

# Etude par traceurs des modalités de transfert dans un réseau hydrographique

PAR

**J. Guizerix**

Chef du Groupe  
des Applications de la Radioactivité et des Traceurs en Hydrologie et dans l'Industrie  
Commissariat à l'Énergie Atomique

**R. Margrita**

Ingénieur au Groupe

**J. Molinari**

Ingénieur au Commissariat à l'Énergie Atomique

## Introduction

Pour définir les modalités de transfert de l'eau dans un réseau hydrographique, la méthode proposée consiste à superposer à l'écoulement à étudier un écoulement de traceur à partir duquel certaines informations sont obtenues.

Le problème est alors de définir les relations existantes entre ces deux types d'écoulement afin d'en déduire des informations sur le premier à partir de mesures de traceur. Cet ensemble de règles constitue la méthode d'utilisation des traceurs, qui sera exposée présentement dans le cas des écoulements dans un réseau hydrographique. Faisant suite à ce bref rappel méthodologique, on décrira les conditions de mise en oeuvre de ces méthodes c'est-à-dire la technologie d'utilisation des traceurs. Des applications illustrant ces méthodes seront ensuite proposées.

## 1. Méthode

L'information de base donnée par les traceurs est la Distribution des Temps de Séjour ou Réponse Impulsionnelle. Cette grandeur représente la probabilité pour qu'une molécule entrant dans un système à l'instant zéro, en sorte entre l'instant  $t$  et  $t + dt$ . Cette information est obtenue en individualisant une tranche de fluide par un traceur. L'obtention de cette fonction par des opérations de traceur doit répondre à certaines règles que nous allons rappeler brièvement.

### 1.1. CAS IDEAL : ECOULEMENT MONODIMENSIONNEL

Dans le cas unidimensionnel idéal, la réponse impulsionnelle  $h_{1,2}(t)$  entre sections (1) et (2) peut être obtenue par deux méthodes :

### Méthode 1 :

Une injection instantanée de traceur dans la section (1) donne dans la section (2) une courbe concentration-temps  $C(t)$ . La réponse impulsionnelle  $h_{1,2}(t)$  cherchée est alors obtenue à partir de  $C(t)$  par la relation ci-après :

$$h_{1,2}(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt}$$

Cette grandeur est l'inverse d'un temps et sa surface est unitaire.

### Méthode 2 :

Cette grandeur  $h_{1,2}(t)$  peut également être obtenue à partir d'une injection de traceur instantanée ou quelconque dans le temps dans toute section située en amont de la section (1). Les courbes concentration-temps  $C_1(t)$  et  $C_2(t)$  relevées dans les sections (1) et (2) sont liées à la réponse impulsionnelle  $h_{1,2}(t)$  du tronçon limité par ces sections (1) et (2) par une intégrale de convolution

$$C_2(t) = \int_0^t C_1(U) h_{1,2}(t-U) du$$

qui, en notation symbolique, s'écrit :

$$C_2(t) = C_1(t) * h_{1,2}(t)$$

Une opération mathématique de déconvolution donne ainsi la réponse impulsionnelle  $h_{1,2}(t)$  à partir des données expérimentales  $C_1(t)$  et  $C_2(t)$ .

### 1.2. CAS REELS

Dans les cas réels, les cours d'eau présentent une certaine largeur et profondeur, et l'écoulement ne peut pas être considéré comme unidimensionnel, et de ce fait, certaines règles

doivent être respectées dans l'application des méthodes précédentes.

– Condition de bon mélange :

D'une manière générale, toutes les opérations faisant intervenir des traceurs, doivent respecter la condition de bon mélange, c'est-à-dire que, suite à une injection de traceur, les courbes concentration-temps relevées en différents points d'une section doivent respecter impérativement la condition suivante :

$$\int_0^{\infty} C(P, t) dt = \text{constante}$$

quelle que soit la position du point  $P$  dans la section considérée.

– Injection multipoint pondéré

Dans le cas de la méthode (1) définie par une injection instantanée de traceur, les quantités de traceur introduites en différents points de la section d'injection doivent être proportionnelles au débit local du cours d'eau. On est ainsi conduit à une connaissance du débit de l'écoulement en tous les points de la section d'injection et à des injections de traceur proportionnelles à ces débits.

Ce type d'injection réalise en fait, par sa définition même, la condition de bon mélange. L'injection réalisée selon cette procédure est alors dite "instantanée, pondérée, multipoint".

– Détection multipoint pondérée

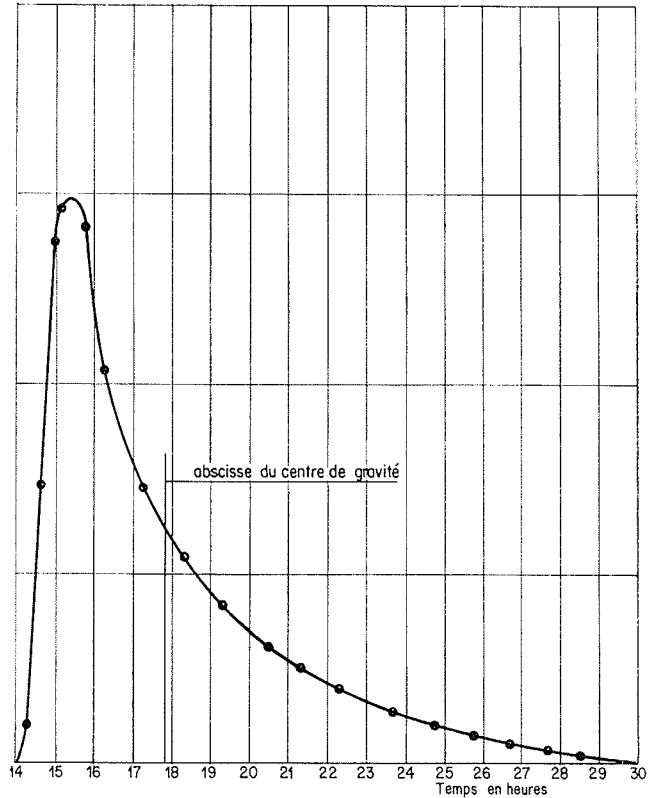
De même on doit relever les courbes concentration-temps dans la section d'observation en différents points de cette section et ces courbes concentrations-temps  $C(P, t)$  doivent être pondérées par les débits locaux  $Q(P)$  des différents points de cette section. On obtient alors une courbe  $C(t)$  telle que

$$C(t) = \frac{\sum_P Q(P) C(P, t)}{\sum_P Q(P)}$$

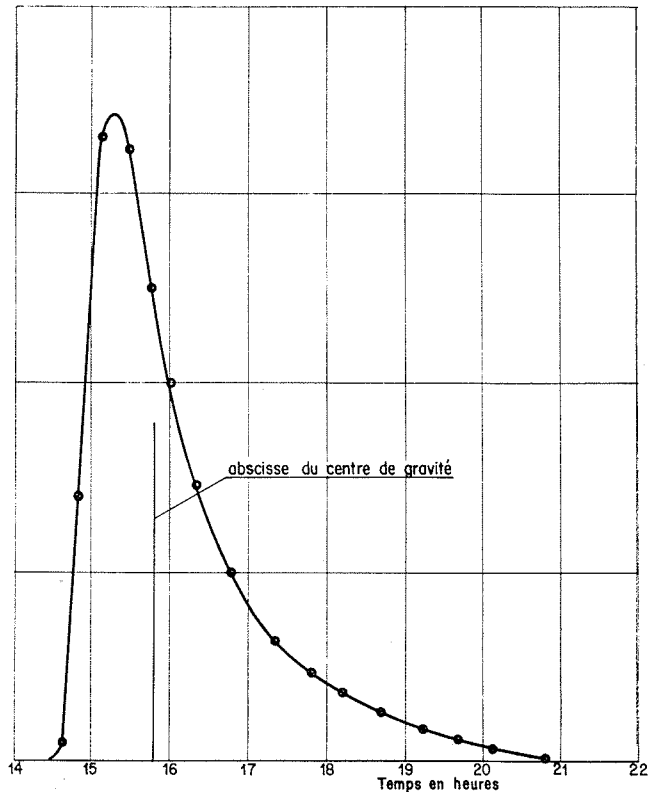
Cette courbe obtenue par pondération des différentes courbes élémentaires donne après normation la réponse impulsionnelle du tronçon (1), (2).

– Identité des réponses impulsionnelles

Un traceur ayant été injecté en un point d'une section d'une manière instantanée, nous avons montré qu'il existe une section de l'écoulement pour laquelle les réponses impulsionnelles définies entre ce point d'injection et les différents éléments de surface de cette section sont identiques. Cette démonstration, qui n'est pas reproduite dans ce mémoire, repose sur les propriétés asymptotiques des processus de Markov réguliers et du premier ordre, par l'intermédiaire desquels on décrit l'écoulement (Réf. 1). Cette propriété a été vérifiée de nombreuses fois sur des fleuves tels que la Loire, la Seine, le Rhin. Elle est d'une importance capitale du point de vue pratique car on est ramené au cas unidimensionnel idéal. Dans une section de mesure on n'est conduit à la détermination que d'une seule réponse impulsionnelle, au lieu de déterminer  $n$  réponses impulsionnelles et les débits de pondérations correspondant, comme cela est nécessaire si l'on ne peut pas choisir une section de mesure assez éloignée de la section d'injection.



1 / Distribution des temps de séjour de l'eau entre le pont de Meung sur Loire et le Pont de Blois pour un débit de  $213 \text{ m}^3/\text{s}$ .



2 / Distribution des temps de séjour de l'eau entre l'écluse de Mericourt et le Pont de Vernon pour un débit de  $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 1.3 DISTRIBUTION DES TEMPS DE SEJOUR D'UN TRONÇON DE GRANDE LONGUEUR

Ces propriétés permettent ainsi d'appliquer les méthodes précédemment décrites pour obtenir la Distribution des Temps de Séjour ou Réponse Impulsionnelle d'un tronçon choisi sur un cours d'eau. Il se peut que le tronçon à étudier soit long (100 kms ou plus) et que les méthodes précédentes ne puissent pas être mises en œuvre pour des raisons pratiques : temps d'observation trop long ou quantité de traceur trop grande à injecter. Dans ce cas on décompose le tronçon à étudier en sous-tronçons et on détermine ainsi leurs réponses impulsionnelles respectives  $h_{1,2}(t), h_{2,3}(t), \dots, h_{n-1,n}(t)$ . La réponse impulsionnelle totale est obtenue par convolution des réponses impulsionnelles de ces sous-tronçons consécutifs c'est-à-dire

$$h(t) = h_{1,2}(t) * h_{2,3}(t) \dots * h_{n-1,n}(t)$$

### 1.4 VARIATION DES REPNSES IMPULSIONNELLES AVEC LE DEBIT ET LA DISTANCE

La réponse impulsionnelle d'un tronçon de cours d'eau a pu être obtenue pour des états hydrauliques caractérisés par leurs débits  $Q_1, Q_2 \dots Q_n$ . Un graphique reproduisant ces réponses impulsionnelles en fonction de ces débits permet alors d'obtenir par interpolation des réponses impulsionnelles pour des débits intermédiaires.

De même si on porte sur un graphique, les réponses impulsionnelles en fonction de la distance d'observation, une interpolation donne des réponses impulsionnelles sur des distances intermédiaires à condition que l'écoulement soit sans affluent sur la longueur considérée.

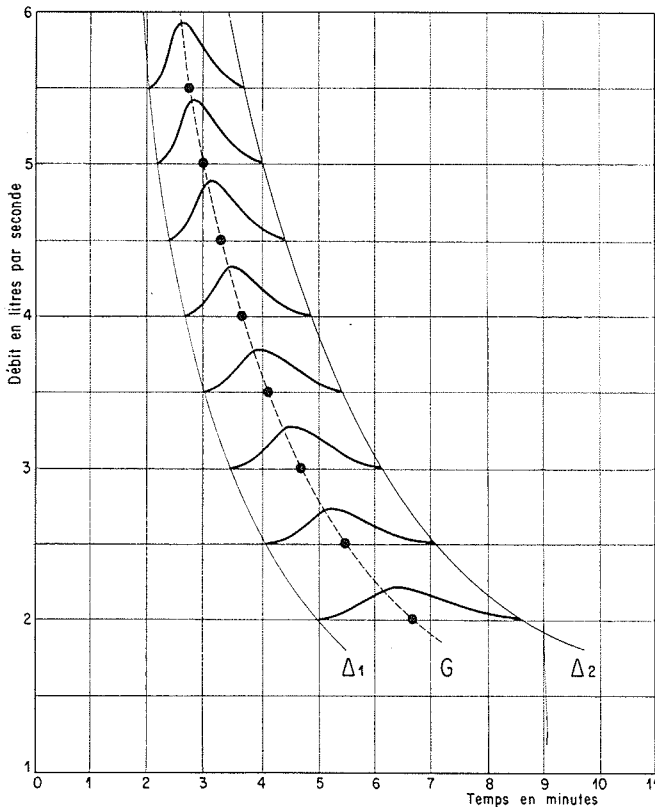
Ces procédés graphiques permettent des interpolations d'un grand intérêt pratique.

## 2. Technique

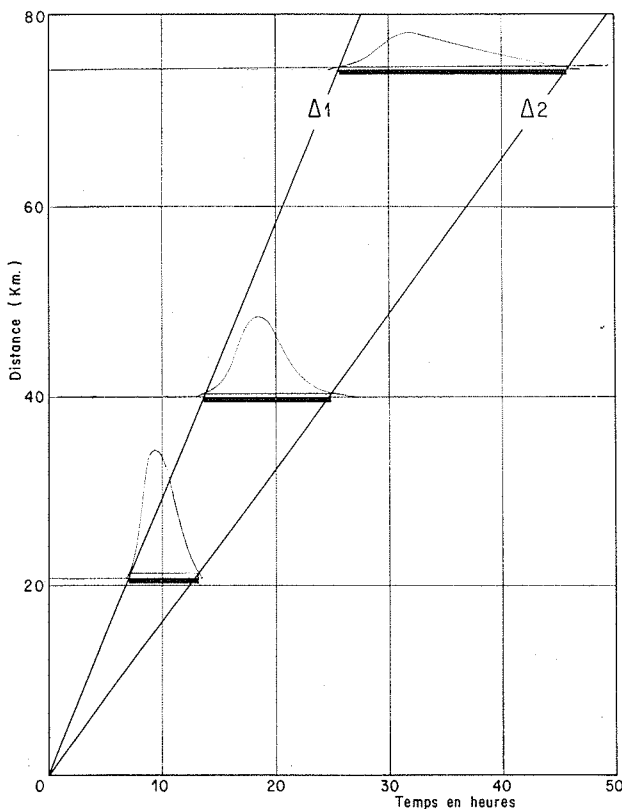
### 2.1. MISE EN OEUVRE DES METHODES PRECEDENTES

#### Injection multipoint.

La méthode d'injection multipoint pondérée par les débits est mise en œuvre sur les fleuves de grande dimension pour réaliser au mieux un marquage idéal et limiter la distance de bon mélange. L'opération consiste à décomposer le fleuve en différentes tranches verticales dont on mesure le débit moyen. La vitesse d'écoulement dans chacune de ces tranches est mesurée au moulinet en un point situé au milieu de la hauteur de la tranche. Cette hauteur est également mesurée (écho-sondeur par exemple). La quantité de traceur injectée est ainsi proportionnelle au débit  $h \times V$  de cette tranche. On adopte parfois dans la pratique un procédé quelque peu différent consistant à injecter des masses de traceur égales, la densité des points d'injection étant proportionnelle au débit. Le nombre de points d'injection est dans la pratique de quelques dizaines (30 sur la Loire par exemple). Cette injection multipoint pondérée est faite depuis un pont à partir de bouteilles en polyéthylène renversées à distance à l'aide d'un dispositif actionné par un messenger. Le mélange vertical étant rapide, cette propriété permet de renverser le traceur à la surface de l'eau et d'éviter ainsi une injection qui devrait être pondérée sur la hauteur du fleuve.



3 / Variation des réponses impulsionnelles avec le débit



4 / Variation des réponses impulsionnelles sur la Loire entre le Pont de Meung sur Loire et Amboise pour un débit de 213 m<sup>3</sup>/s.

### Détection.

La détection est assurée en aval par des prélèvements en différents points d'une section. Un appareil de détection avec enregistreur avertit du passage de la vague de traceur et permet ainsi d'effectuer les prélèvements dans les meilleures conditions. Si la section de prélèvement est placée assez loin de la section d'injection, on observe une identité des réponses impulsionnelles. Cette propriété a été vérifiée sur de nombreux cours d'eau. La figure obtenue sur la Loire à 75 kms du point d'injection illustre cette situation.

### 2.2. CHOIX DU TRACEUR

Les traceurs mis en œuvre peuvent être de nature différente : radioactifs, chimiques, fluorescents, etc... Bien que le traceur radioactif soit "a priori" le meilleur traceur que l'on puisse proposer (brome 82, Iode 131) on utilise cependant de préférence un traceur fluorescent dont la mise en œuvre est beaucoup plus légère : par exemple Rhodamine B. en solution acétique ou Rhodamine W.T. Les quantités de Rhodamine utilisées sont de quelques kilogrammes ou dizaines de kilogrammes (9 kilogrammes sur la Loire par exemple). Les dosages sont effectués avec facilité au niveau de  $10^{-9}$  grammes par ml et même à des teneurs inférieures.

Pour s'assurer de la qualité de ce traceur, des comparaisons ont été effectuées avec un traceur radioactif. Une injection continue à débit constant d'un mélange de Rhodamine B et de Brome 82 pris comme référence a été réalisée pendant plusieurs heures. Des échantillons prélevés dans le panache de dispersion, ont permis de mettre en évidence une disparition de quelques pour cent de Rhodamine B, sur 10 Kms dans la Seine au niveau de Mantes la Jolie dans une eau fortement polluée. Un bilan de traceur effectué à partir de prélèvements permet également de définir la perte de traceur, quand on connaît le débit du cours d'eau. On a pu constater une perte de 6 % de Rhodamine B sur le tronçon de 40 Kms de la Loire au niveau de Blois.

## 3. Applications

Après ce bref rappel méthodologique et technologique, nous allons décrire des exemples d'applications concernant ces problèmes de transfert d'eau dans un système hydrographique.

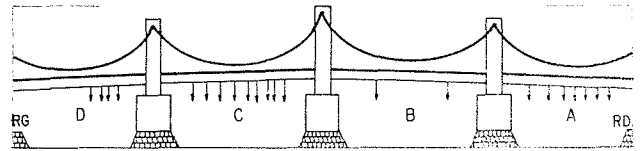
### 3.1. MESURE DE DEBITS

L'exposé concernant ces mesures de débits sera bref et fait uniquement pour mémoire.

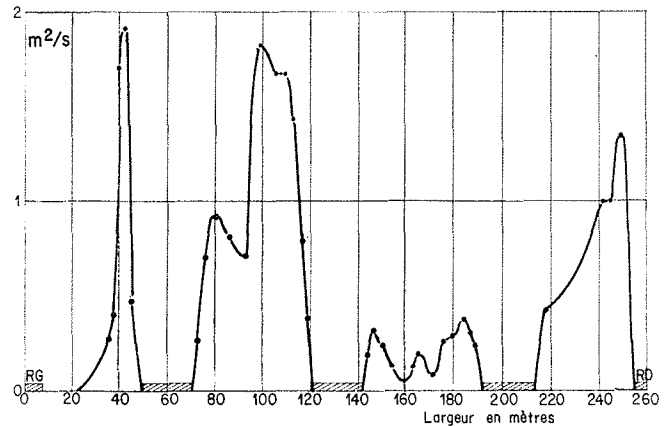
Dans ce type d'applications le traceur doit être conservatif et aucune perte n'est tolérable car toute disparition du traceur se traduit automatiquement par un erreur de même grandeur sur la mesure du débit. Les méthodes employées font appel à un bilan de traceur et sont de deux sortes

— injection instantanée d'une masse  $M$  de traceur et mesure en aval après bon mélange de la concentration  $C(t)$ . Le débit est alors obtenu à partir de l'équation de conservation par la relation :

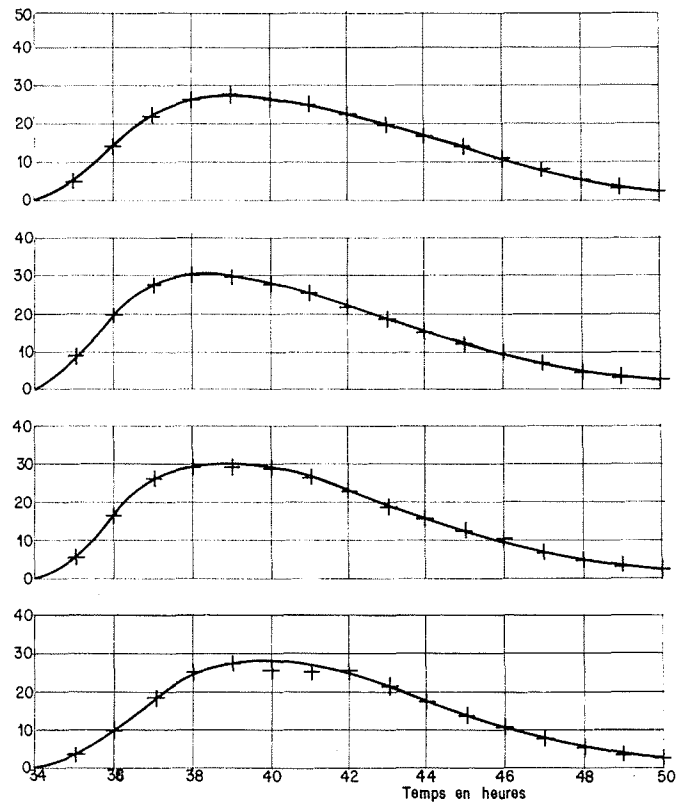
$$M = Q \cdot \int_0^{\infty} C(t) dt$$



5a/ Répartition des points d'injection



5b/ Répartition des débits



6 / Identité des réponses impulsionnelles — distance, injection — détection : 75 km — débit Loire :  $180 \text{ m}^3/\text{s}$ .

— injection continue d'une concentration  $C$  ou débit  $q$ . La concentration  $C$  relevée dans une section aval, après bon mélange, est liée au débit  $Q$  cherché par la relation :

$$C \cdot q = c \cdot Q$$

L'application de ces méthodes suppose impérativement la conservation du traceur et l'obtention dans la section de mesure de la condition de bon mélange. Dans le cas de la méthode à injection continue, une injection préliminaire instantanée de traceur (colorant par exemple) est souvent réalisée pour connaître la réponse impulsionnelle entre le point d'injection et la section de mesure. Cette grandeur d'une durée  $\theta$  permet de déterminer la durée  $T$  de l'injection continue pour que soient définies dans la section de mesure les caractéristiques temporelles d'un palier de concentration de durée  $T - \theta$ . La durée de la courbe concentration-temps égale à  $T + \theta$  permet de définir avec précision la quantité totale de traceur à injecter. De nombreuses mesures faisant intervenir le bichromate de potassium ont été réalisées par E.D.F.

Dans le cas d'effluents fortement pollués, l'utilisation d'un traceur radioactif s'avère nécessaire pour effectuer des mesures de débits. Nous avons, par exemple mesuré, sur des intervalles de temps de 24 heures, des débits d'effluents pollués rejetés par des usines par injection continue de Brome 82 pendant ce temps.

Ces débits de quelques  $m^3/sec$  avaient la propriété d'être variables dans le temps, et pour tenir compte de cette situation, nous avons effectué préalablement des études validant les méthodes employées (Réf. 2).

### 3.2. DETERMINATION DES PARAMETRES D'ÉCOULEMENT

La distribution des Temps de Séjour ou Réponse Impulsionnelle obtenue par les méthodes précédentes permet de déterminer des paramètres d'écoulement. On obtient d'une manière simple le temps minimal d'arrivée  $t_a$  correspondant aux molécules d'eau animées de la plus grande vitesse. Cette distribution des Temps de Séjour donne également des valeurs caractéristiques tels que le temps modal ou abscisse du maximum de la courbe, le temps de fin de courbe à 10 % du maximum, ou à 5 % . . etc. Le paramètre le plus important concernant cette distribution des temps de séjour est le temps moyen  $\bar{t}$  défini comme le premier moment de la distribution

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t h(t) dt$$

Cette grandeur est caractéristique et il est montré que ce temps moyen  $\bar{t}$  présente une propriété remarquable (Réf. 1) On a, en effet, dans un système fermé à la diffusion aux deux extrémités la relation

$$\bar{t} = \frac{V}{q}$$

où  $V$  est le volume du système parcouru par le débit  $q$ .

On peut d'autre part identifier cette distribution des temps de séjour à un modèle mathématique pour en déduire certains paramètres tels que le coefficient de dispersion.

Le modèle le plus souvent utilisé et représentant bien la réalité est appelé "piston-diffusion". Il est caractérisé par une vitesse moyenne et par un coefficient de dispersion  $D$  rendant compte globalement de tous les phénomènes conduisant à l'élargissement dans le temps d'une injection impulsion. La forme mathématique d'une courbe concentration-temps résultant d'une injection instantanée de traceur est

$$C(t) = \frac{C_0}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp - \frac{(L - ut)^2}{4Dt}$$

où :

$C_0$  est la concentration en traceur dans la section d'injection et  $L$  la distance entre cette section et la section de mesure.

Cette expression est souvent utilisée en variable réduite et dans ce cas apparaît un nombre adimensionnel appelé nombre de Peclet  $P = UL/D$ .

Un écoulement piston est caractérisé par un nombre de Peclet infini ; au contraire un nombre de Peclet faible traduit un écoulement défini par une grande dispersion.

Des opérations mathématiques (optimisation) permettent ainsi de déterminer à partir d'un modèle ce coefficient de dispersion.

Des modèles plus élaborés ont également été proposés ; ces modèles prennent en compte des échanges entre un flux principal et des zones mortes. L'un de ces modèles est caractérisé par trois paramètres et la forme analytique résultante fait intervenir des fonctions de Bessel. Les difficultés mathématiques découlant de l'usage de ces modèles rendent leur emploi peu fréquent pour décrire des écoulements de surface.

### 3.3. EXPERIENCES REALISEES AVEC E.D.F. DANS LE CADRE DES ETUDES SUR LA POLLUTION THERMIQUE DES COURS D'EAU

Des modèles mathématiques simulant le comportement thermique des cours d'eau soumis à des rejets d'eaux chaudes ont été élaborés par E.D.F. afin de procéder d'une part à l'inventaire des ressources du réseau hydrographique français en matière de réfrigération et d'autre part à l'optimisation de l'implantation des centrales thermiques.

Ces modèles font intervenir 3 types de données : données hydrologiques — données météorologiques — données de température de l'eau (Réf. 3).

L'utilisation de traceurs permet d'accéder à la détermination des paramètres hydrologiques entrant dans le modèle, à savoir :

- la profondeur moyenne des cours d'eau par tronçons de longueur allant de 30 à 100 kms en fonction du débit,
- la vitesse moyenne des molécules d'eau dans chacun des tronçons en fonction du débit,
- la courbe de répartition des temps de séjour des molécules d'eau en fonction du débit pour un tronçon donné.

La mesure locale des deux premiers paramètres pourrait être réalisée par des mesures classiques : tracé du profil transversal de la rivière et relevé point par point des vitesses ; la détermination des moyennes sur les tronçons envisagés demanderait de très nombreux relevés pour obtenir finalement une précision médiocre ; la distribution des temps de séjour ne peut pas de toute façon être obtenue par ces méthodes. Aussi il a été fait appel aux traceurs pour mesurer ces trois paramètres.

L'abscisse du centre de gravité de la courbe concentration-temps ou temps moyen est égal au quotient du volume  $V$  d'eau compris entre les deux sections de mesure par le débit  $Q$ . La connaissance du débit  $Q$  et de ce temps moyen  $\bar{t}$  permet ainsi d'obtenir le volume d'eau  $V$  entre les deux sections. Ce volume est égal au produit de la surface du plan d'eau par la profondeur moyenne ; la surface du plan d'eau étant déterminée par planimétrie à partir de cartes ou photographies aériennes, on en déduit ainsi la profondeur moyen-

ne du cours d'eau entre deux sections de mesure. Ces expérimentations, faisant intervenir des traceurs pour déterminer ces trois paramètres, ont été réalisées sur des fleuves tels que la Loire, la Seine et le Rhin.

### 3.4. – ETUDES DE TRANSFERT DE POLLUANT

Ces études de transfert de polluant dans un réseau hydrographique supposent que le polluant miscible à l'eau se transfère comme l'eau et que son transfert est simulable par un traceur. Ceci exclue, en toute rigueur, des transferts de surface tels que les pollutions par hydrocarbure, bien que la meilleure approche pour aborder de tels problèmes soit encore l'usage de traceurs miscibles à l'eau malgré les imperfections de la méthode. Nous supposons de plus que ces transferts de substances polluantes sont conservatifs (pas de dégradation). Si des pertes se produisaient, les simulations par traceur donneraient une enveloppe maximale de ce qu'on pourrait observer dans toute section aval, le traceur étant conservatif.

La connaissance de la distribution des temps de séjour  $h(t)$  d'un tronçon de cours d'eau permet de prévoir la concentration  $c(t)$  dans une section aval résultant d'un rejet dans une section amont. Dans le cas d'un rejet accidentel (instantané ou limité dans le temps) on peut ainsi prévoir les conditions temporelles de transfert (temps d'arrivée, durée de la contamination) et également prévoir les concentrations envisageables pour prendre les mesures nécessaires. Un rejet instantané d'une masse polluante  $M$  dans un cours d'eau de débit  $Q$  donne en effet une concentration  $C(t)$  en aval telle que

$$C(t) = \frac{M}{Q} h(t)$$

Si ce rejet ne peut plus être considéré comme instantané à l'échelle du phénomène de transfert mais est caractérisé par une fonction  $m(t)$  traduisant la masse de polluant rejeté en cours du temps dans un cours d'eau de débit  $Q$ , la concentration en aval est donnée par la relation

$$C(t) = \frac{1}{Q} m(t) * h(t)$$

\* étant le symbole de la convolution.

Si  $T$  est la durée du rejet et  $\theta$  la durée de la réponse impulsionnelle, la section aval d'observation sera ainsi contaminée pendant le temps  $T + \theta$ .

Cette action de prévision appliquée à un rejet accidentel non contrôlé peut également s'appliquer à des rejets contrôlables dans le but de minimiser les concentrations dans toute section aval : exemple rejet de sel dans le Rhin. La méthode précédemment exposée permet par exemple de définir la loi de rejet  $m(t)$  pour que la concentration dans une section aval soit inférieure à tout instant ou en moyenne sur un certain intervalle de temps à une valeur fixée a priori. Cette analyse conduit ainsi à définir des schémas du rejet type, c'est-à-dire à optimiser les conditions de stockage des effluents et les dispositifs de rejets.

Le choix et l'implantation sur un cours d'eau d'une station d'analyses et de contrôle automatique chargée de surveiller des rejets existants ou potentiels doivent être faits en tenant compte de ces informations définissant le transfert de l'eau.

L'analyse des relevés de mesure conjuguée aux informations sur le transfert de l'eau permet de localiser des points de rejets inconnus. Supposons que l'on ait mis en évidence, en un certain point d'un cours d'eau, une substance polluante en mesurant ses concentrations en fonction du temps. Le problème que nous nous posons est de déterminer, à partir d'expériences de traceur, la zone du rejet inconnu. Nous faisons évidemment l'hypothèse que ce rejet est limité dans le temps, sinon il suffirait de prélever systématiquement des échantillons en amont pour remonter à la source. Des observations simples concernant les relevés de mesures de pollution (début et durée du rejet, hypothèse de rejet à débit constant ou instantané) composés avec les données hydrodynamiques permettent de réfuter ou d'identifier certains points de rejet.

D'une manière générale, la déconvolution de la fonction concentration-temps relevée par des réponses impulsionnelles  $h_1(t), h_2(t) \dots h_n(t)$  correspondantes à des distances d'injection de plus en plus grandes donne des fonctions d'entrée  $e_1(t), e_2(t), \dots e_n(t)$  définissant les conditions de rejet pour ces distances. Au delà de la distance réelle du rejet on observe que ces fonctions présentent de grandes fluctuations. Des mesures sur un canal expérimental nous ont permis de vérifier le bien-fondé de cette méthode dont le détail n'est pas exposé dans ce document (Réf. 4).

### 3.5. ETUDE DE TRANSFERT DE SUBSTANCES POLLUANTES AVEC BIODEGRADATION : APPLICATION AU POUVOIR AUTOEPURATEUR D'UN COURS D'EAU

– Méthode proposée :

Dans le cas de cours d'eau pollués par des rejets biodégradables, on se propose de déterminer à titre prévisionnelle, l'influence d'une modification de la charge polluante (allègement ou augmentation) sur la qualité des eaux. La qualité de l'eau sera définie par sa teneur en oxygène dissous conformément aux classes d'objectifs proposés par le Ministère de la Qualité de la Vie.

La méthode proposée prend en compte deux catégories de phénomènes :

- phénomènes hydrodynamiques
- phénomènes physico-chimiques

L'hydrodynamique est, en général, négligée dans la plupart des modèles utilisés (modèle du "type piston"). Dans le cas présent, les conditions spatio-temporelles de l'écoulement sont décrites avec rigueur et simplicité par la connaissance des réponses impulsionnelles des différents tronçons du cours d'eau et de ses affluents.

Les phénomènes physico-chimiques retenus et considérés comme majeurs sont relatifs à

- la consommation d'oxygène par biodégradation
- la réoxygénation du cours d'eau

On suppose que ces mécanismes sont régis par des cinétiques du premier ordre définies par des coefficients  $K_1$  (biodégradation) et  $K_2$  (réoxygénation). Ces deux types d'information : hydrodynamique et physico-chimique sont couplés en utilisant les méthodes développées dans la dynamique des systèmes linéaires et applicables dans le cas présent par l'hypothèse faite sur l'ordre des réactions.

– Mise en œuvre :

La mise en œuvre de la méthode consiste ainsi à déterminer sur le terrain les données de base :

- réponses impulsionnelles
- coefficient de biodégradation  $K_1$
- coefficient de réoxygénation  $K_2$

A partir de ces paramètres, des simulations par le calcul sont effectuées (allègement ou augmentation de la charge polluante) pour définir l'influence de ces modifications sur la teneur en oxygène dissous de la rivière.

#### Détermination du coefficient $K_1$ .

Soient  $L_1(t)$  et  $L_2(t)$  les concentrations en éléments polluants dans les sections d'entrée et de sortie d'un tronçon de cours d'eau caractérisé par une réponse impulsionnelle  $h_{1,2}(t)$ . Ces grandeurs sont liées par une intégrale de convolution (notée \*) où intervient  $K_1$ .

$$L_2(t) = L_1(t) * h_{1,2}(t) \exp - K_1 t$$

On obtient ainsi le coefficient de biodégradation  $K_1$  à partir des grandeurs mesurées  $L_1(t)$ ,  $L_2(t)$  et  $h_{1,2}(t)$  par une opération d'optimisation mathématique.

Dans le cas de rivière peu polluée, une simulation peut être réalisée par une injection de produits biodégradables (Urée par exemple). La concentration en Urée en différentes sections du cours d'eau et la réponse impulsionnelle en traceur (produit non biodégradable) permet de déterminer ce coefficient  $K_1$ .

#### Détermination de $K_2$ .

Ce coefficient  $K_2$  sera déterminé sur le même tronçon d'observation que précédemment, à partir des mesures suivantes : déficit en oxygène  $D_1(t)$  et  $D_2(t)$  dans les sections (1) et (2), concentration en éléments polluants dans la section d'entrée (1), coefficient  $K_1$  précédemment déterminé et réponse impulsionnelle  $h_{1,2}(t)$ . Ces grandeurs sont liées par une relation de convolution

$$D_2(t) = F(K_1, K_2, L_1(t), L_2(t)) * h_{1,2}(t)$$

où  $F$  (forme non explicitée ici) est la solution de l'équation de cinétique relative à la réoxygénation. Le coefficient  $K_2$  sera

ainsi déterminé par optimisation à partir de la relation ci-dessus.

Ce coefficient de réoxygénation peut être obtenu d'une manière simple en utilisant les formes de la littérature faisant intervenir uniquement des paramètres hydrauliques : vitesse et profondeur moyenne. Ces deux paramètres sont déterminés par les opérations de traceur et par la connaissance de la surface du plan d'eau.

Une injection simultanée de traceur et de produits créant une désoxygénation partielle contrôlée de la rivière permet également d'accéder à ce coefficient  $K_2$ .

## Bibliographie

- [1] GUIZERIX (J.), MARGRITA (R.), GAILLARD (B.), COROMPT (P.), ALQUIER (M.) — Analyse des informations fournies par les traceurs naturels ou artificiels dans l'étude des systèmes aquifères en hydrogéologie. *Symposium sur "Isotope techniques in groundwater hydrology"* International Atomic Energy Agency — Vienna 1974.
- [2] GUIZERIX (J.), MARGRITA (R.), MOLINARI (J.), GAILLARD (B.), CALMELS (P.), COROMPT (P.) — Contribution à la mesure des débits en régime variable par une méthode de dilution de traceurs radioactifs. *Symposium sur "Isotope Hydrology 1970"* International Atomic Energy Agency — Vienna 1970.
- [3] GUIZERIX (J.), GRAS (R.), MARGRITA (R.), MOLINARI (J.), CALMELS (P.), GAILLARD (B.), SANTOS-COTTIN (M.) — Expériences de traceur réalisées en France dans le cadre d'études sur la pollution thermique des cours d'eau. *Symposium sur "Nuclear techniques in environmental pollution"* (Salzbourg). International Atomic Energy Agency — Vienna 1971.
- [4] GUIZERIX (J.), EMSELLEM (Y.), COROMPT (P.), MARGRITA (R.), de MARSILLY (F.), GAILLARD (B.), RIGOT-MULLER (F.), KAUFMAN (W.), MAX (J.) — Méthodes de traceur pour la détermination a priori de la propagation de substances polluantes dans le réseau hydrographique et a posteriori pour la localisation d'un point de rejet inconnu. *Symposium sur "Nuclear techniques in environmental pollution"* (Salzbourg) International Atomic Energy Agency — Vienna — 1971.

## Discussion

Président : M. Jean RODIER

M. Le Président remercie M. MARGRITA et ses co-auteurs de leur communication qui présente clairement un éventail très complet des applications des traceurs dans les réseaux hydrographiques. Il ouvre ensuite la discussion.

Sur une question de M. P. COHEN (ECOPOL, Paris), M. MARGRITA précise, comme suit, les conditions d'utilisation des traceurs pour la localisation de points de rejets "inconnus".

A la suite d'un rejet inconnu, une station de mesure installée sur un cours d'eau a enregistré une courbe concentration-temps résultat d'un passage d'une vague de polluant. On se propose alors d'identifier ce point de rejet à l'origine de cet incident.

Pour cela, il est nécessaire de disposer d'un réseau de réponses impulsionnelles décrivant le transfert de l'eau entre la section de mesure et différents points de rejets supposés. Ces réponses impulsionnelles sont obtenues par des injections de traceurs. A partir de ces informations, une analyse mathématique permet alors de déterminer la zone et la loi de rejet. Cette analyse mathématique est décrite en détail dans le mémoire présentant la référence 4 dans la présente annexe bibliographique. Une étude a été réalisée sur un canal expérimental en simulant des rejets

en différents points de son cours dans le but d'éprouver la méthode proposée.

Sur la demande de M. l'Inspecteur général LARRAS, M. MARGRITA donne les ordres de grandeur, ci-après, concernant le poids de traceur à utiliser en fonction du débit à mesurer.

La sensibilité de détection de la Rhodamine se situe au niveau de  $10^{-10}$  grammes par millimètre d'eau. Sur la Loire, nous avons utilisé 9 kilogrammes de Rhodamine pour déterminer les Distributions des Temps de Séjour correspondant à des débits de 100 à 200  $m^3/sec$ . Ces Distributions des Temps de Séjour étaient mesurées sur des bases de 50 kilomètres de longueur, et les "temps de passage" étaient de l'ordre de 15 heures. De telles opérations réalisées sur la Seine (débit 1200  $m^3/sec$ ) ont nécessité quelques dizaines de kilogrammes de Rhodamine.

M. Le Président donne l'exemple suivant : à Madagascar, une équipe D.T.G. (E.D.F.) — O.R.S.T.O.M. a pu jauger 2200  $m^3/s$  en employant 50 à 100 kg de bichromate, mais les mesures étaient très longues et exigent un personnel très expérimenté sinon l'erreur probable (qui peut s'abaisser à 5 %) arrive à atteindre 15 à 20 % ; elle est d'ailleurs influencée par le degré de turbidité des eaux.

M. GUIZERIX fait part de son expérience dans une intervention qu'il a résumée comme suit :

"J'ai participé en 1970 à un projet de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique pour la mesure de débits de 10 000 à 30 000 m<sup>3</sup>/s de la Parana River. Pour des raisons techniques, nous avons proposé l'utilisation de tritium et si l'expérience n'eut pas lieu, elle avait toute chance de conduire à un bon résultat. Sur le plan technique, donc, le tritium serait un bon traceur mais je crois devoir ajouter qu'il ne serait pas indiqué, aujourd'hui, d'en proposer une application systématique car l'on risquerait de contaminer le milieu et ainsi de compromettre l'exploitation en hydrologie du tritium d'origine thermonucléaire.

"Nous avons de bonnes raisons de penser que les traceurs fluorescents, comme la rhodamine B, ou mieux, la rhodamine WT, puissent être utilisés pour la mesure de forts débits. Des études sont en cours sur ce sujet. La contrainte principale demeurera celle de la longueur de bon mélange : il n'est pas toujours possible de trouver un tronçon assez long sans affluent ou ne comportant que des affluents de débit négligeable par rapport au débit à mesurer".

"L'intérêt des traceurs fluorescents, précise M. MOLINARI, réside essentiellement dans le fait qu'ils sont détectables "in situ" ce qui constitue un avantage pratique évident pour les opérateurs ; cela requiert évidemment la sélection d'un traceur fluorescent dont le comportement en milieu souvent turbide soit satisfaisant".

M. Paul-Ch. LEVEQUE (Université de Bordeaux I) fait part des essais qu'il poursuit depuis six ou sept ans sur le mélange des eaux chaudes et froides (notamment dans les "estuaires thermiques") par télédétection du rayonnement infra-rouge des plans d'eau intéressés. La température de ces derniers peut être mesurée avec une précision de l'ordre de 1/10 de degré C. Ses observations sur la Gironde (Bec d'Ambès) et sur la Loire au confluent de la Loire et du Loiret montrent que la notion de bon mélange doit être examinée de près dans chaque cas particulier. Ainsi, la zone "chaude" du Loiret est visible sur la thermographie, prise par avion, sur une longueur de 8 à 10 km à l'aval du confluent sur la rive gauche de la Loire. Toutefois, il existe sur la rive droite de la Loire une autre "zone chaude" due à des apports d'eau alluviale qui, plus à l'aval, rejoint peut-être "l'eau chaude" provenant du Loiret. Il est vrai que l'eau chaude est un traceur assez particulier. . . .

M. DUTILLET (Ministère de l'Agriculture, Paris) cite les distances de bon mélange, qu'il a déduites de ses expériences effectuées de 1965 à 1966 :

"Sur la Garonne entre Mas d'Agenais et Marmande : pour un débit jaugé au bichromate de 1 100 m<sup>3</sup>/s, la distance de bon mélange était de l'ordre de 35 kilomètres.

"Sur la Loire :

- Entre Gien et Sully-s/Loire : pour un débit de 600 m<sup>3</sup>/s, la distance de bon mélange excédait 40 km.

- A l'aval de Tours : l'injection de bichromate étant faite sur la rive gauche, aucune particule de ce sel n'avait atteint la rive droite à 20 km à l'aval du point d'injection".

M. REMENIERAS fait observer que l'on diminue la longueur de bon mélange en répartissant, aussi bien que possible, l'injection sur toute la largeur du cours d'eau ; la théorie et l'expérience montrent que si la diffusion est relativement rapide sur une même verticale, elle peut être très différente d'une verticale à l'autre.

Mais, objecte M. MARGRITA, une injection "multipoint" nécessite, en principe, la connaissance du débit dans la section de mesure ; en fait, pense M. MOLINARI, elle peut, en pratique, hâter le "bon mélange".

M. LEFOULON signale que, pour faciliter la diffusion dans le bief de Fessenheim sur le Rhin, des effluents des "Potasses d'Alsace", ces derniers avaient été répartis entre 4 émissaires débouchant à la sortie des 4 turbines de l'usine hydroélectrique ; la turbulence existant dans l'écoulement dans cette zone était favorable au "bon mélange".

Certainement, observe M. GUIZERIX, mais des expériences effectuées tant par M. ANDRE que par nos équipes ont montré que par sa conception même, la turbine hydraulique est un mauvais "mélangeur". Et ce, d'autant plus qu'elle fonctionne plus près de ses "conditions de tracé", ajoute M. REMENIERAS. . .

M. Le Président clôt la discussion en remerciant tous ceux qui en ont fait un dialogue très vivant. Il donne ensuite la parole à Madame MERLIVAT pour la présentation de la Communication qu'elle a établie en collaboration avec M. LORIUS.