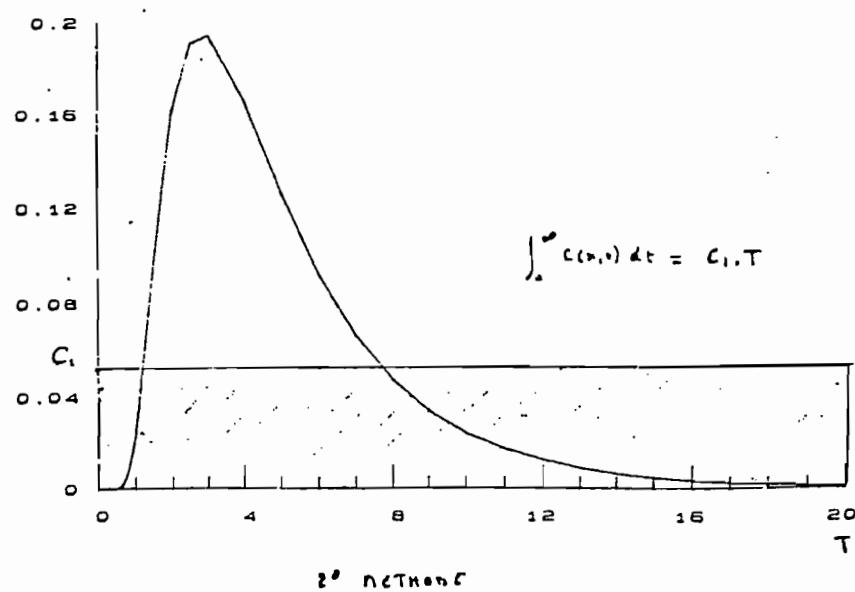


fig. 3



1<sup>e</sup> méthode



3<sup>e</sup> méthode

### 1.1. PRELEVEMENT D'ECHANTILLONS INSTANTANES

#### a) Avantages :

- si les prélèvements sont en nombre suffisant, elle permet de visualiser la forme de la courbe concentration / temps et vérifier ainsi que l'on a bien échantillonné tout le nuage.
- elle peut être mis en œuvre même si l'on ne dispose pas d'appareil pour prélever.

#### b) Inconvénients :

- il faut être sûr que les échantillons puissent permettre une reconstitution fidèle de la courbe  $C(t)$ . Une cadence de prélèvement trop lache risque d'entraîner des erreurs importantes sur la valeur de l'intégrale.
- elle peut donner un poids trop fort aux échantillons aberrants soit dus à une erreur de manipulation, soit dus à des fluctuations aléatoires et de très courtes durées de la concentration.

### 1.2. PRELEVEMENT D'1 ECHANTILLON MOYEN

#### a) Avantages :

- elle est très simple à réaliser puisqu'en théorie un seul échantillon suffit et donne directement la valeur de l'intégrale de la courbe  $C(t)$ .

#### b) Inconvénients :

- il n'est pas toujours très aisément déterminer à priori le temps de prélèvement. Une durée de prélèvement trop courte conduirait à une sous estimation de la valeur de l'intégrale. Une durée trop longue risquerait d'aboutir à des concentrations trop faibles pour être mesurées avec précision.
- En pratique, il est nécessaire de faire plusieurs prélèvements de différentes durées.  
On trace alors la courbe  $C_1.T$  en fonction de  $T$ .  
Cette courbe doit tendre vers une limite qui est la valeur de l'intégrale cherchée - (fig. 5).
- il est nécessaire de disposer d'un appareillage de prélèvement adapté - (pompe peristaltique avec partiteur ou préleveur automatique).

ESTIMATION DE  $\int_0^\infty C(x,t)$  A PARTIR MEILLEURS

MOYENS DE DIFFÉRENTES DURÉES

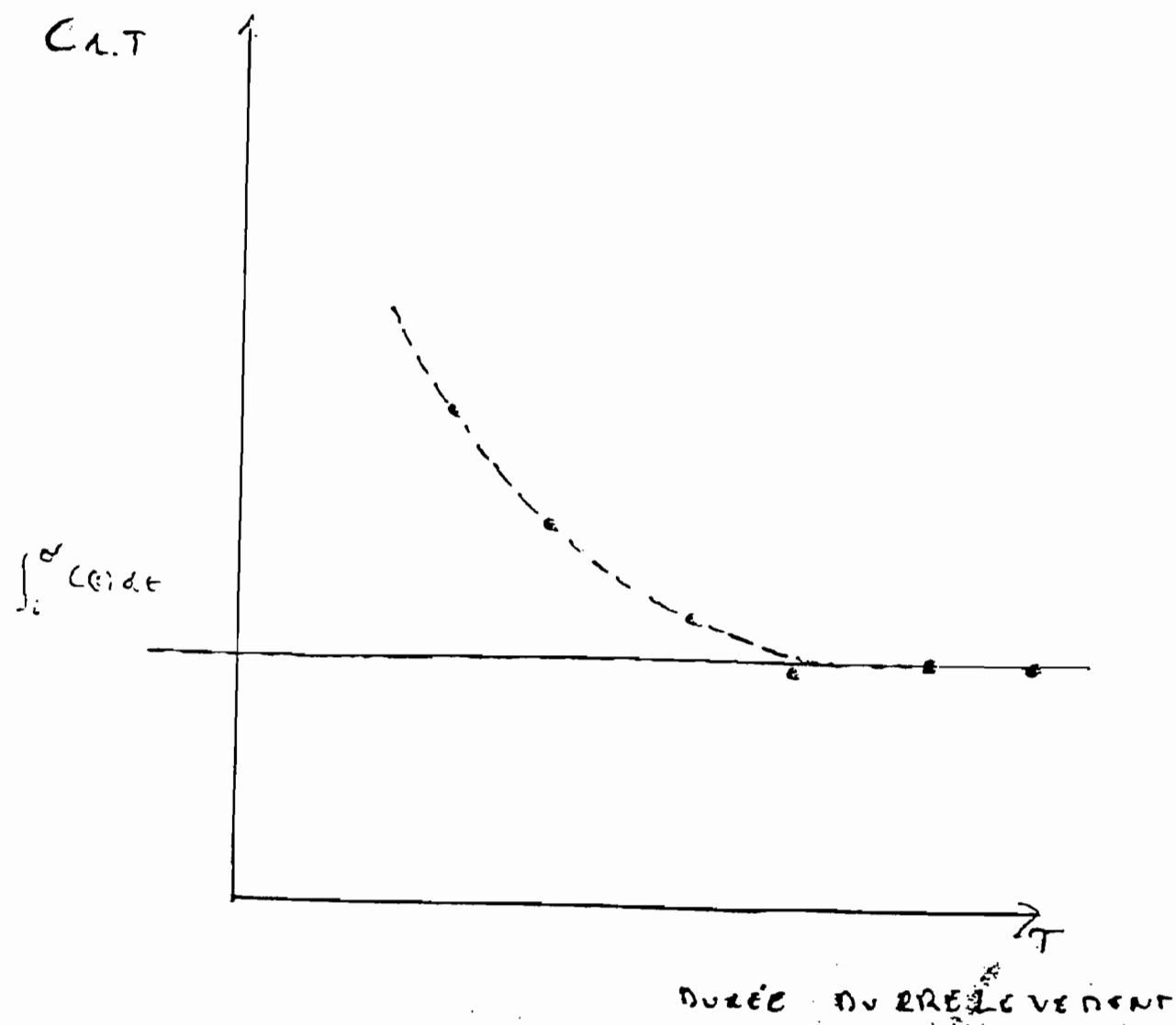


fig. 5

**1.3. Prélèvement d'une série continue d'échantillons moyens de durée constante :**

a) Avantages :

C'est un compromis entre les 2 méthodes précédentes :

- elle permet de visualiser l'allure de la courbe  $C(t)$  et de vérifier que l'échantillonnage est suffisant.

- le calcul de l'intégrale est aisé et peut être fait avec précision.

b) Inconvénients :

- nécessite en pratique un préleveur automatique.

2.

**LES JAUGEAGES A INJECTION A DEBIT CONSTANT**

On injecte dans une rivière de débit  $Q$ , une solution de concentration  $C_0$  avec le débit  $Q_0$ .

Nous avons vu au chapitre précédent que si le temps de l'expérience est suffisant, la courbe concentration temps à une distance  $x$  de la section d'injection, allait tendre vers un palier d'expression :

$$C_p = \frac{C_0 Q_0}{Q} \exp - \frac{R x}{V}$$

le problème de la détermination du débit se pose alors dans les mêmes termes que dans le jaugage par intégration si on remplace  $D_0(x)$  par  $C_p$  et  $C_0, S_0$  par  $C_0, Q_0$ .

On effectue donc, à une ou plusieurs sections à l'aval des prélèvements, jusqu'à ce que l'on observe le palier de concentration  $C_p$ .

a) Si l'on peut négliger la disparition du produit

$Q =$	$\frac{C_0 \cdot Q_0}{C_p}$
-------	-----------------------------

(a)

b) Si l'on ne peut pas négliger la disparition de produit :  
l'on a :

$$\log \frac{C_0 Q_0}{C_P(x)} = \frac{R_x}{V} + \log Q \quad (b)$$

Il faut donc connaître à au moins 2 sections bien choisies, la valeur de  $C_P(x)$  pour préciser la droite (b) dont l'ordonnée à l'origine a pour valeur  $\log Q$  et pour pente  $R / V$ .

### 3.

#### LONGUEUR DE BON MELANGE

Dans tout ce qui précède nous avons supposé que l'on pouvait directement mesurer la concentration moyenne sur l'ensemble de la section, ce qui sera rarement le cas, les prélèvements ne pouvant se faire qu'à un ou quelques points dans la section.

Ce qui précède reste pourtant vrai si en tout point de la section l'intégrale de  $C dt$  est identique. La distance minimale pour laquelle cette condition est réalisée s'appelle la longueur de Bon Mélange ( L B M ).

Plusieurs formules théoriques ou expérimentales ont été proposées, citons :

- Formule de HULL :

$$L = a \cdot Q^{1/3}$$

$a = 50$  si injection au centre  
 $a = 200$  si injection sur le bord

- Formule d'ANDRE, MAZERAN, DUTILLET

$$L = K \cdot La \cdot Q^{1/3}$$

$K$  = variant de 8 à 12 en fonction inverse de la turbulence  
 $La$  = largeur de la rivière

### - Formules LE BARBE

Pour notre part à partir de 11 traçage effectués sur différentes rivières d'Afrique de l'Ouest dans des conditions très diverses puisque les débits variaient de 0,6 m<sup>3</sup>/s à 300 m<sup>3</sup>/s, les largeurs de 10 m à 370 m, Nous pensons qu'il est préférable d'estimer la LBM par la moitié de la longueur de diffusion (cf chapitre 1).

$$LBM \approx 0,5 \cdot L DIF$$

$$= 0,5 \cdot V \cdot \sqrt{\frac{L_a^2}{R_h (g, R_h, I)}}$$

que l'on peut exprimer à partir de la vitesse, la largeur et le débit; en posant

$$Rh = H = \frac{Q}{V \cdot L_a}$$

$$LBM = 0,5 \cdot \left( \frac{L_a \cdot V}{g \cdot Q \cdot i} \right)^{1/2}$$

ou  $i$  est la pente de la rivière.

L'expression précédente peut être simplifiée si on fait l'approximation suivante, vérifiée sur plusieurs rivières d'Afrique de l'Ouest liant la vitesse à l'expression

$$(2g \frac{Q}{L_a})^{1/3}$$

$$V \approx d \cdot (2g \frac{Q}{L_a})^{1/3}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

et  $d$  prenant les valeurs suivantes

V	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5	-2.0	3.0	>3.0
d	0.11	0.143	0.158	0.167	0.172	0.185	0.190	0.192	0.195	0.2

On a alors :

$$L D I F \approx d \cdot g \cdot \sqrt{\frac{8}{I}} \cdot \frac{L_a^2}{V^2}$$

et

$$L B M \approx \sqrt{\frac{2}{I}} \cdot g \cdot d \cdot \frac{L_a^2}{V^2}$$

- Ordre de grandeur de la LBM

Quelque soit les formules, on peut donner des ordres de grandeur suivant :

L a	L B M
0 à 10 m	50 à 500 m
10 à 50 m	500 à 2500 m
50 à 200 m	2,5 à 15 km

## PRINCIPES DES TRACAGES

On peut effectuer un tracage dans 2 optiques différentes:

- la première, de simulation, consiste à utiliser un traceur facilement dosable pour simuler, pour des conditions initiales bien précises, la propagation d'une substance dissoute (polluant par exemple) pour laquelle les analyses sont beaucoup plus complexes ou plus onéreuses à réaliser.
- la seconde, de calage de paramètre, consiste à utiliser le tracage pour caler les paramètres d'un modèle de diffusion dans le but d'utiliser ce modèle pour prévoir la propagation d'une substance dissoute pour des conditions initiales qui peuvent être différentes de celles du tracage.

### 1. TRACAGES DE SIMULATION

On injecte le traceur du même endroit et de la même façon que l'évènement que l'on veut simuler, on effectue ensuite des prélèvements aux endroits jugés les plus intéressants. Ce peut être par exemple, dans le cas d'une simulation d'une pollution, les emplacements de prises d'eau.

La différence entre les courbes de concentration du traceur et celles du polluant résultera essentiellement de la différence entre les valeurs de coefficient de disparition du produit et du polluant.

Si  $R = \text{coefficient de disparition du traceur}$   
 $T$

et  $R_p = \text{coefficient de disparition du polluant}$

tant que :

$4 R_p D \ll V^2$  (Notations du chapitre I)

on admettra que la courbe  $C_p(t)$  de concentration du polluant

$P$

peut s'estimer à partir de la courbe  $C_T(t)$  du traceur par la relation suivante :

$T$

$$\boxed{\frac{C_p(t)}{P} = \frac{C_T(t)}{T} \cdot \exp \left( - \left( \frac{R_p}{R_T} - \frac{R_T}{R_p} \right) \cdot \frac{T M}{T} \right)} \quad (1)$$

ou  $T_M = \frac{\int_0^\infty t \cdot C(t) dt}{T}$  est le temps moyen du nuage du traceur au point de prélèvement

$$= \frac{\int_0^\infty t \cdot C(t) dt}{T}$$

L'application de la formule (1) nécessite bien entendu la connaissance de  $R_p$ .

## 2. TRACAGES DESTINES A LA DETERMINATION DES PARAMETRES D'UN MODELE DE DIFFUSION

Nous limiterons notre exposé au cas des écoulements monodimensionnels.

Il s'agit de déterminer les paramètres du modèle de diffusion présenté au chapitre I, à savoir

- .  $D$  le coefficient de diffusion,
- .  $V$  la vitesse de propagation
- .  $R$  le coefficient de disparition.

2 types de méthodes peuvent être employées, celle des moments et les méthodes mathématiques d'optimisation de paramètres.

### 2.1. METHODES DES MOMENTS :

De l'expression des trois premiers moments, présentés à chapitre I, la dose, le temps moyen et la variance, on peut déduire l'expression des paramètres du modèle: soit avec les mêmes notations:

$$W = \frac{(x_1 - x_0)}{TM(x_1) - TM(x_0)}$$

$$D = \frac{(VT(x_1) - VT(x_0))}{2(x_1 - x_0)} \cdot W^3$$

$$V = W + \ln \frac{D_0(x_0)}{D_0(x_1)} \cdot \frac{2D}{(x_1 - x_0)}$$

$$\text{et } R = \frac{(W^2 - V^2)}{4 D}$$

ou

$D_0(x_0)$  et  $D_0(x_1)$  = Dose aux abscisses  $x_0$  et  $x_1$

$T_M(x_0)$  et  $T_M(x_1)$  = temps moyen aux abscisses  $x_0$  et  $x_1$

$V_T(x)$  et  $V_T(x_1)$  = variance aux abscisses  $x_0$  et  $x_1$

La méthode des moments, si elle est facile à mettre en œuvre, ne permet pas toujours une très bonne coïncidence entre les courbes observées et calculées, celles-ci se trouvant beaucoup plus aplatis que celles-là.

## 2.2. MÉTHODES MATHÉMATIQUES D'OPTIMISATION :

Il existe des méthodes mathématiques d'optimisation des paramètres (MARQUART ou celle du Simplex) qui sont intégrées dans certains logiciels et qui permettent à partir de valeurs initiales données, de trouver les paramètres permettant une coïncidence optimale entre les observations et les résultats du calcul.

Ces méthodes mathématiques sont bien supérieures à la méthode des moments et doivent être préférées quand il est possible de les mettre en œuvre. On pourra prendre comme valeurs initiales les résultats obtenus à l'aide de la méthode des moments.

PRESENTATION DE QUELQUES TRACEURS UTILISES  
EN HYDROLOGIE

Un bon traceur doit avoir six qualités essentielles :

- 1. une grande solubilité dans l'eau pour éviter le maniement des volumes trop importants de solutions lors de l'injection.
- 2. une grande stabilité chimique pour limiter au maximum les phénomènes de disparition du traceur.
- 3. une présence négligeable dans les eaux naturelles.
- 4. une toxicité nulle tant pour les hommes que pour l'environnement aux concentrations utilisées.
- 5. un prix aussi faible que possible.
- 6. un mode d'analyse simple et pouvant permettre des dosages à très faibles concentrations.

Depuis que les traçages et les jauges chimiques sont pratiqués un grand nombre de traceurs ont été employés. C'est certainement le dichromate de sodium qui a été le plus utilisé. Du fait de sa toxicité, il est progressivement abandonné au profit des traceurs fluorescents.

C'est par ce type de traceur que nous allons commencer cette présentation. Nous présenterons ensuite le bichromate de sodium et nous terminerons enfin par un inventaire rapide des autres traceurs employés.

1. LES TRACEURS FLUORESCENTS

Un des principaux avantages de ces substances, autre leur faible toxicité est leur fluorescence qui permet par fluorimétrie des dosages à très faibles concentrations

- 9            -10  
(10      à 10      ).

### 1.1. LA FLUORESCENCE :

Les substances fluorescentes absorbent la lumière dans un certain spectre, le spectre d'absorption, et restituent l'énergie absorbée par émission d'une lumière dans un spectre de longueur d'onde supérieur, le spectre d'émission (fig. 6). La lumière est émise dans toutes les directions de l'espace. La fluorescence varie de façon linéaire avec la concentration tant que celle-ci ne dépasse pas quelques centaines de ppb nous verrons pourquoi par la suite. La mesure à la fluorescence permet donc d'en déduire les concentrations. Elle se fait à l'aide d'un fluorimètre.

### 1.2. Le fluorimètre

Le schéma de principe d'un fluorimètre est représenté sur la figure n° 7. L'échantillon à doser est excité en l'exposant à une lumière dont le spectre est le plus proche possible de celui d'absorption de la substance à doser. On mesure alors la quantité de lumière émise par fluorescence dans le spectre d'émission. Le rapport entre l'intensité lumineuse émise sur l'intensité lumineuse excitante est proportionnelle à la concentration du traceur.

On peut décomposer un fluorimètre en trois parties principales :

- une partie "excitatrice"
- la cuve où est placé l'échantillon à mesurer
- une partie "mesure de l'intensité émise par fluorescence".

#### 1.2.1. La partie excitatrice

Elle se compose d'une lampe, d'un filtre et d'un diaphragme

##### a) les lampes :

les lampes doivent émettre avec une intensité suffisante une lumière comprenant le spectre d'absorption de la substance à doser qui sera ensuite isolé par le filtre primaire.

Il peut s'agir de lampe à vapeur de mercure (émission d'un spectre discontinu constitué des différentes raies du mercure) et / ou à halogène (spectre continu).

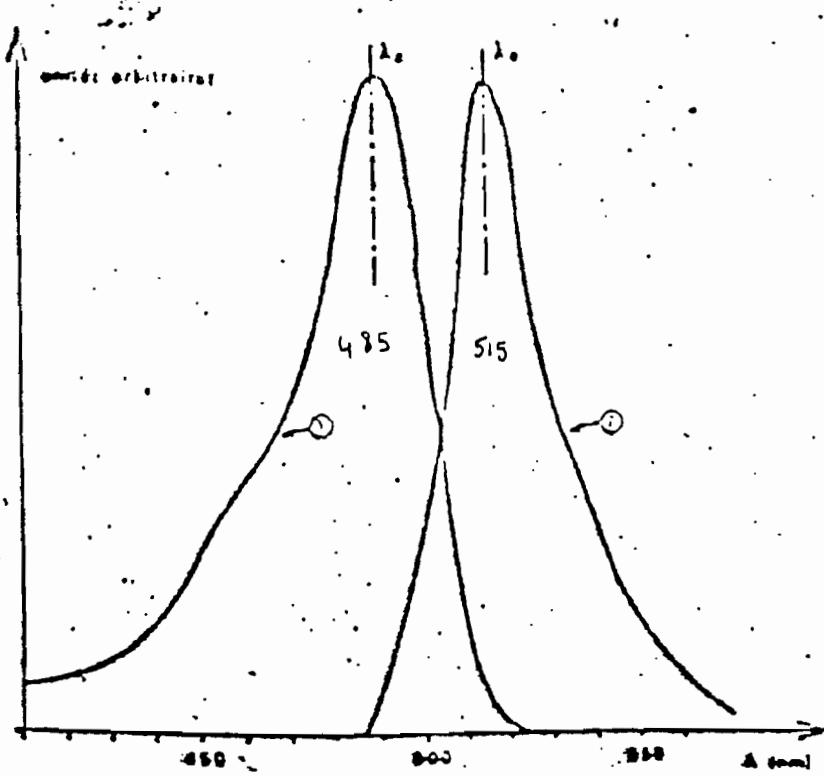
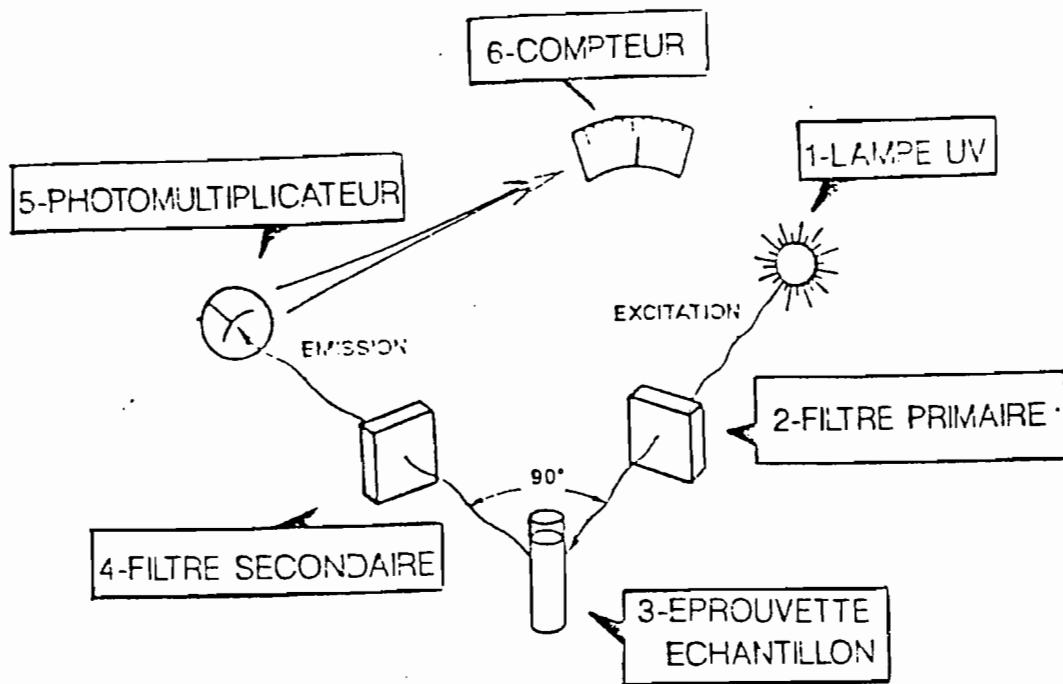


Fig. 6. Spectres d'absorption et d'émission de fluorescence de la fluorescine.  
1 = spectre d'absorption; 2 = spectre d'émission de fluorescence.

Schéma de principe des fluorimèt



#### PRINCIPALES PIECES DU TURNER MODEL 111

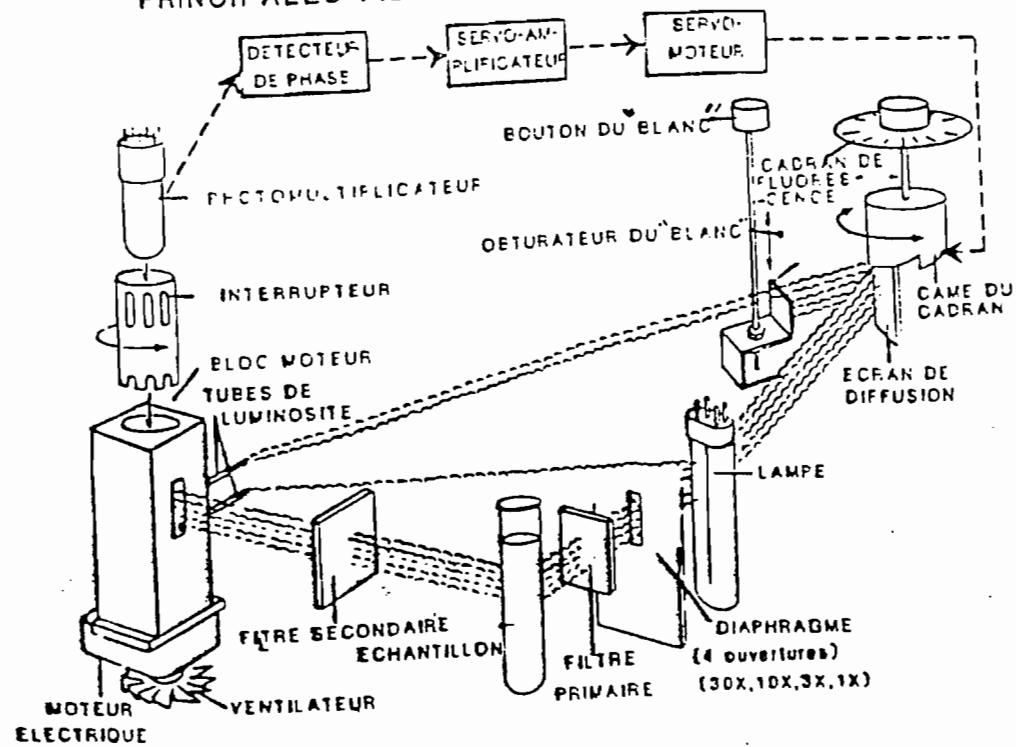


fig. 7

Pour les rhodamines, traceurs très utilisés en hydrologie et avec un fluorimètre Turner 111 ou 112, très couramment employé, on choisira la lampe à UV lointain.

b) le filtre primaire :

Il isole des spectres émis par la lampe, les longueurs d'onde du spectre d'absorption. Il s'agit de filtres à bande passante étroite (N.P) centré sur le pic d'absorption de la substance à doser : 490 nm pour la fluoresceine, 550 nm pour les rhodamines B et WT, 520 nm pour la sulforhodamine G.

c) Le diaphragme :

En ouvrant plus ou moins le diaphragme on peut régler l'intensité excitatrice et étendre la gamme de mesure du traceur.

Sur les fluorimètres TURNER, 111 et 112, quatre ouvertures sont possible 1 X, 3 X, 10 X et 30 X.

On peut compléter l'utilisation de ce diaphragme par l'emploi de filtres de densité neutre (N - D) qui n'ont pour effet que d'absorber une certaine quantité de lumière sans en modifier le spectre. Ces filtres sont caractérisés par le rapport entre l'intensité lumineuse à l'amont et à l'aval du filtre : un filtre N D de 1 % occulte 99 % de la lumière reçue, un filtre N D de 10 % en occulte 90 % .

#### 1.2.2. La cuve de mesure :

La cuve de mesure sera la plupart du temps, un simple tube de 10 à 15 mm de diamètre sur 75 mm à 100 mm de longueur, (type tube à hemodialyse) dans lequel sera placé l'échantillon à mesurer. En cas d'analyse multiple, il faut vérifier que les tubes utilisés aient des caractéristiques optiques identiques. Ce que l'on vérifiera aisément en mesurant la fluorescence d'une même solution avec la totalité des tubes. On devra écarter les tubes pour lesquels la mesure est différente.

Des systèmes plus complexes existent. Par exemple pour faire des mesures en continu (cuve à circulation) ou pour assurer une température constante lors de la mesure (cuve thermostable).

### 1.2.3. La mesure de l'émission :

L'intensité lumineuse qui doit être mesurée est uniquement celle émise par la fluorescence de la substance à doser. La mesure se fera donc perpendiculairement à la lumière excitatrice et se fera uniquement sur le spectre d'émission qui sera isolé par le filtre secondaire.

Ce filtre pourra être un filtre à bande passante (NP) centrée sur le pic d'émission : 520 nm pour la fluoresceine, 580 nm pour les rhodamines B et WT, 540 nm pour la sulforhodamine G.

Mais ce pourra être également un filtre passe-haut (SC) qui ne laisse passer que les longueurs d'onde supérieures à un certain seuil.

Il est très important de s'assurer que les filtres primaires et secondaires soient compatibles, il faut absolument qu'il n'y ait pas superposition de leurs spectres.

A titre d'exemple on pourra utiliser pour la rhodamine B :

- filtre primaire : Filtre NP 540 mm
- filtre secondaire : Filtre NP 590 mm ou Filtre SC de 580 mm.

A l'aval du filtre secondaire, se trouve un système optique permettant de mesurer la fluorescence de l'échantillon.

## 1.3. FACTEURS INFLUENCANT LA FLUORESCENCE

Plusieurs facteurs sont susceptibles d'influer sur la fluorescence. Parmi ceux-ci citons, le Ph, la température, l'exposition à la lumière, la forte concentration de l'échantillon, l'absorption.

### 1.3.1. Influence du Ph :

Un traceur peut avoir plusieurs formes structurales différentes n'ayant pas toutes le même pouvoir de fluorescence.

La proportion entre les formes structurales peut être influencée par le Ph qui va donc influer sur la fluorescence. On trouvera représenté sur la figure n° 8 l'influence du Ph sur les intensités de fluorescence pour la fluoresceine, la rhodamine B et WT et la sulforhodamine G. Pour les Ph couramment rencontrés dans les eaux naturelles, leur influence sera faible sauf peut-être pour la fluoresceine en eaux acides (Ph < 7).

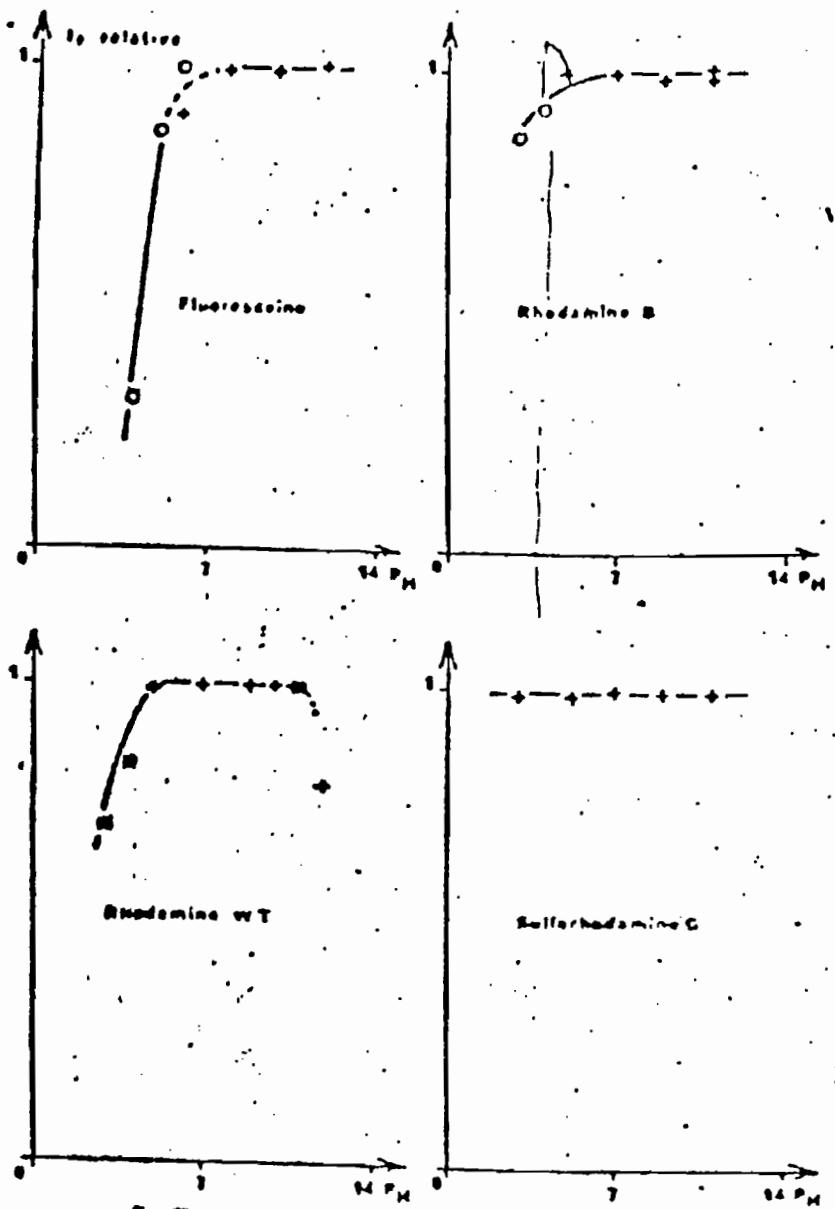


fig. 8. Influence du pH sur les intensités de fluorescence  $I_F$  des traceurs xanthéniques.  
 + = nos résultats; o = résultats de Feuerstein et Selleck (1963); x = résultats de Moser et Neumaier (1969).

### 1.3.2 Influence de la température :

La température peut avoir une influence importante sur la fluorescence comme le montre le tableau suivant :

Traceur	Perte en % par degré C
Fluoresceine	0,36
Rhodamine B	2,7
" WT	2,6
Sulforhodamine B	2,9
" G	0

### 1.3.3 Influence de la lumière :

Les traceurs fluorescents peuvent être photodégradés en solution par l'oxygène dissous ou par les ions ferriques. On trouvera représenté sur la figure n° 9 l'influence de l'exposition à la lumière pour les traceurs déjà cités. On remarquera que la fluoresceine est très sensible à la lumière ce qui restreint son intérêt pour l'hydrologie de surface.

### 1.3.4 Influence des fortes concentrations :

- 2 - 3

Pour les très fortes concentrations ( $10^{-2}$  à  $10^{-3}$ ) peut se produire une polymérisation du traceur. La forme polymère n'étant pas, en règle générale, fluorescente, cela se traduit par une perte de fluorescence. Le processus n'étant pas irréversible il suffira de diluer suffisamment l'échantillon avant l'analyse.

### 1.3.5 Influence des phénomènes d'absorption :

Les phénomènes d'absorption peuvent se produire sur les parois des récipients contenant les traceurs - leur importance relative sera d'autant plus forte que les concentrations seront faibles. On emploiera donc de préférence des récipients en verre. De même les traceurs peuvent être absorbés par les matières en suspension et les plantes aquatiques. La rhodamine WT est le traceur le moins absorbé, puis vient la fluoresceine et la sulforhodamine, en dernier lieu la rhodamine B.

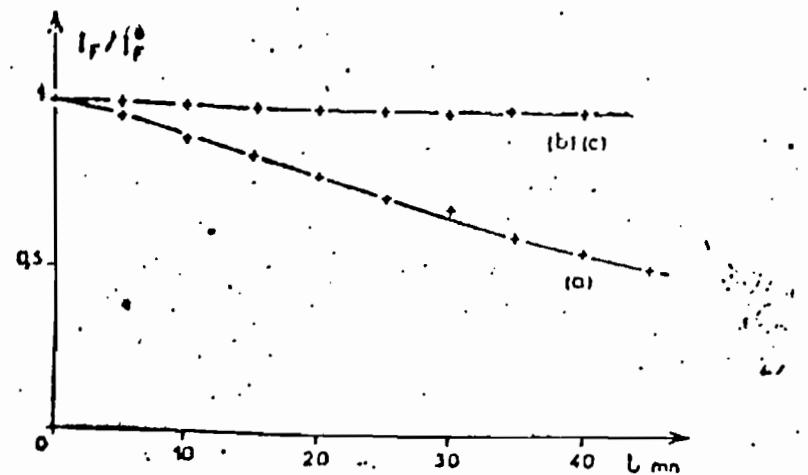


fig. 9. Influence du temps d'irradiation sur l'intensité de la fluorescence des traceurs fluorescents. Conditions expérimentales: (traceur) =  $10^{-4}$  g/ml; solvant = eau; température = 22°C.

- (a) Fluorescéine: excitation à 480 nm; analyse à 515 nm.
- (b) Rhodamines B et WT: excitation à 550 nm; analyse à 575 nm.
- (c) Sulforhodamine G: excitation à 530 nm; analyse à 555 nm.

## 1.4

LES PRINCIPAUX TRACEURS FLUORESCENTS UTILISÉSEN HYDROLOGIE :

Dans ce qui précède nous avons cité les principaux traceurs fluorescents utilisés en hydrologie : la fluoresceine, la rhodamine B, la rhodamine WT, la sulforhodamine G. Nous allons rapidement faire l'inventaire de leurs avantages et inconvénients respectifs. Tous ne sont quasiment pas toxiques.

1.4.1 Fluoresceine :a) Avantages :

- bon marché
- peu d'~~adsorption~~
- peu d'influence de la température

b) Inconvénients :

- très photodégradable
- ne peut être utilisée pour des eaux acides

1.4.2 Rhodamine B :a) Avantages :

- détectable à de basses concentrations  
-10  
(< 10 )
- coût modéré
- ~~adsorption~~ modérée
- photodégradation modéré

b) Inconvénients :

- peu soluble dans l'eau (20 g/l) ce qui oblige l'utilisation de solutions acides pour les solutions initiales

1.4.3 Rhodamines WT :a) Avantages :

- détectable à de très faibles concentrations (supérieur cependant à celles de la rhodamine B)
- peu d'~~adsorption~~
- peu photodégradable

b) Inconvénients :

- coût plus élevé sur la rhodamine B (2 fois plus cher)
- approvisionnement moins aisé que pour la rhodamine B (nécessité de commander aux USA)

1.4.4 Sulforhodamine G :

a) Avantages :

- détectable à de très faibles concentrations
- peu d'absorption
- peu photodégradable
- peu influencé par la température et par le Ph

b) Inconvénients :

- coût élevé (7 fois plus cher que la rhodamine B)
- approvisionnement moins aisé que pour la rhodamine B

1.4.5 Conclusions :

De ce rapide inventaire nous retiendrons :

1. que la fluoresceine du fait de sa forte sensibilité à la lumière, ne pourra rarement être utilisé en hydrologie de surface pour des mesures quantitatives.
2. S'il est nécessaire d'avoir un traceur très conservatif (pour des jauges notamment), on employera de la rhodamine WT.
3. que dans les autres cas, la rhodamine B sera préférée car plus économiques.

2.

LE DICHROMATE DE SODIUM

Ce sel a été durant longtemps le traceur le plus employé. Il a toutes les qualités d'un bon traceur : il est bon marché très soluble dans l'eau (600g/l), facilement dosable, stable (sauf dans les eaux très réductrices), il n'existe pas dans les eaux naturelles. Il présente cependant le très gros inconvénient d'être毒ique à plus de 20 mg/l. Du fait de cette toxicité relativement forte, il tend a être abandonné au profit des traceurs fluorescents. Malgré cela, il nous est apparu nécessaire de le présenter

ici, compte tenu du fait que la technique des jaugeages chimiques avec ce sel, est parfaitement au point car s'appuyant sur un nombre considérable d'expériences.

C'est un traceur coloré, c'est à dire qu'une lumière en le traversant va changer de spectre et donner une couleur rose violet. L'importance de l'intensité lumineuse mesurée dans la couleur du traceur est donnée par la loi de BEER LAMBERT :

$$\log \frac{I_0}{I} = K C$$

ou  $I_0$  = intensité lumineuse à travers la solution

$I$  = intensité lumineuse à travers l'échantillon

$C$  = concentration de dichromate

$K$  = constante fonction de l'épaisseur de l'échantillon, de la température et de la longueur d'onde.

Son principe de dosage est donc le suivant : on forme un complexe coloré (par introduction dans l'échantillon de diphenylcarbazide) que l'on éclaire par une lumière complémentaire de la couleur du complexe et l'on mesure l'intensité lumineuse dans la couleur de la lumière qui a traversé l'échantillon. L'appareil utilisé est un colorimètre.

## 2.1. Colorimètre :

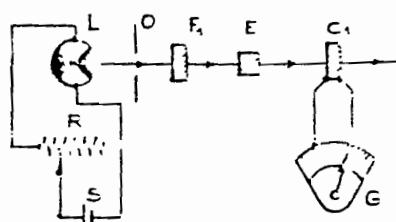
On trouvera représenté sur la figure n° 10 le schéma des trois types de colorimètres couramment employés. La partie "éclairage" de l'échantillon est très semblable pour les trois : elle se compose d'une source lumineuse, d'un dispositif optique permettant d'obtenir un faisceau aussi étroit que possible et d'un filtre, couleur complémentaire de celle du complexe coloré.

En revanche les modes de mesure sont sensiblement différents : dans le colorimètre n° 1, on mesure directement l'intensité lumineuse; ce qui présente deux inconvénients majeurs : d'une part la mesure n'est pas proportionnelle à la concentration, d'autre part elle est très sensible à des variations de la source lumineuse. Les deux inconvénients n'existent pas dans les 2 autres types d'appareils.

S : Source d'énergie stabilisée  
 R : Régulateur de réglage  
 L : Lampe  
 O : Dispositif optique  
 F<sub>1</sub> : Filtre vert  
 F<sub>2</sub> : Filtre anticolorant  
 K : Coin logarithmique en verre neutre  
 E : Échantillon à analyser  
 C<sub>1</sub> : Cellule photo-électrique  
 C<sub>2</sub> : Cellule de comparaison  
 G : Galvanomètre  
 D : Diaphragme réglable de compensation  
 G<sub>0</sub> : Galvanomètre de zéro  
 I : Indicateur de position du coin K  
 M : Miroirs  
 T : Dispositif tournant oscillant successivement R<sub>1</sub> et R<sub>2</sub>  
 A : Ampli-détecteur de déséquilibre de la cellule C<sub>1</sub>

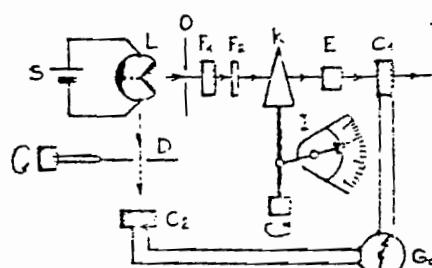
COLORIMETRE N° 1

Fig. 1E a



COLORIMETRE N° 2

Fig. 1E b



COLORIMETRE N° 3

Fig. 1E c

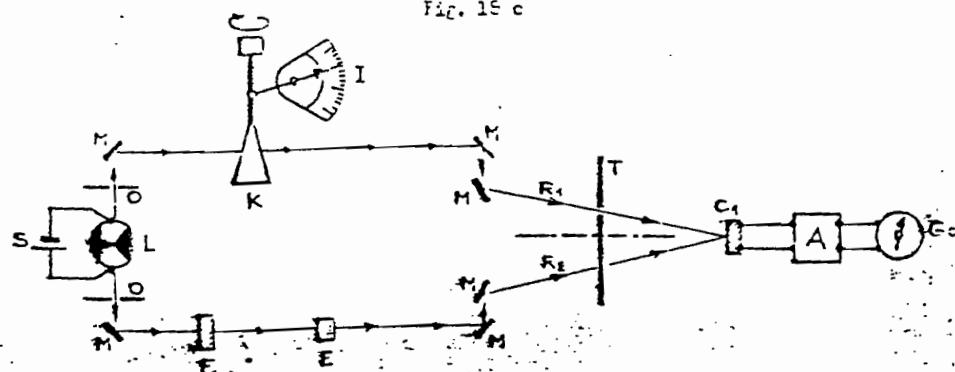


fig. 10 - Schémas de principe de 3 colorimètres

## 2.2. Mode opératoire :

Nous avons vu précédemment que l'analyse au colorimètre devait être précédée d'une manipulation chimique pour former un complexe coloré.

Le réactif utilisé est constitué de diphenylcarbazide dissous dans l'acétone (0,250 g dans 100 cm<sup>3</sup>). Le réactif n'étant stable que durant quelques jours, il est préférable de le préparer au début de chaque série d'analyse.

Pour former le complexe coloré, il faut au préalable acidifier l'échantillon (6 cm<sup>3</sup> d'acide sulfurique à 64° Baumé dilué 10 fois pour un échantillon de 150 cm<sup>3</sup>). La quantité de réactif à introduire est de 6 cm<sup>3</sup> pour un échantillon de 150 cm<sup>3</sup>.

Pour les solutions très diluées (inférieures à 2 mg/l), on peut procéder à une reconcentration préalable (10 fois) par du butanol.

On procède alors de la façon suivante :

- mettre 150 cm<sup>3</sup> des solutions à doser dans des ampoules de décantation.
- introduire 6 cm<sup>3</sup> de réactif
- mettre une dose de 50 g de Na Cl pour obtenir la saturation.
- ajouter 15 cm<sup>3</sup> de butanol
- agiter fortement et longuement (3 minutes)
- laisser décanter 10 minutes, le complexe coloré sera alors passé dans le butanol.
- soutirer et récupérer le butanol surnageant
- analyser le mélange butanol - complexe coloré au colorimètre.

## 2.3 Comparaison avec la Rodhamine :

On peut résumer les résultats de la comparaison entre la rhodamine (B ou WT) et le dichromate dans le tableau suivant:

	Rhodamine	Bichromate
Toxicité	# nulle	forte pour C> 20 mg/l
Solubilité	20 g/l (200 g/l dans solutions d'acide acétique)	600 g/l
Dosage minimum	-9 -10 10 10	-8 -7 10 / 10 après reconcentration
Coût au kg	500 F.F	150 F.F

Le bilan est donc largement en faveur de la rhodamine qui est peu毒ique et qui malgré son prix plus élevé reviendra moins cher puisqu'il faudra, pour un même tracage, une quantité 10 à 100 fois moindre.

### 3. LES AUTRES TRACEURS

#### 3.1 LE CHLORURE DE SODIUM - Na Cl.

Le traceur n'est plus utilisé car il faut de grosses quantités de produit et il est souvent présent dans les eaux naturelles. Le dosage se fait soit par titration chimique, soit par mesure de résistivité.

#### 3.2 LE SULFATE DE MANGANESE - Mn SO<sub>4</sub>.

Ce traceur peut être utilisé à des concentrations finales de 1 à 2 mg/l; il est bien soluble dans l'eau (500 g/l). Mais il est toxique et relativement instable ce qui rend délicate l'analyse chimique qui se fait par colorimétrie après oxydation du manganèse en permanganate.

#### 3.3 LE NITRITE DE SOUDE - Na NO<sub>2</sub>.

Traceur intéressant. Très soluble dans l'eau et décelable à 0,5 mg/l, mais il est souvent présent dans les eaux naturelles et il est instable en milieu acide. L'analyse colorimétrique se fait comme pour le bichromate mais en utilisant le réactif de Griess et un filtre bleu.

### 3.4 LE CHLORURE DE LITHIUM - Li Cl.

Ce traceur est très intéressant et nouvellement testé. Très soluble dans l'eau (630 g/l), non toxique, chimiquement stable et rarement présent dans les eaux naturelles, il est facilement dosable par spectrométrie d'émission de flamme à de très faibles concentrations ( $10^{-9}$  à  $10^{-10}$ ). L'analyse est simple à réaliser mais un spectrophotomètre de flamme est un appareil assez cher dont sont équipés la plupart des laboratoires mais pas les sections d'hydrologie.

### 3.5 LE CHLORURE DE ZINC.

De caractéristiques assez semblables au Li Cl, ce traceur a été abandonné à cause de sa toxicité. Il est dosable à 0,01 mg/l par spectrométrie d'absorption atomique.

### 3.6 COLORANTS ALIMENTAIRES.

Des essais récents et très prometteurs ont été réalisés en FRANCE avec des colorants alimentaires. Trois substances ont été étudiées :

- la tartrazine;
- le jaune soleil;
- la coccine.

L'analyse se fait au spectrophotomètre de flamme sans formation de complexe au réactif et sans reconcentration.

La solubilité est d'environ 100 g/l.

### 3.7 TRACEURS RADIOACTIFS.

Des essais ont aussi été faits dans ce domaine. La méthode consiste à injecter un traceur radioactif en solution dans l'eau et à compter la radioactivité, soit dans une cuve où sont prélevés des échantillons, soit directement dans la rivière.

Les principaux traceurs employés ont été le Brome (Br 82), l'Iode (I 131), le Sodium (Na 24) et l'Or (Au 198).

Ce procédé est pénalisé par la réglementation stricte en matière de radioactivité (enceintes de production, période des éléments employés courtes) et par le prix du matériel qui exige un personnel spécialisé.

## MODES OPERATOIRES

Nous allons ici détailler la façon dont peut être mené un traçage ou un jaugeage chimique.  
Nous supposerons dans tout ce chapitre que le traceur utilisé est la Rhodamine B.

Nous allons voir successivement les différentes étapes qu'il faut suivre à savoir :

- les démarches administratives préalables
- la reconnaissance du terrain
- la détermination du protocole
- les travaux sur le terrain
- les travaux de laboratoire
- l'analyse des résultats

### 1. LES DEMARCHEES ADMINISTRATIVES PREALABLES

Avant de réaliser un traçage ou un jaugeage chimique, il est indispensable d'en demander l'autorisation aux autorités et de prévenir les populations riveraines. On ne peut injecter des traceurs dans une rivière sans tenir compte de la gêne que cela peut occasionner. Il est donc indispensable de prévenir suffisamment tôt pour que les dispositions nécessaires soient prises.

Par ailleurs dans le cas d'un traçage qui s'effectuerait à l'aval d'un barrage, il faudra prendre contact avec le gestionnaire pour connaître les prévisions des débits turbinés et si possible obtenir de lui un débit constant de jour de l'expérience.

### 2. LA RECONNAISSANCE DU BIEF

La détermination du protocole impose de connaître un certain nombre de paramètres caractérisant le bief et l'écoulement dans le bief.

## 2.1. Caractéristiques du bief :

Nous citerons ici J. THIEBAUX :

"Le premier jaugeage ou tracage doit être précédé d'une bonne consultation sur carte, si possible à petite échelle, 1/20.000, 1/50.000, 1/100.000, ou sur photo aérienne et impose en tous cas, au minimum, une sérieuse reconnaissance sur le terrain. Cette reconnaissance a pour but de déterminer l'endroit où sera injecté le traceur et le ou les lieux de prélèvement. Ayant à l'esprit les grands principes de la méthode on va choisir obligatoirement un lieu d'injection précisément dans une veine de courant préférentiel et les prélèvements seront toujours effectués dans des eaux courantes. (Voir fig. 11).

La reconnaissance a pour but également de répertorier, au moins en mémoire, les apports, les zones d'eau stagnante, les prises d'eau, les coudes et virages, les contractions, les zones de rapides, les îlots, les débordements, les accès aux différents points du parcours, enfin de « photographier » toute l'hydrographie d'un bief afin de choisir celui qui offrira le plus grand nombre de qualités conduisant toujours au même but : temps de passage le plus court possible, bon brassage et pas d'apport intermédiaire à l'amont immédiat du point de prélèvement.

Il faut donc souvent effectuer une reconnaissance pédestre des rives gauche et droite.

Il n'est pas conseillé de négliger cette reconnaissance. Elle est le point de départ de la réussite ou de l'échec de la mesure".

Si l'on ne dispose pas de cartes ou de photographies aériennes suffisamment précises on devra effectuer cette reconnaissance avec un "topofil" et une boussole pour dresser une carte approximative du bief.

Si possible on essayera d'avoir une estimation de la pente du plan d'eau en effectuant un cheminement topographique sur la berge la moins escarpée.

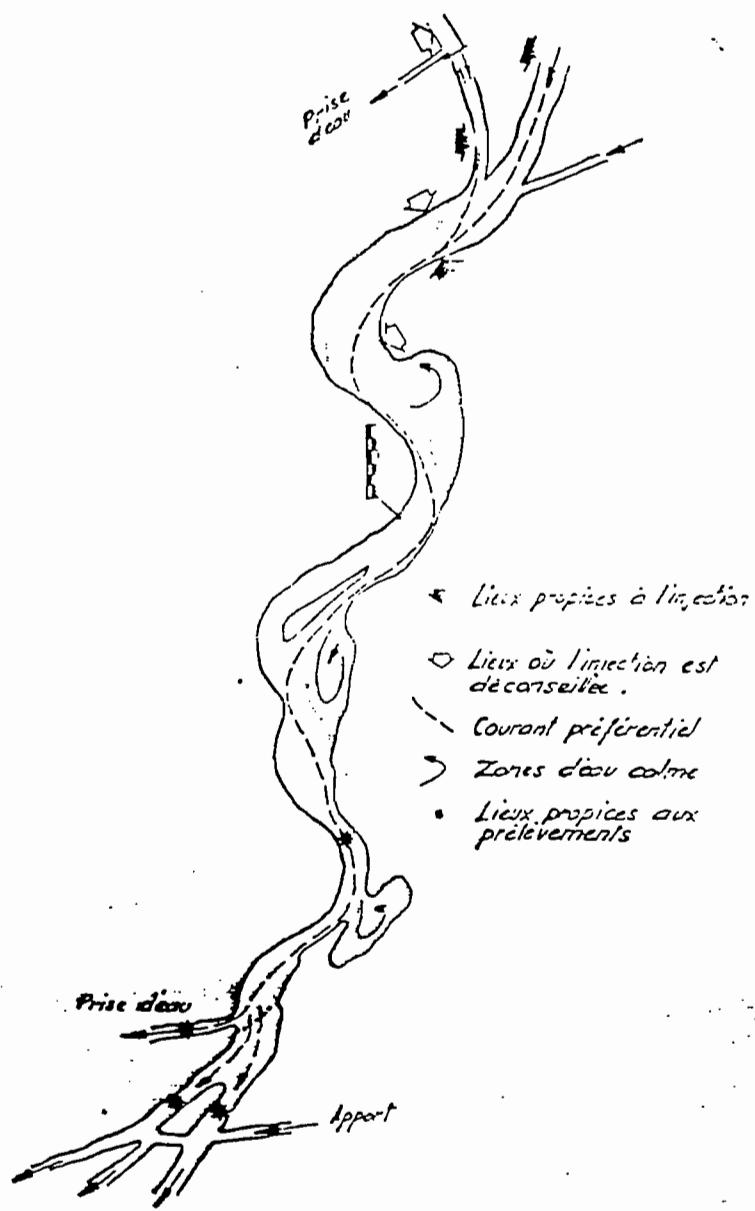


Fig. 11

## 2.2. Caractéristiques de l'écoulement

Hormis le cas des canaux ou cours d'eau très régulier, il est en général très difficile d'estimer la profondeur moyenne le long d'un bief. Les cours d'eau naturelles, se présentent souvent comme une série de vasques plus ou moins profondes et plus ou moins étendues séparées par des seuils. Le nombre de sections qu'il faudrait explorer pour avoir une estimation de la profondeur moyenne serait, dans ces conditions, prohibitif. Les paramètres de l'écoulement que l'on cherchera à estimer seront donc : la largeur, la vitesse moyenne de propagation et le débit. Les conditions d'écoulement peuvent varier entre la date de la reconnaissance et celle du traçage, on installera une échelle limnimétrique s'il n'y en a pas déjà.

### 2.2.1. Estimation de la largeur moyenne

On mesurera en divers sections bien choisies de la rivière, sa largeur et l'on en déduira une estimation de sa largeur moyenne.

### 2.2.2. Vitesse de propagation

Il est très important de distinguer la vitesse moyenne de l'écoulement à une section de la vitesse de propagation moyenne le long d'un bief. Elles ne seront égales que si le bief est rectiligne et bien calibré ce qui sera rarement vérifié sur les cours d'eau naturels sauf peut être pour les très hautes eaux.

Pour estimer quelle peut être la vitesse de propagation plusieurs méthodes sont possibles.

a) Si l'on connaît le débit (cas des traçages) on pourra utiliser la relation empirique donnée au chapitre II et de ce cours reliant la vitesse à l'expression;

$$(2 \ g \ \frac{Q}{L^2})^{1/3}$$

Si l'on appelle X cette valeur, on obtient entre X et la vitesse de propagation, V, la correspondance suivante :

X (m/s)	V (m/s)
1	0,09
2	0,34
3	0,47
4	0,73

L'utilisation de cette relation ne donne qu'une approximation grossière de la vitesse de propagation. Il faudra si possible essayer de la vérifier par les méthodes expérimentales que nous allons présenter ci-après.

#### b) Les méthodes expérimentales

##### b.1 Les flotteurs :

On mesurera le temps mis par des flotteurs pour parcourir la distance entre deux sections encadrant le bief. On calculera la vitesse moyenne des flotteurs en écartant ceux qui ont été manifestement retardés.

On pourra utiliser des bouteilles d'eau minérale en plastique d'1,5 l peintes en blanc et rouge et lestées de sable.

##### b.2 L'utilisation d'un traceur bon marché

Ce pourra être soit la fluoresceine soit une solution de sel ordinaire.

Dans le premier cas on notera le temps mis par le nuage visible à l'oeil nu pour arriver à la section aval. On essayera d'estimer quand passe le maximum et l'on en déduira la vitesse de propagation à partir de la formule donnée au chapitre I de ce cours.

Il ne sera pas nécessaire de faire cette mesure sur la totalité du bief. Les deux sections devront être cependant suffisamment distantes pour que la vitesse ainsi estimée puisse être considérée comme représentatif du bief.

Dans le deuxième cas on placera dans la section aval une sonde d'un conductivimètre qui permettra de percevoir l'arrivée du nuage salin et la date du maximum. Cette méthode n'est envisageable que pour les faibles débits (<10 m<sup>3</sup>/s).

### 2.2.3. Estimation des débits

S'il s'agit d'un tracage, il sera en règle général possible d'estimer le débit à partir d'un jaugeage au moulinet et de la courbe de tracage de la station située sur le bief si elle existe.

S'il s'agit d'un jaugeage chimique, on ne connaît pas à priori le débit. On devra essayer de l'estimer en faisant appel à son expérience d'hydrologue ou en inversant la formule liant la vitesse à l'expression ( $Q = Q/La^{1/3}$ ), donnée plus haut.

3.

### LA DETERMINATION DU PROTOCOLE

La définition du protocole nécessite de pouvoir répondre aux questions suivantes :

- où faut-il injecter et prélever ?
- quelle méthode d'injection doit être utilisée ?
- quelle quantité de traceur faut-il injecter ?
- quand et comment faut-il effectuer les prélèvements ?

La réponse à ces questions passe par une estimation de la réponse impulsionnelle et de la longueur de bol mélange.

#### 3.1. Estimation de la réponse impulsionnelle :

Nous avons vu au chapitre I de ce cours que la réponse impulsionnelle pouvait s'écrire, en négligeant dans un premier temps les phénomènes de disparition du produit :

$$C = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{x^*}{t^* \sqrt{t^*}} \cdot \exp \left( -\left( \frac{x^* - t^*}{2\sqrt{t^*}} \right)^2 \right) \quad (1)$$

ou  $x^* = x / L$   
et  $t^* = t / T$

avec  $L = \frac{D}{V}$

$$\text{et } T = \frac{D}{V^2} = \frac{L}{V}$$

On a également défini une longueur de diffusion, LDIF, telle que :

$$\text{LDIF} \approx \left[ \frac{\text{La}}{\frac{g \cdot Q \cdot I}{\sqrt{3}}} \right]^{1/2}$$

que l'on peut aussi estimer par

$$\boxed{\text{LDIF} \approx \sqrt{\frac{8}{I} \cdot g \cdot d} \cdot \frac{4.5 \cdot \text{La}}{V^2}} \quad (2)$$

ou  $d$  est un paramètre fonction de  $V$  et qui a été donné au chapitre II.

Les traçages que nous avons effectués sur des rivières très diverses d'Afrique de l'Ouest, nous ont montrés que l'on pourrait estimer  $D$  par la relation suivante (cf fig. 12).

$$\boxed{\frac{D}{V} = \text{LDIF} \cdot 0.37 \cdot \left( 1 - \exp \left( -\frac{0.06 \cdot x}{\text{LDIF}} \right) \right)} \quad (3)$$

On peut donc exprimer la réponse impulsionnelle en fonction de la largeur, de la pente et de la vitesse.

L'incertitude sur la vitesse de propagation sera en général bien plus forte que celle sur les autres facteurs. Ce sera donc d'elle que dépendra essentiellement celle comprise sur la réponse impulsionnelle. On se donnera donc une fourchette pour la vitesse de propagation et l'on en déduira les 2 réponses impulsionales limites.

Estimation de D

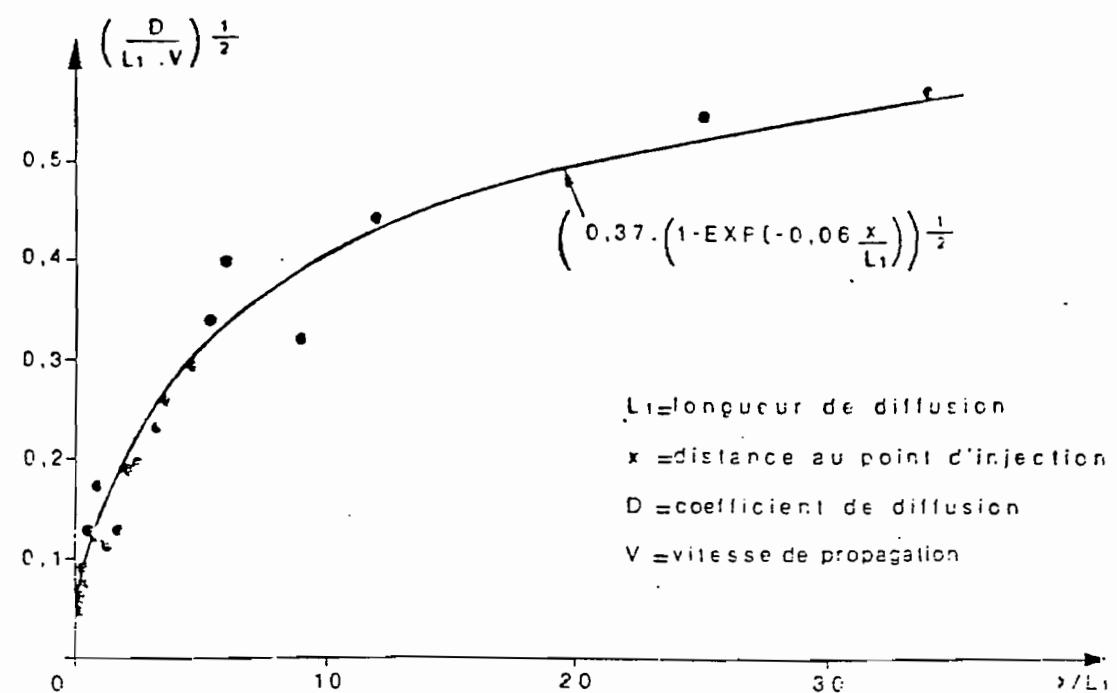


Fig. 12

Nous prendrons un exemple :

Exemple

On veut effectuer un tracage sur une rivière qui fait 50 m de large et dont la pente est de 0,0015. On a estimé que la vitesse de propagation était comprise entre 0,3 et 0,6 m/s. On veut estimer la réponse impulsionale à une section située à 6.000 m du point d'injection.

On a alors :

	$V = 0,3 \text{ m/s}$	$V = 0,6 \text{ m/s}$
$d$	0,158	0,175
LDIF (m)	4950	1950
$D$ $L = \frac{D}{V}$	128	122
$T = L/V$ (s)	427	203
$x^* = x/L$	47	49

On a représenté sur la figure n° 13, les 2 réponses impulsionales obtenues.

Celle correspondant à la vitesse de propagation la plus faible débuterait pour une valeur de  $T^*$  de 22, soit 2,6 heures; celle correspondant à la vitesse la plus élevée débuterait pour une valeur de  $T^*$  de 25, soit 1,4 heures.

Les dates de fin seraient respectivement de 9,5 heures et 4,5 heures.

ESTIMATION DE LA REPONSE IMPULSIONNELLE  
----- EXEMPLE -----

-- x -- .17  
-- x -- .49

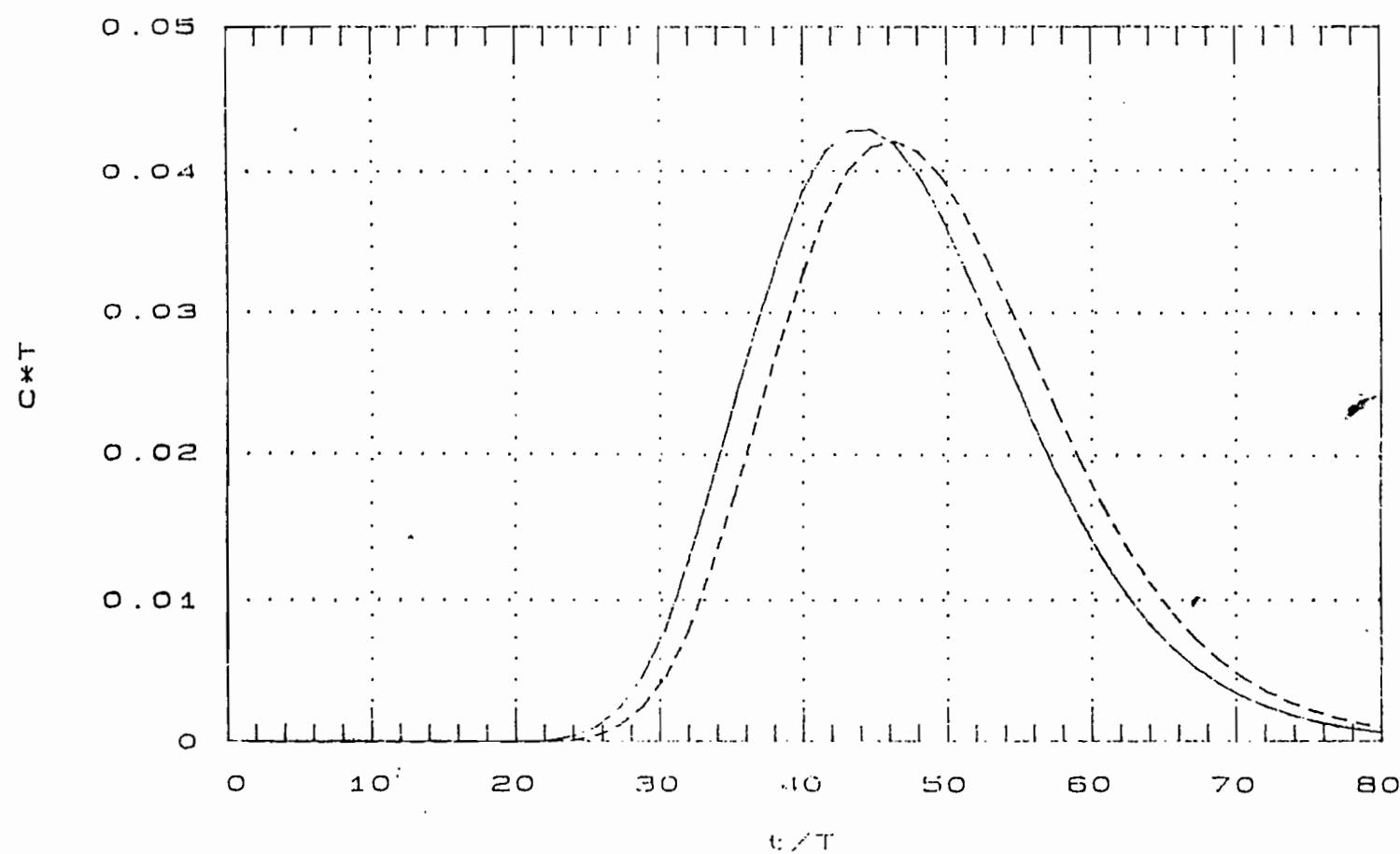


fig. 13

### 3.2. Distance de bon mélange

La distance de bon mélange pourra être calculée à partir des formules données au chapitre II de ce cours. On pourra également l'estimer par la moitié de la longueur de diffusion calculée comme au paragraphe précédent.

### 3.3. Choisir des sections d'injection et de prélèvement

Parmi les sections reconnues lors de la prospection du terrain, on choisira celle permettant que la distance entre la section d'injection et celle de prélèvement soit supérieure à la longueur de son mélange.

### 3.4. Choix de la méthode d'injection

Dans le cas des traçages de simulation, la méthode d'injection sera imposée par la nature de l'événement que l'on veut simuler.

Dans le cas d'un traçage destiné à caler les paramètres d'un modèle de propagation, il sera toujours préférable d'injecter de façon instantanée. L'analyse des résultats sera plus aisée et l'estimation des paramètres du modèle plus précise.

Dans le cas d'un jaugeage chimique, les 2 procédés sont théoriquement aussi précis l'un que l'autre. L'expérience a montré cependant qu'en règle générale, la méthode d'injection à débit constant est plus précise (de quelques %) que la méthode par intégration. On choisirra donc de préférence la première solution si les conditions matériels (disponibilité du matériel d'injection, coût du produit etc...) le permettent.

Dans tous les cas, on s'efforcera d'injecter au centre de la rivière, ou mieux, de répartir l'épandage sur toute sa largeur.

### 3.5. Estimation de la quantité de traceur à injecter

3 cas sont à considérer.

- le cas des injections instantanées
- le cas des injections à débit constant dans le cas des jaugeages
- le cas des injections quelconques dans le cas de traçages de simulation.

a) Cas des injections instantanées

On veut qu'à la section,  $x$ , de prélèvement, la plus éloignée de celle d'injection la concentration soit suffisante pour être dosée.

Si on appelle TPA, la durée de la réponse impulsionnelle de la section la plus éloignée, et que l'on déterminera par la différence entre les temps de fin et de début, la concentration moyenne, CM, au cours du passage du nuage sera :

$$CM = \frac{Co \cdot So}{Q} \exp\left(-\frac{R \cdot x}{V}\right) \cdot \frac{1}{TPA}$$

ou

$Co$  = Concentration de la solution injectée

$So$  = Quantité à injecter

$Q$  = Débit

$R$  = Coefficient de disparition

Pour la rhodamine on injectera la quantité  $So$  de telle sorte que  $CM$  soit de l'ordre de  $5 \text{ kg/l}$  en prenant pour

valeur de  $R$ ,  $1.10 \cdot 10^{-5}$ , dans les conditions d'écoulement les plus défavorables.

Soit :

$So = \frac{CM \cdot TPA \cdot Q}{Co} \exp\left(-\frac{R \cdot x}{V}\right)$
--

avec  $CM = 5.10^{-9}$

et  $R = 10^{-5}$

Exemple : Si on reprend l'exemple du paragraphe 3.1, si la valeur estimée pour le débit est de  $35 \text{ m}^3/\text{s}$  pour la vitesse de propagation de  $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$  et de  $70 \text{ m}^3/\text{s}$  pour  $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ , on obtient les résultats suivants en prenant

$CM = 5.10^{-9}$ ,  $R = 10^{-5}$  et  $Co = 100 \text{ g/l}$ , pour une section située à  $6000 \text{ m}$  de l'injection.

	$V = 0,3 \text{ m}^3/\text{s}$	$V = 0,6 \text{ m}^3/\text{s}$
$Q \text{ m}^3/\text{s}$	35	70
TPA (en s)	25000	11200
$M \text{ en kg}$	5,3	4,3
$S_0 \text{ en l}$	55	43

$M$  = masse à injecter

Suivant les volumes que l'on aura préparés, souvent des multiples de 5 ou 10 l, on injectera 55 ou 60 litres

#### b) Cas des jauges à injection à débit constant

Il faut à la fois déterminer le débit et la durée de l'injection.

- Pour le débit, le problème est tout à fait semblable à celui vu précédemment. Si l'on note  $Q_0$  le débit d'injection avec les mêmes notations qu'au paragraphe précédent celui-ci devra être :

$$Q_0 = \frac{C_M \cdot Q}{C_0} \exp\left(-\frac{R \cdot x}{V}\right)$$

- le temps d'injection devra être égale au minimum à la date de fin de la réponse impulsionale. Il faudra si l'on veut vérifier que l'on a bien atteint le palier de concentration, maintenir le régime permanent d'une durée que l'on pourra prendre égale au cinquième de la durée de la réponse impulsionale.

Exemple : en reprenant toujours le même exemple qu'au paragraphe 3.1, nous obtenons; avec les mêmes notations et les mêmes valeurs :

	$V = 0,3 \text{ m/s}$	$V = 0,6 \text{ m/s}$
$Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	35	70
$Q_0$ ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	2,13	3,87
TPF (s)	34100	16250
TFA (s)	25000	11200
TFA/5 (s)	5000	2240
Ti (s)	39100	18500
VD 1	83	72
M kg	8,5	7,2

avec

TPF: date de fin de la réponse impulsionnelle

Ti : durée de l'injection

V D: volume à injecter

M : Masse à injecter

Q<sub>0</sub> : Débit d'injection

Cet exemple illustre bien le fait que cette méthode d'injection exige souvent beaucoup plus de produit. Près de 60% de plus dans ce cas, si les vitesses et les débits sont connus avec suffisamment de précision.

Dans la réalité, où l'on peut mal connaître les débits comme les vitesses, l'écart pourra être beaucoup plus grand. Dans notre exemple, pour être sûr de bien faire la mesure quelque soit la vitesse, il faudrait injecter avec un débit de 3,9 cm<sup>3</sup>/s durant 39100 secondes. C'est alors 151 l de solution qui seraient nécessaires soit 3 fois plus que lors d'un jaugeage par intégration.

### c) Cas des injections quelconques

Dans le cas des traçages de simulation, on pourra être amené à injecter d'une façon qui ne soit ni instantanée ni à débit constant. On pourra par exemple voir ce qui passe lors de la vidange accidentelle d'une cuve se trouvant près des berges d'une rivière. La loi de vidange pourra être par exemple de type exponentielle.

En règle général il ne sera pas possible de faire varier de façon continue le débit d'injection. On procèdera donc à une injection qui se présentera sous la forme de  $n$  paliers de débit constant  $Q_i$ . La courbe concentration temps à une distance  $x$  du point d'injection pourra alors s'écrire.

$$C(x,t) = \frac{c_0}{Q} \cdot \sum_{i=1}^n Q_i \left( \int_0^{t-T_i} I(T)dT - \int_0^{t-T_{i+1}} I(t')dT' \right) \quad (4)$$

où  $I(t) = 0$  si  $t < 0$

et

$I(t) =$  la réponse impulsionnelle donnée plus haut si  $t > 0$ ,  
et où

$T_i$  et  $T_{i+1}$  sont les dates de début et de fin du palier  $Q_i$

L'expression entre crochets de la formule (4) peut se calculer relativement facilement en utilisant l'expression de  $\int_0^t I(t) dt$  donné au chapitre 1.

L'estimation des quantités de traceur à injecter se fait donc de la façon suivante. Comme précédemment on déterminera une estimation de la réponse impulsionnelle. On en déduira la valeur de l'expression entre crochets de la formule (4). Par une simple affinité on pourra en déduire les valeurs des différents  $Q_i$ , sachant la concentration minimale que l'on veut pouvoir doser.

### 3.6. Protocole de prélèvement

#### a) Jaugeages chimiques par intégration

On a vu au chapitre 2, qu'il y aurait trois modes de prélèvements possibles qui sont par ordre de précisions croissantes :

- des prélèvements instantanés
- prélèvement d'un ou plusieurs échantillons moyens
- prélèvement d'une série continue d'échantillons moyens.

P

P

Le choix de la méthode dépendra uniquement de matériel disponible. Pour chacune d'entre elles nous allons préciser les temps et le rythme de l'échantillonnage.

### a 1) Prélèvement instantané

Si on reprend l'exemple précédent, on peut décrire de façon satisfaisante, les 2 courbes impulsionales limites par environ 10 échantillons bien répartis.

La durée entre deux prélèvements successifs devait être pour éviter des erreurs des valeurs "rondes", 5, 10, 15 ou 30 minutes, pour chacune des réponses on obtiendrait le protocole d'échantillonnage suivant :

	$V =$ 0,3 m/s	$V =$ 0,6 m/s
T D heure	2,5	1,5
T F heure	9,5	4,5
N	15	13
D T heure	0,5	0,25

avec

TB= date du premier prélèvement

TF= date du dernier prélèvement

N = Nt de prélèvements

DT= durée entre 2 prélèvements successifs

Ne connaissant pas exactement la vitesse de propagation, mais en admettant quelle est comprise entre les 2 valeurs limites, on adoptera le protocole suivant

Date du 1er échantillon = 1,5 heure

Jusqu'à 6 h = 1 prélèvement toutes les 15 minutes

de 6 à 9,5 h = 1 prélèvement toutes les 30 minutes

Soit 27 prélèvements

a.2.) Prélèvement d'un ou plusieurs échantillons moyens

La date du début de prélèvement sera celle du début de la réponse impulsionale la plus rapide : 1,5 heures dans notre exemple.

Si l'on ne peut faire qu'un seul prélèvement, on prendra comme date de fin de prélèvement la date de fin de la réponse impulsionale la plus lente : 9,5 h dans notre exemple.

Si l'on peut faire, comme c'est conseillé, plusieurs prélèvements, on étalera la date d'arrêt de chacun entre les dates de fin de la réponse impulsionale la plus rapide et de la plus lente : 4,5 h et 9,5 h dans notre exemple. Par mesure de sécurité, il est conseillé d'aller au delà. On pourrait prendre dans notre exemple 10,5 h comme date d'arrêt du dernier prélèvement.

a.3) Prélèvement d'une série continue d'échantillons moyens

Cette technique nécessite en pratique un préleveur automatique. Ce type d'appareil a en général une capacité limitée : 12 ou 24 prélèvements. On choisira donc la capacité maximale, et l'on programmera le préleveur de telle façon que le prélèvement ait lieu pendant toute la durée comprise entre le début TD de la réponse impulsionale la plus rapide et la fin, TF, de la plus lente, avec un changement tous les  $(TF - TD) / N$ , N étant le nombre de flacons.

Dans notre exemple, si l'on dispose d'un préleveur à 24 flacons, on débutera le prélèvement à 1,5 h et l'on l'arrêtera à 9,5 h en programmant un changement de flacon toutes les 20 minutes.

b) Jaugeages chimiques à injection à débit constant

On commencera à prélever à partir de la date où le palier de concentration peut être atteint, c'est à dire à la date de fin de la réponse impulsionale la plus rapide.

On s'arrêtera de prélever à la date de fin de la réponse impulsionale la plus lente majoré d'une marge de sécurité que l'on prendra égale à un cinquième de la durée de la réponse impulsionale la plus lente.

Les échantillons (6 en général suffisent) seront repartis de façon régulière entre les dates de début et de fin.

Ainsi dans notre exemple on pourra prélever entre 4,5 h et 10,5 h, 7 échantillons à raison d'un toutes les heures.

### c) Tracées

Pour les tracages on veut cerner la plus précisément possible la courbe concentration/temps.

Si l'on ne dispose pas d'un échantillonneur automatique, on procédera de la même façon que celle décrite pour les jaugeages chimiques par intégration.

Si l'on dispose d'un échantillonneur automatique, il sera préférable de prélever des échantillons moyens sur une durée courte par rapport à celle de la réponse impulsionale. On lissera ainsi les courbes et le poids des fluctuations aléatoires des concentrations sera moins fort. Dans notre exemple on pourra prélever des échantillons moyens sur 3 à 5 minutes.

## 3.7. Présentation des résultats

Cette étape de préparation du protocole peut paraître complexe. Elle est en fait relativement facile à faire si on dispose d'un micro ordinateur.

Ce travail est indispensable et conditionne la réussite d'un tracage ou d'un jaugeage chimique. Il faut avoir conscience que les opérations de terrain sont très prenantes et dès qu'elles débutent il n'est plus possible d'improviser.

Il faut donc que le protocole soit déjà prêt et présenté sous la forme la plus claire possible. On préparera une fiche pour la section d'injection et pour les différentes sections de prélèvements. Ces fiches seront données aux agents chargés de les faire et comporteront le détail des travaux à réaliser.

Par ailleurs entre la date de la reconnaissance sur le terrain et celle du tracage proprement dit, les conditions d'écoulement peuvent changer. Il faudra donc préparer autant de protocole et de fiches que de scénarios possibles.

#### 4. LES OPERATIONS SUR LE TERRAIN

On distinguerà les travaux préparatoires, du tracage proprement dit.

##### 4.1 LES TRAVAUX PREPARATOIRES

###### a) Préparation et conditionnement de la solution

Il existe dans le commerce des solutions toutes prêtes de Rhodamine dans un mélange à 30 % d'acide acétique et d'eau et pouvant titrer jusqu'à 300 g/l. C'est le type de produit qu'il faudra utiliser de préférence à de la Rhodamine en poudre qui nécessite la préparation d'une solution mère.

Cette préparation est en effet très salissante. La poudre de Rhodamine étant à la fois très fine et très légère, elle se met en suspension au moindre souffle d'air, s'insinue partout, se colle à la peau, et très rapidement les personnes qui la manipulent, comme le matériel, sont colorés en rouge.

S'il était malgré tout nécessaire de diluer de la Rhodamine en poudre, il faudrait procéder de la façon suivante pour une solution à 200 g/l.

- se mettre le plus à l'écart possible du laboratoire et des lieux où sont rangés les matériels de prélèvements.
- se protéger au maximum (gants, blouse, bottes, masque)
- dans un grand becher de 5 litres, verser 1.75 l d'eau et rajouter 0.75 l d'acide acétique.
- verser ensuite assez rapidement et en agitant sans cesse 500 g de Rhodamine (qui est un conditionnement courant).
- continuer d'agiter jusqu'à la disparition de tous les grumeaux.

On prélevera ensuite environ 100 cm<sup>3</sup> de cette solution qui serviront à préparer les solution servant à étalonner le fluorimètre.

Différents volumes, mesurés avec la plus grande précision possible, de la solution mère seront enfin placés dans des récipients de verre fumée, fermant bien et nettoyés au préalable.

Il faudra toujours tenir ces flacons le plus loin possible de ceux qui seront utilisés pour des prélèvements.

b) Vérification et préparation du matériel

On dressera la liste de matériel à emporter et l'on vérifiera son bon état de marche. Il ne faudra pas oublier notamment de s'assurer de la charge des batteries alimentant les pompes ou préleveurs.

Il faudra en outre nettoyer avec du TEEPOL, ou mieux avec un agent ionique, les flacons de prélèvements. Ceux-ci seront ensuite rangés dans des caissettes facilement transportables.

c) Préparation de table de dilution

L'expérience montre qu'il est très facile de se tromper dans la préparation des dilutions témoins si on ne prend pas le temps d'y réfléchir. Nous conseillons donc de préparer avant le traçage la table de dilution qui sera utilisé lors des analyses.

On trouvera à titre d'exemple sur la figure n° 14, une présentation possible des résultats.

#### 4.2 LE TRACAGE OU JAUGEAGE CHIMIQUE

La première chose à faire avant le traçage, pour être sûr de ne pas l'oublier, est de prélever de l'eau de la rivière dans une bonbonne de 20 litres environ. Cette eau servira à réaliser des dilutions témoins lors du dépouillement au fluorimètre. Il est commode d'utiliser une bonbonne ayant à sa base un robinet qui permettra un soutirage aisément des quantités d'eau désirées.

Il faut ensuite aller lire l'échelle pour choisir parmi les différents scénarios préparés, celui qui est le plus adapté.

On fait alors un rapide briefing avec les différents opérateurs pour leur expliquer clairement ce qu'ils ont à faire et mettre les montres à l'heure.

##### 4.2.1. Injection :

Les personnes qui seront chargées de l'injection porteront des gants et des blouses.

fig. 14

exemple de présentation de la table de dilutions

		Concentration recherchée	Solution à utiliser	Volume de solution	Volume final
Dilutions primaires	C1	200 g/l	-	-	-
	C2	1 g/l	C1	10 ml	2 l
	C3	10 mg/l	C2	10 ml	1 l
Dilutions témoins (en µg/l)		100	C3	10 ml	1 l
		50	C3	5 ml	1 l
		20	C3	2 ml	1 l
		10	C3	2 X 500 µl	1 l
		5	C3	500 µl	1 l
		2	C3	2 X 100 µl	1 l
		1	C3	100 µl	1 l

Matériel nécessaire :

- 1 fiole jaugée de 2 l
- 8 fioles jaugées de 1 l
- 3 pipettes de 10 ml (2 pour les solutions concentrées)
- 1 pipette de 5 ml
- 1 pipette de 2 ml
- 1 petite seringue de 500 µl
- 1 micro-seringue de 100 µl

Quantité minimum d'eau nécessaire : 10 litres

### a) instantanée

Bien que l'on ait utilisé dans tout ce qui précède le terme instantané, il faut avoir conscience qu'une injection faite sur une durée représentant 1 % ou 2 % de la réponse impulsionale pourra être considérée comme instantanée. Dans l'exemple cité en début de ce chapitre, où la durée de la réponse impulsionale est, dans le cas où la vitesse est maximale, de 3 heures, celle de l'injection pourra être de 2 minutes sans altérer en aucune manière les résultats. Il ne sert donc à rien de se précipiter et de prendre les risques de répandre sur les berges une partie du traceur, ce qui comprometttrait la réussite de l'opération.

L'injection se fera donc dans le calme, de préférence au centre de la rivière, ou mieux, en ligne sur toute la largeur de la rivière, ce qui favorisera le bon mélange du traceur.

Il est fortement déconseillé de mesurer sur le terrain les volumes à injecter. Ceux-ci devront donc être préparés avant. Il vaut mieux injecter une plus grande quantité de traceur plutôt que de prendre le risque de se tromper sur la quantité épandue en mesurant dans de mauvaises conditions les volumes.

Il ne faudra pas oublier de noter l'heure exacte et la durée de l'injection.

On pourra ensuite essayer de suivre la propagation du traceur tant qu'il est visible, pour vérifier que la vitesse de propagation est bien comprise dans la fourchette retenue pour le protocole. Si ce n'était pas le cas on préviendra si possible les équipes chargées des prélèvements pour qu'ils décalent d'autant leur protocole.

### b) à débit constant

Le matériel d'injection (vase à niveau constant, vase de Mariotte, pompe), déjà vérifié auparavant, est installé.

A l'heure prévue on procède à l'injection. Un opérateur devra rester sur place pour contrôler le bon déroulement de l'épandage et noter toutes anomalies rencontrées.

Il faudra faire très attention qu'aucune quantité de traceur n'arrive à la rivière par d'autre voie que le système d'injection. Les flacons de concentration initiale seront mis bien à l'écart. On placera, en cas d'utilisation d'un vase à niveau constant, la cuve de trop plein dans un endroit sans risque.

On évitera dans la mesure du possible de modifier le dispositif d'injection, une fois celle-ci commencée même si il ne s'avère pas optimale.

#### 4.2.2 Prélèvements

Les sections de prélèvements seront dans la mesure du possible matérialisées par un cable. On repérera sur ce cable le ou les points où ils seront faits. Les abscisses de ces points par rapports à une des berges seront notées sur la fiche de prélèvement.

Les prélèvements seront faits toujours à la même profondeur.

En cas d'utilisation de micropompe ou de prélevage automatique, il faudra l'amorcer avant le premier prélèvement.

Les échantillons prélevés seront numérotés, l'utilisation d'un marqueur "multisurfaces" résistant à l'eau semble la meilleure solution.

Sur la fiche de prélèvement seront notés en face de chaque numéro, l'heure et le lieu de prélèvement, ainsi que la durée s'il s'agit d'un échantillon moyen.

Il est très fortement déconseillé que les opérateurs chargés des prélèvements, aient manipulé auparavant des solutions concentrées de traceur; cela induirait un risque important de contamination des eaux prélevées.

#### 4.2.3 Contrôle des variations limnimétriques

S'il n'y a pas de limnigraphie installé, il est nécessaire de suivre l'évolution de la cote à l'échelle au cours du traçage.

### 5. LES TRAVAUX AU LABORATOIRE

#### 5.1. REMARQUES IMPORTANTES :

- Dans les jaugeages chimiques comme dans les traçages ce que l'on cherche à préciser au laboratoire, ne sont pas les concentrations absolues, mais la dilution de la solution qui a été injectée. L'étalonnage du fluorimètre se fera donc à partir de dilution de la solution initiale et non pas à partir des solutions toutes prêtes de concentrations différentes que l'on trouve dans le commerce.

Vu les très faibles concentrations solutions à analyser, les risques de pollutions accidentelles des échantillons ne sont pas à négliger. Il est donc conseillé de prendre les précautions suivantes :

- 1 - manipuler toujours les solutions concentrées avec des gants jetables.
- 2 - mettre le plus d'espace possible entre les endroits où sont rangées les solutions concentrées et les solutions diluées.
- 3 - ne jamais utiliser les mêmes récipients, pipettes ou microséringues pour les 2 types de solution. On marquera par exemple, par un adhésif de couleur, le matériel utilisé pour les solutions concentrées.

## 5.2. CONFECTON DES DILUTIONS TEMOINS

- Pour que les dilutions témoins soient le plus possible comparables à celles que l'on rencontre dans les eaux tracées, il faut qu'elles soient faites le plus rapidement possible après l'injection. Cette contrainte peut imposer l'installation d'un laboratoire de campagne.

- Ces dilutions témoins seront faites suivant la table de dilution préparée au préalable. Ce travail doit être fait avec beaucoup de soins. L'utilisation de microséringues simplifient de façon notable les manipulations mais exigent un certain nombre de précautions qui sont indiquées par les fournisseurs. Il faut notamment les rincer tout de suite après leur utilisation, ne jamais toucher avec les doigts le corps du piston et ne jamais le plier ou le forcer.

## 5.3 ANALYSE AU FLUORIMETRE

Le fluorimètre devra être allumé au moins une heure avant les mesures pour permettre à la température de se stabiliser. La température, nous l'avons vu, influence en effet la fluorescence.

### a) Analyse des dilutions témoins et tracé des courbes de calibration

En suivant la méthode qui sera décrite plus bas, on analyse les dilutions témoins. Les analyses servent à calibrer le fluorimètre. Elles doivent donc être faites pour les différentes ouvertures de diaphragme et les différents filtres ND susceptible d'être employés.

On notera chaque fois la température pour corriger éventuellement par la suite les mesures des échantillons.

Pour les différents diaphragmes et filtres ND, on tracera les courbes de calibration (fig. n° 15) celles-ci doivent être linéaires. On pourra mettre aussi en évidence des dilution mal faites, des éventuels phénomènes de polymérisation pour les fortes concentrations, de diffusion des spectres incidents pour les faibles concentrations. Ces ~~différences~~ anomalies sont illustrées sur la figure n° 16 où sont également précisés les moyens d'y remédier.

Il est conseillé au cours des analyses des échantillons de repérer cette procédure de calibration pour vérifier la stabilité des étalonnages.

b) Analyse des échantillons (Fluorimètre TURNER 111)

b.1) Mesure de la fluorescence

On suivra le protocole suivant

- Rincer une fois l'éprouvette avec la solution qui sera mesurée.

Remplir d'éprouvette avec cette solution jusqu'à 0,5 cm du bord supérieur. Essuyer l'extérieur de l'éprouvette avec un tissu ou un papier de type KLEENEX. Si des bulles d'air sont présentes dans la solution, tapoter l'éprouvette.

- Ne pas jeter le reliquat de solution qui pourra permettre un contrôle ultérieur.

- Insérer l'éprouvette dans son logement et fermer la porte du fluorimètre.

Ne pas le faire trop brutalement afin d'éviter des éclaboussures.

- Regarder le compteur de fluorescence une fois celui-ci stabilisé. De légères oscillations sont normales ( $\pm$  1/4 d'une graduation).

Pour une plus grande sensibilité, faire la lecture de l'échantillon sur la plus large échelle possible (en ouvrant le diaphragme). Noter la valeur lue pour 30X, 10X, 3X et 1X.

Plusieurs précautions à prendre :

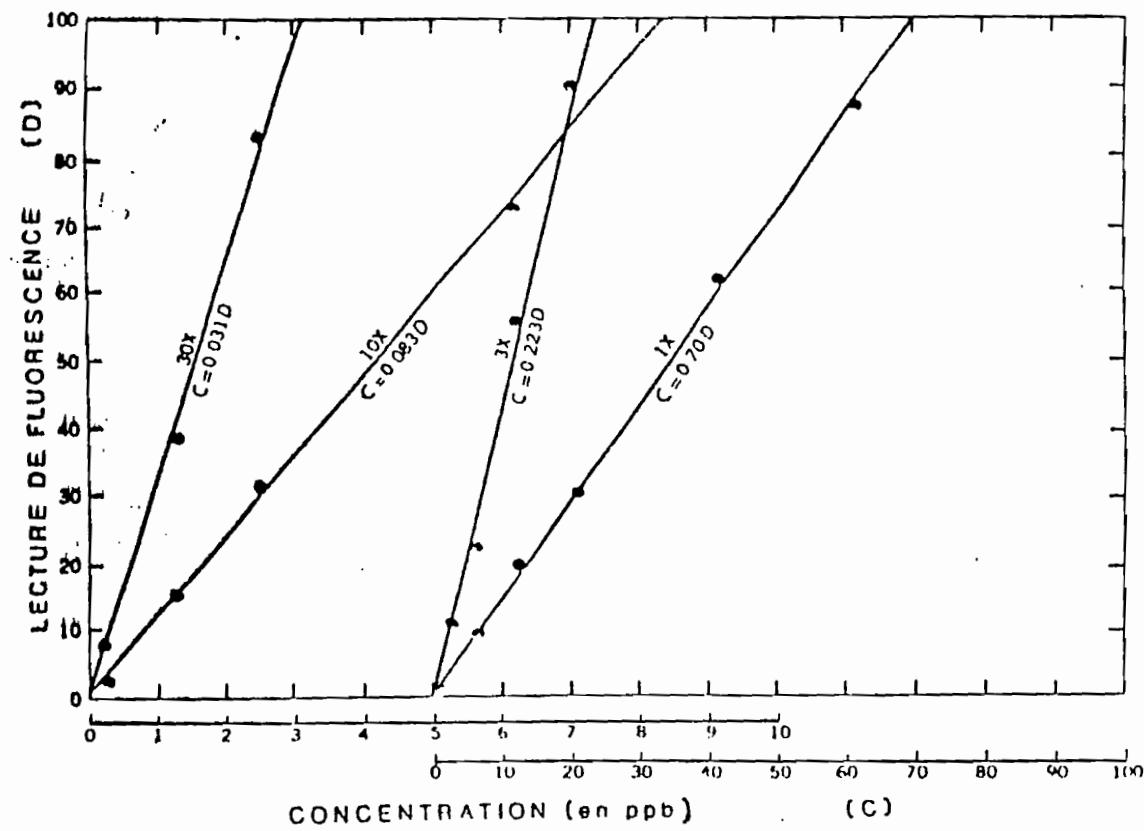
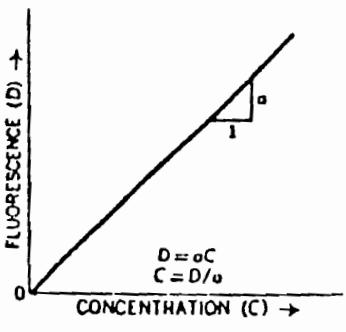
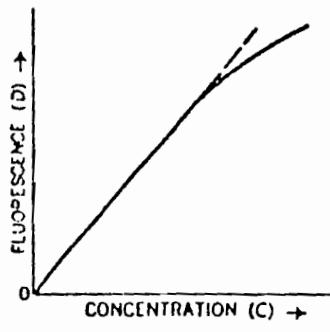


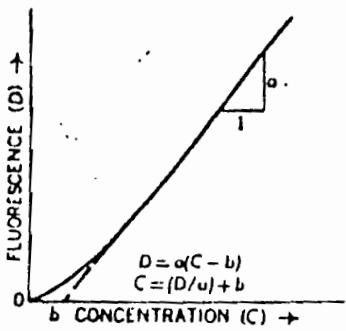
fig. 15. Courbes-types de calibration pour les quatre ouvertures du diaphragme



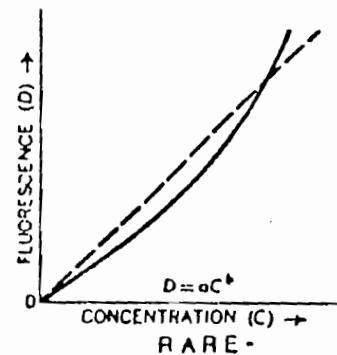
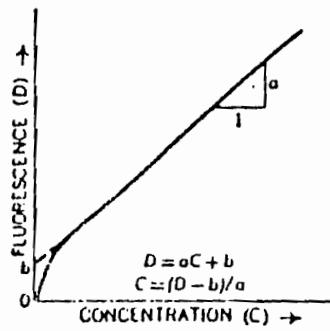
THEORIQUE  
ET TRES SOUVENT OBSERVE



PHENOMENE DE QUENCHING  
ECHANTILLON A DILUER



ASSEZ RARE



RARE

LINEARISATION DE LA RELATION A EFFECTUER APPAREIL A RETOURNER

- Après quelques minutes du fait de la chaleur à laquelle est exposée l'éprouvette, la fluorescence décroît. Il convient de noter la valeur lue, rapidement. Pour les premières mesures afin de s'assurer de bonnes lectures ultérieures, attendre la décroissance de la fluorescence et la chiffrer en temps. Faire les mesures ensuite dans le laps de temps où le compteur est stabilisé.

De même, lors du transfert bouteille de prélèvement-éprouvette, des matières en suspension assez grossières peuvent fausser la mesure. Faire le transfert quelques dizaines de minutes avant la lecture si les eaux sont chargées.

- Noter la température. Il s'agit de celle de la solution dans l'éprouvette, juste après la lecture dans le fluorimètre. La correction de la lecture sera faite ultérieurement.

- Plusieurs fois entre les lectures des échantillons, faire également les lectures du "blanc" et du "bâton noir". Conclure toujours la fin des expérimentations par ces deux mesures de contrôle.

#### b.2) Calcul des concentrations

Se fait en utilisant la courbe de calibration et en la corrigeant par un facteur de correction fonction de l'écart entre la température lors de la calibration et celle lors de la mesure.

La détermination du facteur de correction peut se faire soit en utilisant la courbe théorique de la figure 17, soit à partir de la calibration faite à différentes températures. En pratique pour cette dernière solution, on suit l'évolution de la température du laboratoire et on procède à une calibration chaque fois que la température varie d'un degré (écart de 2.6 % de la fluorescence).

## 6.

### ANALYSE DES RESULTATS

Il ne s'agit pas ici de détailler les opérations de dépouillement des jaugeages ou tracages déjà décrite dans les chapitres précédents, mais de voir comment, une fois les opérations terminées, faire une première critique qui permettra d'avoir une idée sur la confiance à accorder aux résultats.

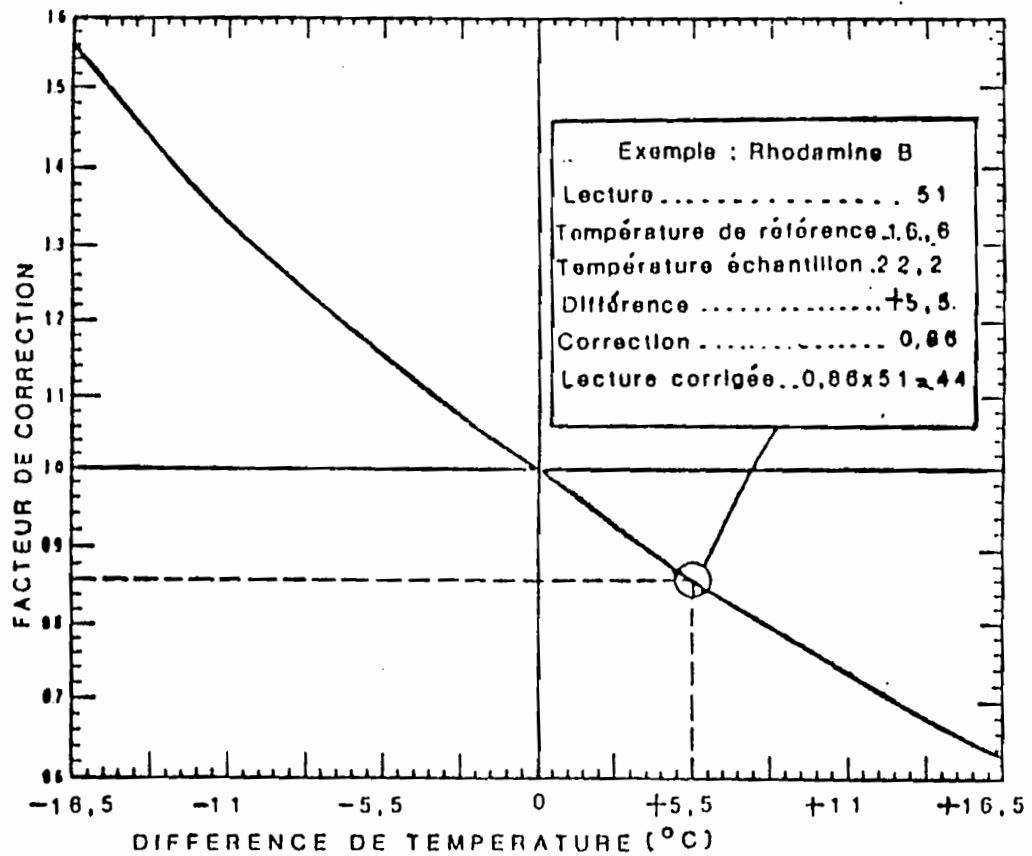


fig. 17 -Courbe de correction des lectures du fluorimètre en fonction de la température  
(Rhodamine B ou WT);

Celle-ci doit porter sur les opérations de terrain, sur les analyses au laboratoire et sur les dépouillements.

#### 6.1 Critique des travaux de terrain :

A partir des relevés des opérateurs, on fera une critique des opérations de terrain. On essayera notamment de répondre aux questions suivantes :

- le débit de la rivière a-t-il varié au cours de la mesure ? et dans quelle proportion ?
- Y a-t-il eu des anomalies lors de l'injection ? En cas d'injection instantanée le temps de l'injection est-il compatible avec la réponse impulsionale observée ? Y a-t-il eu à l'injection une perte de produit ? En cas d'injection à débit constant, y a-t-il eu des incidents durant la durée de l'injection ? si oui sont-ils susceptibles d'entraîner des erreurs ? etc...
- Y a-t-il eu des anomalies au cours des prélèvements ? ceux-ci ont-ils été bien faits toujours au même endroit ? si non faut-il exclure des dépouillements une partie de l'échantillonnage ? ou la totalité des prélèvements faits à la section ? En cas de prélèvement par micropompage, ou par prélevateurs automatique, est-on sûr que le matériel a bien fonctionné durant toute la durée du traçage ? etc...

#### 6.2 Critique des analyses au laboratoire

- On tracerá les courbes concentrations/temps. Si des points s'écartent de façon incompréhensible des autres, on procédera à une nouvelle analyse de ces échantillons. Si l'écart persiste, on regardera sur les fiches de prélèvement si un incident survenu au cours du traçage peut expliquer cette anomalie. On prendra alors ou non la décision d'écartier tel ou tel point.
- On vérifiera que les écarts entre les calibrations faites au cours de l'analyse ne sont imputables qu'à des différences de températures. Si ce n'était pas le cas et si l'évolution des étalonnages semble indiquer une disparition du traceur dans les dilutions, on sera peut être amené à reprendre les analyses en repétant souvent les calibrations.

### 6.3. Critique des dépouillements :

#### Pour les tracages :

Pour Des sections suffisamment éloignées du point d'injection on calculera, par les méthodes exposées au chapitre II, le débit et on vérifiera l'égalité entre la valeur trouvée et celle mesurée, ou déduite des lectures d'échelles. On vérifiera aussi, si possible, qu'il ne passe pas plus de produit à l'aval qu'à l'amont. Si ce n'était pas le cas on peut supposer soit une erreur de dépouillement, soit que la ou les sections sont trop près du point d'injection pour qu'il y ait bon mélange. Si on a calé des paramètres, on tracera sur une même graphique les valeurs observées et calculées pour vérifier la qualité du collage. Si on utilise la méthode des moments, il peut y avoir des écarts importants entre les 2 courbes. En l'absence de logiciel adapté, on pourra par tatonnements essayer de réduire ces écarts. Enfin on comparera les valeurs des paramètres calculés avec celles obtenues par d'autres pour des conditions d'écoulement à peu près semblables.

#### Pour les jaugeages :

- S'il y a plusieurs points, on vérifiera l'hypothèse de bon mélange : les débits calculés à partir des mesures sur les différents points doivent être égaux.
- Si il y a plusieurs sections, on vérifiera qu'il ne passe pas plus de produit à l'aval qu'à l'amont. Si c'était le cas, plusieurs explications sont possibles: erreurs d'analyse, mauvais protocole de prélèvement, condition de bon mélange non respectée.

## INVENTAIRE DU MATERIEL ET DES PRODUITS A UTILISER

Nous allons ici procéder à un rapide inventaire du matériel nécessaire. Il n'est donné qu'à titre indicatif. Le matériel scientifique connaît des progrès constants. La première chose à faire, pour un service qui désirerait se lancer dans les tracages, serait de se procurer les catalogues des fournisseurs de matériel de laboratoire et de produits chimiques et de faire son choix compte tenu des objectifs suivis et des disponibilités budgétaires.

Les prix que nous indiquerons parfois ne doivent être considérés que comme des ordres de grandeurs. Ils peuvent varier de façon importante d'un fournisseur à l'autre.

1.

### MATERIEL HYDROMETRIQUE ET DE TOPOGRAPHIE

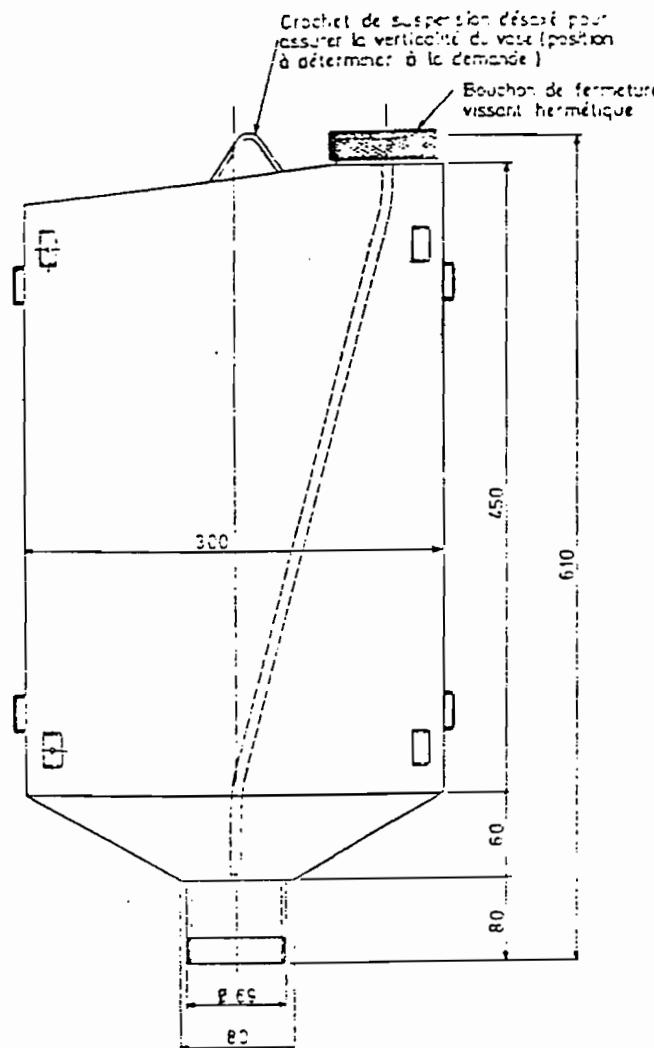
- échelle limnimétrique
- moulinet hydrométrique
- niveau de géomètre
- "topofil" à 2 bobines = 1800 FF + 60 FF par bobine de 5000 m
- chronomètre : 1000 FF
- télémètre de poche (15 - 180 m) = 1000 FF
- planchette topographique
- boussole de reconnaissance = 600 FF
- double décamètre et câble gradué

2.

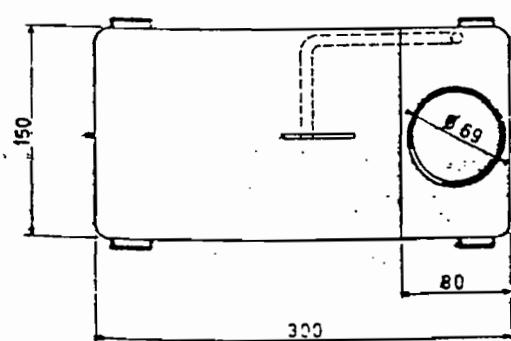
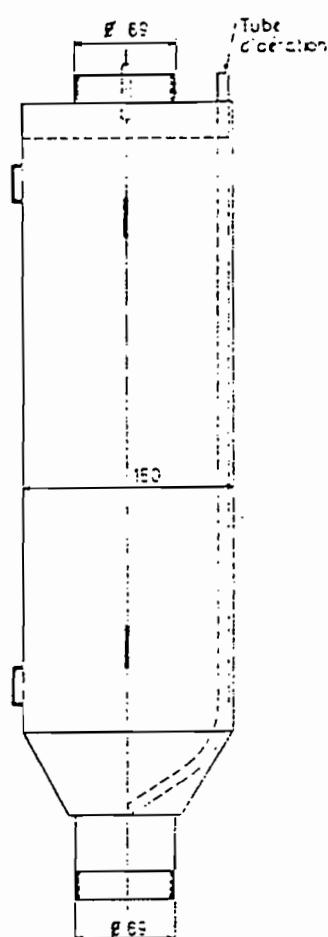
### MATERIEL D'INJECTION

- vase à niveau constant } cf. figure n°18 à 20 tiré du cours
- vase de Mariotte } "hydrométrie pratique des cours d'eau" de ANDRE et Al.
- pompe péristaltique : on choisira une pompe où la vitesse de rotation est affichable et permettant une grande gamme de débits. Pour répartir l'injection sur toute la section on pourra choisir un corps de pompe sur lequel peut se fixer des têtes de pompe multi-canaux. Coût de l'ensemble : 20 à 40 KF selon les modèles qui peuvent être ou non programmables.

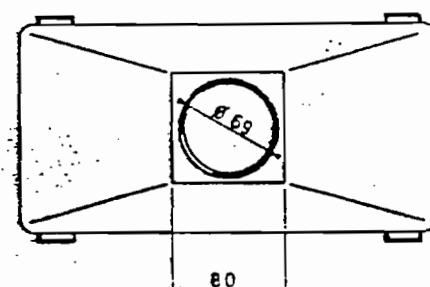
VUE DE FACE



VUE DE GAUCHE



VUE DE DESSUS

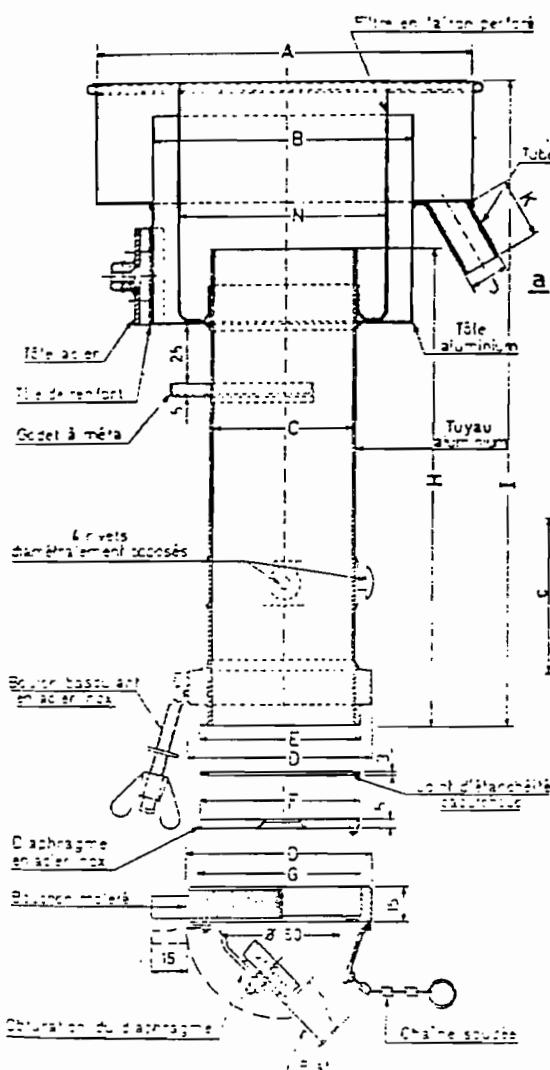


VUE DE DESSOUS

d'après plan EDF n°1495  
Production Hydroélectrique - D.I.G.  
Grenoble

fig. 19 Plan d'un vase de Mariotte

CCUPE 2-a



## VUE DE DESSUS

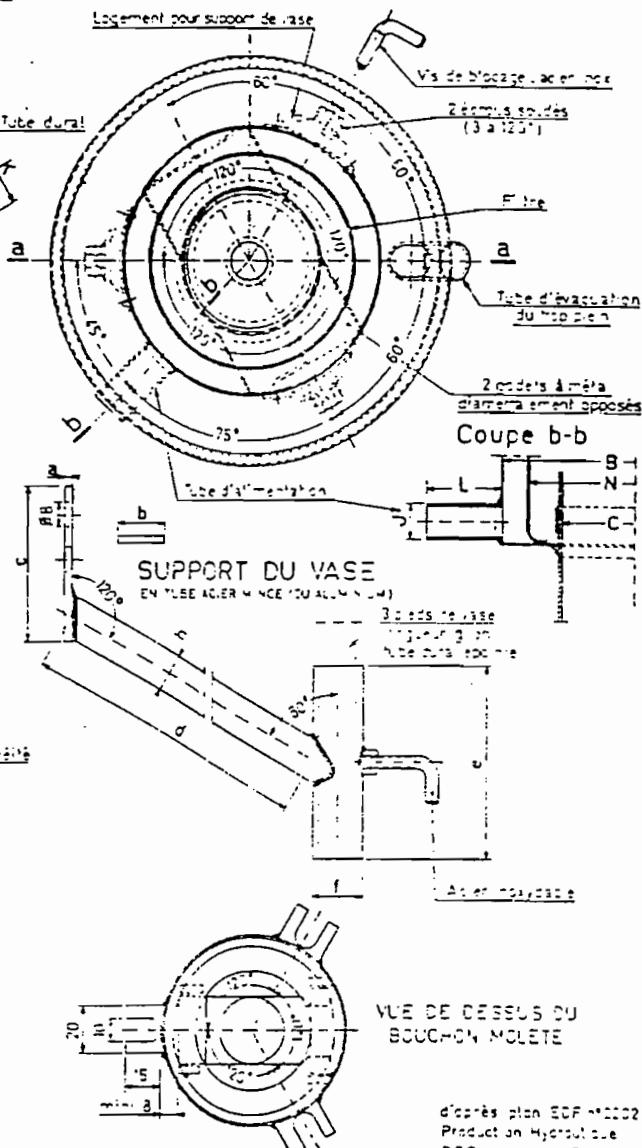


TABLEAU RECAPITULATIF DES COTES (valeurs en mm)

COTES	GRAND MODELE	PETIT MODELE	COTES	GRAND MODELE	PETIT MODELE
A	8 300	8 150	L	50	30
B	8 225	8 112,5	M	833	353
C	Tuyau 75,8-90	Tuyau 58-63	N	150	90
D	8 112	8 80	a	4	1
E	8 96	8 70	b	25	20
F	8 95	8 69	c	100	65
G	3 97	8 71	d	400	300
H	350	135	e	100	80
I	530	265	f	825	221
J	8 33	8 15	g	1000	730
K	40	20	h	211	86

fig. 18 - Plan de vases à niveau constant utilisés par E.D.F.

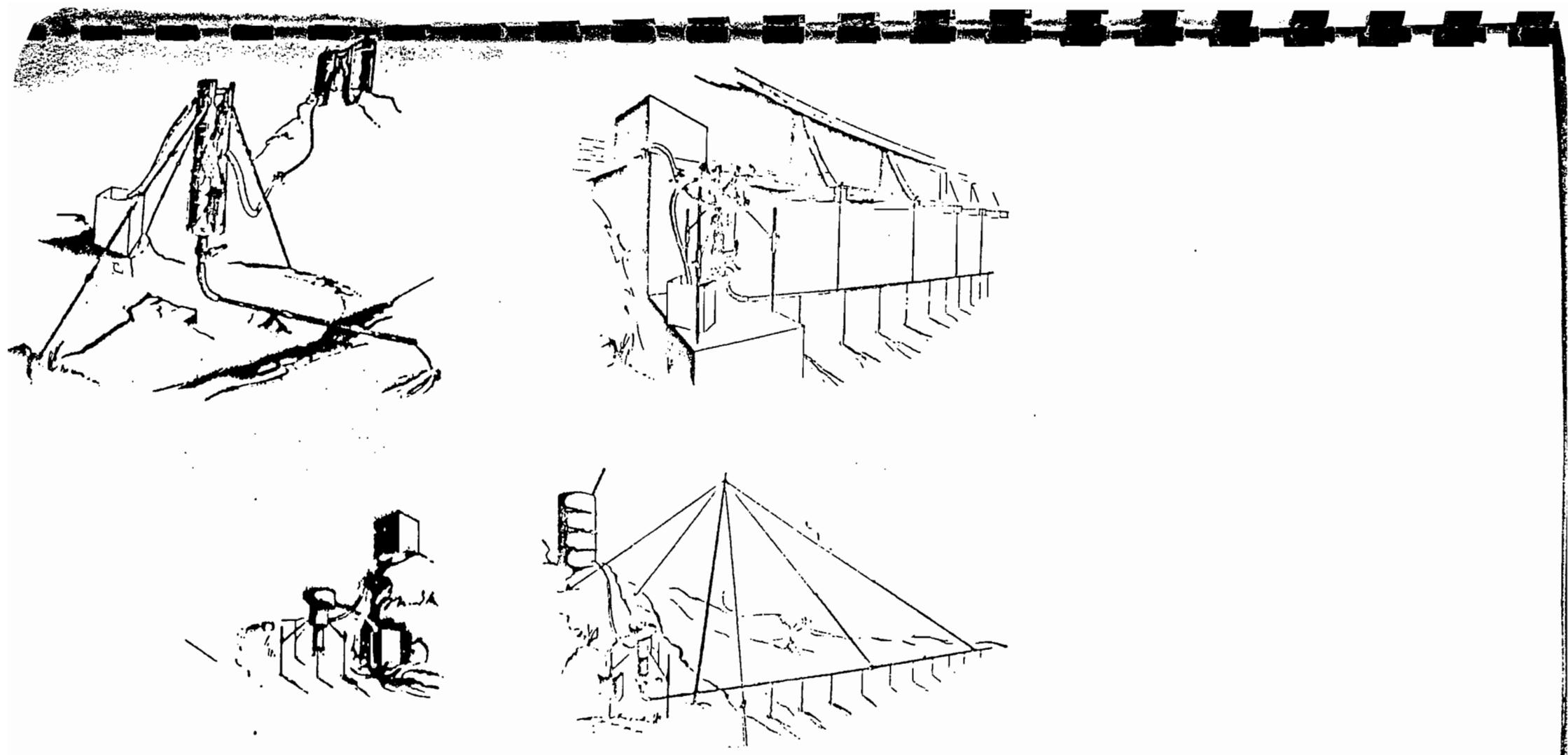


fig. 20

3.

**MATERIEL DE PRELEVEMENT**

a) Prélèvement manuel :

- flacons en verre de 50 ml, à large ouverture, à bouchons à vis,
- parafilm petite largeur pour assurer l'étanchéité du bouchage
- éventuellement s'il n'est pas possible de prélever directement avec les flacons : godet préleveur fixé sur perche ou attaché au bout d'une drisse.

b) Prélèvement par pompe peristaltique

- pompe peristaltique à faible débit, simple ou multi-canaux (permettant le prélèvement simultané de plusieurs échantillons) de 10 à 20 KF.
- pour les jaugeages par intrégation : répartiteur de prélèvement (fig. n° 21).
- crèpine

c) Prélèvement automatique

- échantillonneur portable à alimentation mixte, 24 flacons (de l'ordre de 30 KF)
- crèpine

4.

**MATERIEL DE LABORATOIRE**

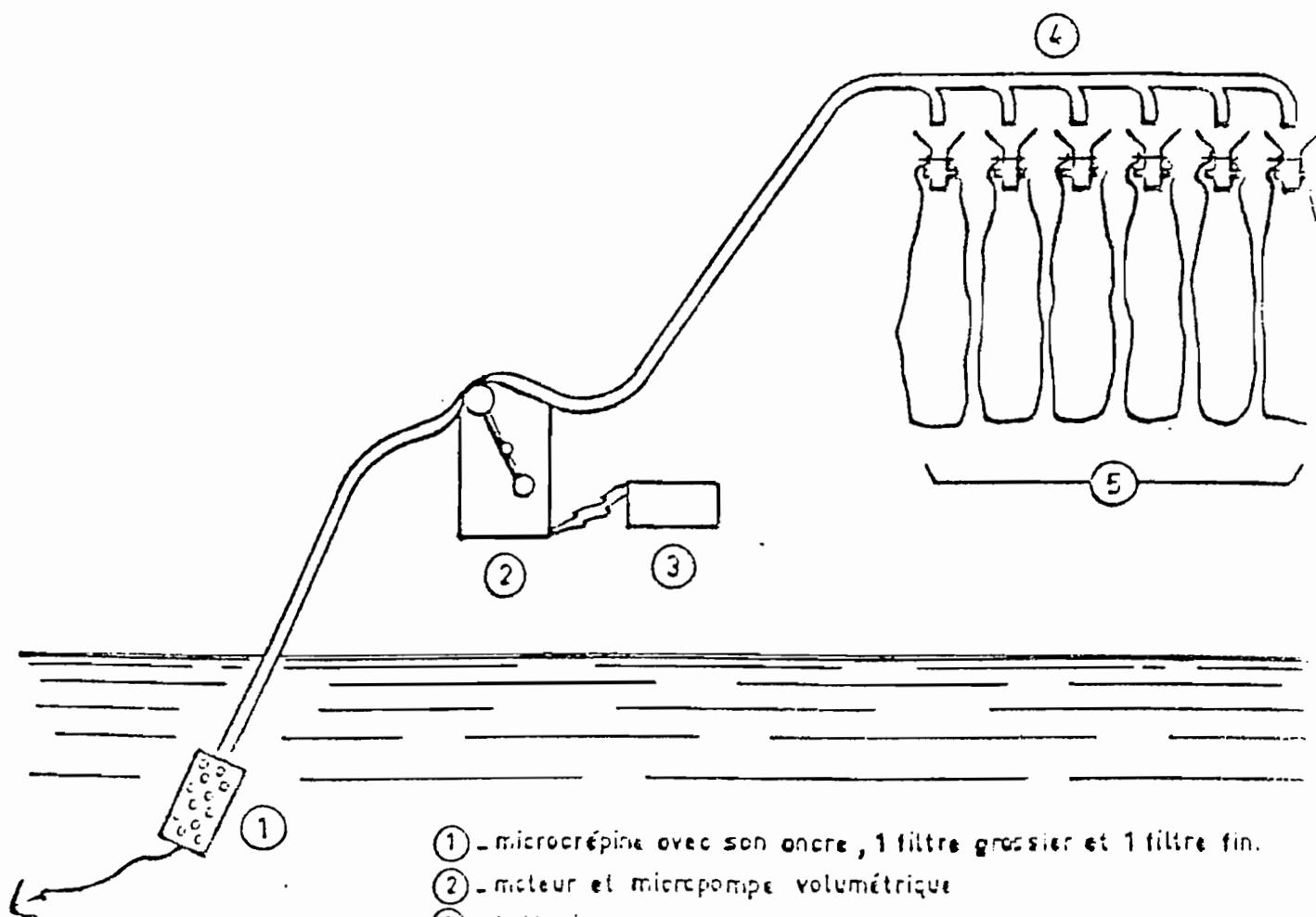
a) Fluorimètre :

- fluorimètre Turner 112 ou 111 (50 KF)
- 2 jeux de filtre (3 KF)
- 1 lampe de rechange (500 FF)
- cuves 4 ml en verre de 12 mm de diamètre sur 7,5 mm de hauteur (600 F.F les 12)

b) Rampe de Filtration :

Si les eaux sont très chargées

- pompe de filtration avec pompe à vide, et filtre en verre frité.



- ① - microcreepine avec son ancre , 1 filtre grossier et 1 filtre fin.
- ② - micteur et micropompe volumétrique
- ③ - batterie
- ④ - répartiteur à 6 voies
- ⑤ - 6 sacs en plastique

fig. 21 - Schéma de principe du matériel de prélèvement à la micro-pompe pour 5 échantillons moyens réalisés dans des temps différents

c) Verrerie : ( à titre d'exemple )

- bechers (en verre)

- 2 de 2,5 litres (s'il est nécessaire de préparer la solution de rhodamine)
- 10 de 10 cm<sup>3</sup>

- fioles jaugés :

- 2 fioles jaugés de 2 l
- 10 fioles jaugés de 1 l

- Pipette :

- 5 pipettes de 10 ml
- 2 pipettes de 5 ml
- 2 pipettes de 2 ml

d) Micro sérингues :

- 2 de 500 µl
- 1 de 100 µl

e) Autres matériels :

- 2 pissettes
- gants jetables en latex
- marqueur "multisurface"
- adhésif de couleur (pour repérer le matériel à utiliser avec les solutions concentrées)
- agitateurs

5. **PRODUITS** (autre que le traceur)

- acide acétique
- Teepol

6. **AUTRE MATERIEL**

- groupe électrogène, si nécessaire d'installer un labo de terrain, 1,5 KWA
- 2 bonbonnes de 20 l avec robinets
- blouses
- bottes
- etc...

## BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE POUR EN SAVOIR PLUS

### 1. SUR LES JAUGEAGES CHIMIQUES

- ANDRE (H) - Hydrométrie pratique des cours d'eau - Tome I - jaugage par la méthode de dilution - 1964.
- ANDRE (H) - et Al - Hydrométrie pratique des cours d'eau - Eyrolles - Direction des études et recherches d'E D F - 1976.
- J. THIEBAUX - Note concernant les jaugeages par la méthode de dilution au bichromate de sodium. Application aux régions tropicales ou désertiques. Cahiers ORSTOM série Hydrologie - Vol. XVII N° 1 - 1960

### 2. SUR LES TRACEURS FLUORESCENTS

WILSON (J.F.) (1966) "Fluorometric procedures for dye tracing", in Techniques of water-resources investigations of the U.S. Geological Survey, Applications of hydraulics, Book 3, Chapter A12, U.S. Gouvernement Printing Office, WASHINGTON, 31 p.

ANDRE (J.C.), MOLINARI (J.) (1976) "Mise au point sur les différents facteurs physico-chimiques influant sur la mesure de concentration de traceurs fluorescents et leurs conséquences pratiques en hydrologie", Journal of Hydrology, 30, 257-285.

NORDIN (C.F.), RICHARDSON (E.V.) (1971) "Instrumentation and measuring techniques", River Mechanics, Edit. H. W. Shen, FORT COLLINS (COLORADO), Vol. 1, 14, 1-38.

### 3. SUR LES PROCESUS DE DISPERSION :

FISCHER (H.B.) (1967) "The mechanics of dispersion in natural streams" J. Hydraul. Div., ASCE, 93, HY6, 187-216.

FISCHER (H.B.) (1968) "Methods of predicting dispersion coefficients in natural streams, with application to lower reaches of the Green and Duwanish rivers (WASHINGTON). Dispersion in surface water", U.S. Geological Survey Professional Paper, 582-A, 27 p.

M QUIVEY (R.S.), KEEFER (T.N.) (1974) "Simple method for predicting dispersion in streams", J. Environmental Engineering Div., ASCE, 100, EE4, 997-1011.

KAHLIG (P.) 1979 "One-dimensional transient model for short-term predicting of downstream pollution in rivers", Water Research, 13, 1311-1316.

JAYAWARDENA (A.W.), LUI (P.H.) (1984) "Numerical solution of the dispersion equation using a variable dispersion coefficient : methods and applications", Journal des Sciences Hydrologiques, 29, 3, 9, 293-309.

SABOL (G.V.), NORDIN (C.F.) (1976) "Dispersion in rivers as related to storage zones", J. Hydraul. Div., ASCE, 104, HY5, 695-706.

VALENTIN (E.M.), WOOD (I.R.) (1977) "Longitudinal dispersion with dead zones", J. Hydraul. Div., ASCE, 103, HY9, 975-990.

BUJON (G.) (1963) "Modélisation de la dispersion des substances solubles ou pseudo-solubles dans un cours d'eau. Application au cas de la SEINE à l'amont de PARIS", La Houille Blanche, 1, 45-53.

#### 4. SUR LES TRACAGES

DUTANG (M.), DEMOCRATE (Ch.), LHERITIER (R.), GIRARD (C.), MANEM (J.) (1982). "Simulation de pollutions accidentielles à l'aide de tracage par la Rhodamine B", Revue Française des Sciences de l'Eau, 1, 369-386.

LE BARBE (L.), GIODA (A.), DELFIEU (G.), WORME (K.), "Etudes hydrologiques menées dans le cadre du programme de lutte contre l'onchocercose - Etude expérimentale de la propagation des insecticides dans les rivières - Rapports final - ORSTOM 1987.

LE BARBE (L.), GIODA (A.) - Recherche d'un protocole standard d'épandage d'insecticide dans les rivières traitées par le programme de lutte contre l'onchocercose - Hydrologie continentale - Vol. 4 N° 2 1989.