

L'analyse des systèmes-traçages à débit variable et volume constant : possibilités d'application en milieu karstique

Marc Dzikowski

▶ **To cite this version:**

Marc Dzikowski. L'analyse des systèmes-traçages à débit variable et volume constant : possibilités d'application en milieu karstique. Environnement et Société. Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 1991. Français. NNT : . tel-00691545

HAL Id: tel-00691545
https://theses.hal.science/tel-00691545

Submitted on 26 Apr 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

n° d'ordre : 853

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DE LILLE

pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE EN GÉOSCIENCES
(HYDROGÉOLOGIE)

L'ANALYSE DES SYSTEMES-TRAÇAGES A DEBIT VARIABLE ET VOLUME CONSTANT. POSSIBILITES D'APPLICATION EN MILIEU KARSTIQUE.

par
Marc DZIKOWSKI

Soutenue le 03 février 1992 **devant la commission d'examen :**

Président :	**M. G. de MARSILY**, Directeur de thèse, Professeur à l'Université de Paris VI
Rapporteurs :	**M. A. MANGIN**, Directeur de Recherches au C.N.R.S (Moulis)
	M. M. RAZACK, Professeur à l'Université de Poitiers
Examinateurs :	**M. J. GUIZERIX**, Ingénieur au C.E.A, Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble
	M. N. CRAMPON, Directeur de thèse, Professeur à l'Université de Lille

M. J.P. SAUTY, Docteur Ingénieur, BRGM, Orléans.

n° d'ordre : 853

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DE LILLE

pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE EN GÉOSCIENCES
(HYDROGÉOLOGIE)

L'ANALYSE DES SYSTEMES-TRAÇAGES A DEBIT VARIABLE ET VOLUME CONSTANT. POSSIBILITES D'APPLICATION EN MILIEU KARSTIQUE.

par
Marc DZIKOWSKI

Soutenue le 03 février 1992 **devant la commission d'examen :**

Président :	**M. G. de MARSILY**, Directeur de thèse, Professeur à l'Université de Paris VI
Rapporteurs :	**M. A. MANGIN**, Directeur de Recherches au C.N.R.S (Moulis)
	M. M. RAZACK, Professeur à l'Université de Poitiers
Examinateurs :	**M. J. GUIZERIX**, Ingénieur au C.E.A, Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble
	M. N. CRAMPON, Directeur de thèse, Professeur à l'Université de Lille

M. J.P. SAUTY, Docteur Ingénieur, BRGM, Orléans.

Avant - propos

Au terme de ce travail, il m'est agréable de remercier tous ceux qui, directement ou indirectement, ont participé à son élaboration.

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à Messieurs les Professeurs ***N. Crampon et G. de Marsily****, pour avoir suivi ce travail tout au long de ces trois années. Je leur dois également mon orientation vers cette discipline par leurs enseignements en maîtrise et en D.E.A. mais aussi par l'attention qu'ils ont su me porter.*

Je remercie l'ensemble des membres du Jury , pour avoir accepté d'en faire partie et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce mémoire.

Monsieur ***J.P. Sauty****, qui est également à l'origine du sujet et qui m'a aimablement fourni les données relatives aux campagnes de traçages réalisées sur l'Ouysse.*

Monsieur ***A. Mangin****, que j'ai eu le plaisir de rencontrer auparavant à Moulis et qui m'a fait profiter de son expérience des traçages dans les systèmes karstiques. Je lui suis reconnaissant d'avoir accepté de rapporter ce mémoire.*

Monsieur le Professeur ***M. Razack****, qui a accepté la lourde tâche de rapporter ce mémoire.*

Monsieur ***J. Guizerix****, qui à la lecture de ce mémoire m'a apporté son soutien par de nombreux appels téléphoniques.*

Je suis reconnaissant à M ***E. Carlier*** *à qui je pouvais confier les problèmes mathématiques auxquels je me heurtais.*

Je remercie ***M. Lepiller*** *pour sa collaboration, la lecture attentive des documents que je lui ai soumis ,et pour les données de traçages qu'il a bien voulu me faire parvenir.*

Pour l'ambiance agréable dans laquelle s'est déroulé ce travail, les discussions scientifiques ou non, leur sympathie, les moments de détente, leur aide lors "des coups de feu" , je remercie Messieurs ***K. Anouar, P. Bracq, J. P. Colbeaux, F. Delay, D. Devred, B. El Mansouri, L. Hanich, C. Lamouroux, A. Maqsoud, G. Porel.***

Enfin, à mes parents, à Corinne qui a su attendre patiemment et à Maxime qui pourra dans quelques années lire ces mots, je dédie ces quelques pages.

- SOMMAIRE -

Pages

INTRODUCTION 10

A. ANALYSE DES SYSTEMES.

I/ DEFINITIONS RELATIVES AUX SYSTEMES 12

I.1/ LE SYSTEME 12

I.2/ ETATS DES SYSTEMES 13

- Système scalaire ou univariable 13

- Système vectoriel ou multivariable 13

I.3/ PROPRIETES DES SYSTEMES 13

- La linéarité 13

- L'invariance 13

I.4/ LES REPONSES DES SYSTEMES 13

I.4.1/ Systèmes scalaires linéaires invariants 13

I.4.2/ Systèmes scalaires non linéaires 16

I.4.3/ Systèmes scalaires non stationnaires 16

I.4.4/ Systèmes vectoriels stationnaires 16

I.4.5/ Les systèmes vectoriels non stationnaires 17

I.4.6/ La déconvolution 17

II/ L'IDENTIFICATION DES SYSTEMES 18

II.1/ INTRODUCTION 18

II.2/ LES METHODES D'IDENTIFICATION DES SYSTEMES 19

II.2.1/ Les méthodes matricielles..... 19
II.2.2/ Les méthodes d'optimisation..... 20
II.2.3/ Les méthodes d'analyse des séries temporelles..... 20
II.2.4/ Les méthodes de transformation..... 21
II.2.5/ Les méthodes par projection..... 21
II.2.6/ L'analyse des fonctions de transfert dans le domaine des fréquences..... 22
II.2.6.1/ Définition de la fonction de transfert..... 22
II.2.6.2/ Analyse spectrale et filftre linéaire..... 23
II.3/ CONCLUSION..... 24

III/ L'ANALYSE DES SYSTEMES ET LES TRACAGES ARTIFICIELS..... 25
III.1/ GENERALITES..... 25
III.2/ LES TRACAGES ARTIFICIELS..... 26
III.2.1/ Principe et définitions..... 26
III.2.2/ Les apports des traçages artificiels..... 27
III.2.2.1/ Principe du "tout ou rien"..... 27
III.2.2.2/ Les informations sur le transfert..... 27
III.3/ LA DISTRIBUTION DES TEMPS DE SEJOUR..... 29
III.3.1/ Définitions..... 29
III.3.2/ Relations spatio-temporelles..... 30
III.3.2.1/ Les temps caractéristiques..... 30
III.3.2.2/ Les vitesses de transit..... 31
III.3.2.3/ Analyse des moments des temps..... 32
III.4/ LES REPONSES IMPULSIONNELLES DERIVANT DE SOLUTIONS ANALYTIQUES DE MODELE DE TRANSFERT..... 33
III.5/ PRINCIPE DE CONVOLUTION..... 34
III.5.1/ L'état des systèmes..... 34

III.5.2/ Etude des différents systèmes..... 34
III.5.2.1/ Etude des systèmes stationnaires..... 35
III.5.2.2/ Etude des systèmes non stationnaire..... 36
- système à volume constant..... 36
- Système à volume variable..... 37
III.6/ CONCLUSION..... 38

B. RELATIONS ENTRE REPONSES IMPULSIONNELLES.

I/ RELATIONS ENTRE REPONSES ISSUES DE TRACAGES : THEORIE..... 39
I.1/ LES RELATIONS "DEBIT CONSTANT-DEBIT CONSTANT"..... 39
I.1.1/ Modèle de transfert en tube..... 40
I.1.1.1/ Rappels sur le transfert dans un tube..... 40
- Réponse à une injection continue..... 41
I.1.1.2/ Relations entre réponses impulsionnelles dans un tube..... 42
- Réponse à une injection instantanée..... 42
- Détermination de la réponse impulsionnelle h(t) dans un tube..... 43
- Les relations entre réponses impulsionnelles..... 44
I.1.2/ Modèle de transfert en convection-dispersion..... 45
I.1.2.1/ Rappels sur le modèle..... 45
I.1.2.2/ Relations entre les restitutions concentrations - temps..... 46
I.1.3/ Conclusions..... 47
I.2/ RELATION "DEBIT CONSTANT - DEBIT VARIABLE"..... 48
- Relations entre réponses impulsionnelles..... 48
I.3/ RELATIONS "DEBIT VARIABLE - DEBIT VARIABLE"..... 50
I.3.1/ Système scalaire..... 50
I.3.2/ système vectoriel..... 53

I.3.2.1/ Systèmes invariants à entrées et sorties multiples..... 53

I.3.2.2/ Systèmes variants à volume constant, à entrées - sorties multiples... 54

- Principe de convolution en terme de h(z)..... 55

- Principe de convolution à partir des relations entre réponses..... 56

II/ PRESENTATION DES DEVELOPPEMENTS INFORMATIQUES..... 57

II.1/ METHODE DE CALCUL DE TRANSFORMATION DES SIGNAUX h(t) EN FONCTION DU DEBIT..... 58

II.1.1/ Les problèmes liés à la variation du débit..... 58

II.1.2/ Principe du calcul..... 60

II.1.2.1/ Principe de base..... 60

II.1.2.2/ Détermination des temps de transferts..... 61

- Débit constant-débits variables..... 61

- Débits variables-débit constant..... 62

II.2/ LES REPONSES IMPULSIONNELLE PAR "MARCHE AU HASARD" (modèle RIMH)..... 62

II.2.1/ Le principe de détermination des réponses impulsionnelles (cas du transfert unidimensionnel)..... 63

II.2.1.1/ Principe du transfert des particules..... 63

- Déplacement convectif d'une particule..... 63

- Déplacement dispersif d'une particule..... 63

- Déplacement total..... 64

II.2.1.2/ Définition de la réponse impulsionnelle..... 64

II.2.2/ Relations entre réponses impulsionnelles obtenues par le modèle R.I.M.H..... 65

II.2.2.1/ A différents débits constants..... 65

II.2.2.2/ Débit constant - débits variables..... 66
- Réponses du modèle R.I.M.H..... 66
- Transformation débit constant - débit variable..... 67
- Comparaison avec le modèle R.I.M.H..... 68
II.2.3/ Conclusion..... 68

III/ ETUDE DES TRANSFERTS EN COLONNE DE LABORATOIRE..... 69
III.1/ EN TUBE VIDE..... 69
III.1.1/ Description du dispositif..... 69
- Le système "colonnes"..... 69
- Alimentation en eau du dispositif..... 71
- La sortie du dispositif..... 71
III.1.2/ Les traçages..... 71
III.1.2.1/ Première série de traçages..... 71
III.1.2.1.1/ Système-traçage..... 71
III.1.2.1.2/ Réalisation des traçages et résultats..... 72
III.1.2.1.3/ Transformation des réponses impulsionnelles..... 75
- Transformations "débit constant-débit constant"..... 75
- Transformations "débit constant-débit variable"..... 77
III.1.2.1.4/ Conclusion..... 78
III.1.2.2/ Deuxième série de traçages..... 79
III.1.2.2.1/ Système-traçage..... 79
III.1.2.2.2/ Réalisation des traçages et résultats..... 79
III.1.2.2.3/ Transformation des réponses impulsionnelles..... 84
III.1.2.2.4/ Conclusion..... 85
III.2/ EN MILIEU GRANULAIRE..... 85
III.2.1/ Description du dispositif expérimental..... 85

III.2.2/ Transformation des réponses impulsionnelles..... 86

III.2.3/ Conclusions..... 88

IV/ LE MODELE CONVOX..... 89

IV.1/ CONCEPTION GENERALE DU PROGRAMME..... 89

IV.1.1/ Relations caractéristiques..... 89

IV.1.2/ Effet d'une dilution externe au système-traçage..... 90

IV.2/ ARCHITECTURE GENERALE DU PROGRAMME..... 91

IV.3/ QUELQUES EXEMPLES DE RESTITUTIONS SIMULEES PAR LE PROGRAMME CONVOX..... 92

IV.4/ CONCLUSION..... 95

ALGORITHMIE DU PROGRAMME CONVOX..... 96

C. APPLICATION AUX SYSTEMES KARSTIQUES.

I/ GENERALITES..... 115

II/ LES SYSTEMES KARSTIQUES DE L'OUYSSE (CAUSSE DE GRAMAT)..... 118

II.1/ SITUATION GEOGRAPHIQUE..... 118

II.2/ CADRE GEOLOGIQUE..... 118

II.3/ CADRE HYDROGEOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE..... 122

III/ LES CAMPAGNES DE TRACAGES..... 124

III.1/ PRESENTATION..... 124

III.2/ HYDROLOGIE..... 125

III.3/ APPLICATIONS AU SYSTEME THEMINES-THEMINETTES-BESACES..... 127

III.3.1/ Réalisation des traçages et résultats..... 128

III.3.1.1/ Injections et échantillonage..... 128
III.3.1.2/ Résultats..... 128
III.3.2/ Les applications..... 130
III.3.2.1/ Comparaison des réponses impulsionnelles..... 131
III.3.2.1.1/ Détermination des réponses impulsionnelles..... 131
III.3.2.1.2/ Méthode de transformation..... 132
III.3.2.1.3/ Conclusions..... 134
III.3.2.2/ Convolution d'entrées massiques..... 134
III.3.2.2.1/ Mesures physicochimiques..... 134
III.3.2.2.2/ Comparaison des restitutions en fonction des traçages de référence..... 136
III.3.2.2.3/ Simulations sur le système Thémines-Théminettes-Besaces. 138
III.4/ APPLICATIONS AU SYSTEME THEMINES-VITARELLES-BESACES-PONT..... 141
III.4.1/ Injections et échantillonnage..... 141
III.4.2/ Résultats..... 142
III.4.3/ Les applications..... 144
III.4.4/ Conclusions..... 145
III.5/ DISCUSSION..... 146

CONCLUSION..... 147

Bibliographie..... 149
Liste des figures..... 155
Liste des tableaux..... 160
Liste des symboles..... 161
ANNEXES..... 164

- INTRODUCTION -

En 1987, et 1988, afin de vérifier l'existence d'un pouvoir épurateur du karst vis-à-vis des eaux qui le traversent, une étude a été menée sur le réseau karstique de l'Ouysse par le BRGM (SRG Midi-Pyrenées et Département Eau- Environnement-Energie d'Orléans), le CENG de Grenoble (Section d'Application des Traceurs), le SRAE Midi-Pyrenées, la DDAF du Lot et le groupe spéléologique de Gramat. Elle a fait notamment l'objet de campagnes d'expérimentations de traçages sur le terrain.

Le souhait de réaliser des traçages à débit constant a déterminé le choix des périodes d'expérimentation, la deuxième motivation était d'effectuer ces traçages pour des régimes hydrodynamiques bien différenciés. Deux campagnes de mesures se sont donc déroulées, la première en période d'étiage (Mai 1987) et la deuxième, en période de hautes-eaux (Février 1988). Le choix du système karstique de l'Ouysse est dû à la "bonne" connaissance des écoulements de cette région.

Or il s'est avéré que les débits dans les systèmes tracés ont varié au cours de ces expériences, ce qui a eu pour conséquence de limiter les interprétations des restitutions en traceur. L'idée était en particulier, de simuler des pollutions accidentelles à partir des résultats des traçages effectués. Là encore les variations de débits n'ont autorisé que des simulations pour des conditions hydrodynamiques similaires à celle des périodes pendant lesquelles furent menées les campagnes.

Il apparaissait donc utile, pour palier cet inconvénient, de tenter de mettre au point, une méthodologie permettant, dans des conditions hydrodynamiques variables, d'interpréter les restitutions en traceur et de pouvoir extrapoler ces résultats pour de plus larges périodes de temps.

Dans ce mémoire, nous nous sommes donc intéressés au problème de la caractérisation du transport conservatif d'un traceur dans les systèmes où les conditions hydrodynamiques sont susceptibles de varier. L'approche utilisée est une approche dite "système", dans le sens où l'on ne tente pas de déterminer des paramètres intrinsèques au terrain ou à l'espace occupé par le traceur. Le système, entre l'entrée et la sortie du traceur, est considéré comme une "boîte noire". Cette approche offre l'avantage de pouvoir utiliser des restitutions non interprétables par des solutions analytiques courantes du transfert de masse. Elle s'applique plus particulièrement aux milieux très hétérogènes où toutes extrapolations dans l'espace restent hasardeuses.

Ce mémoire est composé de trois chapitres:

Chapitre A: L'identification des systèmes consiste généralement à définir la réponse de ces derniers à une impulsion, à partir de fonctions d'entrées et de sorties. La réponse impulsionnelle déterminée à partir d'un traçage présente certaines particularités que nous développons dans cette première partie, en mettant l'accent sur les problèmes liés aux variations de débit.

Chapitre B: Dans ce chapitre, et uniquement dans le cadre des traçages artificiels, les problèmes des restitutions de traceur influencées par les conditions hydrodynamiques au cours d'expérimentation sont abordés sous la forme de relations entre les réponses impulsionnelles et le débit d'écoulement. A partir de modèles théoriques simples, nous avons développé une méthode de calcul de la "réponse" d'un système à une variation de débit. Cette méthode est ensuite appliquée, pour comparaison, à des résultats obtenus en colonne de laboratoire. La dernière partie de ce chapitre concerne le développement d'un programme informatique permettant, à partir d'un traçage de référence, de déterminer la réponse d'un système à une entrée quelconque, en conditions hydrodynamiques variables.

Chapitre C: Nous proposons quelques applications de la méthode sur le système karstique de l'Ouysse dans le Causse de Gramat, en montrant les limites lorsque l'on s'intéresse à un milieu où l'échelle des hétérogénéités peut modifier, en fonction des conditions de débit en cours de traçage, les écoulements et donc l'espace occupé par le traceur au cours de son transfert.

A. ANALYSE DES SYSTEMES.

I/ DEFINITIONS RELATIVES AUX SYSTEMES.

Avant d'aborder l'analyse des systèmes dans le cadre des traçages artificiels, il convient de définir les concepts généraux et propriétés relatives à cette approche qui n'est pas exclusive de ce type d'application. Pour ne citer qu'un exemple en hydrologie de surface, elle est couramment utilisée dans l'étude des relations pluie-débit aux exutoires des bassins versants. De plus, l'approche système des milieux naturels présente certaines particularités inhérentes aux phénomènes étudiés, la théorie des systèmes dans un premier temps est donc présentée dans son cadre le plus général.

I.1/ LE SYSTEME

Un système (Fig.A1) a pour effet de transformer en fonction du temps une ou plusieurs grandeurs physiques d'entrée notée $e_i(t)$ en une ou plusieurs grandeurs physiques de sorties $s_j(t)$.Ce sont donc les entrées et les sorties qui caractérisent un système, celui-ci étant considéré comme une "boite noire" n'ayant qu'un effet de transformation. (Poitrinal et de Marsily 1973).



Fig.A1 : Système "boite noire"

t : temps chronologique.

Walliser (1977) définit un système physique comme une entité relativement individualisable qui se détache de son contexte ou de son milieu, tout en procédant à des échanges avec son environnement. Il est constitué de sous-systèmes en interactions qui lui assurent une certaine cohérence. Les transformations par un système des grandeurs d'entrées en grandeurs de sorties caractérisent donc les échanges de ce dernier avec son environnement.

I.2/ ETATS DES SYSTEMES

-Système scalaire ou univariable : Un tel système est caractérisé par une seule grandeur d'entrée e(t) et une seule grandeur de sortie s(t).

-Système vectoriel ou multivariable: Dans ce cas, le système est caractérisé par plusieurs grandeurs d'entrée $e_i(t)$, i variant de 1 à n et plusieurs grandeurs de sorties $s_j(t)$, j variant de 1 à m.

I.3/ PROPRIETES DES SYSTEMES.

- La linéarité : un système scalaire est linéaire lorsqu'il y a proportionnalité entre les entrées et les sorties. Si à n entrées différentes $e_1(t)$, $e_2(t)$,..., $e_n(t)$ correspondent n sorties $s_1(t)$, $s_2(t)$,..., $s_n(t)$ distinctes, toute combinaison linéaire des entrées de la forme:

$\sum_i \lambda_i e_i$ produira une sortie de la forme: $\sum_i \lambda_i s_i$, λ_i constantes quelconques.

-L'invariance : Un système est invariant ou stationnaire lorsque ses propriétés ne varient pas dans le temps. En d'autres termes : si s(t) est la réponse d'un système invariant à une histoire d'entrée e(t) alors $s(t-\tau)$ serait la réponse à la même histoire d'entrée si elle s'était produite avec un décalage de τ.

I.4/ LES REPONSES DES SYSTEMES.

I.4.1/ Les systèmes scalaires linéaires invariants.

Lorsque l'entrée du système correspond à un signal de Dirac* $\delta(t)$, la réponse ou transformation de ce signal par le système est appelée réponse impulsionnelle notée h(t).Cette réponse particulière permet dans les conditions de linéarité et de stationnarité des systèmes de déterminer la réponse s(t) de ce dernier à une fonction d'entrée quelconque e(t) sous la forme d'une intégrale dite intégrale de DUHAMEL ou de convolution en temps :

$$s(t) = \int_0^{\infty} h(\tau)\, e(t-\tau)\, d\tau$$

t : temps chronologique

τ: variable d'intégration

*$\delta(t)$: Impulsion de Dirac : $\delta(t) = \frac{1}{dt}$ quand dt tend vers 0 avec:

$$\int_{t-\tau}^{t+\tau} \delta(t')\, dt' = 1 \quad \text{quelque soit } \tau$$

Cette intégrale de convolution est généralement symbolisée sous la forme: s(t) = e(t)*h(t), elle signifie qu'une grandeur de sortie d'un système à un instant donné est "influencée" par l'ensemble des grandeurs d'entrées précédant cet instant (Fig.A2). Cette "influence" est une fonction de pondération des grandeurs d'entrées précédant dans le temps la grandeur de sortie considérée.

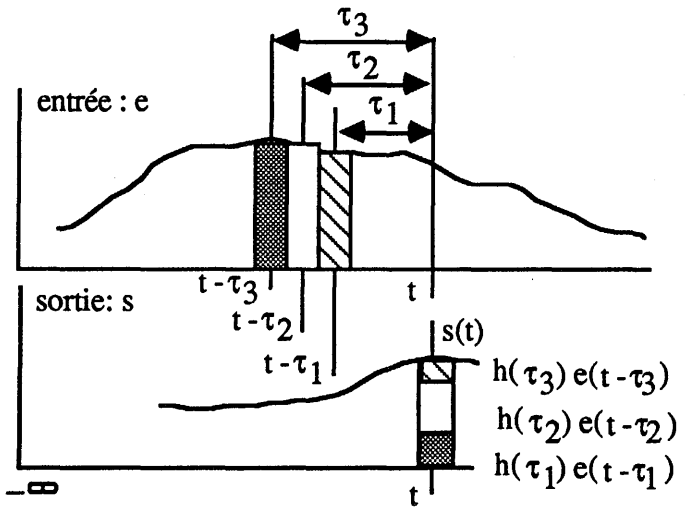


Fig.A2: Sortie s(t) à l'intant t représentée par la somme pondérée des entrées aux temps $t-\tau_1$,$t-\tau_2$ et $t-\tau_3$

La borne supérieure de l'intégrale de DUHAMEL peut être limitée par la mémoire du système T. La mémoire T qui constitue un intervalle de temps signifie que les entrées chronologiquement antérieures au temps t-T n'ont plus d'influence sur la sortie à l'instant t.(Fig.A3).

L'intégrale de convolution est donc de la forme :

$$s(t) = \int_0^T h(\tau)\, e(t-\tau)\, d\tau$$

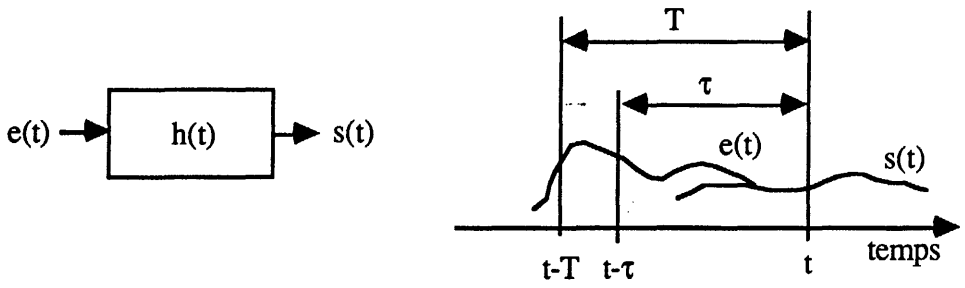


Fig.A3 : Schéma des temps associés au principe de convolution.

Lorsque le signal d'entrée est un Dirac $\delta(t)$, la fonction de sortie du système constitue la réponse impulsionnelle (Fig.4) :

$$s(t) = \int_0^{\infty} h(\tau)\, \delta(t-\tau)\, d\tau = h(t)$$

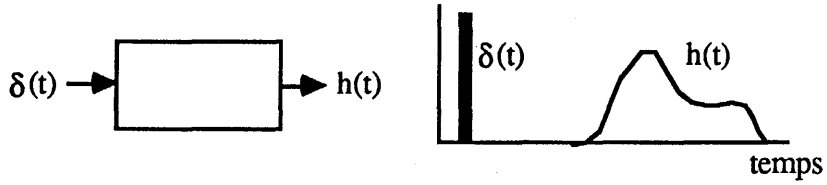


Fig.A4 : réponse à un signal de Dirac

Remarques:

-La fonction d'entrée e(t) et la réponse impulsionnelle h(t) ont un rôle symétrique, la fonction de sortie s(t) peut aussi être définie par :

$$s(t) = \int_{-\infty}^{t} h(t-u)\, e(u)\, du \qquad \text{avec } u=t-\tau$$

La mémoire T du système limite ici la borne inférieure de l'intégrale qui devient :

$$s(t) = \int_{t-T}^{t} h(t-u)\, e(u)\, du$$

-Si $h_1(t)$ et $h_2(t)$ sont respectivement les réponses impulsionnelles de deux systèmes en séries alors $h(t) = h_1(t)*h_2(t)$ est la réponse impulsionnelle du système formé par les deux systèmes ainsi définis.

I.4.2/ Les systèmes scalaires non linéaires.

Les systèmes non-linéaires sont des systèmes dont l'état est modifié par les grandeurs d'entrées. L'intégrale de convolution est développée suivant des expressions polynômiales d'ordre supérieur portant sur l'entrée.(Voltera 1930), (Jun Xia 1991).

$$s(t) = \int_0^\infty h_1(\tau)\, e(t-\tau)\, d\tau + \int_0^\infty \int_0^\infty h_2(t,\sigma)\, e(t-\tau)\, e(t-\sigma)\, d\tau d\sigma + \ldots$$

I.4.3/ Les systèmes scalaires non stationnaires.

Un système est non stationnaire lorsque la réponse de ce dernier à une entrée e(t) varie en fonction du temps suivant l'état du système. Dans ces conditions,l'intégrale de convolution va comprendre une réponse impulsionnelle dépendante d'une variable temporelle à grande échelle θ. Cette intégrale est donc de la forme (Chui et Bitler 1969) :

$$s(t) = \int_0^\infty h(\theta,t,\tau)\, e(t-\tau)\, d\tau$$

Généralement la réponses impulsionnelles des systèmes variants sont considérés dépendantes du temps et de la variable d'intégration τ, l'intégrale de convolution est simplifiée de la façon suivantes (Niemi 1977) :

$$s(t) = \int_0^\infty h(t,\tau)\, e(t-\tau)\, d\tau$$

I.4.4/ Les systèmes vectoriels invariants.

Ces systèmes sont caractérisés par plusieurs grandeurs d'entrées et de sorties (Fig.A5). La relation de convolution s'établit par l'intermédiaire d'une matrice des réponses impulsionnelles [g(t)]. Lorsqu'un système est défini par n entrées $e_1(t)$, $e_2(t)$,...,$e_i(t)$,...,$e_n(t)$ et par m sorties $s_1(t)$,$s_2(t)$,...,$s_j(t)$,...,$s_m(t)$ constituant respectivement les vecteurs d'entrées $\overline{e_n}(t)$ et de sorties $\overline{s_m(t)}$, l'opération de convolution s'établit comme suit :

$$\overline{s_m}(t) = \overline{e_n}(t) * [h(t)]_{n,m}$$

où [h(t)]n,m est la matrice des réponses impulsionnelles de dimension n,m.

Pour une sortie $s_j(t)$: $$s_j(t) = \sum_{i=1}^{m} \int_0^{\infty} h_{i,j}(\tau)\, e_i(t-\tau)\, d\tau$$

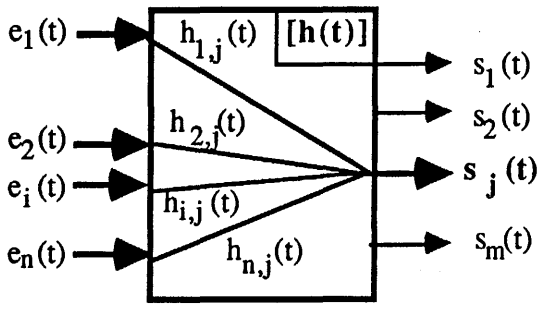


Fig.A5 : représentation d'un système vectoriel

I.4.5/ Les systèmes vectoriels non stationnaires.

Pour ces systèmes l'intégrale de convolution s'exprime sous la forme :

$$s_j(t) = \sum_{i=1}^{m} \int_0^{\infty} h_{i,j}(\theta,t,\tau)\, e_i(t-\tau)\, d\tau$$

I.4.6/ La déconvolution.

La déconvolution consiste à rechercher à partir de l'intégrale de DUHAMEL, la réponse impulsionnelle d'un système h(t) lorsque les grandeurs d'entrées e(t) et de sorties s(t) sont observées simultanement sur un même intervalle de temps . La déconvolution est donc l'opération d'indentification du système. Cette opération est nécessaire lorsque que l'on ne dispose pas d'une sortie mesurée quand l'entrée est une impulsion.

II/ L'IDENTIFICATION DES SYSTEMES.

II.1/ INTRODUCTION

La méthode de l'hydrogramme unitaire (Sherman 1932) est à l'origine du développement des méthodes d'identification des systèmes naturels. L'hydrogramme unitaire correspond au phénomène de transformation Pluie (impulsion) - Débit de ruissellement. Cette transformation est considérée comme un processus linéaire et invariant. Les méthodes d'identification dans le cas des relations Pluie (sur un bassin versant) - Débit (à l'exutoire) se sont imposées par la difficulté de l'obtention "directe" de l'hydrogramme unitaire dans l'attente d'une pluie de courte durée. A partir des années 60 de nombreux hydrologues et mathématiciens ont donc recherché des méthodes permettant d'identifier les systèmes à partir de variables temporelles.
Ainsi décrite, l'analyse des systèmes est donc depuis longtemps utilisée pour les relations Pluie-Débit appliquées aux bassins versants hydrologiques mais aussi et plus récemment aux aquifères karstiques (Knisel 1972, Dreiss 1982,1983). L'analyse des systèmes linéaires a fait également l'objet de développements pour l'étude du transport de soluté à grande échelle (échelle régionale) dans les sols hétérogènes (Jury et al. 1987), dans les aquifères fracturés (Duffy & Harrison 1987) et dans les aquifères karstiques (Duffy & Gelhar 1985,1986) (Dreiss 1989).
Tenant compte des études "hydrologiques" d'identification des systèmes, l'intérêt dans cette présentation est porté sur les développements théoriques ou appliqués dans le cadre des transferts de soluté, c'est pourquoi les aspects de l'étude des systèmes non linéaires ou non stationnaires dans le cadre des relations Pluie-Débit ne seront pas abordés.

Remarque : L'identification d'un système est la recherche de sa réponse à une entrée impulsion, on trouve parfois associé au terme de réponse impulsionnelle, les termes d'opérateur de convolution où de fonction de transfert.

Les synthèses effectuées sur les méthodes d'identification (Dooge 1973, Singh et al. 1981, Morel-Seytoux 1981, Rodriguez-Hernandez 1989) définissent quatre grands types de familles.

- Les méthodes matricielles
-Les méthodes d'optimisation.
-Les méthodes d'analyse des séries temporelles.
-Les méthodes de transformation

A ces quatre grandes familles de méthodes citées, peuvent être ajoutées les méthodes par projection.Dans cette partie sera développée également l'analyse des fonctions de transfert dans le domaine des fréquences, plus particulièrement adaptée au transfert de soluté et que nous dissocieront des méthodes généralement présentées dans le cadre de l'analyse des séries temporelles.

Ces méthodes nécessitent une représentation discrète de l'intégrale de Duhamel du type :

$$Si = \Delta t \sum_{j=1}^{N} Hj\text{-}1\ Ei\text{-}j+1 \qquad i=1,2,...,M \qquad (1)$$

avec : Si : valeur de sortie au temps i Δt.
Ej : valeur d'entrée au temps j Δt.
Hj : valeur de la réponse impulsionnelle au temps j Δt.
M : nombre d'observations de la sortie.
N Δt = T : mémoire du système.

II.2/ LES METHODES D'IDENTIFICATION DES SYSTEMES

II.2.1/ Les méthodes matricielles.

La représentation discrète de l'intégrale (1) peut s'établir sous forme matricielle :

$$\overline{S_N} = [H]_{N,N}^{*} \ (\Delta t * \overline{E_N})$$

avec : N dimension de la matrice [H] = M
M : nombre d'observation de la sortie.

L'identification de la fonction de transfert consiste à résoudre directement ce système d'équation. Ce système est généralement résolu par des méthodes numériques (Gauss, relaxation...). Cette méthode reste toutefois peu employée pour la recherche de l'identificateur d'un système car elle est généralement instable.

II.2.2/ Les méthodes d'optimisation

La méthode la plus couramment utilisée est celle des moindres carrés. Elle consiste à introduire un terme d'erreur au schéma discret de l'intégrale de convolution qui représente les résidus liés au erreurs de mesures sur les variables. Ce terme d'erreur (er) est pris en compte de la façon suivante :

$$Si = \Delta t \sum_{j=1}^{N} Ei\text{-}j+1\ Hj\text{-}1 + er_i \qquad i=1,2,...,M$$

Hi-j est déterminé en minimisant la somme des carrés des erreurs er :

$$\text{Min er} = \sum_{i=0}^{M} (er_i)^2 = \sum_{i=0}^{M} (Si - \Delta t \sum_{j=1}^{N} Ei\text{-}j+1\ Hj\text{-}1)^2$$

Cette méthode est une donc une régression linéaire multiple et suppose que les variables Ej sont indépendantes.
Remarque : Cette méthode n'implique pas forcement une relation de causalité entre les variables " d'entrée" et "de sortie" telles qu'elles ont été définies.

Dreiss (1989) utilise cette méthode pour étudier la fonction de transfert des cations Ca^{2+} à l'échelle d'un karst dans le sud-est du Missouri.. Les entrées sont liées aux pluies efficaces, les sorties étant les concentrations aux sources liées aux événements pluvieux. Elle montre que le transfert rapide entre une entrée diffuse liée aux précipitations et la source karstique de Maramec peut être défini comme un processus stationnaire dans le temps.

II.2.3/ Les méthodes d'analyse des séries temporelles.

Il existe un ensemble de modèles "d'identification" basés sur les méthodes d'analyse des séries temporelles, ce sont essentiellement les modèles autorégressifs de type ARMA (Auto-Regressive Moving Average) et ARIMA (Auto-Regressive Integrated Moving Average) (Box & Jenkins 1976). Ces méthodes étant moins utiles dans les applications aux systèmes hydrologiques souterrains et en particulier au transport de soluté, elles ne seront pas développées dans le cadre de ce mémoire. Signalons cependant que ces modèles peuvent être employés pour la prédiction des concentrations en sédiment en suspension dans les rivières. (Lemke 1991)

II.2.4/ Les méthodes de transformation.

La plus connue des méthodes est la transformation de Fourier. Dans l'espace des transformées de Fourier, le produit de convolution se transforme en un produit simple.
La recherche de la réponse impulsionnelle d'un système linéaire s'établit de la façon suivante :

Si E(ω), S(ω) et H(ω) sont respectivement les transformées de Fourier de e(t) , s(t) et h(t) (h(t) étant la réponse impulsionnelle).

$$S(\omega) = H(\omega) * E(\omega)$$

H(ω) : fonction de transfert.

Pour s(t), S(ω) est de la forme :

$$S(\omega) = F\ (s(t)) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)\ \exp(-i\omega t)\ dt$$

F : transformée de Fourier.

La réponse impulsionnelle est définie par la transformée inverse de la fonction de transfert H(ω).

$$h(t) = F^{-1}\left(\frac{S(\omega)}{E(\omega)}\right) = F^{-1}\ (H(\omega))$$

F^{-1} : transformée de Fourier inverse.

$$h(t) = F^{-1}\ (H(\omega)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(i\omega t)\ H(\omega)\ d\omega$$

Une telle opération ne peut être utilisée que si les entrées e(t) et les sorties s(t) vérifient une relation de convolution exacte. Un "bruit" est ajouté à h(t) si ce n'est pas le cas.

II.2.5/ Les méthodes par projection.

Ces méthodes peuvent être généralisées de la façon suivante:
Pour un schéma discret du type :

$$S(j) = \sum_{1}^{N} H(i)\ E(j-i)$$

La réponse impulsionnelle est définie par une somme pondérée de fonctions paramétrées de la façon suivante :

$$H = \sum_k a_k \; f_k(p_1,..,p_i,...,p_n)$$

où a_k sont des paramètres à identifier, fk sont les fonctions paramétrées connues, les paramètres p_i de ces fonctions sont eux aussi à identifier.

De Marsily (1978) propose de développer linéairement la réponse impulsionnelle recherchée suivant des fonction de base (fonctions de Walsh) B1,...Bk avec des coefficients a_k :

$$H(i) = \sum_k a_k \; B_k(i)$$

La réponse impulsionnelle est obtenue par identification des coefficients a_k. Ces coefficients sont déterminés par une méthode des moindres carrés en minimisant A :

$$\text{Min A} = \sum_{j=N+1}^{M} \left[S(j) - \sum_{1}^{N} \sum_{k} ak \; Bk(i) \; E(i-j) \right]^2$$

La mémoire N est ici supposée égale à une puissance de 2 car les fonctions de Walsh sont des fonctions définies sur des intervalles $(0,2^p)$ prenant sur des intervalles de longueur 2^{p-1} la valeur +1 ou -1.
Bien que la réponse impulsionnelle soit obtenue par projection, aucune forme particulière n'est ici imposée à cette dernière.

II.2.6/ L'analyse des fonctions de transfert dans le domaine des fréquences.

L'analyse des fonctions de transfert dans le domaine des fréquences fait référence à l'analyse spectrale des séries temporelles (Jenkins and Watts, 1968), (Koopmans, 1974).

II.2.6.1/ Définition de la fonction de transfert.

A partir de la transformée de Fourier d'une réponse impulsionnelle quelconque h(t), la fonction de transfert H(ω) correspondante est de la forme :

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \exp(-i\omega t)\, dt$$

$\omega = 2\pi f$ (f: fréquence exprimée en T^{-1})

$H(\omega)$ étant une fonction complexe, elle peut s'exprimer en fonction de son module ou amplitude $|H(\omega)|$ et de sa phase $\theta(\omega)$:

$$H(\omega) = |H(\omega)| \exp(i\,\theta(\omega))$$

Une analyse spectrale de $H(\omega)$ consiste à étudier séparément la variation en fonction de ω de son module et de sa phase.

Diaconu et al. (1984) présentent sous cette forme le résultat de traçages artificiels réalisés en karst afin de caractériser les circulations d'eau.

II.2.6.2/ Analyse spectrale et filtre linéaire.

On considère qu'un système linéaire transforme par une opération de convolution une série d' entrées e(t) stationnaires dans le temps en une série de sorties stationnaires dans le temps s(t), c'est-à-dire que la moyenne μ et la variance σ^2 de chaque série sont indépendantes du temps.Cette transformation est caractérisée par une équation différentielle linéaire.

Le spectre ou densité spectrale $\phi_{ee}(\omega)$ de e(t) est exprimé par :

$$\phi_{ee}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{ee}(\tau) d\tau$$

où $R_{ee}(\tau) = E[(e(t)-\mu)(e(t+\tau)-\mu)]$ est la fonction d'autocovariance du signal e(t).

E : espérance mathématique.
μ : moyenne des entrées e(t).
τ : écart de temps.

L'amplitude de la fonction de transfert $H(\omega)$ est déterminer par :

$$\frac{\phi_{ss}(\omega)}{\phi_{ee}(\omega)} = \left|H(\omega)\right|^2$$

$\phi_{ss}(\omega)$: spectre de s(t).

Si $\phi_{se}(\omega)$ est le spectre croisé de e(t),s(t) :

$$\phi_{se}(\omega) = \phi_{ee}(\omega)\, H(\omega) = Re(H(\omega)) - i\, Im(H(\omega))$$

La phase spectrale $\theta_{se}(\omega)$ est déterminée par :

$$\theta_{se}(\omega) = - tg \left[\frac{Im\, H(\omega)}{Re\, H(\omega)} \right]$$

Im : partie imaginaire
Re : partie réelle

Les différents spectres ainsi établis permettent d'analyser la fonction de transfert dans le domaine des fréquences.

Duffy & Gelhar (1985) présentent l'analyse dans le domaine des fréquences de modèles de transfert de masse à partir des réponses impulsionnelles, solutions analytiques de ces derniers.(cf § III.4). Ils étudient ainsi les modèles réservoirs, convectifs et convectifs-dispersifs permettant de caractériser les fonctions de transferts à partir de séries chronologiques d'entrées et sorties d'un système.

En 1987, ces mêmes auteurs appliquent cette analyse sur des données de terrains. Ils étudient en particulier le transfert du tritium dans une région karstique située dans les Alpes, à partir d'une entrée diffuse liée aux précipitations et des sorties données par les sources du karst , ils caractérisent le transfert par un modèle en convection-dispersion.

II.3/ CONCLUSION

Les développements récents basés sur l'analyse des systèmes ont permis d'étudier le transfert de soluté à l'échelle régionale. Dans ce cadre, différents systèmes naturels ont été modélisés (bassins versants, rivières, karsts). Ce qui caractérise ces méthodes est l'utilisation d'une entrée diffuse dans l'espace en ce qui concernent en particulier les bassins versants et les zones karstiques, le système étant considéré dans sa globalité, les points de sorties étant des exutoires

ou des sources. Les méthodes, nécessitant des enregistrements de fonctions d'entrées et de sorties sur de longues durées, s'appliquent plus particulièrement aux traceurs naturels (Tritium, cations etc).
Ces aspects divergent de l'analyse des systèmes dans le cadre des traçages artificiels où l'entrée est une entrée ponctuelle dans l'espace, où la réponse impulsionnelle est directement établie et où le problème à résoudre est un problème de convolution ne disposant que de l'identificateur du système correspondant à un état particulier de ce dernier. De plus le traceur utilisé n'est pas présent dans le système avant l'injection, ce qui n'est pas le cas des traceurs naturels.
Si les conditions hydrodynamiques peuvent modifier l'interprétation des mécanismes de transfert dans les systèmes (Margrita et al. 1984), l'échelle de temps associée au transfert des traceurs artificiels nous oblige à tenir compte de la non stationnarité liés à la variation du débit des systèmes étudiés. Cet aspect sera développé dans la suite de ce mémoire.

III/ L'ANALYSE DES SYSTEMES ET LES TRACAGES ARTIFICIELS

III.1/ GENERALITES.

L'analyse des systèmes appliquée au transfert de masse s'est développée dans différentes disciplines scientifiques, l'une des premières à intégrer cette méthode dans l'étude du transfert de masse est le génie chimique (Villermaux et Swaaij 1969). De manière générale, la méthode est couplée à des modèles classiques de transfert tel que les modèles de cellules en cascade ou les modèles piston-dispersion (Nir, 1984). L'approche consiste à identifier un système général à partir de la réponse impulsionnelle définie pour un "système élémentaire" de ce dernier. La réponse impulsionnelle "du système élémentaire" étant définie par un modèle analytique, peut intégrer divers phénomènes liés au transfert tels que les échanges de soluté survenant entre le fluide en écoulement et les zones d'eau stagnante.

En hydrologie et en hydrogéologie la méthode est couramment utilisée pour l'étude des transferts de traceur en rivière (Guizerix et Margrita 1976), en aquifère karstique (Mangin et al. 1976) ou en aquifère alluvionnaire (Gaillard 1976). La réalisation d'un traçage artificiel permettant d'obtenir à la sortie d'un système une réponse impulsionnelle lorsque qu'une injection instantanée de traceur est réalisée à l'entrée de ce dernier, la réponse à une entrée quelconque peut donc par définition être directement calculée en sortie par convolution. Son utilisation est employée pour la prédiction par des opérations de convolution ou pour fournir des informations sur le système étudié.
Une des caractéristiques apparaissant dans la littérature sur ce sujet est le développement méthodologique de l'analyse des systèmes appliqués aux systèmes linéaires invariants. Les

systèmes étudiés, identifiés par une réponse impulsionnelle issue de la réalisation d'un traçage sont généralement des systèmes dépendant du temps, liés en particulier à la variation des conditions hydrodynamiques au cours du temps.
L'approche système des transferts de masse appliquée au traçages artificiels est donc liée à un certain nombre de particularités qu'il convient de rappeler. Nous intégrons aussi dans ce sous-chapitre les approches de l'analyse des systèmes (non stationnaires) influencés par les conditions hydrodynamiques, bien que ces approches ne soient pas restreintes au transfert des traceurs artificiels.

III.2/ LES TRACAGES ARTIFICIELS.

III.2.1/ Principe et définitions

Un traçage artificiel consiste à introduire une masse de traceur dans un milieu fluide quelconque, le point où a lieu l'injection détermine l'entrée. Le ou les lieux "d' apparition " du traceur sont appelés sorties.L'écoulement du traceur est superposé à l'écoulement du fluide. Un traçage artificiel consiste donc à établir des relations entrées-sorties dans un milieu contenant un fluide que l'on appelle système.Cette définition générale du traçage artificiel en hydrogéologie montre que les relations établies sont du type entrée unique imposée par le lieu d'injection et sortie unique ou multiple. Ces traçages artificiels mettent donc en évidence des relations entrées-sorties d'un système plus complexe vis-à-vis de ces relations.(Fig.A6)

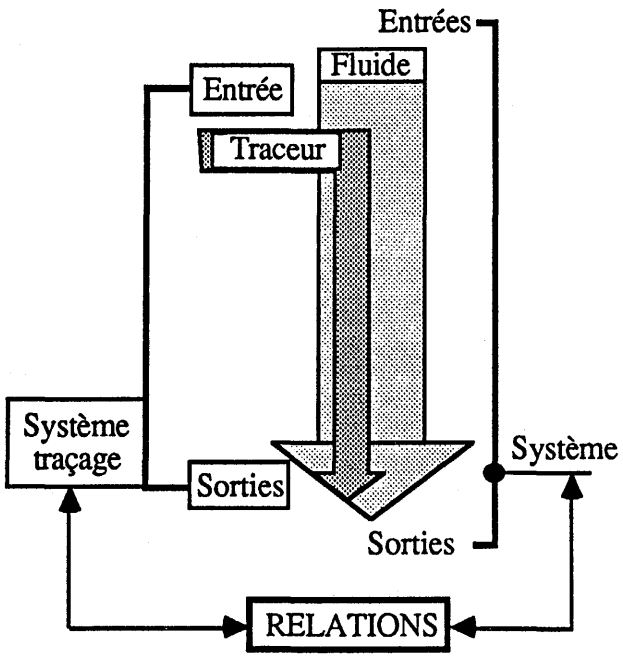


Fig.A6 : représentation d'un traçage artificiel dans un système.

III.2.2/ Les apports des traçages artificiels.

Indépendamment de la nature du système investi et des conceptions sur les transferts de masse dans les différents milieux, un certain nombre d'informations spatio-temporelles peuvent être déduites de la réalisation d'un traçage artificiel dans un milieu quelconque.

III.2.2.1/ Le principe "tout ou rien".

La première information apportée par les traçages artificiels est une relation du type 'tout ou rien' (Guizerix et Margrita 1976, Lepiller et Mondain 1986). La méthode qui ne nécessite pas de conditions d'injection particulières met en évidence des relations spatiales entrées-sorties dans la limite des points de surveillance des sorties présumées et des moyens de détection du traceur utilisé. C'est une méthode qualitative d'appréciation des entrées-sorties d'un système-traçage (Mangin 1975).

Il est important de signaler que les 'systèmes-traçages' peuvent varier au cours du temps ou d'une période d'expérimentation à une autre. Ils ne mettent donc pas nécessairement en évidence l'ensemble des relations entrées-sorties du système physique. En effet si le système physique représente l'espace suceptible d'être occupé par le fluide, le système traçage ne représente que l'espace occupé par la masse de traceur au cours de son transfert.

III.2.2.2/ Les informations sur le transfert.

Les informations fournies par les traçages artificiels ne se limitent pas à des relations spatiales entrées-sorties. Lorsqu' une masse de traceur M est injectée instantanément dans un système, la restitution à la sortie de cette masse en partie ou en totalité s'établit sous forme de variation des concentrations en fonction du temps C(t) (Fig.A7).

La courbe de restitution du traceur en fonction du temps permet de définir les temps et valeurs de concentrations caractéristiques liés au transfert du traceur dans le système étudié.(Fig.A8)

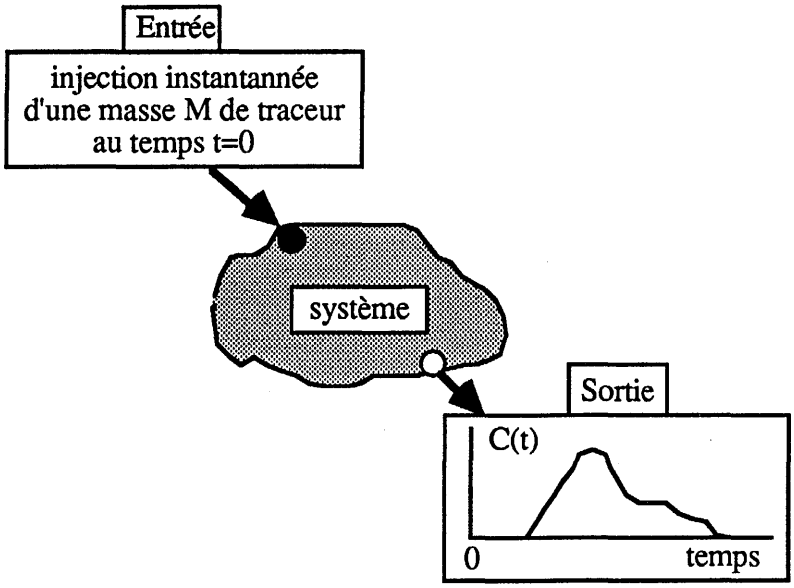


Fig.A7 : traçage et restitution.

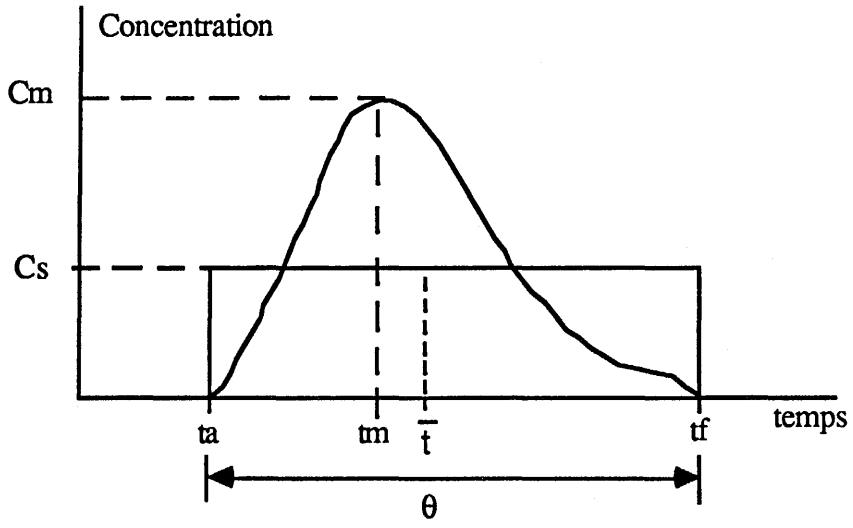


Fig.A8 : Représentation des temps et concentrations caractéristiques pour une restitution unimodale

Sont déterminés :

- Le temps de première arrivée **ta** correspondant à la première concentration mesurée supérieure au bruit de fond.
- La modalité de la restitution qui est le nombre de pics de concentration.

- Le ou les temps modaux **tm** correspondants aux pics de concentrations maximales **Cm**.
- Le temps de dernière arrivée **tf** correspondant à la dernière concentration mesurée supérieure au bruit de fond.
- la durée de la restitution θ : $\theta = tf - ta$
- La concentration moyenne **Cs** : $Cs = \frac{1}{tf-ta} \int_{ta}^{tf} C(t)\,dt - Cbf$

Cbf : Concentration du "bruit de fond"

La connaissance du débit Q(t) au point de sortie permet de calculer :

- La quantité de traceur restitué **Mr** défini par : $Mr = \int_{ta}^{tf} Q(t)\,[C(t) - Cbf]\,dt$

- Le taux de restitution du traceur **r %** : $r\,\% = \frac{Mr}{M} * 100$

- Les volumes écoulés **V** à la sortie entre deux temps t_1 et t_2 : $V = \int_{t_1}^{t_2} Q(t)\,dt$

III.3/ LA DISTRIBUTION DES TEMPS DE SEJOUR.

III.3.1/ Définitions.

La distribution des temps de séjour **DTS** ayant la dimension inverse d'un temps (Guizerix et al, 1976) représente la fonction de densité de probabilité qu'ont les molécules d'eau de séjourner dans le système étudié dans un laps de temps dt. Si l'on considère que les molécules de traceur ont un comportement comparable aux molécules du fluide tracé, la distribution des temps de séjour s'exprime par :

$$h(t) = \frac{\phi(t)}{\int_{-\infty}^{+\infty} \phi(t)\,dt} = \frac{Q(t)\,C(t)}{\int_{-\infty}^{+\infty} Q(t)\,C(t)\,dt} = \frac{Q(t)\,C(t)}{Mr} \qquad (1)$$

$\phi(t)$: variation du flux de traceur en fonction du temps à la sortie.

Remarque: La réponse impulsionnelle correspondant à la distribution des temps de séjour dans le cas d'un traçage où le traceur est injecté en signal de Dirac, le terme de réponse impulsionnelle sera utilisé par la suite.

Le produit h(t) dt, où dt est un temps court, représente le pourcentage de la masse restituée de traceur qui quitte le système pendant dt au temps t.

Le pourcentage de la masse restituée r_t % à l'instant t pour un transfert conservatif (M=Mr) s'exprime alors par :

$$r_t\,\% = 100 * \int_{-\infty}^{t} h(t)\,dt \qquad \text{avec } h(t) = \frac{\phi(t)}{M}$$

La distribution des temps de séjour ou réponse impulsionnelle est caractérisée par :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} h(t)\,dt = 1$$

Remarque : Notons que certains auteurs (Mangin, Molinari et Paloc 1976), (Molinari 1973) appliquent le terme de distribution des temps de séjour à la réponse concentrations-temps lorsque le débit est constant. La réponse concentrations-temps à une injection instantanée de traceur est une réponse impulsionnelle particulière tenant compte de la masse de traceur injecté et du taux de restitution.

III.3.2/ Relations spatio-temporelles.

III.3.2.1/ Les temps caractéristiques.

En se basant sur le principe de la distribution des temps de séjour, il est possible de déterminer les temps caractéristiques suivants :

- Le temps moyen de séjour $\overline{t}$ ou moyenne arithmétique pondérée des temps :

$$\overline{t} = \int_{-\infty}^{+\infty} t\,h(t)\,dt \qquad (2)$$

Dans le cas particulier où la réponse impulsionnelle correspond à une distribution Gaussienne dans l'espace, $\overline{t}$ est égal au temps par convection pure t_c (ou temps de renouvellement) défini par : $t_c = \frac{V}{Q}$

V: volume du système.

Q: débit d'écoulement.

Généralement le temps moyen de séjour est différent du temps par convection pure.

- Le temps harmonique **th** ou moyenne harmonique pondérée des temps :

$$th = \frac{1}{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{h(t)}{t} dt} \qquad (3)$$

III.3.2.2/ Les vitesses de transit.

Si la distance linéaire **L** entre les points d'entrée et de sortie du traceur est considérée comme la distance parcourue par le traceur, il est ainsi possible de déterminer les vitesses caractéristiques suivantes :

- La vitesse maximale v_{max} de transit correspondant au déplacement de la particule de traceur la plus rapide : $v_{max} = \frac{L}{ta}$

- La vitesse moyenne de transit $\overline{v}$: $\overline{v} = L \int_0^{\infty} \frac{1}{t} h(t)\, dt$

- La vitesse apparente de transit v_{app} : $v_{app} = \frac{L}{\overline{t}}$

En relation avec le temps de transfert par convection pure, il est possible de déterminer la vitesse effective **u** : $u = \frac{L}{t_c}$, par conséquent la vitesse apparente est généralement différente de la vitesse effective.

Remarque : La distance linéaire L prise en compte entre les points d'entrée et de sortie implique que les vitesses de transit du traceur ainsi calculées sont des vitesses minimales, en effet la distance réelle Lr de parcours du traceur dans le système est de fait supérieure ou égale à L.

III.3.2.3/ Analyse des moments des temps.

Lorsque la distribution est unimodale, c'est-à-dire lorsqu'elle ne présente qu'un seul pic ou si l'on s'intéresse qu'à un seul mode d'une réponse plurimodale, l'analyse des moments des temps (Dreiss 1989) permet de déterminer les caractéristiques de la distribution :

Les moments μ_n d'ordre n sont définis par : $\mu_n = \int_{-\infty}^{+\infty} t^n \, h(t) \, dt$

Remarque : Le temps moyen de séjour correspond au moment d'ordre 1 : $\mu_1 = \overline{t}$

La dispersion du nuage de traceur dans l'espace est décrite par la variance σ^2 de la distribution ou le moment centré d'ordre 2 : $\sigma^2 = \mu 2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (t - \overline{t})^2 \, h(t) \, dt$ (4)

Le coefficient adimensionnel de variation Cv est de la forme : $Cv = \frac{\sigma}{\overline{t}}$

Le moment centré d'ordre 3 exprime l'aplatissement Γ de la réponse :

$$\Gamma = \int_{-\infty}^{+\infty} (t - \overline{t})^3 \, h(t) \, dt \qquad (5)$$

Le coefficient adimensionnel d'aplatissement γ est de la forme : $\gamma = \frac{\Gamma}{\sigma^3}$

Remarques : Lorsque le débit est supposé constant, les relations (1) à (5) se simplifient et le terme Q(t) n'est plus nécessaire. Ces relations peuvent alors s'exprimer respectivement de la façon suivante :

$$h(t) = \frac{C(t)}{\int_{-\infty}^{+\infty} C(t) \, dt} \qquad \overline{t} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} t \, C(t) \, dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} C(t) \, dt}$$

$$t_h = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} C(t)\,dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{C(t)}{t}\,dt} \qquad \sigma^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (t - \bar{t})^2\, C(t)\,dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} C(t)\,dt}$$

$$\Gamma = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (t - \bar{t})^3\, C(t)\,dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} C(t)\,dt}$$

III.4/ LES REPONSES IMPULSIONNELLES DERIVANT DE SOLUTIONS ANALYTIQUES DE MODELE DE TRANSFERT.

Il est intéressant de pouvoir associer la réponse impulsionnelle à une solution analytique paramétrée correspondant à un modèle de transfert. Le but de ces opérations est de pouvoir caractériser le transfert étudié par rapport aux propriétés du milieu traversé par le traceur. Un grand nombre de modèles intégrant divers paramètres sont présentés dans la littérature, pour ne citer que quelques exemples, en milieux poreux ou fracturés (Sauty 1977, Grisak et Pickens 1981), Sudicky et Frind 1984), en aquifère fissuré (Maloszewski et Zuber 1986).Nous présentons ici les modèles les plus communément utilisés en hydrologie de surface et karstique. (Nir 1984, Gaspar 1987)

Pour ces différents modèles : Q représente le débit constant du système. V, le volume. $\bar{t}$ le temps moyen de séjour.L'entrée est un signal de Dirac $\delta(t)$.

-Modèle piston

$$h(t) = \delta(t - \bar{t}) \qquad \bar{t} = \frac{V}{Q}$$

-Modéle réservoir

$$h(t) = \frac{1}{\bar{t}} \exp\left(-\frac{t}{\bar{t}}\right) \qquad \bar{t} = \frac{V}{Q}$$

-Modèle de (n+1) cellules identiques parfaitement mélangées

$$h(t) = \frac{\lambda^{n+1}}{n!}\, t^n \exp(-\lambda t) \qquad \lambda = \frac{n+1}{V}\, Q\,, \quad \bar{t} = \frac{(n+1)}{\lambda}$$

-modèle en convection-dispersion en écoulement monodimensionnel uniforme en milieu semi-infini.

$$h(t) = \frac{x}{\sqrt{4\pi D t^3}} \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{4\pi D t}\right) \qquad \bar{t} = t_c\,, \quad t_c = \frac{V}{Q}$$

D : coefficient de dispersion en (L^2T^{-1})
u : vitesse effective (LT^{-1})
x: distance entrée-sortie (L)

Une caractéristique commune de ces différents modèles est de ne présenter que des solutions unimodales. Lorsque la réponse impulsionnelle est plurimodale, l'utilisation de ces modèles reste interprétative du mécanisme de transfert.

III.5/ PRINCIPE DE CONVOLUTION

III.5.1/ L'état des systèmes.

L'état d'un système va dépendre des conditions hydrodynamiques à l'entrée et à la sortie de celui-ci.
Si Qe et Qs sont respectivement les débits à l'entrée et à la sortie d'un système, on définit :
- le système fermé : Qe=Qs=0
-Le système ouvert : Qe≠0
-l'état stationnaire : Qe=Qs (régime permanent)
-l'état non stationnaire : Qe=Qe(t),Qs=Qs(t) (régime transitoire)

III.5.2/ Etude des différents systèmes.

L'ensemble des développements théoriques sur l'étude des systèmes naturels dans le cadre des traçages artificiels est basé sur les hypothèses suivantes : le transfert de masse est conservatif et

le traceur est un traceur parfait, c'est-à-dire que les molécules ont le même comportement que les molécules d'eau. En relation avec les concepts de la méthode "boite noire" et les conditions hydrodynamiques, on distingue les systèmes stationnaires ou invariants (indépendant du temps) et les systèmes non stationnaires ou variants (dépendant du temps).
Cette partie concerne les théories ou approches du transfert d'un traceur dans les systèmes influencés par les conditions hydrodynamiques.

III.5.2.1/ Etude des systèmes stationnaires.

Un système stationnaire est caractérisé par un état stationnaire Qe=Qs=Q, le volume V constituant ce système est lui aussi constant en fonction du temps. Pour un tel système la réponse impulsionnelle issue d'un traçage est de la forme :

$$h(\tau) = \frac{Cs(\tau)}{\int_{-\infty}^{+\infty} Cs(\tau)\, d\tau}$$

τ : temps absolu (τ=0 : temps d'injection du traceur dans le système)

Remarque : h(τ) ainsi définie est formulée lorsque le débit est constant entre le temps d'arrivée et de fin de passage du traceur à la sortie du système pendant lequel est réalisé un traçage. Elle n'identifie pas forcement un système invariant.

Pour l'injection au temps τ=0 d'une masse M à l'entrée, les concentrations Cs(t) à la sortie se déduisent par :

$$Cs(\tau) = \frac{M}{Q}\, h(\tau)$$

Pour une entrée Ce(t) quelconque, la variation des concentrations Cs(t) à la sortie est la suivante:

$$Cs(t) = \int_{0}^{\infty} h(\tau)\, Ce(t-\tau)\, d\tau$$

t : temps chronologique

Remarque : Nous présentons ici l'aspect "convolution" à partir de la réponse impulsionnelle issue d'un traçage artificiel. Cette intégrale peut également permettre d'identifier un système et peut aussi être généralisée pour les traceurs radioactifs :

$$Cs(t) = \int_0^{\infty} h(\tau)\ Ce(t-\tau)\ \exp(-\lambda\tau)\ d\tau$$

$\lambda = \frac{\ln 2}{T}$ où T représente la période (temps de demi-vie) du traceur étudié.

III.5.2.2/ Etude des systèmes non stationnaires.

Un système hydrologique ou hydrogéologique non stationnaire est caractérisé par un débit d'entrée et de sortie variant en fonction du temps : Qe(t) et Qs(t), le volume d'eau V(t) du système peut également varier en fonction du temps.

- Système à volume constant V(t) = V

Dans le cas d'un système non stationnaire caractérisé par une seule entrée Ce(t), une seule sortie Cs(t), un volume constant V et soumis au conditions hydrodynamiques Q(t): (Niemi 1977)

$$Cs(t) = \int_0^{\infty} \frac{Q(\tau)}{Q(t)}\ h(t,\tau)\ Ce(\tau)\ d\tau$$

Remarque : l'hypothèse d'un volume constant dans le système avec une entrée et une sortie uniques implique : Qe(t) = Qs(t) = Q(t). V représente aussi le volume accessible par le traceur.

Dans ces conditions Niemi définit une fonction de distribution indépendante du temps $h(z-\zeta)$ et une intégrale de convolution de la forme :

$$Cs(z) = \int_{-\infty}^{z} h(z-\zeta)\ Ce(\zeta)\ d\zeta$$

z : variable adimensionnelle

ζ : variable d'intégration

avec : $$z-\zeta = \frac{1}{V} \int_{\tau}^{t} Q(v)\, dv$$

$$h(t,\tau)\, dt = h(z,\zeta)\, dz = h(z,\zeta)\, \frac{Q(t)}{V}\, dt$$

il obtient donc :

$$Cs(t) = C(z) = \frac{M}{Q(t)}\ h(t,\tau) = \frac{M}{V}\ h(z-\zeta)$$

L'intégrale de convolution, en intégrant la nouvelle fonction $h(z-\zeta)$, devient :

$$Cs(t) = \frac{1}{V} \int_{-\infty}^{t} h(z-\zeta)\ Q(\tau)\ Ce(\tau)\, d\tau$$

Lorsque $h(z-\zeta)$ (indépendant du temps) est connue, la réponse impulsionnelle $h(t,\tau)$ peut être définie par conséquent quels que soient t et τ. Nous reviendrons sur cette approche dans le chapitre suivant.

- Système à volume variable V(t)

Zuber (1986) reprend la théorie de Niemi (1977) et intègre une variation du volume du système V(t) représentant aussi ici le volume accessible par le traceur. L'intégrale de convolution s'exprime alors par :

$$Cs(t) = \int_{0}^{\infty} \frac{Qe(\tau)}{Qs(t)}\ h(t,\tau)\ Ce(\tau)\, d\tau$$

Les relations liant $h(t,\tau)$ et $h(z-\zeta)$ deviennent :

$$h(t,\tau) = h(z-\zeta)\, \frac{Q(t)}{V(t)} \qquad \text{avec} \qquad z-\zeta = \frac{1}{V(t)} \int_{\tau}^{t} Q(v)\, dv$$

L'intégrale de convolution, en intégrant la nouvelle fonction $h(z-\zeta)$, devient (Zuber 1986):

$$Cs(t) = \frac{1}{V(t)} \int_{-\infty}^{t} h(z-\zeta)\, Qe(\tau)\, Ce(\tau)\, d\tau$$

Cette formulation est directement applicable aux traceurs injectés en continu sur de longues durées (par exemple, le tritium depuis 1954) (Zuber 1986)

Dans le cadre des traçages artificiels, la formulation ainsi définie est inadéquate, en effet la réponse impulsionnelle identifie un système-traçage caractérisé par un volume donné, par conséquent si le volume V(t) varie, les réponses impulsionnelles en terme de $h(z-\zeta)$ peuvent varier elles aussi.

III.6/ CONCLUSION

Lorsque l'on s'intéresse à l'analyse des systèmes dans le cadre des transferts de solutés, deux approches permettent d'identifier un système.
La première consistant à rechercher la réponse impulsionnelle à partir de chroniques d'entrée et de sortie s'applique plus particulièrement au traceur naturel et identifie généralement un système dans sa globalité (bassin versant, système karstique). Cette approche où les entrées sont en relation avec les pluies efficaces sur le système étudié et où les sorties sont mesurées à l'exutoire d'un bassin versant ou au niveau de sources karstiques, prend en considération un système scalaire à l'échelle régionale. La difficulté est alors de faire la part au niveau des sources (en ce qui concerne les aquifères karstiques) entre le traceur issu des épisodes pluvieux caractérisés par un transfert rapide et celui provenant de la réserve. Pour ces études les systèmes sont généralement considérés comme linéaires et stationnaires et l'identification nécessite des mesures effectuées sur longues périodes de temps.
La deuxième, est l'utilisation des traceurs artificiels qui permettent une identification directe d'un système lorsque l'injection peut être assimilée à un signal de Dirac. L'entrée et les sorties sont ponctuelles, le système étudié représente donc une partie ou sous-système d'un système plus complexe vis-à-vis de ces relations. On se situe donc au niveau d'une des relations entrée-sorties d'un système vectoriel ce qui rend les opérations de convolution très délicates. De plus l'influence des conditions hydrodynamiques pouvant modifier la réponse au niveau du système-traçage entraine des conditions de non stationnarité, en effet les restitutions dans le temps seront influencées par le débit (Guizerix et al., 1976). Dans la suite de ce mémoire, j'aborde ce problème en établissant des relations entre réponses impulsionnelles en fonction des conditions hydrodynamiques et propose des hypothèses afin de replacer le système-traçage dans le système plus complexe auquel il appartient.

B.RELATION ENTRE REPONSES IMPULSIONNELLES.

Dans ce chapitre, sont abordés dans le cadre des traçages artificiels, les problèmes des restitutions de traceur influencées par les conditions hydrodynamiques lors des expérimentations sous la forme de relations entre les réponses impulsionnelles et le débit d'écoulement dans les systèmes étudiés. Dans un premier temps, sont développés les aspects théoriques de relations "débit constant-débit constant" à l'intérieur d'un système à partir de solutions analytiques répondant à des modèles particuliers de transfert de masse, c'est-à-dire là où ces relations s'appliquent entre deux restitutions de traceur lorsque pour chaque cas le débit d'écoulement est constant, mais différent d'un traçage à l'autre, l'injection étant brève et ponctuelle. Les solutions analytiques ne permettant que d'établir des relations "débit constant-débit constant", les relations entre les réponses impulsionnelles ou les restitutions de traceur et des débits d'écoulement variables impliquent des hypothèses sur le transfert sans imposer toutefois à la réponse impulsionnelle de répondre à un modèle de transfert préétabli. Ces relations ont abouti à la notion de transformation des réponses impulsionnelles en fonction des conditions hydrodynamiques (Dzikowski et al., 1991).
La deuxième partie de ce chapitre est consacrée aux développements informatiques intégrant les relations proposées. L'intérêt est porté ici sur les problèmes d'algorithmie liés à la discrétisation du temps. Je propose aussi une méthode de détermination de réponses impusionnelles en fonction des conditions hydrodynamiques basée sur le principe de résolution du transfert de masse par " marche au hasard ", ce qui a permis de vérifier les relations proposées dans le cas d'un modèle de transfert monodimensionnel adapté au milieu poreux. La troisième partie de ce chapitre concerne des applications sur colonnes de laboratoire où les résultats d'expériences de traçages ont permis de vérifier les relations proposées mais aussi de fixer les limites de la méthode. Enfin dans la quatrième partie, est développé la mise au point d'un programme permettant des opérations de convolution sur les entrées d'un système soumis à des conditions hydrodynamiques variables lorsque l'on dispose d'une réponse de référence. Quelques exemples de restitutions de traceur lors d'écoulements différents à débit variable, pour des injections instantanées et en créneaux montrent les mécanismes du programme.

I/ RELATIONS ENTRE REPONSES ISSUES DE TRACAGES : THEORIE

I.1/ LES RELATIONS "DEBIT CONSTANT-DEBIT CONSTANT".

Deux modèles de transfert de masse, un modèle de transfert en tube et un modèle de transfert en convection-dispersion, ont permis d'établir des relations entre les réponses à l'injection instantanée d'un traceur lorsque le débit constant est différent pour chaque expérience de

traçage dans les "systèmes modèles". A partir du modèle de transfert de masse en écoulement laminaire dans un tube (Taylor, 1953), les relations s'établissent entre les valeurs des réponses impulsionnelles déterminées pour deux traçages correspondant à des débits d'écoulements constants mais différents à l'intérieur du tube. Le modèle de transfert en convection-dispersion (Zuber, 1974; Sauty, 1977) est utilisé pour mettre en relation les réponses concentrations - temps de deux traçages réalisés pour des débits d'écoulement constants différents, ces réponses correspondent à des injections instantanées de masse de traceurs différentes. Cette démarche a pour but d'établir le domaine de validité des relations en fonction des paramètres des modèles. Ces études sur modèle visent donc à définir des relations entre deux réponses définies par traçage artificiel pour deux états stationnaires (débit constant) d'un système non stationnaire ou variant (débit différent pour chaque réalisation).

I.1.1/ Modèle de transfert en tube

I.1.1.1/ Rappels sur le transfert dans un tube

Dans le cas d'un écoulement laminaire au sein d'un tube, la dispersion du nuage de traceur est une dispersion mécanique liée à la répartition parabolique des vitesses.(Fig.B1).

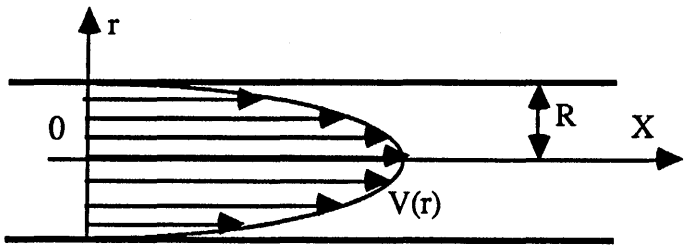


Fig.B1 : représentation parabolique des vitesses au sein d' un tube.

Les vitesses sont supposées nulles au niveau des parois du tube, la vitesse étant maximale au centre du tube.Lorsque la convection axiale prédomine sur la diffusion radiale, la diffusion moléculaire peut être négligée, ce qui implique (Bear, 1972):

$$\frac{2x}{Vmoy} << \frac{R^2}{14{,}4\ Dd}$$

Dd : coefficient de diffusion moléculaire.
$Vmoy = Q / \pi R^2$: vitesse moyenne.

R : rayon du tube.

Q : débit d'écoulement.

x : distance à partir du point d'injection (x=0)

L'expression de la vitesse V(r) à une distance r de l' axe OX est :

$$V(r)= Vm \left(1-\frac{r^2}{R^2}\right) \quad (4)$$

Vm = 2 Vmoy : vitesse maximale (m/s)

- Réponse à une injection continue (Taylor 1953).

L'injection continue est représentée par un signal d'entrée de concentration Co constant (temps t=0) en fonction du temps (Fig.B2).

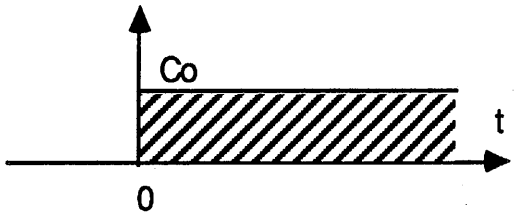


Fig.B2 : signal d'entrée (cas d'une injection continue).

La répartition des vitesses au sein du tube soumis à un écoulement laminaire va engendrer une forme parabolique du nuage (Fig.B3)

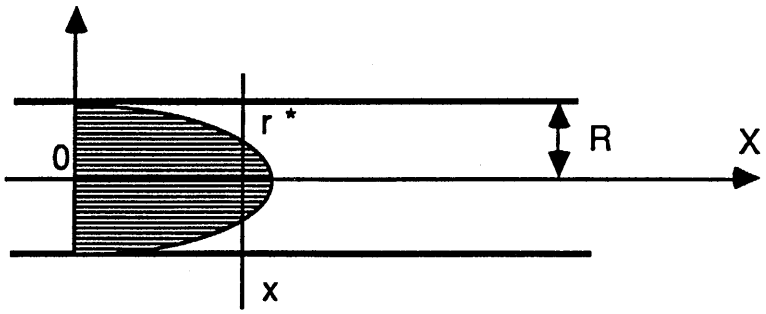


Fig.B3 : représentation du nuage dans le cas d'une injection continue.

Le rapport entre le flux traversant la section du nuage, perpendiculaire à l'axe de l'écoulement en un point situé à une distance x du point d'entrée et le flux traversant la surface totale du tube va permettre de définir la concentration en ce point.
La surface s du nuage perpendiculaire à l'écoulement au point x pour un temps t s'écrit :

$$s = \pi r^{*2}$$

avec :

$$r^* = R\left(1 - \frac{x}{Vm\ t}\right)^{1/2} \qquad (5)$$

La concentration C(t) à distance donnée en fonction du temps s'exprime alors par la relation :

$$C(t) = Co \int_0^{r^*} \frac{2\pi\ r\ V(r)}{\pi\ Vmoy\ R^2}\, dr = Co\left(1 - \frac{x^2}{Vm^2\ t^2}\right) \qquad (6)$$

I.1.1.2/ Relations entre réponses impulsionnelles dans un tube.

- Réponse à une injection instantanée.

L'étude des réponses impulsionnelles nécessite de définir la réponse à une injection brève. Celle-ci est simulée par un signal d'entrée constant de concentration Co à l'instant initial, puis par l'entrée d'un signal constant de concentration -Co après un temps dt (Fig.B4).

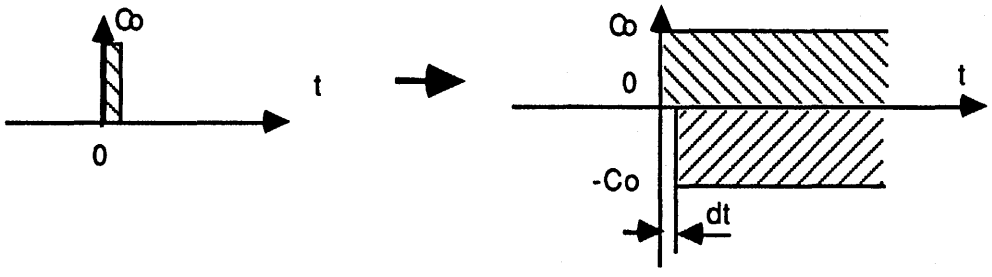


Fig.B4 : signal d'entrée, cas d'une injection brève.

Les conditions de simulation de l'entrée brève implique une représentation du nuage du type : (Fig.B5)

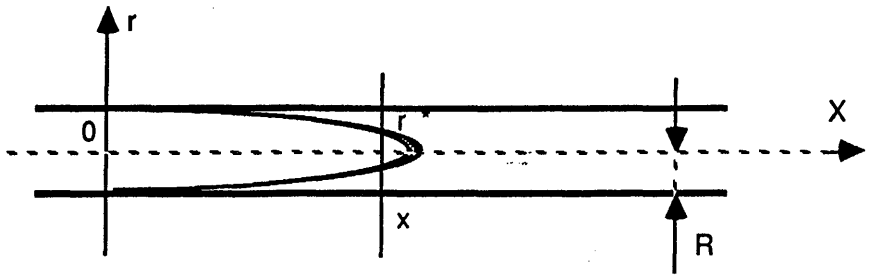


Fig.B5 : représentation du nuage, cas d'une injection brève.

L'évolution des concentrations C(t) à une distance donnée x de l'entrée est de la forme :

$$C(t) = Co\left(1 - \frac{x^2}{Vm^2\, t^2}\right) - Co\left(1 - \frac{x^2}{Vm^2 (t-dt)^2}\right) \qquad (7)$$

Si l'on assimile l'entrée à un signal de type Dirac $\delta(t)$: $\delta(t) = 1/dt$

Lorsque dt tend vers 0, l'équation (7) devient :

$$\frac{C(t)}{Co} = \frac{\partial\left(1 - \frac{x^2}{Vm^2\, t^2}\right)}{\partial t} dt$$

$$C(t) = Co \frac{2x^2}{Vm^2\, t^3} dt \qquad (8)$$

avec: $t \geq \frac{x}{Vm}$

Si Q est le débit constant à l'intérieur du tube :

$$Vm = \frac{2Q}{\pi R^2}$$

$$C(t) = Co \frac{(x \pi R^2)^2\, dt}{2Q^2\, t^3} \qquad (9)$$

- Détermination de la réponse impulsionnelle h(t) dans un tube.

La détermination de la réponse impulsionnelle s'effectue de la façon suivante :

La masses injectée étant m alors :

$$Co = \frac{m}{Q\,dt}$$

On obtient donc d'après (9)

$$\frac{Q\,C(t)}{m} = \frac{(x\,\pi\,R^2)^2}{2\,Q^2\,t^3} \quad (10)$$

La réponse impulsionnelle d' un système étant par définition

$$h(t) = \frac{Q(t)\,C(t)}{\int_{-\infty}^{+\infty} Q(t)\,C(t)\,dt}$$

$$m = \int_{-\infty}^{+\infty} Q(t)\,C(t)\,dt$$

Dans le cas d'un écoulement dans un tube la réponse impulsionnelle sera de la forme :

$$h(t) = \frac{(x\,\pi\,R^2)^2}{2Q^2\,t^3} \quad \text{pour} \quad t \geq \frac{x\,\pi\,R^2}{2Q} \quad (11)$$

- Les relations entre réponses impulsionnelles.

Dans un premier temps sont établies les relations entre les valeurs des réponses impusionnelles à l'instant de la première arrivée du traceur à la sortie du système.

Calcul de h(t) au temps d'arrivée t_a pour un débit d'écoulement Q et t'_a pour Q'.

$$t_a = \frac{x\,\pi\,R^2}{2Q}, \qquad t'_a = \frac{x\pi\,R^2}{2Q'}$$

$$h(t_a) = \frac{4Q}{x\,\pi\,R^2}, \qquad h'(t'_a) = \frac{4Q'}{x\,\pi\,R^2}$$

$$\Rightarrow \quad h'(t'_a) = \frac{h\,(t_a)\,Q'}{Q} \quad \text{avec} \quad t'_a = \frac{Q\,t_a}{Q'} \quad (12)$$

Cette relation (12) permet en connaissant t_a et $h(t_a)$ de déduire $h'(t'_a)$ à un débit Q' différent de Q.

La généralisation quel que soit le temps t supérieur aux temps d'arrivée, s'effectue à partir de t_a+t et t'_a d'après (12) comme suit :

$$\frac{Q'}{Q} h(t_a+t) = \frac{Q'}{Q} \frac{(x\ \pi\ R^2)^2}{2Q^2(t_a+t)^3} = \frac{Q'(x\ \pi\ R^2)^2}{2Q^3(t_a+t)^3}$$

$$= \frac{Q'(x\ \pi\ R)^2}{2Q^3(\frac{Q't'_a}{Q} + t)^3} = \frac{Q'(x\ \pi\ R)^2}{2\ (Q't'_a + Q\ t)^3}$$

$$= \frac{Q'x\ \pi\ R^2}{2Q'^3(t'_a+(Q\ t\ /\ Q'))^3} = h'\left(t'_a + \frac{Qt}{Q'}\right)$$

donc: $$h'(t'_a + \frac{Qt}{Q'}) = \frac{Q'\ h\ (t_a+t)}{Q}$$

Soit de façon plus générale :

$$h'\left(\frac{Q(t_a + t)}{Q'}\right) = \frac{Q'\ h\ (t_a+t)}{Q} \qquad (13)$$

La relation (12) peut donc être étendue quel que soit t supérieur aux temps d'arrivée.

I.1.2/ Modèle de transfert en convection-dispersion.

I.1.2.1/ Rappels sur le modèle.

La solution analytique proposée est de la forme : (Zuber, 1974; Sauty,1977)

$$C(x,t) = \frac{m\ x}{Q\sqrt{4\ \pi\ D_L\ t^3}}\ \exp\left(-\frac{(x - u\ t)^2}{4\ D_L\ t}\right) \qquad (14)$$

Cette équation exprime la variation de la concentration en fonction de la distance et du temps obtenue à partir d'une injection instantanée au temps t=0 en x=0 dans un écoulement monodimensionnel en milieu semi-infini.

Les conditions aux limites de cette relation sont :

$$C(x, t=0) = 0 \quad \forall\, x > 0$$
$$C(x=0, t) = \frac{m}{Q}\,\delta(t)$$
$$C(\infty, t) = 0 \qquad \forall\, t > 0$$

Q : débit d'écoulement
m : masse injectée
u : vitesse (écoulement uniforme)
t : temps
C : concentration
x : distance à partir du point d'injection
D_L : coefficient de dispersion longitudinale
$\delta(t)$: signal de Dirac

I.1.2.2/ Relations entre les restitutions concentrations - temps.

A distance constante X, la concentration à un instant donné t_1, résultant de l'injection d'une masse m_1 dans un débit d'écoulement constant Q_1 au temps t=0, s'exprime de la façon suivante si u_1 est la vitesse moyenne relative au débit constant Q_1 :

$$C(t_1) = \frac{m_1\, X}{Q_1 \sqrt{4\,\pi\, D_{L1}\, t_1^{\,3}}}\ \exp\left(-\frac{(X - u_1\, t_1)^2}{4\, D_{L1}\, t_1}\right) \qquad (15)$$

Dans les conditions m_2, Q_2, u_2, la concentration C' à l'instant t_2 s'écrit :

$$C'(t_2) = \frac{m_2\, X}{Q_2 \sqrt{4\,\pi\, D_{L2}\, t_2^{\,3}}}\ \exp\left(-\frac{(X - u_2\, t_2)^2}{4\, D_{L2}\, t_2}\right) \qquad (16)$$

Posons :

$$Q_1 = k'\, Q_2$$

$$u_i = \frac{Q_i}{S}$$

$$D_{Li} = \alpha_L u_i$$

S : surface moyenne d'écoulement

α_L : dispersivité longitudinale (supposée constante quel que soit le débit d'écoulement).

Dans ces conditions :

$$C(t_1) = \frac{m_1 X}{Q_1 \sqrt{4 \pi \alpha_L \frac{Q_1}{S} t_1^3}} \exp\left(-\frac{(X - \frac{Q_1}{S} t_1)^2}{4 \alpha_L \frac{Q_1}{S} t_1}\right)$$

$$C(t_1) = \frac{m_1 X}{k' Q_2 \sqrt{4 \pi \alpha_L \frac{k' Q_2}{S} t_1^3}} \exp\left(-\frac{(X - \frac{k' Q_2}{S} t_1)^2}{4 \alpha_L \frac{k' Q_2}{S} t_1}\right)$$

si $t_1 = \frac{t_2}{k'}$

$$C(t_1) = \frac{m_1 X}{Q_2 \sqrt{4 \pi \alpha_L \frac{Q_2}{S} t_2^3}} \exp\left(-\frac{(X - \frac{Q_2}{S} t_2)^2}{4 \alpha_L \frac{Q_2}{S} t_2}\right)$$

on obtient donc la relation :

$$C(t_1) = \frac{m_1}{m_2} C'(t_2) \qquad \text{avec} \quad t_1 = \frac{t_2}{k'} \qquad (17)$$

Cette relation fait apparaître, que l'intensité des concentrations à l'intérieur d'un nuage à l'autre ne varie qu'en fonction de la masse injectée; celle-ci étant répartie de la même façon dans un volume identique à distance constante du point d'injection, dans le cas d'un écoulement uniforme et pour une même surface d'écoulement S.

I.1.3/ Conclusions.

Deux types de relations sont donc établis entre les restitutions concentrations - temps, les réponses impulsionnelles et le débit d'écoulement constant lors de la réalisation d'un traçage : lorsque $t_1 = \frac{Q_2}{Q_1} t_2$: d'après (13) et (17).

$$C(t_1) = \frac{m_1}{m_2} C'(t_2)$$

$$h(t_1) = \frac{Q_1}{Q_2} h'(t_2)$$

Ces relations sont définies pour des systèmes ou modèles à entrée unique et sortie unique, elles impliquent que le volume du système soit constant et indépendant du débit d'écoulement. C'est le cas pour le transfert dans un tube sous pression, mais aussi pour le modèle de transfert en convection-dispersion, en effet la surface moyenne d'écoulement est considérée constante et indépendante du débit. Dans ce deuxième cas, le coefficient de dispersion D doit être proportionnel à la vitesse u : $D = \alpha u$. La dispersion cinématique doit donc être prédominante par rapport à la diffusion moléculaire (Pfannkuch, 1963). Dans le cas d'une relation non linéaire entre le coefficient de dispersion et la vitesse du type : $D = \alpha u^n$ (Klotz et al., 1980; Gupta et al. 1980), les relations précédentes ne sont plus applicables.

I.2/ RELATION "DEBIT CONSTANT - DEBIT VARIABLE".

- Relations entre réponses impulsionnelles.

Considérons le signal de sortie suivant (Fig.B6), où la réponse h(t) est une impulsion de Dirac.

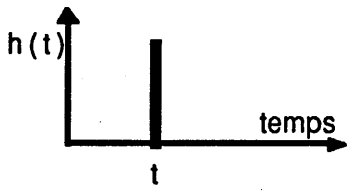


Fig.B6 : sortie du signal d'entrée au temps t.

Le traceur étant injecté au temps t=0 de façon brève et ponctuelle nous définissons :

$Q t = X S$

Q : débit constant.

S : surface moyenne d' écoulement

X : distance (entrée-sortie)

t : temps convectif. (t=tc)

Supposons dans un deuxième temps, la même expérience mais avec un débit variable en fonction du temps Q'(t) à partir du temps d' injection t = 0.

Si t' est le temps convectif de sortie du système il est possible d' écrire :

$$X S = \int_0^{t'} Q'(t)\, dt$$

cette relation implique :

$$Q t = \int_0^{t'} Q'(t)\, dt \quad (18)$$

Il est donc possible de déduire t' (temps de transfert prenant en compte la variation du débit) à partir du temps de transfert t au débit Q et de la variation du débit Q' en fonction du temps.

Réciproquement à partir de t', Q'(t) et Q, il est possible de retrouver le temps t au débit constant Q.

D'après la relation (19), il est possible de déduire un débit constant équivalent Qm tel que:

$$Qm = \frac{1}{t'} \int_0^{t'} Q'(t)\, dt \qquad (19)$$

D' après l' équation (13) h'(t') est déduit à partir de h(t) par la relation :

$$h'(t') = \frac{Qm}{Q} h(t) \quad (20)$$

En considérant qu'une réponse impulsionnelle quelconque peut être représentée par une une suite d'impulsions, il est ainsi possible de construire la réponse pour toute variation de débit.

Remarques:

- Ces hypothèses impliquent que la quantité de matière représentée par un signal h(t) caractérisé par son temps de transfert t occupe la même surface d'écoulement quel que soit le débit .

- Lorsqu'un traçage a été réalisé dans des conditions de débit variable Q(t) :

au temps t_1, la valeur de la réponse impulsionnelle $h(t_1)$, pour un transfert conservatif et pour l'injection d'une masse M est définie par :

$$h(t_1) = \frac{Q(t_1)\, C(t_1)}{M} \qquad (21)$$

Le débit moyen Qm_1 entre le temps d'injection et le temps t_1 est :

$$Qm_1 = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} Q\ (t)\ dt$$

La valeur de la réponse impulsionnelle $h'(t_1)$ au temps t_1 pour un débit d'écoulement constant Qm_1 devient ainsi, en fonction des relations établies :

$$h'(t_1) = \frac{Qm_1\, h(t_1)}{Q(t_1)} \qquad (22)$$

I.3/ RELATIONS "DEBIT VARIABLE - DEBIT VARIABLE".

I.3.1/ Système scalaire.

- Supposons maintenant deux valeurs de réponses impulsionnelles $h_1(t_1)$ au temps t_1 et $h_2(t_2)$ au temps t_2 pour des réalisations de traçages respectivement dans les conditions $Q_1(t)$ et $Q_2(t)$ et pour des masses injectées m_1 et m_2, d'après (21) et (22) :

$$h_1'(t_1) = \frac{Qm_1\, C_1(t_1)}{m_1} \qquad h_2'(t_2) = \frac{Qm_2\, C_2(t_2)}{m_2}$$

$$Qm_1 = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} Q_1(t)\, dt \quad \text{et} \quad Qm_2 = \frac{1}{t_2} \int_0^{t_2} Q_2(t)\, dt \qquad (23)$$

$h_1'(t_1)$: valeur de la réponse impulsionnelle au temps t_1 pour un débit constant Qm_1.
$h_2'(t_1)$: valeur de la réponse impulsionnelle au temps t_2 pour un débit constant Qm_2.

Pour des temps t_1 et t_2 tels que : $Qm_1\ t_1 = Qm_2\ t_2$

alors : $$h_1'(t_1) = \frac{Qm_1}{Qm_2}\ h_2'(t_2) \qquad (24)$$

et donc $$C_1(t_1) = \frac{m_1}{m_2}\ C_2(t_2) \qquad (25)$$

Ces deux équations montrent les relations entre les réponses impulsionnelles, les restitutions concentrations-temps et les débits d'écoulement variables durant les périodes de réalisation des traçages pour un système scalaire (entrée unique - sortie unique) définis par un volume constant indépendant des conditions hydrodynamiques.
Dans le cas d'un transfert conservatif, ces relations signifient qu'une masse de traceur injectée de façon instantanée dans un système dont le volume est constant a la même répartition dans un espace défini après un parcours de longueur donnée quelles ques soient les conditions hydrodynamiques existantes au cours du transfert. La concentration est alors proportionnelle à la masse injectée.

Les questions qui se posent maintenant sont de savoir si ces relations peuvent être vérifiées pour des réponses impulsionnelles ou des restitutions de traceur ne correspondant pas à priori à des modèles de transfert et quelles sont les conditions d'application dans le cas d'une relation entrée-sortie d'un système vectoriel.

Si l'on repart de la notion de réponse impulsionnelle h(z) indépendante du temps et pour un système scalaire à volume constant (Chapitre A § III.5.2.2) (Niemi 1977) :

$$Cs(t) = C(z) = \frac{M}{Q(t)}\ h(t,\tau) = \frac{M}{V}\ h(z-\zeta) \qquad (26)$$

$$z-\zeta = \frac{1}{V} \int_{\tau}^{t} Q(v)\, dv \qquad (27)$$

$$h(t,\tau)\, dt = h(z,\zeta)\, dz = h(z,\zeta)\, \frac{Q(t)}{V}\, dt \qquad (28)$$

où Cs(t) représente la concentration à la sortie du système influencé par une variation de débit Q(t).

Dans le cas d'un traçage artificiel, l'instant de l'injection du traceur est déterminé par t=0 d'où $\zeta = 0$. Si l'on suppose que pour deux traçages effectués dans un même système h(t1) et h'(t2) sont les valeurs des réponses impulsionnelles au temps t1 et t2 :

$$h(t_1,0)\,dt = h(z_1,0)\,\frac{Q(t_1)}{V}\,dt$$

$$h'(t_2,0)\,dt = h'(z_2,0)\,\frac{Q(t_2)}{V}\,dt$$

$$h(t_1,0) = \frac{C(t_1)\,Q(t_1)}{m_1} \qquad \text{et} \qquad h'(t_2,0) = \frac{C(t_2)\,Q(t_2)}{m_2} \qquad (29)$$

m_1 : masse injectée pour le premier traçage
$C(t_1)$: concentration au temps t_1 pour le premier traçage.
m_2 : masse injectée pour le second traçage traçage
$C(t_2)$: concentration au temps t_2 pour le second traçage.

Lorsque $z_1 = z_2 = z$

d'après (27) $\frac{1}{V}\int_0^{t1} Q(v)\,dv = \frac{1}{V}\int_0^{t2} Q(v)\,dv$

donc d'après (23) $$z = \frac{Qm_1\,t_1}{V} = \frac{Qm_2\,t_2}{V}$$

ce qui implique : $$t_1 = \frac{Qm_2\,t_2}{Qm_1}$$

d'autre part la valeur de la réponse impulsionnelle h(z) ne dépendant que de z, $h(z_1,0) = h'(z_2,0)$, ce qui implique d'après (28) :

$$\frac{h(t_1,0)}{Q(t_1)} = \frac{h'(t_2,0)}{Q(t_2)} \qquad \text{d'où d'après (29)} \qquad C(t_1) = \frac{m_1}{m_2}\,C(t_2)$$

A partir des relations (26), (27) et (28), il est possible de retrouver dans le cas de deux traçages artificiels la relation (25) entre les restitutions concentrations - temps. Les relations établies par Niemi n'imposant pas de forme particulière à la réponse impulsionnelle, la relation (25) et par

conséquent la relation (24) peuvent être appliquées pour des systèmes quelconques définis par un volume constant, les hypothèses émises sur le transfert du traceur dans un système à volume constant sont donc justifiées.

I.3.2/ système vectoriel.

Lorsque l'on connait la réponse par traçage d'un système à une injection instantanée dans les conditions de débits correspondant à l'expérimentation, les relations mises en évidence entre les restitutions ou les réponses impulsionnelles et le débit d'écoulement permettent par une opération de convolution à débit variable de définir la réponse à une entrée quelconque. C'est dans ce sens que sont ici établis les principes de convolution pour des systèmes vectoriels en fonction des hypothèses formulées précédemment sur le transfert du traceur.

I.3.2.1/ Systèmes invariants à entrées et sorties multiples.

Un système peut être invariant, si les débits constants des n entrées e_n sont respectivement $Qe_1, Qe_2, ..., Qe_i, ...Qe_n$ et les débits constants aux m sorties s_m, $Qs_1, Qs_2, ..., Qs_j, ..., Qs_m$: Qe = Qs (Fig.B7) avec,

$$Qe = \sum_{i=1}^{n} Qe_i \quad \text{et} \quad Qs = \sum_{j=1}^{n} Qs_j$$

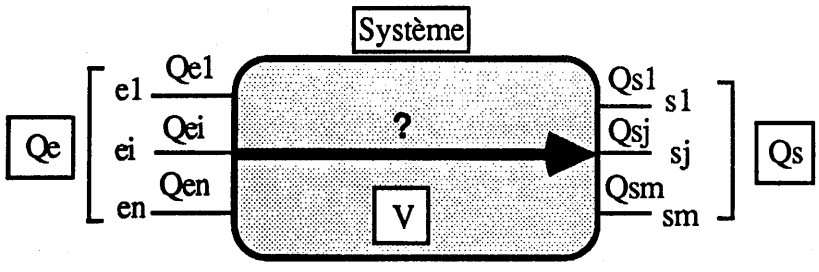


Fig.B7 : Système vectoriel stationnaire.

La réponse impulsionnelle dans le cas d'un traçage identifie la relation entre une entrée unique e_i et une sortie unique s_j.

$$h_{i,j}(\tau) = \frac{Cs_j(\tau)}{\int_{-\infty}^{+\infty} Cs_j(\tau)\, d\tau}$$

Dans ces conditions :

-Pour l'injection au temps $\tau=0$ d'une masse M à l'entrée e_i, les concentrations $Cs_j(\tau)$ à la sortie se déduisent par :

$$Cs_j(\tau) = \frac{M\ r\%}{100\ Qs_j}\ h(\tau)$$

$$r\% = \frac{Mr}{M} \times 100$$

r% : pourcentage de masse restituée.
Mr : Masse restituée.
M : Masse injectée.

-Pour une entrée $Ce_i(t)$ quelconque, la variation des concentrations $Cs_j(t)$ est la suivante:

$$Cs_j(t) = \frac{r\%}{100}\ \frac{Qe_i}{Qs_j} \int_0^{\infty} h_{i,j}(\tau)\ Ce_i(t-\tau)\, d\tau$$

Lorsque la réponse impulsionnelle est définie par un traçage, le principe de convolution doit tenir compte des flux de traceur à l'entrée et à la sortie ainsi que du taux de restitution, en effet la détermination de la réponse impulsionnelle s'établit à partir de la masse restituée en ce point et non de la masse injectée.

I.3.2.2/ Systèmes variants à volume constant, à entrées - sorties multiples

L'analyse de ces systèmes dans le cas où la réponse impulsionnelle est issue d'un traçage artificiel repose sur les hypothèses suivantes :
- Les différents débits aux entrées et aux sorties du système, sont proportionnels au débit total du système caractérisé par un volume constant V (Fig.B8). Cette proportionnalité est indépendante du temps.

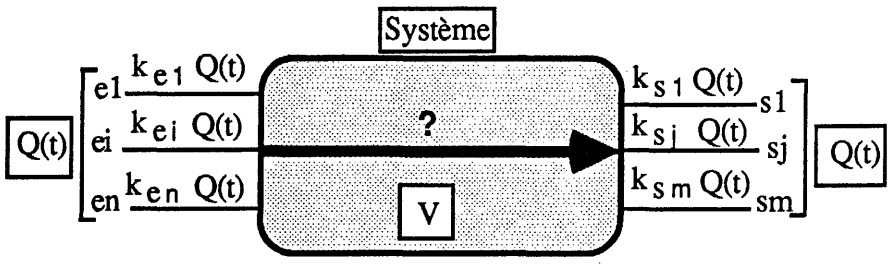


Fig.B8 : Système vectoriel non stationnaire.

Elle s'exprime de la façon suivante : Lorsque Q(t) est le débit variable dans une des entrées et des sorties d'un système à n entrées $e_1,...,e_i,...,e_n$ et à m sorties $s_1,...,s_j,...,s_m$ la variation des débits aux entrées et aux sorties sont respectivement à chaque instant : $ke_1\ Q(t),...,ke_i\ Q(t),...,ke_n\ Q(t)$ et $ks_1\ Q(t),...ks_j\ Q(t),...,ks_m\ Q(t)$ avec :

$$\sum_{i=1}^{n} ke_i = \sum_{j=1}^{m} ks_j = 1, \qquad ke_i, ks_j \text{ constantes}$$

- Le taux de restitution à la sortie s_j résultant de l'injection d'une masse M à l'entrée e_i est constant et indépendant du temps.

- Le volume V_j correspondant au volume occupé par le traceur quittant le système à la sortie s_j au cours de son transfert, ne varie pas en fonction des conditions hydrodynamiques Q(t).

L'intégrale de convolution est donc de la forme :

$$Cs_j(t) = \frac{r\%}{100} \int_{-\infty}^{t} \frac{ke_i\ Q(\tau)}{ks_j\ Q(t)}\, h_{i,j}(t,\tau)\ Ce_i(\tau)\ d\tau$$

- Principe de convolution en terme de h(z).

Si l'on définit la réponse impulsionnelle à débit variable dans un tel système par :

$$h_{i,j}(\tau) = \frac{ks_j\ Q(\tau)\ Cs_j(\tau)}{\int_{-\infty}^{+\infty} ks_j\ Q(\tau)\ Cs_j(\tau)\ d\tau}$$

où $\tau = 0$: temps d'injection du traceur

La relation reliant $h_{i,j}(\tau)$ et $h_{i,j}(\zeta)$

$$h_{i,j}(\zeta) = \frac{Vj}{ks_j\, Q(\tau)}\ h_{i,j}(\tau) \quad \text{avec} \quad \zeta = \frac{ks_j}{Vj}\int_0^{\tau} Q(v)\, dv$$

$\zeta = 0$ correspondant à $\tau=0$ (temps d'injection)

Pour l'injection d'une masse M à t=0 ($\zeta=0$), la variation des concentrations $Cs_j(\tau)$ est de la forme :

$$Cs_j(\tau) = \frac{M\ r\%}{100\ Vj}\, h(\zeta)$$

$$r\% = \frac{Mr}{M} \times 100$$

La détermination de $h_{i,j}(\zeta)$ s'effectue donc de la façon suivante :

Lorsque : $\zeta = \frac{ks_j}{Vj}\int_0^{\tau} Q(v)\, dv$ $\qquad$ $h_{i,j}(\zeta) = \frac{Cs_j(\tau)\ Vj}{Mr}$

Connaissant $z\text{-}\zeta$ et $h_{i,j}(z\text{-}\zeta)$ à partir du traçage, $h_{i,j}(t,\tau)$ peut être déterminée par :

$$h_{i,j}(t,\tau) = h_{i,j}(z\text{-}\zeta)\ \frac{ks_j Q(t)}{Vj} \qquad \text{avec} \qquad z\text{-}\zeta = \frac{ks_j}{Vj}\int_{\tau}^{t} Q(v)\, dv$$

L'intégrale de convolution en intégrant la nouvelle fonction h(z) devient :

$$Cs_j(t) = \frac{r\%}{100}\ \frac{ke_i}{Vj}\ \int_{-\infty}^{t} h_{i,j}(z\text{-}\zeta)\ Qe_i(\tau)\ Ce_i(\tau)\, d\tau \qquad (30)$$

- principe de convolution à partir des relations entre réponses.

A partir des relations mises en évidence entre restitution et conditions hydrodynamiques, il est possible de définir une intégrale de convolution intégrant les valeurs concentrations-temps.

Si $Cref_j(\tau)$ est la restitution concentration-temps du traceur (à la sortie considérée d'un système vectoriel) correspondant à l'injection d'une masse Mref de traceur à $\tau = 0$ à l'entrée et pour des conditions hydrodynamiques $Qref_j(\tau)$, la concentration $Cs_j(t)$ pour une entrée $Ce_i(t)$ s'exprime par:

$$Cs_j(t) = \int_0^{\infty} \frac{Cref_j(\tau)}{Mref} \, Ce_i(t - \tau') \, Qe_i(t - \tau') \, d\tau \qquad (31)$$

$t-\tau'$ est déterminé par $\qquad Vs_j(t-\tau') = \int_{t-\tau'}^{t} Qs_j(v) \, dv = Vref_j(\tau) \qquad (32)$

$Vref_j(\tau) = \int_0^{\tau} Qref_j(v) \, dv$: variation du volume écoulé en fonction du temps a partir de $\tau=0$ (injection du traceur) à la sortie du système au point de mesure pour des conditions hydrodynamiques de référence $Qref_j(t)$.

Cette intégrale de convolution permet donc d'identifier un système par une restitution $Cref_j(t)$ particulière où Mref est la masse injectée à l'entrée, Qref(t) est la variation de débit à partir du temps d'injection du traceur. L'utilisation de valeurs de concentrations de référence Cref pour une masse injectée Mref permet de tenir compte du taux constant de restitution au point de sortie considérée. Dans la suite de ce mémoire est proposé un algorithme de calcul permettant, à partir d'une restitution de référence dépendante de conditions hydrodynamiques particulières, d'effectuer une convolution d'entrées successives pour des conditions hydrodynamiques variables. De plus, la proportionnalité entre les débits de sorties autorise l'utilisation d'une variation quelconque de l'un de ces débits pris comme référence pour l'écoulement.

II/ PRESENTATION DES DEVELOPPEMENTS INFORMATIQUES.

Dans ce paragraphe sont présentés dans un premier temps, les aspects modélisation informatique des relations entre réponses impulsionnelles. Nous appellerons transformation des réponses, le calcul consistant à redéfinir une réponse impulsionnelle dans des conditions hydrodynamiques différentes de celles existantes lors d'un traçage de référence. Les différentes transformations abordées sont "débit constant - débit constant" (transformation d'une réponse impulsionnelle à débit constant pour un débit constant différent), "débit constant - débit variable" et "débit variable - débit constant". Pour de ces deux dernières, une algorithmie de

calcul de transformation particulière est proposée tenant compte des problèmes liés à la détermination en valeurs discrètes des réponses impulsionnelles pour des temps discrétisés.
Nous proposons également une méthode de calcul des réponses impulsionnelles pour une représentation gaussienne du transfert de masse par l'intermédiaire d'un modèle de "Marche au Hasard". Ce modèle appelé R.I.M.H (Réponse Impulsionnelle par Marche au Hasard) a permis d'établir des réponses impulsionnelles en écoulement monodimensionnel, dépendantes de conditions hydrodynamiques diverses et de tester les relations entre ces réponses dans le cas d'un modèle de transfert monodimensionnel adapté au milieu poreux.

II.1/ METHODE DE CALCUL DE TRANSFORMATION DES SIGNAUX h(t) EN FONCTION DU DEBIT.

II.1.1/ Les problèmes liés à la variation du débit.

Nous rappelons que les relations permettant de transformer une réponse impulsionnelle h(t) au débit constant Q et d'obtenir la réponse impulsionnelle h'(t') au débit constant Q' sont :

$$h'(t') = \frac{Q'}{Q}\, h(t) \qquad (33)$$

$$t' = \frac{Q}{Q'}\, t \qquad (34)$$

La programmation informatique des relations entre réponses impulsionnelles nécessite une discrétisation du temps à partir du temps d'injection en pas égaux à Δt. La réponse impulsionnelle h(t) en valeurs discrètes est alors représentée par une suite de créneaux que nous appellerons signaux h(t).
Si l'on effectue une transformation d'une réponse impulsionnelle représentée par un unique signal h(t) au pas Δt pour un débit Q afin obtenir la réponse représentée par un unique signal h'(t') au pas $\Delta t'$ pour un débit constant Q' (Fig.B9) à partir des relations (33) et (34), la discrétisation du temps implique :

$$h'(t')\,\Delta t' = h(t)\,\Delta t$$

Cette relation vérifie la propriété des réponses impulsionnelles suivante :

$$\sum_{-\infty}^{+\infty} h'(t')\,\Delta t' = 1 \qquad (35)$$

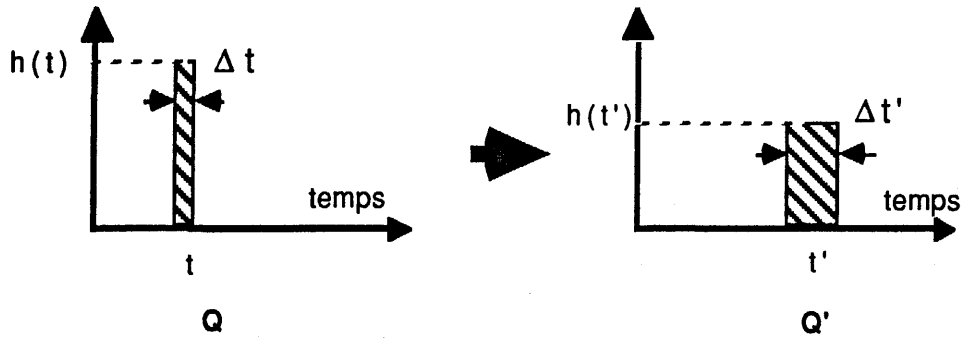


Fig.B9 : transformation de t et du signal h(t) au débit Q en t' et h'(t') au débit Q'.

En effet la transformation à partir de la relation (33) et la propriété (34) imposent :

$$\sum_{-\infty}^{+\infty} h(t)\,\Delta t = \sum_{-\infty}^{+\infty} h'(t')\,\Delta t' = \sum_{-\infty}^{+\infty} h(t)\,\frac{Q'}{Q}\,\Delta t' = 1$$

d'où: $\Delta t' = \frac{Q}{Q'}\Delta t$

Si l'utilisation de la relation (34) basée sur le temps de transfert convectif de chaque signal ne pose pas de problèmes dans le cas de transformation "débit constant - débit constant" pour une succession de signaux, lorsque que l'on effectue, par exemple une transformation "débit constant - débit variable", il se produit un chevauchement des signaux lorsque le débit va augmenter (Fig.B10) et de la disjonction des signaux lorsque le débit va décroître entre le temps d'apparition et de disparition du nuage (Fig.B11).

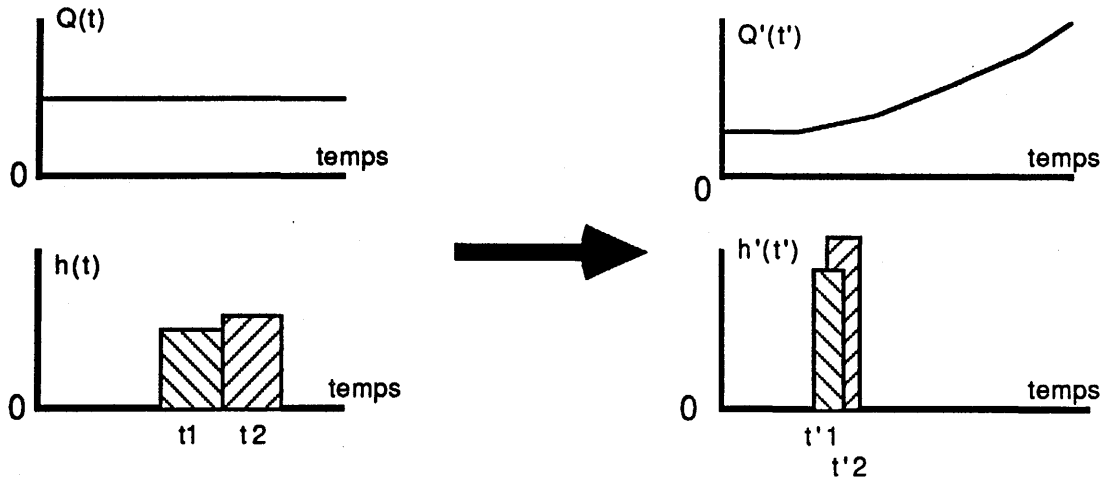


Fig.B10 : chevauchement des signaux après transformation au débit Q'(t).

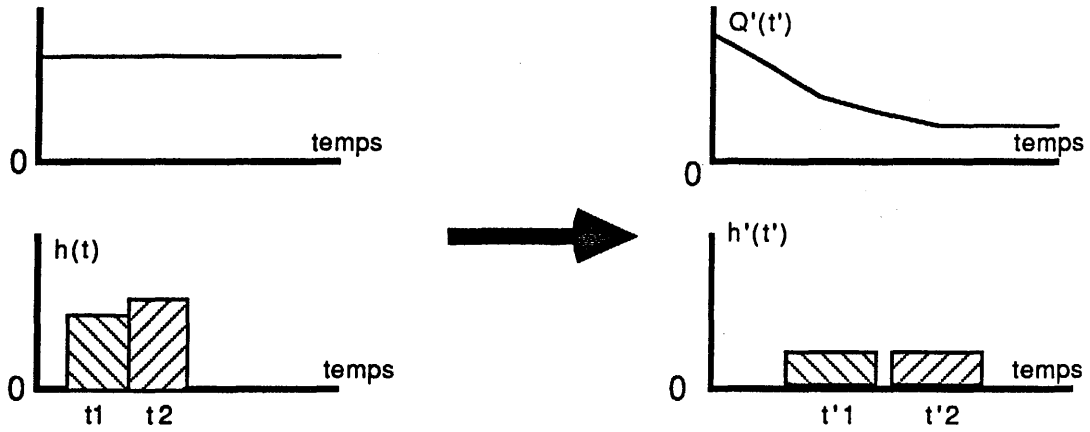


Fig.B11 : Disjonction des signaux après transformation au débit Q'(t).

De plus dans ces conditions : $\sum_{-\infty}^{+\infty} h'(t')\ dt' \neq 1$

La méthode de calcul sera donc basée sur les temps convectifs d' arrivée et de sortie de chaque signal afin de respecter cette propriété.

II.1.2/ Principe du calcul

II.1.2.1/ Principe de base

L' équation (34) va nous permettre de calculer les temps convectif d' arrivée t'1, t'2, t'3 à partir de t1, t2, t3.(Fig.B12)

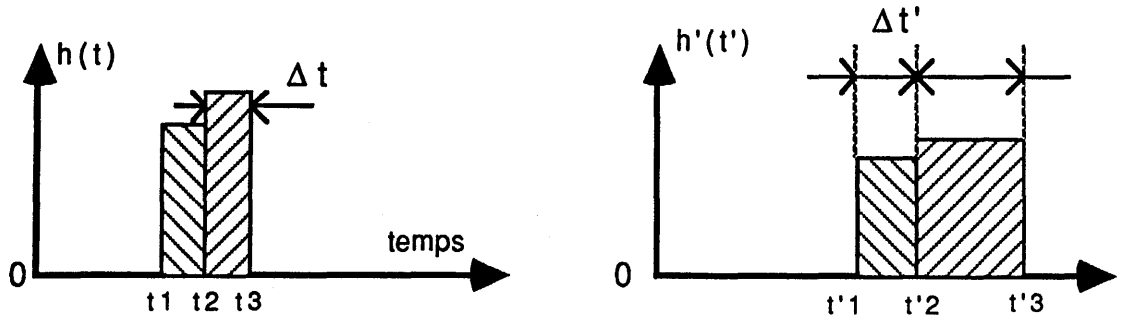


Fig.B12 : transformation de la réponse impulsionnelle1 à débit constant en une réponse impulsionnelle2 à débits variables.

Nous définissons des temps moyens 'tmoy' de transfert pour chaque signal comme suit :

$t1moy = (t2+t1) / 2$
$t'1moy = (t'2+t'1) / 2$
$R1= (t'2-t'1) / (t2-t1)$

h'(t') est déduit de h(t) de la façon suivante :

$h (t1moy) = R1\ h'(t'1moy)$

La transformation proposée respecte l'égalité entre les surfaces, en effet:

Si $h(t1moy)\ (t2-t1) + h(t2moy)\ (t3-t2) =1$ alors :
$h'(t'1moy)\ (t'2-t'1) + h'(t'2moy)\ (t'3-t'2) =1$

II.1.2.2/ Détermination des temps de transferts.

La variation du débit est discrétisée en pas de temps égaux à ΔT à partir du temps d' injection du traceur.

- Débit constant-débits variables.

Le principe du calcul consiste à définir le temps T' (temps de transfert prenant en compte la variation du débit Q'(t)) à partir de T (temps de transfert au débit Q constant), l'algorithme consiste à déterminer n (entier) et k (réel inférieur à 1) tel que :

$$k\ (Q_{n+1}/Q)\ \Delta T + \sum_{i=1}^{n} (Q_i/Q)\ \Delta T = T \qquad \text{avec } k< 1$$

T' est donc définit par :

$$T' = (n+k)\ \Delta T$$

T : temps de transfert au débit Q.
T': temps de transfert aux débits Q_i.

Qi : débit entre (i-1)ΔT et iΔT

- Débits variables-débit constant.

La transformation débits variables,débit constant consiste à définir T à partir de T' de la façon suivante :
n et k sont déterminés par :

$n = INT (T'/\Delta T)$
$k = MOD(T'/\Delta T)$
INT : partie entière
MOD : modulo

T est définit comme suit:

$$T = \sum_{i=1}^{n} (Qi/Q)\,\Delta T + k\,(Qn+1/Q)\,\Delta T$$

II.2/ LES REPONSES IMPULSIONNELLE S PAR "MARCHE AU HASARD". (modèle RIMH)

Afin de tester les relations entre réponses impulsionnelles à débit variable, nous avons donc utilisé un modèle statistique monodimensionnel de dispersion basé sur le principe de résolution du transfert de masse par " Marche au hasard". (Chandrasekhar, 1943 in Bear; 1972; Scheidegger, 1954; De Jong J., 1958)
Les modèles informatiques de résolution du transfert de masse par "Marche au hasard" sont des modèles discrets en espace et en temps , ils sont généralement couplés à des modèles hydrodynamiques permettant d'établir un champ de vitesse sur un domaine maillé (Goblet, 1981; Ackerer, 1985; Dzikowski, 1988).
Pour notre étude, seul le temps est discrétisé, la distance du transfert étant constante.

II.2.1/ Le principe de détermination des réponses impulsionnelles (cas du transfert unidimensionnel)

II.2.1.1/ Principe du transfert des particules.

Un nombre Nt de particules est injecté dans le modèle au temps t=0, chaque particule va subir un déplacement convectif DC puis un déplacement dispersif DD dans la direction de l'écoulement monodimensionnel. Ces déplacements vont dépendre de la variation du débit en fonction du temps, celui-ci étant discrétisé en pas égaux à Δt.

- Déplacement convectif d'une particule .

$DC = u\,\Delta T$

DC : déplacement convectif pendant ΔT selon ox.

u : vitesse effective selon ox.

ΔT : pas de temps de la discrétisation.

- Déplacement dispersif d'une particule.

Nous avons utilisé l'approche d'Uffink (1983) :

$$DD = A\sqrt{6\,\alpha\,u\,\Delta T}$$

DD : déplacement dispersif

A : nombre aléatoire de la loi uniforme, compris entre 1 et -1.

α : dispersivité (m)

Remarque: Ne disposant pas de fonction génératrice de nombres aléatoires de la loi uniforme, nous avons utilisé un procédé permettant d'engendrer des nombres aléatoires par récurrence (Bouleau, 1986, p.74) du type :

$$A_{n+1} = a\,A_n \bmod m \qquad \text{avec } a = 8192 \text{ et } m = 67099547$$

A_n, A_{n+1} : nombre pseudo-aléatoire compris entre 0 et 1.

Le nombre aléatoire A de la loi uniforme définissant le déplacement dispersif étant compris entre -1 et 1, le déplacement dispersif DD d'une particule devient :

$$DD = (A_n - 0{,}5)\sqrt{24\ \alpha\ u\ \Delta T}$$

- Déplacement total.

$$DT = DC+DD$$

Ce modèle calcule la réponse impulsionnelle d'un système en fonction :

de la distance entrée-sortie
de la dispersivité (constante)
du temps moyen du transfert caractérisé par le débit d'écoulement en fonction du temps : $t = XS / Q$
S : surface d'écoulement .
X : distance entrée-sortie.
Q : débit d'écoulement variable.

II.2.1.2/ Définition de la réponse impulsionnelle.

$$h(t) = N / (Nt\ \Delta T)$$

N : nombre de particules ayant dépassé la distance entrée-sortie entre $t-(\Delta T/2)$ et $t+(\Delta T/2)$.
Nt : nombre total de particules entrées dans le système.
ΔT : pas de temps.

Remarque: Le nombre de particules injectées dans le modèle est égale à 1000 pour chaque simulation, le caractère aléatoire du déplacement des particules engendre une oscillation des valeurs de h(t) dépendante de la durée du pas de temps ΔT choisi. Nous avons donc utilisé un lissage de type moyenne mobile :

$$h\ (i\ \Delta T) = \frac{h\ (\ (i-1)\ \Delta T) + h\ (i\ \Delta T) + h(\ (i+1)\ \Delta T)}{3}$$

$h(i\Delta T)$: valeur de la réponse obtenue au temps $i\Delta T - \frac{\Delta T}{2}$

II.2.2 / Relations entre réponses impulsionnelles obtenues par le modèle R.I.M.H.

II.2.2.1/ A différents débits constants.

Dans un premier temps, sont analysées les relations entre réponses impulsionnelles pour des débits différents mais constants au cours du transfert.
Le modèle R.I.M.H a permis de calculer les réponses impulsionnelles correspondant à des temps moyens de transferts différents.

La relation : $Q_1\ t_1 = Q_2\ t_2$ (ou t_1 et t_2 sont les temps moyens respectifs aux débits constants Q_1 et Q_2), implique que le rapport t_1/t_2 est constant.

Nous avons donc calculé avec le modèle R.I.M.H, les réponses impulsionnelles pour des temps moyens de 3, 6, 9 et 12 heures , les pas de temps choisis étant respectivement de 0.5, 1, 1.5 et 2 heures. Dans chaque cas la distance entrée-sortie et la dispersivité sont constantes.

A partir du principe énoncé ci-dessus et des relations entre réponses impulsionnelles dans un tube, nous avons comparé la réponse impulsionnelle correspondant au temps moyen de trois heures avec les réponses impulsionnelles au même temps moyen obtenues à partir de la transformation des réponses impulsionnelles aux temps 6, 9 et 12 heures par les relations:

$$h_1(t) = (t_2/t_1)\ h_2(t')$$
$$t = (t_1/t_2)\ t'$$

$h_1(t)$: réponse impulsionnelle à l'instant t, en écoulement avec le débit Q1constant.
$h_2(t')$: réponse impulsionnelle à l'instant t', en écoulement avec le débit Q2 constant.

Les réponses sont comparées sous forme d' histogrammes (Fig.B13).

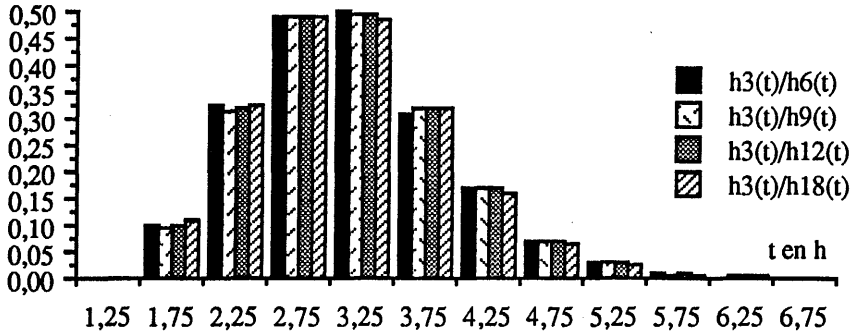


Fig.B13 : comparaison de la réponse impulsionnelle (tmoy = 3h) avec les réponses impulsionnelles transformées à partir des réponses impulsionnelles (tmoy = 6,tmoy = 9h, tmoy = 12h).

h_i (t) : réponse impulsionnelle correspondant à un temps moyen de transfert de 'i' heures.
h_i (t) / h_j (t) : transformée de la réponse impulsionnelle correspondant à un temps moyen de transfert de 'j' heures en la réponse impulsionnelle à un temps moyen de 'i' heures.

Ces résultats confirment ici la validité des relations entre les réponses, au niveau d'un milieu présentant une dispersivité constante et caractérisé par un transfert de masse conservatif répondant aux équations basées sur le principe gaussien du déplacement de particules.

II.2.2.2/ débit constant - débits variables.

Dans un deuxième temps la méthode de transformation débit constant - débit variable est testée pour des réponses impulsionnelles plurimodales.

- Réponses du modèle R.I.M.H

Le modèle R.I.M.H a permis de calculer une réponse impulsionnelle bimodale, chaque mode étant caractérisé par une dispersivité et un temps moyen de transfert différents, la vitesse étant identique et constante caractérisée par un débit d'écoulement égal à 100 l / s.
Ces modes correspondent à deux transferts en parallèle dans des systèmes monodimensionnels indépendants.

Caractéristiques des deux modes.

X= 1000 m (distance entrée-sortie)

Q = 100 l/s

1er mode:

α = 100 m

tm = 260 heures

masse restituée: 50%

2e mode:

α = 150 m

tm = 400 heures

masse restituée: 50%

- Transformation débit constant - débit variable.

La réponse impulsionnelle calculée par le modèle R.I.M.H à débit constant a été transformée par les relations établies pour l'écoulement dans un tube de façon à prendre en compte une variation de débit à partir du temps d' injection (Fig.B14). Les résultats sont représentés par la figure B15.

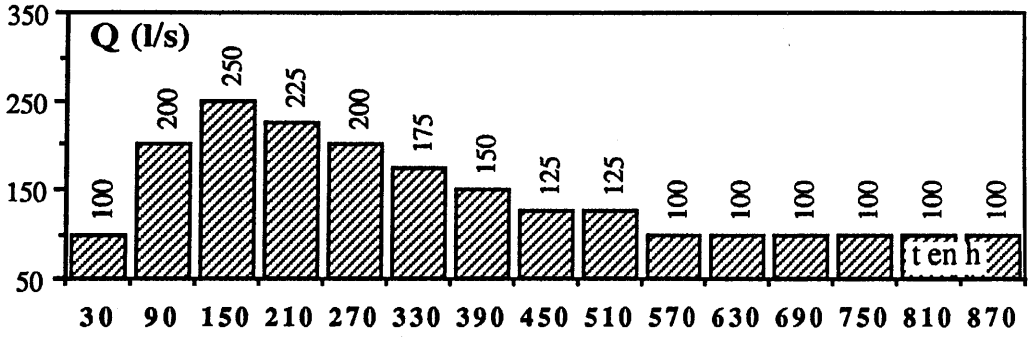


Fig.B14 : variation du débit à partir du temps d'injection.

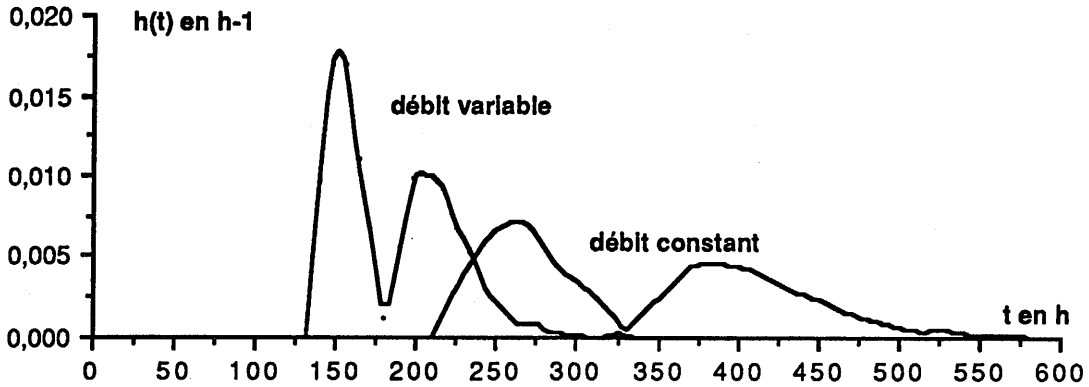


Fig.B15 : réponse impulsionnelle à débit variable transformée à partir de la réponse impulsionnelle à débit constant égal à 80 l/ s.

- Comparaison avec le modèle R.I.M.H

La réponse impulsionnelle obtenue(par transformation débit constant - débit variable) est comparée à la réponse impulsionnelle calculée par le modèle R.I.M.H prenant en compte la variation des vitesses en fonction du temps sur la distance entrée-sortie (Fig.B16). Cette variation des vitesses étant due à la variation du débit.(Fig.B15).

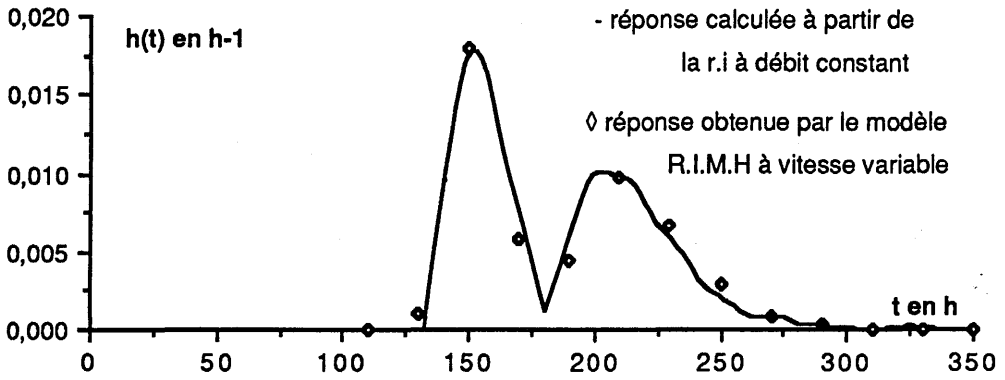


Fig.B16 : comparaison des réponses impulsionnelles obtenues par le modèle R.I.M.H et par transformation (débit constant-débit variable)

II.2.3/ Conclusion

Les deux méthodes utilisées montrent une bonne convergence des résultats. La méthode (par transformation) peut aussi être utilisée dans le cas inverse, afin de retrouver la réponse impulsionnelle à débit constant à partir d'une réponse impulsionnelle obtenue à débit variable. Les relations établies semblent donc pouvoir être étendues au transfert monodimensionnel en milieu poreux.Ces relations s'appliqueraient donc à tous les milieux aquifères (karstiques ou poreux) quelle que soit l'échelle du transport dans des conditions d'indépendance de l'espace occupé par le traceur au cours du transfert suivant l'état du système étudié.

III/ ETUDE DES TRANSFERTS EN COLONNE DE LABORATOIRE.

III.1/ EN TUBE VIDE.

Afin de valider les relations théoriques entre les réponses impulsionnelles et les débits d'écoulement dans les systèmes, nous avons monté un dispositif expérimental de laboratoire constitué de colonnes de plexiglas. Ce dispositif a été conçu en fonction des objectifs suivants :

- Respecter les conditions d'un système à volume constant soumis à des conditions de débits variables.
- Maîtriser parfaitement les débits d'écoulement
- Etre suffisamment complexe pour ne pas correspondre à un modèle de transfert défini par une solution analytique
- Offrir la possibilité d'obtenir un système vectoriel à entrées multiples.
- Pouvoir observer le transfert du traceur à l'intérieur des tubes.
- Pouvoir modifier le cheminement du traceur pour obtenir différents système-traçages.
- Etre représentatif en proportionnalité (longueur et temps de transfert, surface et débits d'écoulement) de systèmes naturels.

III.1.1/ Description du dispositif. (Fig.B17)

- Le système "colonnes"

Des tubes en plexiglas extrudé transparent d'une longueur de quatre mètres pour un diamètre interne respectivement de 3 et 4 cm ont permis de constituer le dispositif présenté par la figure B17.

Les deux tubes sont superposés en position horizontale, la partie supérieur du système "colonnes" est constitué par deux tubes en série de longueur égale à 210 et 187 cm (diamètre interne égale à 3 cm), ces tubes en série sont reliés entre eux et au tube inférieur de diamètre interne égal à 4 cm par un robinet trois voies dont le diamètre interne des sorties est égal à 0,9 cm. La longueur totale de ce dispositif est de 4 m. Un deuxième robinet 3 voies permet de relier dans la partie terminale du dispositif les tubes supérieurs et inférieurs. Le volume total du système ainsi constitué est approximativement de 7922 cm^3.

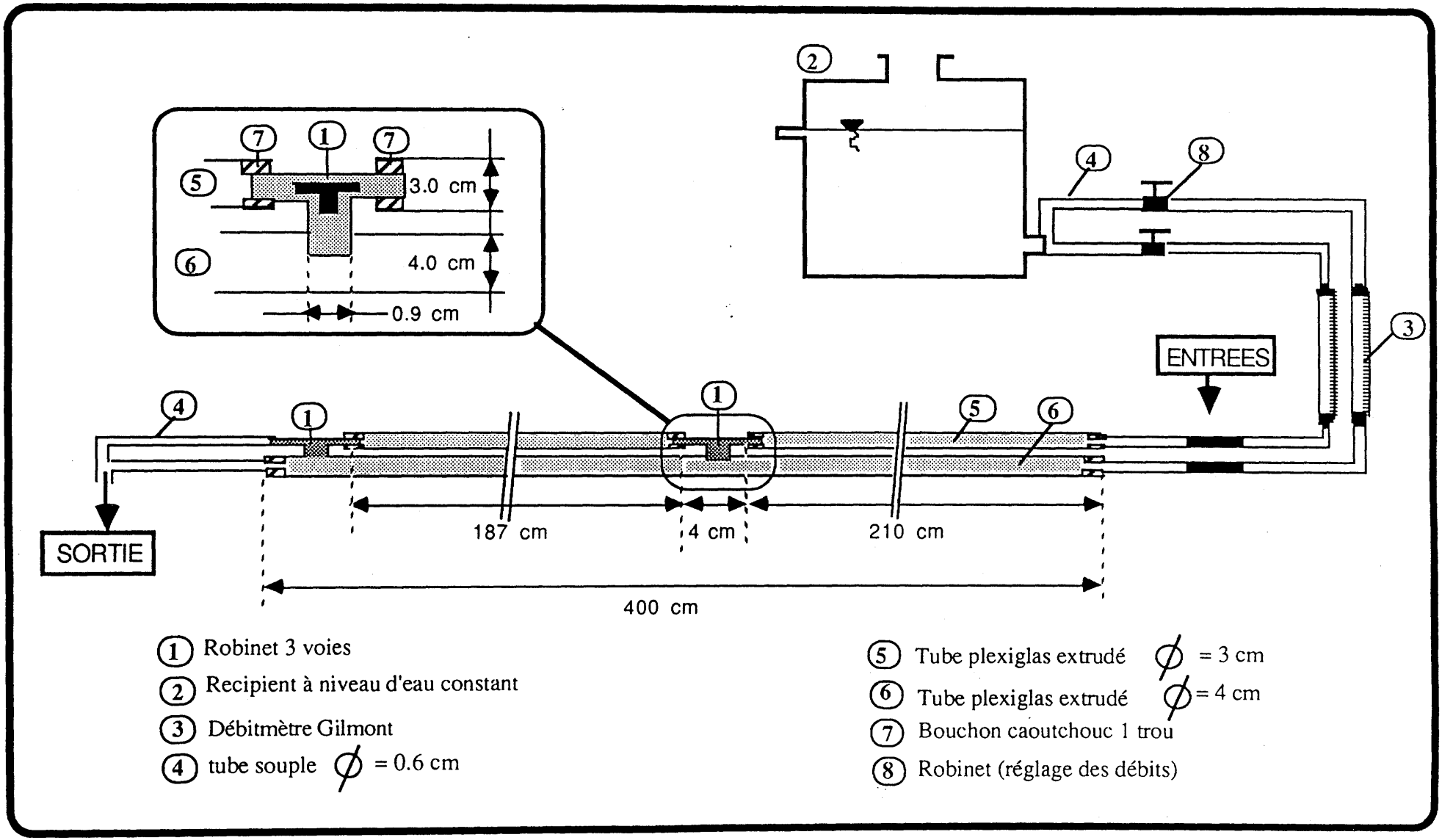


Fig.B17: Dispositif général de la colonne expérimentale.

- Alimentation en eau du dispositif.

Une bonbonne reçoit l'eau du réseau de distribution publique, un déversoir de trop plein permet de garder un niveau d'eau constant à l'intérieur du récïpient afin d'éviter des variations de débit par perte de charge. A la base de cette bonbonne une sortie permet d'alimenter par l'intermédiaire de 2 tubes de plastique souple d'un diamètre interne de 0,6 cm chacun des tubes du système "colonne".Chaque alimentation est équipé d'un robinet permettant le réglage du débit et d'un débitmètre Gilmont. Ce dispositif permet d'agir séparément sur les débits entrant dans le système.

- la sortie du dispositif.

La sortie est constituée de deux tubes de plastique souple reliés aux deux sorties du système "colonne". Le niveau de la sortie d'eau est supérieur au niveau de la colonne supérieure afin de garder le système sous pression. Les débits de sortie sont donc proportionnels aux débits mesurés en entrée en fonction du temps.

III.1.2/ Les traçages.

Le traceur fluorescent utilisé pour les traçages est l'uranine, l'avantage des traceurs colorés est de pouvoir suivre de visu le déplacement du colorant à travers les colonnes de plexiglas au cours des expériences. Le traceur est injecté en volume, par l'intermédiaire d'un seringue d'une contenance égale à 1 ml, dans l'un ou l'autre des tubes souples à 40 cm avant l'entrée du système "colonne". Les échantillons sont prélevés à la sortie des tubes souples terminant le dispositif. Ces derniers sont analysés au fluorimètre TURNER. Les caractéristiques et le fonctionnement de cet appareil de mesure ont déjà été présentés par ailleurs par Charrière (1974).

III.1.2.1/ Première série de traçages.

III.1.2.1.1/ Système - traçage

Pour cette première série, quatre traçages ont été réalisé pour le système représenté par la figure B18. Le volume du système est égal à 2896 cm^3.

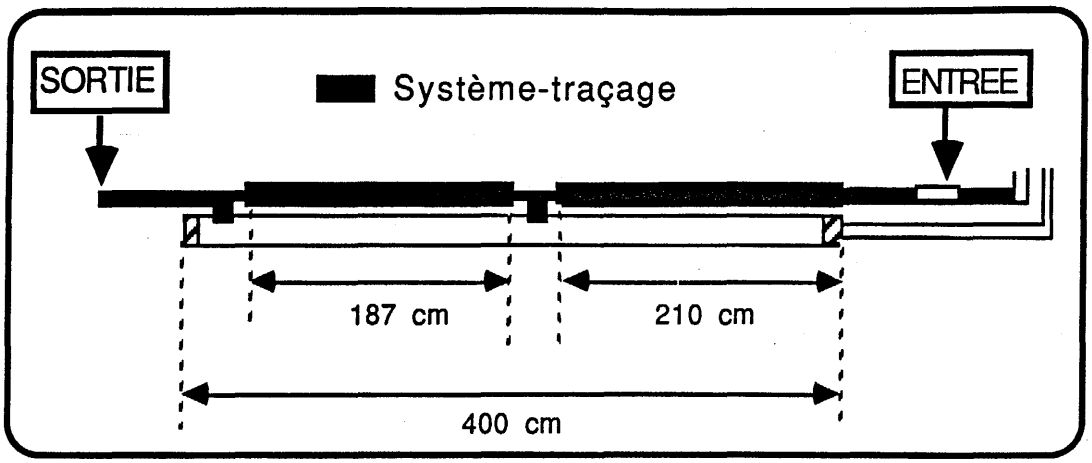


Fig.B18: Schéma du système occupé par le traceur (en noir).

L'injection d'uranine est effectuée dans le tube souple à l'entrée de la colonne supérieure, les robinets trois voies sont orientés afin que le traceur au cours de son transfert ne puisse occuper que la partie supérieure du système "colonne", les échantillons sont prélevés "en flux à la sortie du tube souple terminal.

III.1.2.1.2/ Réalisation des traçages et résultats. (Annexe 1)

Quatre traçages ont donc été réalisés pour différents débits d'écoulement, trois à débit constant et un à débit variable. Les débits constants d'écoulement sont respectivement 640, 320 et 148 ml/mn. Les courbes de restitution du traceur pour ces débits d'écoulement sont représentées par la figure B19. La restitution du traceur pour le traçage réalisé dans un écoulement à débit variable est représentée par la figure B20, où est associée la variation du débit en fonction du temps à partir du temps d'injection (t=0). Les caractéristiques de l'ensemble des expérimentations sont résumés dans le tableau B1.

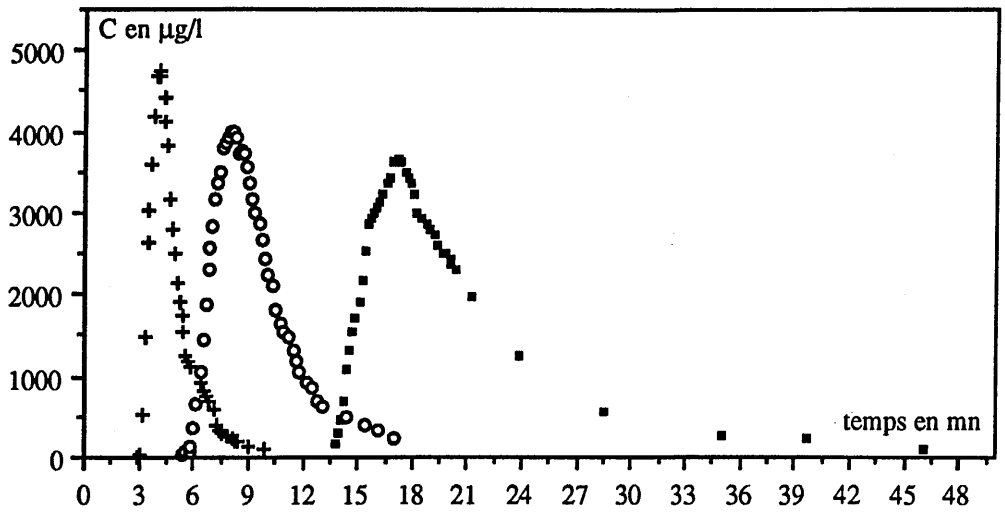


Fig.B19: Résultat des traçages n° 1,2 et 3 (1ere série). Croix: n° 3 (640 ml/mn),Cercles: n°2 (320 ml/mn), Carrés noirs: n°1(148 ml/mn)

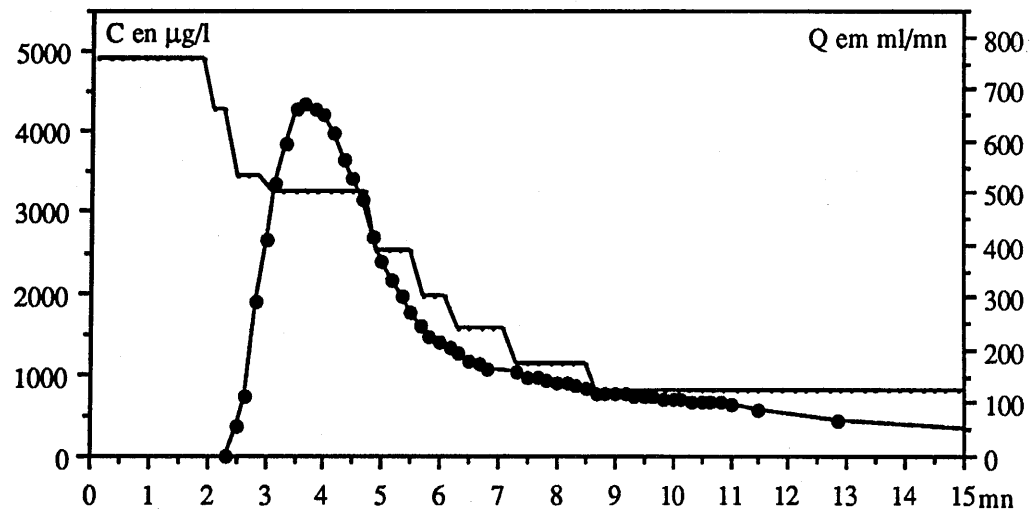


Fig.B20: Résultat du traçage n° 4 (1ere série). Ronds noirs: concentrations,trait continu: débit

Le tableau B1 présente également un ensemble de valeurs utiles définissant les constantes liées à la transformation des réponses impulsionnelles au temps modal. Ces valeurs sont: le rapport de la concentration maximale sur la masse restituée, le produit du temps modal et de la valeur maximale de la réponse impulsionnelle, le rapport de cette valeur maximale et du débit à l'instant correspondant ainsi que le volume V écoulé entre le temps d'injection (t=0) et le temps modal. Pour les expériences réalisées à débit constant, le traçage à 320 ml/mn présente pour ces caractéristiques des différences avec les deux autres.

Le coefficient adimensionnel de variation $Cv = \frac{\sigma}{t}$ varie entre 0,25 et 0,29 pour les traçages à débit constant, or pour le traçage à débit variable ce dernier égale à 0,48 présente une différence importante avec les précédents. Cette valeur peut être liée à la décroissance progressive du débit d'écoulement, la variation du débit d'écoulement modifierait donc les valeurs calculées de ces coefficients utilisés en particulier pour le calcul de la dispersivité α du milieu (Fried et Combarnous 1971) : $\alpha = \frac{X}{2} Cv^2$

N°	Débit Q (ml/mn)	ta (mn)	tm (mn)	Cmax (µg/l)	hmax (mn-1)	$\bar{t}$ (mn)
1	148	13,6	17,08	3669	0,119	21,93
2	320	5,5	8,06	3987	0,229	9,52
3	640	2,9	4,00	4757	0,501	4,82
4	variable	2,3	3,76	4333	0,382	4,98

N°	Mr (µg)	Cv	Cmax/ Mr	tm *hmax	hmax / Q(tm)	V(tm) (ml)
1	4646,72	0,29	0,79	2,04	0,81	2527,84
2	5578,56	0,25	0,71	1,84	0,72	2579,20
3	6000,05	0,26	0,79	2,00	0,78	2560,00
4	5659,78	0,48	0,77	1,44	0,75	2560,56

Tab.B1 : Caractéristiques des traçages de la première série. ta: temps d'arrivée,tm: temps modal, Mr: masse restituée, Cv: coefficient de variation adimensionnel, V(tm): volume écoulé au temps modal à partir de l'injection, $\bar{t}$: temps moyen de séjour, Cmax: concentration maximale, hmax: valeur maximale de la réponse impulsionnelle.

Le Tableau B2 présente la comparaison entre le volume calculé du système et le produit temps moyen de séjour, débit constant d'écoulement. Nous remarquons que globalement les volumes ainsi calculés correspondent au volume du système égal à 2896 cm^3. Néanmoins, plus le débit est important, plus le volume ainsi calculé se rapproche du volume du système. Il faut envisager ici un comportement du traceur différent en fonction du débit, lié soit à un effet de densité retardant la progression du traceur dans la colonne, soit une diffusion moléculaire dont les effets deviennent plus prépondérants à faible débit.

N°	Débit (Q ml/mn)	$V = Q\ \bar{t}$ (ml)	V / 2896
1	148	3241	1,12
2	320	3046	1,05
3	640	3080	1,06

Tab.B2: Comparaison entre le produit (Débit, temps moyen de séjour) et le volume du système.

III.1.2.1.3/ Transformation des réponses impulsionnelles.

(Les principes de transformation font référence au paragraphe II.1.2.)

- Transformations "débit constant - débit constant."

Les réponses impulsionnelles obtenues pour les débits de 148 et 320 ml/mn seront transformées pour un débit de 640 ml/mn. Les nouvelles réponses ainsi obtenues sont comparées au résultat expérimental du traçage réalisé pour un débit d'écoulement égal à 640 ml/mn.

Les taux de restitutions calculés r_i % de ces traçages en fonction des masses injectées M_i sont les suivants :

Traçage	N° 1 :	r_1 % = 92,9 ± 2,1 %	M_1 = 5000 µg	(148 ml/mn)
Traçage	N° 2 :	r_2 % = 102 ± 1,8 %	M_2 = 5500 µg	(320 ml/mn)
Traçage	N° 3 :	r_3 % = 92,3 ± 1,8 %	M_3 = 6500 µg	(640 ml/mn)

Les erreurs sur les taux de restitutions sont calculés pour une erreur de mesure sur les concentrations de ±2 µg/l, l'erreur moyenne commise sur la mesure des débits étant de ± 2%, l'erreur maximale de 6%.

Transformation " 148 ml/mn - 640 ml/mn"

La réponse impulsionnelle transformée pour un débit de 640 ml/mn à partir de la réponse obtenue pour un débit de 148 ml/mn (traçage N° 1) est comparée à solution expérimentale (traçage N°3) (Fig.B21). Les taux de restitution étant très proches, les réponses impulsionnelles calculées en fonction de la masse restituée présentent donc la même proportionnalité entre les

valeurs par rapport à la masse injectée. Les réponses impulsionnelles peuvent dans ces conditions être directement comparées.(Tab.B3)

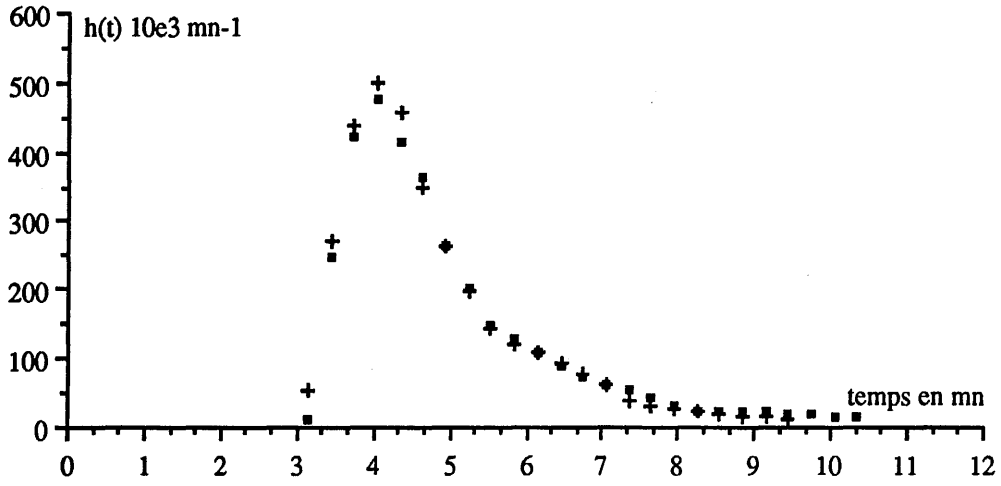


Fig.B21: Comparaison entre la réponse impulsionnelle (148 ml/mn) tranformée pour un débit de 640 ml/mn (Carrés noirs) et le résultat expérimental (Croix).

Reponse Impuls..	tm (mn)	h(tm) (mn-1)	% Mr (au tm)	$\bar{t}$ (mn)	$h(\bar{t})$ (mn-1)	% Mr (au $\bar{t}$)	Cv -----
640 ml/mn	4,00	0,510	38	4,79	0,309	66	0,26
transformée	4,05	0,476	35	4,80	0,312	62	0,28

Tab.B3 : Comparaisons de la réponse impulsionnelle (N° 1) transformée avec le résultat expérimental (N° 3)

Transformation "320 ml/mn - 640 ml/mn"

La même opération à été réalisée pour le traçage effectué à 320 ml/mn, la réponse impulsionnelle transformée pour un débit de 640 ml/mn est comparée à la réponse expérimentale obtenue à ce débit (Fig.B22). Les taux de restitutions étant différents, les valeurs de la réponse impulsionnelle transformée sont multipliées par 1,07 (rapport $\frac{r_2\%}{r_3\%}$).

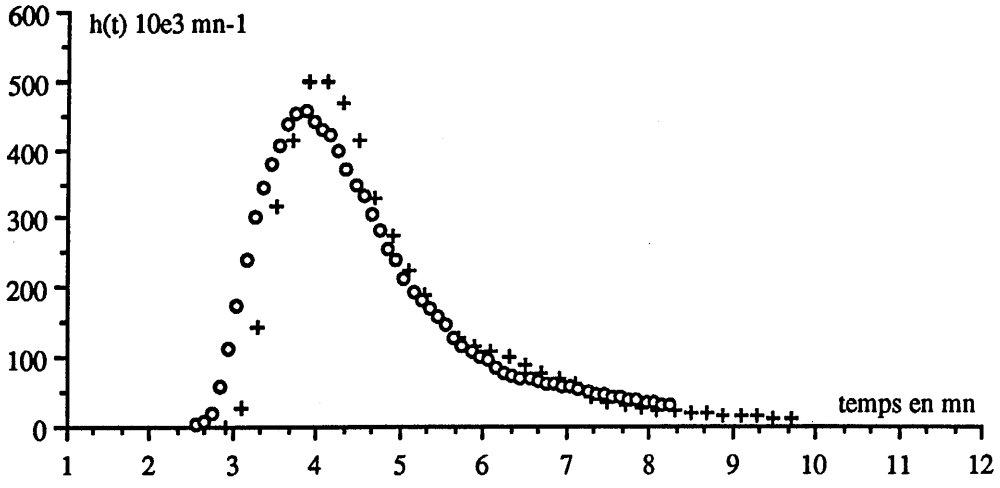


Fig.B22: Comparaison entre la réponse impulsionnelle (320 ml/mn) tranformée pour un débit de 640 ml/mn (ronds) et la solution expérimentale (Croix).

- Transformations "débit constant - débit variable."

Afin de tester sur les données expérimentales la transformation débit constant - débit variable, la réponse impulsionnelle obtenue pour 640 ml/mn (traçage N° 3) est transformée de façon à tenir compte de la variation de débit du traçage N° 4. La réponse ainsi obtenue est comparée à la solution expérimentale. (Fig.B23).

Le taux de restitution r_4 % du traçage N° 4 est estimé à 100 %, la masse injectée M_4 étant de 5500 µg. Les valeurs de la réponse transformée sont donc divisées par 1,07 (rapport $\frac{r_4\%}{r_3\%}$). Le tableau B4 présente quelques caractéristiques de comparaison de la réponse expérimentale avec la solution transformée.

Le coefficient adimensionnel de variation Cv pour la réponse transformée est égal à 0,45 alors que pour la réponse à 640 ml/mn, ce dernier était égal à 0,29, ceci montre que ce coefficient calculé dépend des conditions hydrodynamiques au cours du traçage. Le produit (temps modal*hmax) égal à 1,46 pour la réponse transformée dépend également de ces conditions.

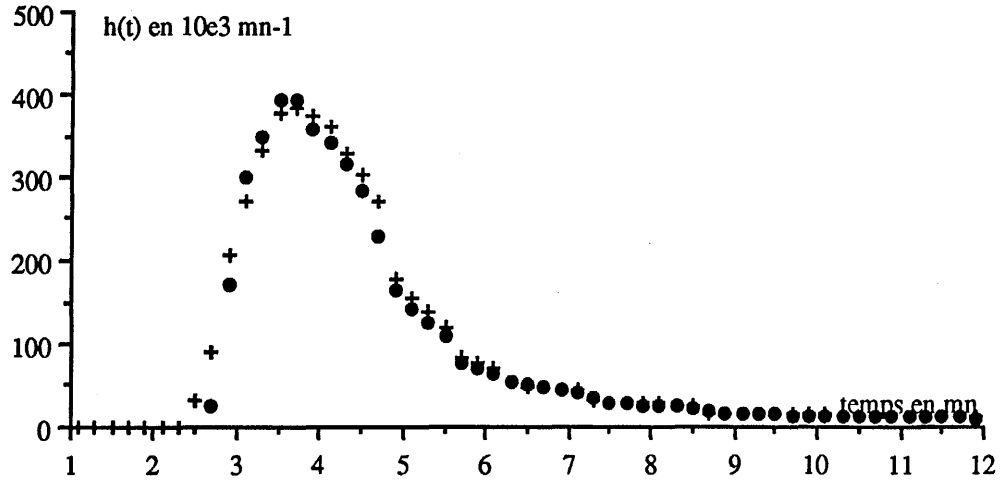


Fig.B23: Comparaison entre la réponse impulsionnelle (640 ml/mn) tranformée pour la variation de débit du traçage n°4 (Croix) et le résultat expérimental (Ronds noirs)

Réponse Impuls..	tm (mn)	h(tm) (mn-1)	% Mr (au tm)	$\bar{t}$ (mn)	$h(\bar{t})$ (mn-1)	% Mr (au $\bar{t}$)	Cv -----
Q variable	3,7	0,382	33,8	4,98	0,166	71	0,48
transformée	3,7	0,394	32,6	4,72	0,197	66	0,45

Tab.B4 : Comparaisons de la réponse impulsionnelle (N° 3) transformée avec la réponse expérimentale (N° 4)

III.1.2.1.4/ Conclusion

Cette première série de traçage a permis de vérifier les développements théoriques de transformation des réponses impulsionnelles. Nous avons ici utilisé les relations entre les réponses impulsionnelles basées sur les flux, et non pas les restitutions concentrations-temps, ceci est lié au fait que l'échantillonnage est effectué sur le volume total écoulé et fournit ainsi une concentration en flux à la sortie.

En ce qui concerne le traçage à 320 ml/mn, la transformation de la réponse impulsionnelle pour un débit de 640 ml/mn aboutit à un résultat criticable, nous attribuons ce dernier au mode d'injection du traceur dans le système qui n'est pas systématiquement identique d'un traçage à l'autre (injection par seringue) ainsi qu'à l'erreur commise sur le débit. Nous verrons avec la deuxième série de traçages que la méthode de transformation n'est valable que pour un

comportement identique du traceur dans le système, le comportement du traceur à l'entrée du système en particulier peut être un facteur de non linéarité du phénomène de transport.

III.1.2.2/ Deuxième série de traçages.

III.1.2.2.1/ Système - traçage

Pour cette deuxième série de traçage, le système est modifié à l'aide des robinets trois voies, le nouveau système-traçage est représenté par la figure B24. Le volume du système est égal à 6411 cm^3.

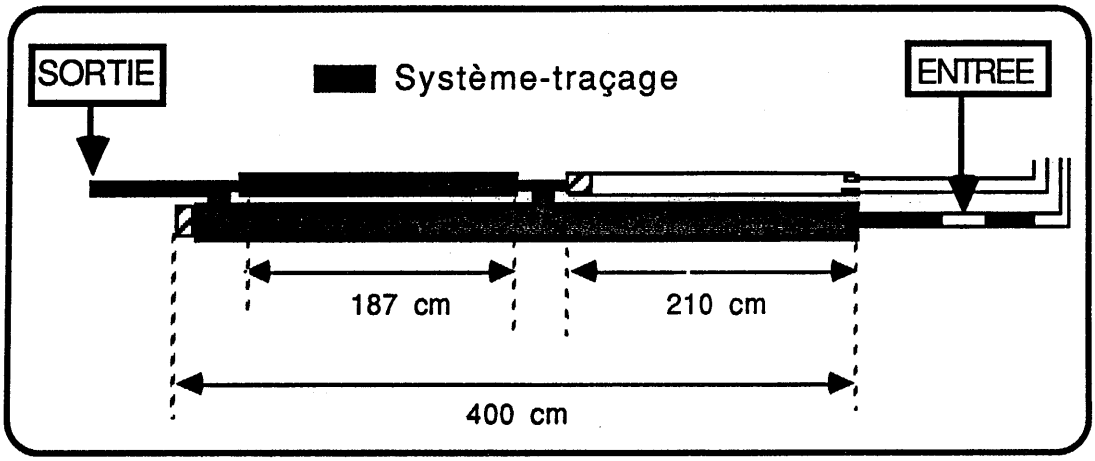


Fig.B24: Schéma du système occupé par le traceur (en noir).

L'injection d'uranine est effectuée à l'entrée du tube inférieur, le traceur est susceptible de remonter dans le deuxième tube supérieur par orientation du robinet trois voies central. Le robinet terminal du dispositif met en communication le tube inférieur avec le tube supérieur, l'échantillonage s'effectue à la sortie de ce dernier.

III.1.2.2.2/ Réalisation des traçages et résultats. (Annexe 2)

Pour cette deuxième série d'expériences, trois premiers traçages ont été réalisés, deux à débit constant et un à débit variable. Les masses injectées pour chaque réalisation ont été choisies égales à 10000 µg, la première expérience est effectuée pour un débit d'écoulement de 620 ml/mn, pour la deuxième au débit de 391 ml/mn un phénomène de densité lié à l'injection et à la

masse injectée trop importante s'est produit à l'entrée du tube inférieur. Ceci nous a conduit, pour le traçage à débit variable débutant par une valeur de 260 ml/mn, à injecter le traceur suffisamment lentement afin d'éviter tout phénomène de densité.
Enfin un quatrième traçage est réalisé avec un débit égal à 391 ml/mn pour une masse injectée égale à 4000 µg. Nous nous attacherons donc à décrire le comportement du traceur dans le système considéré afin de mieux comprendre les résultats des transformations des réponses impulsionnelles. Les caractéristiques des traçages sont synthétisés dans le tableau B5.

N°	Débit (ml/mn)	Mi (µg)	Mr (µg)	r%	$\bar{t}$ (mn)
1	620	10 000	9960	99,6	9,7
2	391	10 000	9750	97,5	17,1
3	variable	10 000	10580	105,8	12,0
4	391	4000	4038	100,9	16,1

N°	t_{harm} (mn)	hmax (mn-1)	Cmax (µg/l)	tm1 (mn)	2e mode temps	C
1	9,0	0,159	2613	7,58	10,8	2080
2	14,9	0,115	2935	11,5	23,0	1139
3	11,5	0,185	2501	10,17	11,8	2290
4	14,6	0,106	1095	11,75	17,8	796

Tab.B5: Caractéristiques des traçages de la deuxième série. Mi: masse injectée, Mr: masse restituée, r%: taux de restitution, $\bar{t}$: temps moyen de séjour, t_{harm}: moyenne harmonique des temps, hmax: valeur maximale de la réponse impulsionnelle, Cmax: concentration maximale, tm1: temps modal correspondant à Cmax..

Le tableau B6 présente la comparaison entre le produit (Débit constant, temps moyen de séjour) et le volume du système. Pour les traçages N° 1 et N° 4 les volumes calculés sont systématiquement inférieurs au volume du système. Pour le traçage N° 2 à 391 ml/mn, le volume calculé est supérieur au volume du système (6411 cm^3).

N°	Débit (Q ml/mn)	$V = Q\ \bar{t}$ (ml)	V / 6411
1	620	6014	0,94
2	391	6686	1,04
4	391	6295	0,98

Tab.B6: Comparaison entre le produit (Débit,temps moyen de séjour) et le volume du système.

Comportement du traceur à l'intérieur du système.

L'expérience effectuée à 620 ml/mn à montré (de visu) à l'intérieur du tube inférieur un nuage présentant un front parabolique cohérent avec la théorie de l'écoulement laminaire en tube rectiligne et lisse. Au niveau du robinet central à trois voies une partie du traceur à pénétré dans le tube supérieur après le passage du front parabolique . Les conséquences de ce comportement impliquent que la première quantité de traceur restitué est issue du tube inférieur. (Fig.B25). De la configuration du montage au niveau du robinet central résulte un apport limité de traceur dans le tube supérieur.(Axes d'écoulement à angle droit). Ceci peut être l'une des causes de la différence négative entre le volume calculé par le produit (débit, temps moyen de séjour) et le volume du système, le traceur n'occupant pas intégralement le volume du tube supérieur. La courbe de restitution du traceur à la sortie (Fig.B26) présente une bimodalité résultant du transfert dans les deux tubes.

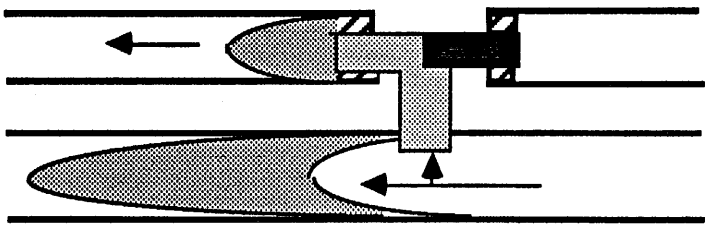


Fig.B25: Représentation schématique des nuages de traceur au niveau du robinet trois voies central.

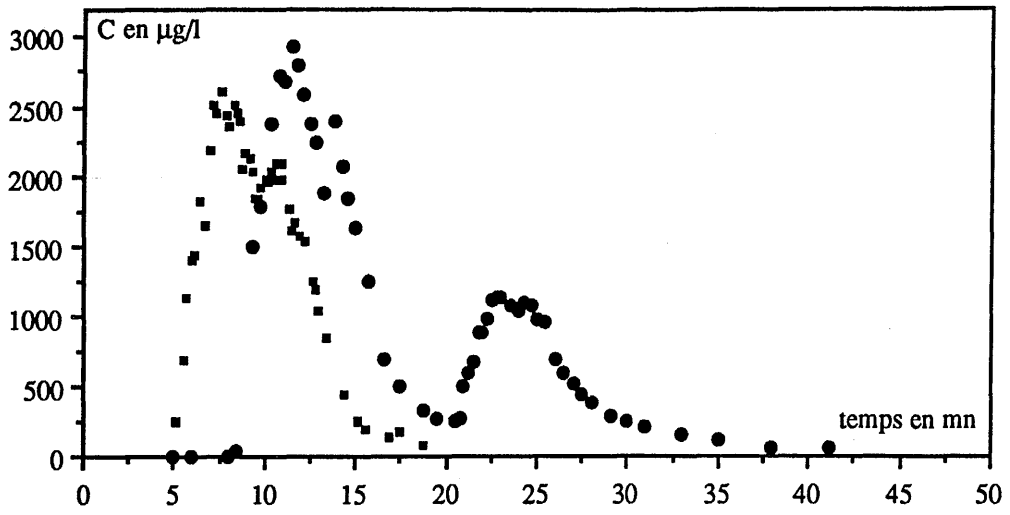


Fig.B26: Résultat des traçages n° 1 et 2 (2e série). Carrés noirs: n° 1 (620 ml/mn),Ronds noirs: n°2 (391 ml/mn)

Pour l'expérience réalisée à 391 ml/mn avec une masse injectée de 10000 µg, un phénomène de densité, essentiellement à l'entrée du tube inférieur, a entrainé le déplacement d'une quantité importante de traceur dans le fond du tube (Fig.B27). Le volume calculé par le produit (débit, temps moyen de séjour) est par conséquent surestimé et lié au retard du traceur déplacé au niveau des faibles vitesses de la partie inférieur du tube. Ce phénomène explique également la faible quantité de traceur entrainé dans le tube supérieur. La courbe d'évolution des concentrations en fonction du temps (Fig.26) présente un mode à 23 mn lié au phénomène de densité.

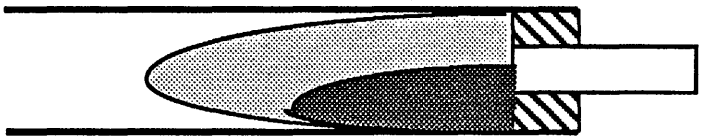


Fig.B27: Représentation schématique du nuage de traceur (effet de densité) à l'entrée du tube inférieur.

Une deuxième expérience a été réalisée au même débit mais pour une masse injectée égale à 2500 µg. Dans cette condition de débit, le comportement apparent du traceur est identique à celui de l'expérience réalisé à 620 ml/mn. Les restitutions des deux traçages au débit de 391 ml/mn sont présentées par la figure B28.

Pour le traçage réalisé à débit variable (Fig.B29), la manipulation simultannée du débit et l'échantilonnage ne nous ont pas permis d'apprécier visuellement le comportement du traceur.

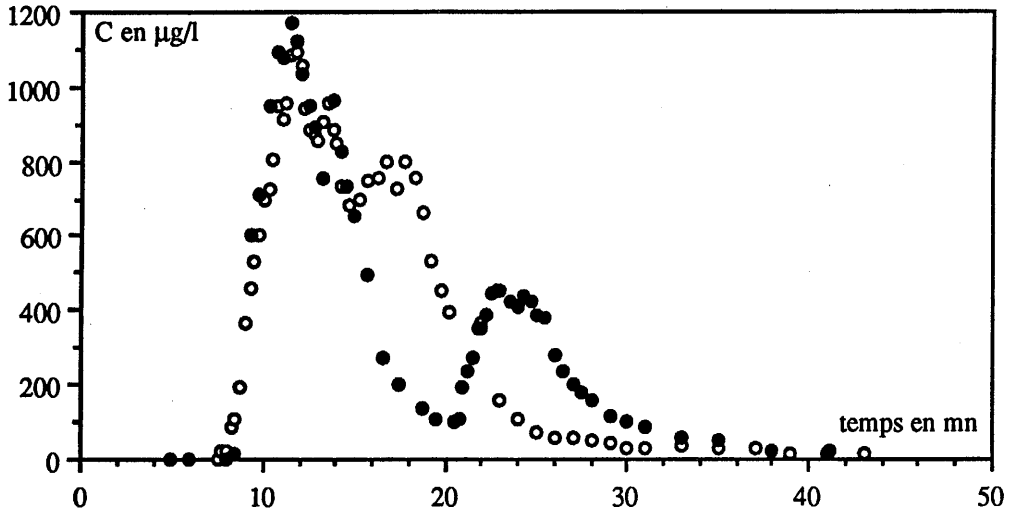


Fig.B28: Résultat des traçages n° 2 et 4 (2e série). Cercles: n° 4 (391 ml/mn), Ronds noirs: n° 2 (391 ml/mn, concentrations divisées par 2,5)

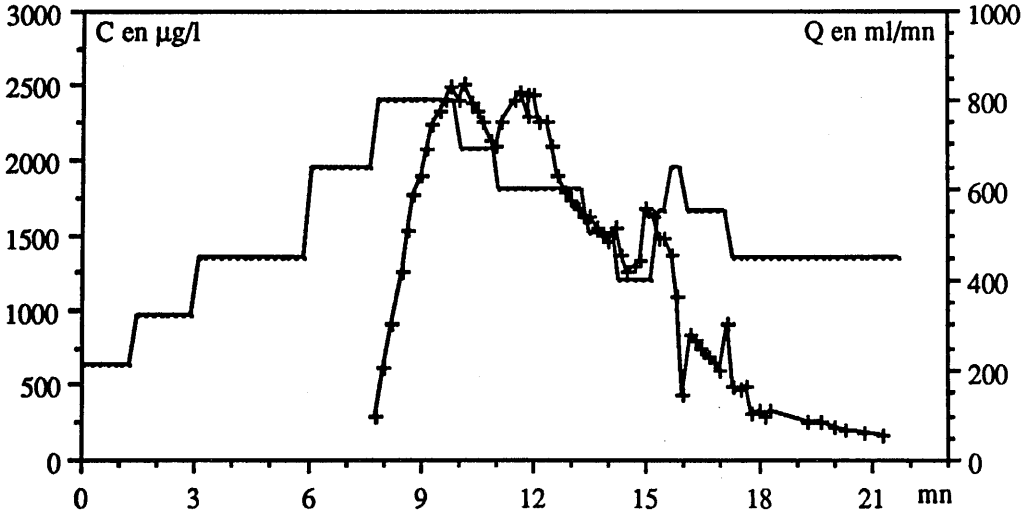


Fig.B29: Résultat du traçage n° 3 (2e série). Croix: concentrations,trait continu: débit

III.1.2.2.3/ Transformation des réponses impulsionnelles.

Deux transformations des réponses impulsionnelles en fonction des débits ont été réalisées, la première est la tranformation de la réponse obtenue au traçage N° 4 (391 ml/mn, 2500 µg) pour un débit de 620 ml/mn (N°1). Cette réponse transformée est comparée au résultat expérimental à 620 ml/mn (Fig.B30). La deuxième opération effectuée concerne la transformation de la réponse impulsionnelle obtenue à débit variable (N°3) pour un débit de 620 ml/mn. Les résultats sont comparées dans la figure B31.

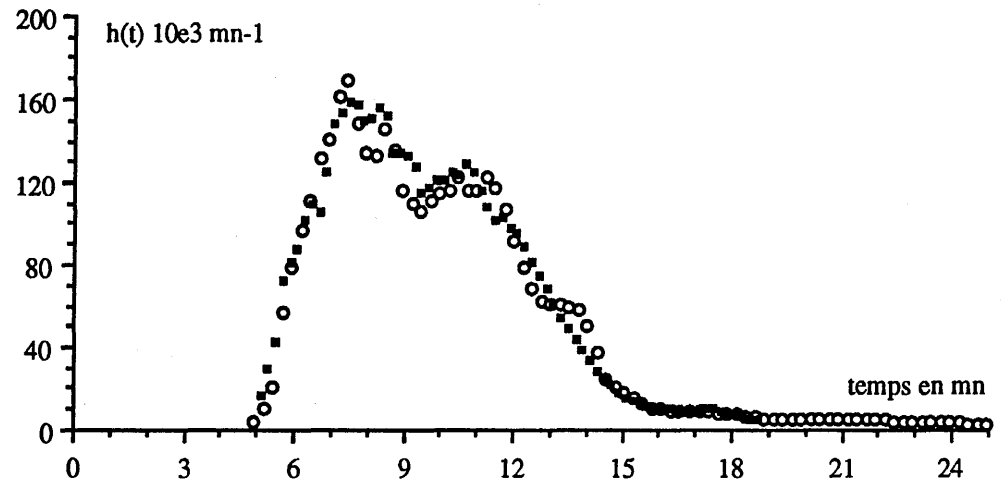


Fig.B30: Comparaison entre la réponse impulsionnelle (391 ml/mn) tranformée pour un débit de 620 ml/mn (Cercles) et le résultat expérimental (Carrés noirs)

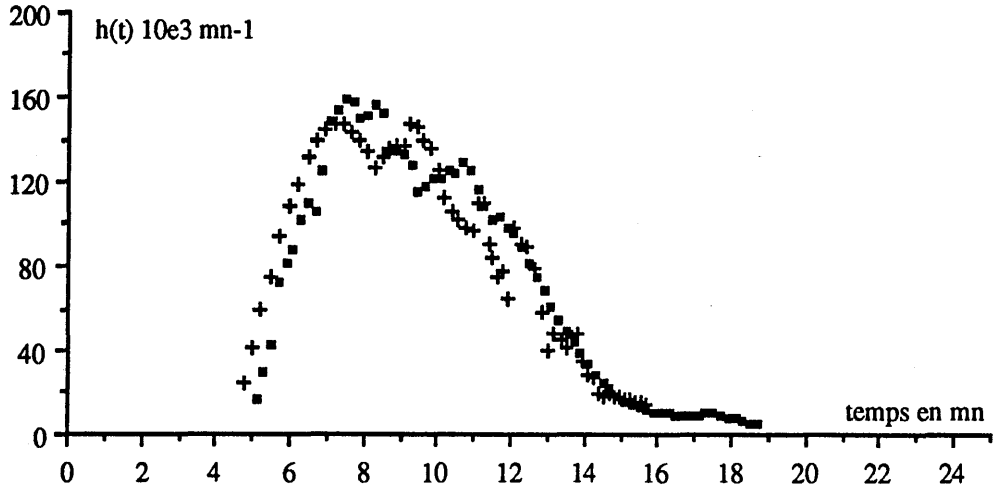


Fig.B31: Comparaison entre la réponse à débit variable (traçage n°3) tranformée pour un débit de 620 ml/mn (Croix) et le résultat expérimental (Carrés)

III.1.2.2.4/ Conclusion.

Le première observation faite sur cette deuxième série de traçage est la présence d'une bimodalité concernant la restitution du traceur. Cette bimodalité est lié à l'écoulement dans les deux tubes superposés pour les traçages N°1 et N°4, le comportement du traceur a montré que la première quantité restituée est issue du tube de plus gros diamètre (4 cm). La plurimodalité des restitutions de traceur n'est pas toujours en relation avec des cheminements différents, le traçage N° 2 montre qu'un phénomène de densité peut en être responsable.
Le volume calculé par le produit (débit, temps moyen de séjour) est proche du volume du système malgré la complexité des restitutions.
Enfin, les comparaisons après transformation des réponses impulsionnelles aboutissent à un résultat satisfaisant pour des comportements semblables d'un traceur dans un système à volume constant.

III.2/ EN MILIEU GRANULAIRE.

Porel (1988) a effectué des traçages sur colonne horizontale remplie de granules de craie. Les courbes d'évolution concentrations - temps correspondant à différents débits constants au cours des traçages entre l'entrée et la sortie du tube, ont permis de tester les méthodes de transformation pour un transfert en milieu granulaire présentant une double porosité.

III.2.1/ Description du dispositif expérimental.

La colonne est un tube en plexiglass transparent de deux mètres de longueur, son diamètre interne est de neuf centimètres.
Cette colonne est remplie de granules de craie dont la granulométrie est comprise entre 2 et 3,15 mm.La porosité matricielle de cette craie est estimée à 41,6% et la porosité intergrains à 45%.Dans ces conditions la porosité totale est égale à 67,9%. Le volume du système en ne tenant compte que de la porosité intergrains est égal à 6329,9 cm^3; en fonction de la porosité totale, il est égal 9551 cm^3.

Le traceur utilisé pour les traçages est l'uranine.Les échantillons prélevés ont été analysés au fluorimètre TURNER.

III.2.2/ Transformation des réponses impulsionnelles.

Les caractéristiques des différents traçages réalisés par Porel sont résumés par le tableau B7. Nous avons repris ici les résultats et la nomenclature des expériences de Porel (1988) pour les traçages réalisés en colonne remplie de granules de craie.

N°	Mi µg	Q ml/mn	Cmax ppb	$\bar{t}$	r%	Cmax/Mi	Q $\bar{t}$
XVIII	4680	63,18	526	115,11	73,38	0,112	7267
XIX	4920	89,16	572	90,76	79,09	0,116	8092
XX	5560	120,00	684	65,98	77,14	0,123	7918
XXI	4920	148,80	620	60,46	79,11	0,126	8948
XXIII	4920	198,00	1024	40,86	93,74	0,208	8090
XXIV	4740	256,80	870	36,24	84,42	0,183	9306
XXV	5160	342,60	1400	24,24	87,92	0,271	8305

Tab.B7: Principaux résultats de traçages effectués en milieu granulaire crayeux. (d'après Porel 1988).Cmax: concentration maximale.Mi: masse injectée. r%: taux de restitution. Q: débit d'écoulement.

Les méthodes de transformation sont appliquées pour les réponses présentant, d'une part les mêmes rapports entre concentration maximale et masse injectée , et d'autre part, des produits similaires entre le débit d'écoulement et le temps modal (Tab.B8). Les réponses offrant ces conditions sont respectivement les couples de traçages (XIX, XXI) et (XXII, XXIV) (cf double encadrements Tab.B7 et B8). Ce choix est imposé par les relations entre réponses impulsionnelles mises en évidence précédemment, ces traçages définissent à priori la meilleure comparaison en fonction des débits d'écoulement.

N°	XVIII	XIX	XX	XXI	XXIII	XXIV	XXV
Q ml/mn	63,18	89,16	120,00	148,80	198,00	256,80	342,60
tm mn	67,0	45,0	32,0	25,8	17,5	14,8	10,5
Q tm ml	4233	4012	3840	3839	3465	3800	3597

Tab.B8: détermination du volume défini par le produit entre débit et temps modal.

Nous avons donc transformé la réponse impulsionnelle du système défini pour un débit de 148,8 cm^3/mn afin d'obtenir une réponse impulsionnelle au débit de 89,16 cm^3/mn . Cette réponse impulsionnelle "transformée" est comparée au résultat expérimental à 148,8 ml/mn après reinterprétation des traçages.(Fig.B32 et Tab.B9)

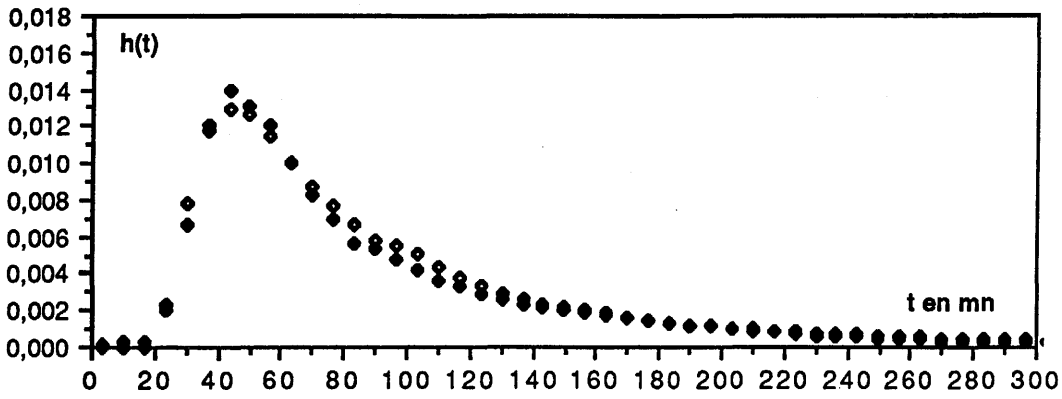


Fig.B32: comparaison de la réponse impulsionnelle transformée au résultat expérimental.♦ h(t) (Q=89,16 ml/mn) obtenue à partir de h(t) (Q=148 ml/mn),◊h(t) (Q=89,16ml/mn) expérimentale

Reponse Impuls..	tm (mn)	h(tm) (mn-1)	% Mr (au tm)	$\bar{t}$ (mn)	h($\bar{t}$) (mn-1)	% Mr (au $\bar{t}$)
98,16 ml/mn	43,3	0,0129	23,71	88,65	0,0059	62,51
transformée	43,3	0,0140	23,15	87,87	0,0055	61,53

Tab.B9: Comparaison entre les réponses impulsionnelles, expérimentale (Q=89,16 ml/mn) et transformée.

La deuxième opération effectuée est la transformation de la réponse pour un débit 256,8 ml/mn afin d'obtenir la réponse pour un débit de 198 ml/mn (Fig.B33 et Tab.B10).

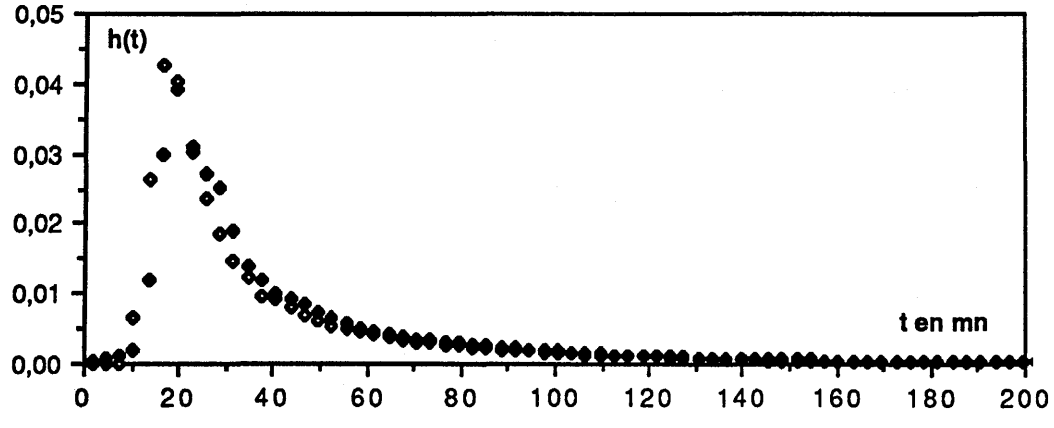


Fig.B33 : comparaison de la réponse impulsionnelle transformée avec la réponse expérimentale.

♦h(t) (Q=198 ml/mn) obtenue à partir de h(t) (Q=256,8 ml/mn),◊ h(t) (Q=198 ml/mn) expérimentale

Reponse Impuls..	tm (mn)	h(tm) (mn-1)	% Mr (au tm)	$\bar{t}$ (mn)	h($\bar{t}$) (mn-1)	% Mr (au $\bar{t}$)
198 ml/mn	16,5	0,0427	21	40,5	0,0098	65
transformée	19,4	0,0392	22	46,5	0,0074	56

Tab.B10: Différence entre réponse impulsionnelle expérimentale (Q=89,16 ml/mn) et transformée.

III.2.3/ Conclusions.

La méthode de transformation "débit constant-débit constant" ne semble applicable que pour des différences de débits relativement peu importantes pour ce milieu granulaire crayeux. En effet les phénomènes d'adsorption, de diffusion moléculaire peuvent être des facteurs de non linéarité dépendant du débit d'écoulement.

Porel attribue la forme de ces courbes à la superposition de deux écoulements caractérisés par des paramètres de transport différents. Ce phénomène de superposition rend délicat la détermination des paramètres du transport. La méthode de transformation "débit constant - débit constant " entre les traçages choisis montre que ce phénomène peut être considéré comme linéaire pour une différence de débit relativement faible.

Les dispersivités calculées par Porel à partir des traçages (XIX,XXI) et (XXIII,XXIV) selon les huit méthodes suivantes,

- Méthode dite "de l'écart type" (Fried et Combarnous, 1971)
- Méthode dite "de la variance réduite" (Fried et Combarnous,1971)
- Méthode "inverfc" (Gupta et al,1980)
- Méthode des abaques de Sauty (1977)
- Méthode des abaques de Crampon (1987)
- Méthode graphique linéaire (Wang et al., 1987)
-Méthode D.A.P de Porel (1988)

montrent que des différences existent selon la méthode d'identification utilisée. Toutefois, les valeurs pour le couple de traçages (XXIII,XXIV) sont très proches quelle que soit la méthode. Pour le couple (XIX,XXI), seules les méthodes "inverfc" et des abaques de Crampon montrent une dispersivité voisine.

Notons également que les débits expérimentaux sont des débits moyens; en effet ceux-ci varient dans une gamme d'environ 5% à 8% entre le début et la fin du traçage, ce qui rend délicate la comparaison de réponses impulsionnelles pour de très fortes différences de débits.

IV/ LE MODELE CONVOX.

A l'issue des recherches théoriques sur les relations entre réponses impulsionnelles ou les restitutions de traceur et le débit d'écoulement à l'intérieur d'un système à volume constant, un modèle informatique appelé CONVOX a été développé. Il permet l'application rapide des transformations de restitution en fonction de différentes conditions hydrodynamiques.
Les opérations de convolution d'entrées successives autorisées dans le cadre de systèmes stationnaires seront ici possibles pour un système soumis à des conditions hydrodynamiques variables. On transforme une réponse impulsionnelle de référence à un débit variable ou constant, en une réponse impulsionnelle pour chaque nouvelle condition hydrodynamique entre les temps des différentes entrées (injections) et sorties de traceur du système.
Ce paragraphe a pour but de présenter le programme CONVOX, les particularités de la mise en oeuvre d'une telle programmation, ainsi que quelques comportements types de restitution en fonction de conditions hydrodynamiques variables.

IV.1/ CONCEPTION GENERALE DU PROGRAMME.

Le modèle est basé sur l'hypothèse qu'une masse de traceur injectée à l'entrée d'un système sous pression ou à volume constant a la même répartition dans l'espace à une distance donnée quelle que soit la variation du débit de sortie existante au cours de son transfert. Dans ces conditions, pour un transfert de masse conservatif sans phénomène de sorption ou de diffusion, la forme géométrique du nuage de traceur est indépendante du débit et les concentrations en chaque point ne dépendent que de la masse injectée.

IV.1.1/ Relations caractéristiques.

Les relations caractéristiques utilisées entre deux traçages réalisés dans des conditions hydrodynamiques différentes sont:

$$Vs_{o,ta} = V's_{o,t'a} \quad <=> \quad \int_{o}^{ta} Qs(t)\,dt = \int_{o}^{t'a} Q's(t)\,dt \qquad (35)$$

$Vs_{o,ta}$: Volume écoulé à la sortie du système traçage entre t=0(temps d'injection) et ta.
ta : temps de première arrivée du traceur pour les conditions Qs(t)
Qs(t) : débit à la sortie du système.
$Vs_{o,t'a}$: Volume écoulé à la sortie du système traçage entre t=0(temps d'injection) et t'a.
t'a : temps de première arrivée du traceur pour les conditions Q's(t)

Q's(t) : débit à la sortie du système.
Après le temps de première arrivée :

$$Vs_{ta,t1} = Vs_{t'a,t'1} \quad <=> \quad \int_{ta}^{t1} Qs(t)\,dt = \int_{t'a}^{t'1} Q's(t)\,dt \qquad (36)$$

$Vs_{ta,t1}$: volume écoulé à la sortie entre les temps ta et t_1
$V's_{ta',t'1}$: Volume écoulé à la sortie entre les temps t'a et t'_1

Si pour une masse injectée m à l'entrée dans les conditions Qs(t), $Cs(t_1)$ est la concentration au temps t_1 alors :

$$Cs'(t'1) = \frac{m'}{m} Cs(t1) \qquad (37)$$

avec : $ta \leq t_1$ et $t'a \leq t'_1$

Cs'(t'1) : concentration au tempst'1 dans les conditions Q's(t) et pour une masse injectée m'

IV.1.2/ Effet d'une dilution externe au système-traçage.

Lorsque le débit mesuré à la sortie Q(t) d'un système n'est pas le débit du système traçage Qs(t), une dilution différentielle se produit en fonction des différentes conditions hydrodynamiques. Nous supposons donc qu'une certaine quantité du volume écoulé à la sortie ne participe pas au transfert du traceur et apporte une dilution des concentrations de sortie.

Cette effet de dilution est pris en compte de la façon suivante :

$$Rd(t) = \frac{Q(t)}{Qs(t)} = \frac{Cs(t)}{C(t)} \quad (38) \qquad \text{et} \qquad Rd'(t) = \frac{Q'(t)}{Qs'(t)} = \frac{Cs'(t)}{C'(t)} \quad (39)$$

$Rd(t) \geq 1$ et $Rd'(t) \geq 1$

Rd(t) : variation du taux de dilution en fonction du temps dans les conditions Q(t)
Rd'(t) : variation du taux de dilution en fonction du temps dans les conditions Q'(t)

Dans ces conditions (35), (36) et (37) deviennent respectivement:

$$\int_{o}^{ta} \frac{Q(t)\,dt}{Rd(t)} = \int_{o}^{t'a} \frac{Q'(t)\,dt}{Rd'(t)} \qquad (40)$$

$$\int_{ta}^{t1} \frac{Q(t)\,dt}{Rd(t)} = \int_{t'a}^{t'1} \frac{Q'(t)\,dt}{Rd'(t)} \qquad (41)$$

$$C'(t'_1) = C(t_1)\,\frac{m'\,Rd(t)}{m\;Rd'(t)} \qquad (42)$$

L'équation (42) montre que la répartition des concentrations dans le nuage va dépendre de la quantité de masse injectée mais également du rapport des taux de dilution affectant chaque concentration en fonction du temps, le phénomène physique de la dilution à la sortie du système étant supposé instantané.

IV.2/ ARCHITECTURE GENERALE DU PROGRAMME.

Une première version du programme (disponible sur disquette) a été écrite en FORTRAN 77 sur MACINTOSH SE, le format des différents fichiers de données et de résultats étant compatibles avec les principaux tableurs et logiciels graphiques de ce type de machine (Excel, CricketGraph 1.1), cette version est disponible en disquette. Le programme que nous allons détailler dans ce mémoire est une nouvelle version PC écrite en langage C (normes ANSI). Il a été élaboré avec la participation de Frédérick Delay, Maitre de conférence en informatique géologique à l'Université de Paris VI.

Dans la suite de cet exposé, le traçage de référence sera appelé RTT (reference tracer test) et le traçage calculé en fonction des nouvelles conditions hydrodynamiques STT (simulated tracer test). Les temps sont référencés à partir de l' injection du traceur (t=0) pour le RTT et à partir de la première masse injectée (t=0) pour le STT, ce dernier pouvant être le résultat d'une injection continue simulée par une succession d'entrées massiques dans le temps.

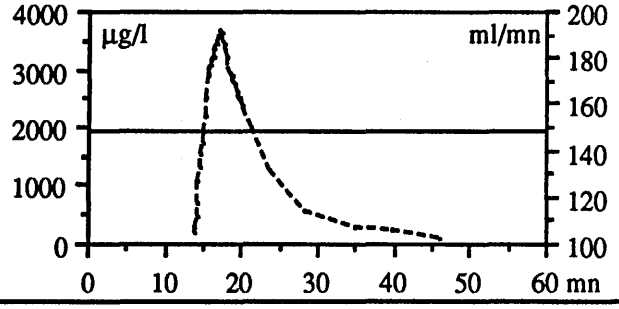
Le programme détaillé est présenté à la fin de ce chapitre (pp.96 - 114) sous la forme d'arbres programmatiques qui présentent les algorithmes sans s'appuyer sur les spécificités d'un langage de programmation particulier; ainsi tout programmeur peut reprendre ce travail et

l'adapter à ses propres méthodes. Un glossaire des variables utilisées dans la programmation est également ajouté.

IV.3/ QUELQUES EXEMPLES DE RESTITUTIONS SIMULEES PAR LE PROGRAMME CONVOX.

Afin de conclure sur le modèle CONVOX, nous présentons quelques résultats simulés par le programme. La restitution prise en référence (RTT) est celle du traçage n° 1 en tube vide (1ère serie de traçage, § III.1.2.1.2) pour une masse injectée de 5 000 µg et pour un débit d'écoulement de 148 ml/mn. A partir de cette référence, deux types d'injections sont simulés (instantanée et en créneau). L'injection en créneau consiste à entrer dans le modèle 10 masses de 1000 µg à une minute d'intervalle chacune. On réalise donc un créneau d'injection de 10 mn pour une masse totale de 10 000 µg. Pour chaque type d'injection, les restitutions pour trois différents conditions hydrodynamiques à partir de la première masse injectée sont proposées: Décrue, Crue et débits constants. L'ensemble de ces résultats est rassemblé dans le tableau B11. Un effet de dilution externe est pris en compte pour les restitutions [11] et [12] (Tab.B11). Pour la restitution [11] , le débit du STT représente 84 % du débit mesuré égal à 148 ml/mn. Pour la restitution [12], le débit du RTT représente 80 % du débit mesuré égale à 148 ml/mn.

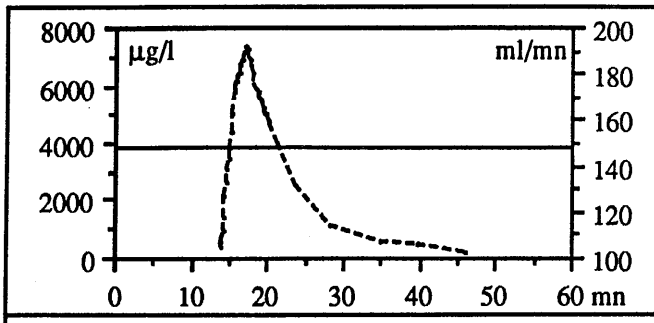
TRACAGE DE REFERENCE



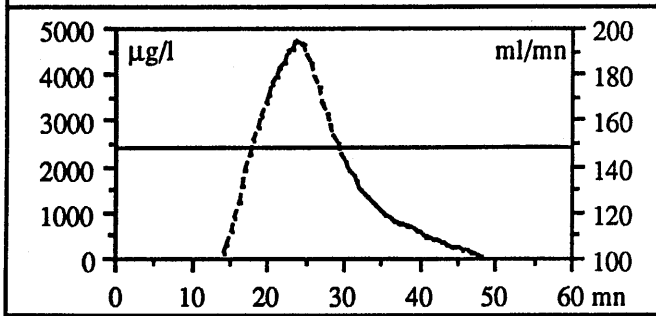
Injection instantanée.	[1]
Nb masse:	1
Masse totale (µg):	5000
Durée d'injection (mn):	----
Pas d'injection (mn):	----
Masse par injection (µg) :	5000

SIMULATIONS

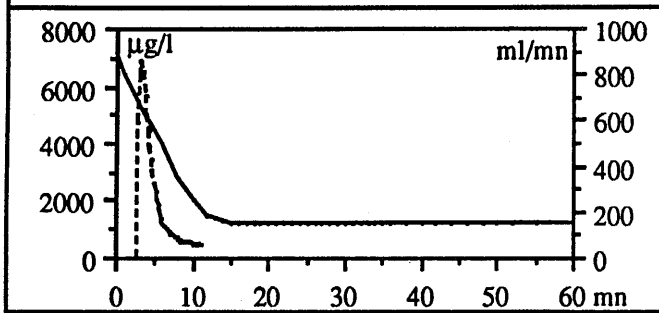
REPONSES (- - -) DEBIT (———)	CONDITIONS D'INJECTION



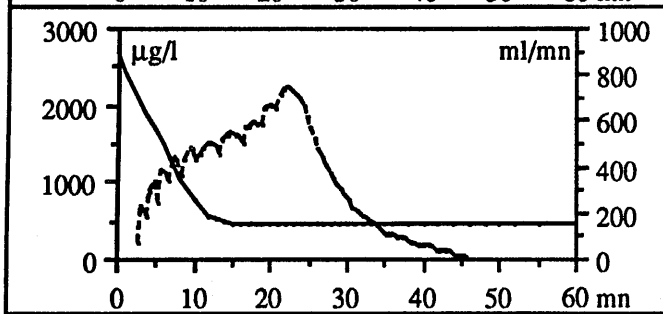
Injection instantanée.	2
Nb masse:	1
Masse totale (µg):	10000
Durée d'injection (mn):	-----
Pas d'injection (mn):	-----
Masse par injection (µg) :	10000



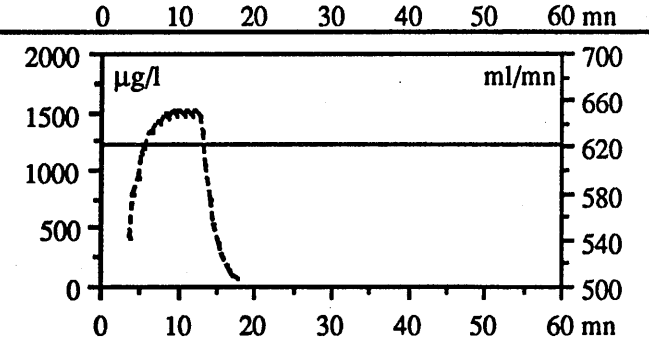
Injection en créneau.	3
Nb masse:	10
Masse totale (µg):	10000
Durée d'injection (mn):	10
Pas d'injection (mn):	1
Masse par injection (µg) :	1000



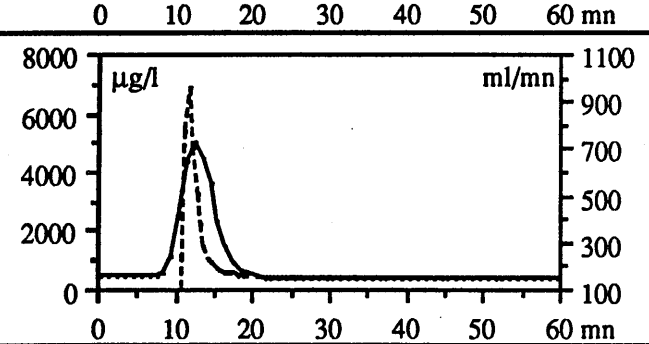
Injection instantanée.	4
Nb masse:	1
Masse totale (µg):	10000
Durée d'injection (mn):	-----
Pas d'injection (mn):	-----
Masse par injection (µg) :	10000



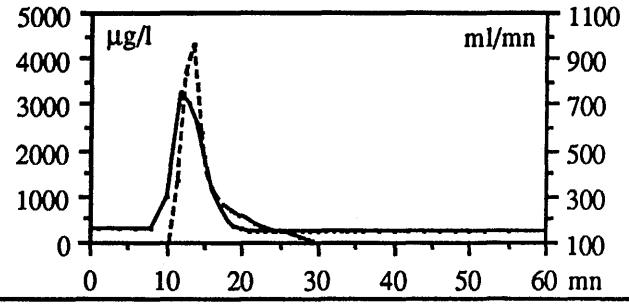
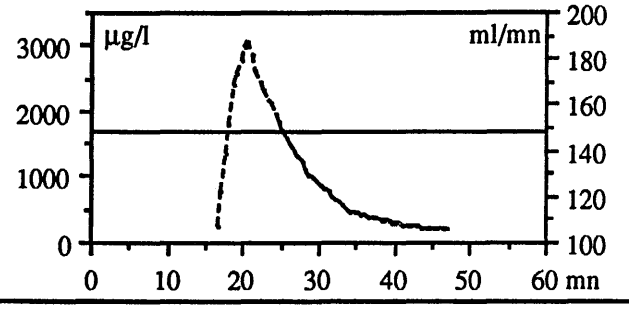
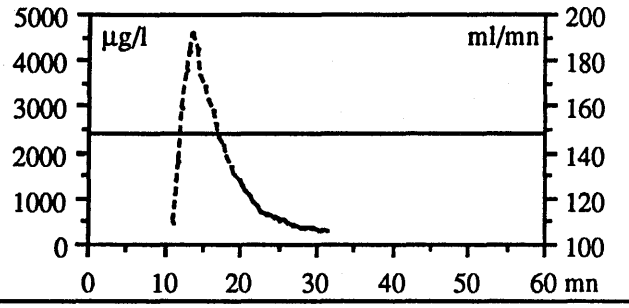
Injection en créneau.	5
Nb masse:	10
Masse totale (µg):	10000
Durée d'injection (mn):	10
Pas d'injection (mn):	1
Masse par injection (µg) :	1000



Injection en créneau.	6
Nb masse:	10
Masse totale (µg):	10000
Durée d'injection (mn):	10
Pas d'injection (mn):	1
Masse par injection (µg) :	1000



Injection instantanée.	8
Nb masse:	1
Masse totale (µg):	10000
Durée d'injection (mn):	-----
Pas d'injection (mn):	-----
Masse par injection (µg) :	10000

	**Injection en créneau.** 10 Nb masse: 10 Masse totale (µg): 10000 Durée d'injection (mn): 10 Pas d'injection (mn): 1 Masse par injection (µg) : 1000
SIMULATIONS AVEC DILUTION DIFFERENTIELLE	
	**Injection instantanée.** 11 (effet de dilution) Masse injectée (µg): 5000 Dilution (RTT) : 1 Dilution (STT): 1,2
	**Injection instantanée.** 12 (effet de dilution) Masse injectée (µg): 5000 Dilution (RTT) : 1,25 Dilution (STT): 1

Tab.B11: Synthèse des cas de restitutions simulées par le programme CONVOX.
Colonne de gauche: Graphiques des restitutions temps-concentrations et évolution du débit à partir de la première masse injectée (t=0, pour la simulation) (Trait plein: variation du débit en fonction du temps, Tirets: évolution des concentrations. Colonne de droite: Conditions d'injection. [1] traçage de référence. De [2] à [12] : traçages simulés

L'ensemble des restitutions montrent que pour des injections instantannées, les concentrations sont proportionnelles à la masse injectée quel que soit le débit d'écoulement. Seuls les temps de première arrivée et les durées de restitutions vont dépendre des conditions hydrodynamiques associées aux simulations.
Pour les restitutions à partir de l'injection en créneau sur une durée de 10 mn, les conditions hydrodynamiques vont influencer les concentrations maximales obtenues ainsi que la durée de passage du nuage et le temps de première arrivée du nuage à la sortie du système.

IV.4/ CONCLUSION

Le programme CONVOX permet donc de simuler, à partir d'un traçage et de conditions hydrodynamiques de référence (constantes ou variables) d'un système, une restitution à la sortie de ce même système correspondant à une entrée quelconque en masses et soumis à des conditions hydrodynamiques variables et différentes de celles du traçage de références. Les applications reposent sur l'hypothèse un système-traçage indépendant des conditions hydrodynamiques. Il est donc nécessaire de s'assurer dans le cadre d'application sur des systèmes naturels qu'entre les conditions de débits entre le traçage simulé et le traçage de référence l'espace occupé par le traceur au cours de son transfert n'est pas modifié. Le programme permet rapidement de vérifier ces conditions entre deux traçages réalisés à des périodes différentes et pour des débits différents. Notons que les dilutions externes intégrées dans le modèle peuvent également simuler des variations de volumes du système au cours du temps. Il faut cependant, dans ces conditions, considérer que la "forme" de la restitution est indépendante du système-traçage. L'approche que nous avons utilisée a également fait l'objet de travaux (Guizerix, 1988) où, reposant sur les mêmes hypothèses de base, les réponses impulsionnelles en fonction de débits variables sont obtenues par une méthode d'interprétation géométrique.

ALGORITHMIE DU PROGRAMME CONVOX

PREPARATION ET AQUISITION DES DONNEES.

Préparation des données du RTT.

La première opération consiste à entrer les données relatives au traçage pris en référence par le programme (RTT), soit par une entrée des données au clavier (Keyb_acquisition), soit par la lecture de fichier (File_acquisition).
Ces deux fonctions stockent respectivement les données brutes temps-concentrations du RTT dans les tableaux t[] et c[]. L'opérateur définit ensuite le pas de discrétisation (delt) afin d'obtenir un RTT échantillonné à pas de temps constant (Fig.B34)

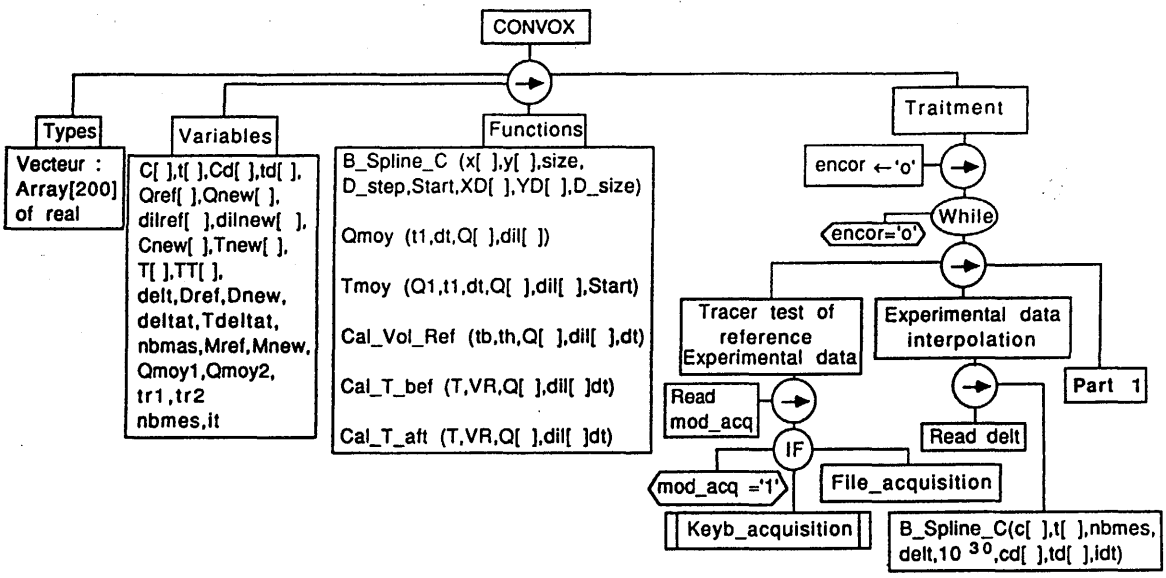


Fig.B34: Programme CONVOX, déclarations des variables et fonctions, traitement des données.

A partir des tableaux t[] et c[], les valeurs discrètes du RTT au pas "delt" sont interpolées par une méthode utilisant une fonction B_spline carrée (Burden & Faires,1989). Il s'agit d'un interpolateur exact, passant en l'occurence par les couples de points t[], c[] du RTT.
Le choix de cette méthode d'interpolation est lié, d'une part à son faible "pouvoir de lissage" qui respectera le caractère oscillant de certaines formes de restitutions de traceur, et d'autre part à sa mise en oeuvre relativement aisée. Néanmoins, nous avons introduit un coefficient pondérateur des oscillations afin de rendre cette méthode plus souple dans la recherche des valeurs de concentrations discrètes. Cette méthode particulière correspond à la fonction B_Spline_C() (Fig.B35).

L'interpolation d'une fonction y=f(x) sur un intervalle $[x_i,x_{i+1}]$ est pratiquée grâce à une expression polynomiale du second degré du type :

$$y_i = C_i\, x^2 + B_i\, x + A_i$$

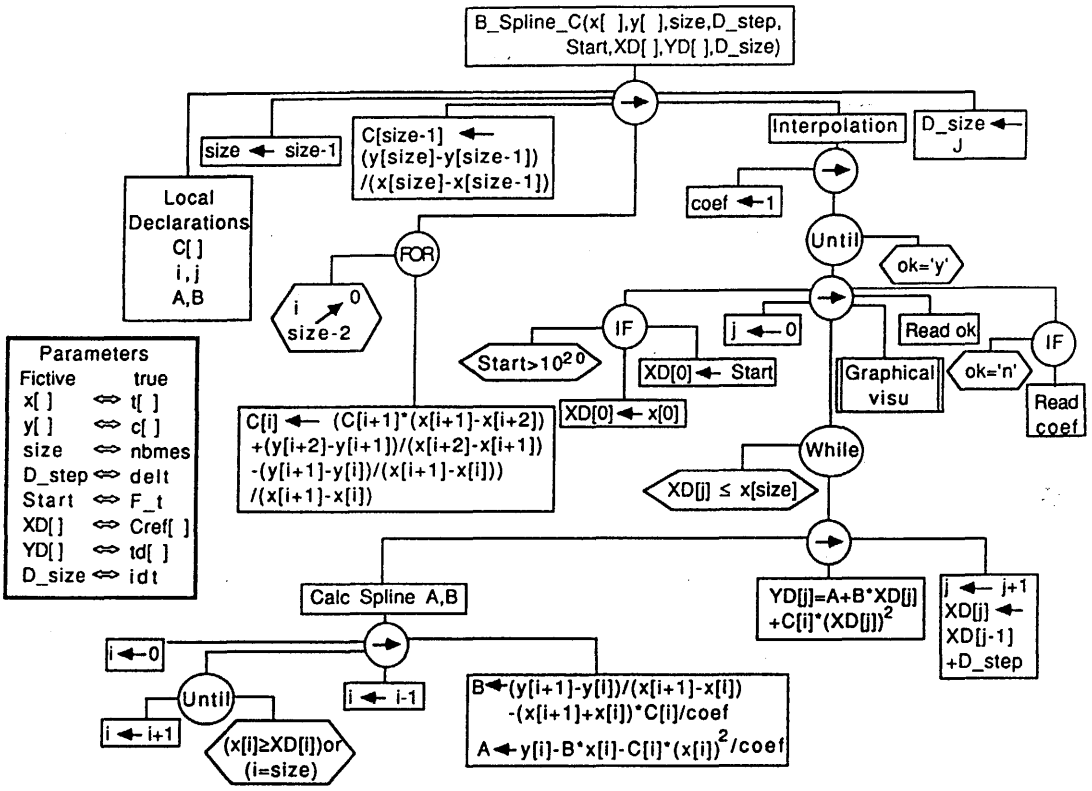


Fig.B35: Méthode d'interpolation utilisant une fonction B_Spline de degré 2: y[]=C[]*x[]2+B[]*x[]+A[]. x[] et y[]: valeurs initiales, Size: nombre de couple (x[],y[]). La fonction interactive permet la modification de "coef" divisant les valeurs initiales de C[]. YD[], XD[] valeurs discrètes interpolées au pas D_step, D_size: nombre de couple(XD[],YD[]).

La continuité, de la fonction interpolation et de ses premières dérivées en tout point x_i permet de calculer les différents coefficient C_i, B_i,A_i

.

$$C_{n-1} = -\frac{y_n - y_{n-1}}{(x_n - x_{n-1})^2} \qquad (43)$$

$$C_i = \frac{1}{x_{i+1} - x_i}\left[C_{i+1}(x_{i+1} - x_i) + \frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{x_{i+2} - x_{i+1}} - \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right] \quad i=1\text{-->}n-2 \quad (44)$$

$$B_i = -C_i(x_{i+1} + x_i) + \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \quad i=1\text{-->}n-1 \quad (45)$$

$A_i = y_i - B_i x_i - C_i x_i^2 \qquad i=1-->n-1 \qquad (46)$

n : nombre de couple de y=f(x) de la fonction brute.

En divisant les différents coefficient C_i calculés en chaque point x_i par une constante (coef : Fig.B35), les oscillations de la fonction B_Spline_C peuvent être limitées, cet opération réduit en effet les pentes de la fonction d'interpolation dont la dérivée première aux points x_i est du type: $y'=B_i + 2C_ix$.

Une sortie graphique à l'écran visualisant la coube interpolée pour chaque valeur de "coef" facilite le choix le plus approprié de cette constante en fonction des données relatives au RTT (Fig.B36). Après acceptation par l'utilisateur, les valeurs discrètes interpolées sont stockées dans les tableaux td[] (temps discrétisés) et cd[] (concentrations discrètes de référence). idt représente le nombre de couple (td[], cd[]) (Fig.B34).

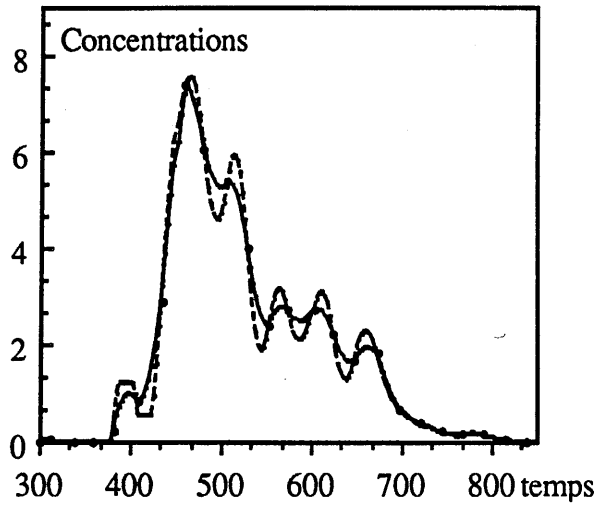


Fig.B36: Exemple d'oscillations limitées par les valeurs de"coef" pour la méthode d'interpolation utilisant une fonction B_Spline_Carrée. Carrés noirs: concentrations mesurées. Tirets : interpolation (coef=1). Trait plein: interpolation (coef=3).

La saisie des données relative au RTT se poursuit (Part 1: Fig.B37) par l'entrée des conditions hydrodynamiques au cours du RTT. Deux cas peuvent alors se présenter, le RTT est effectué à débit constant (rep1='1') ou variable (rep1='2'). Les débits ainsi que les dilutions associées définis sur des périodes de temps constantes "Dref" sont stockés respectivement dans Qref[] et Dilref[]), soit manuellement (fonction Keyb_acq_FR()), soit automatiquement par lecture de fichier (fonction File_acq_Fr()). Lorsque rep1='1', le débit et la dilution constants au cours du

temps pour le RTT sont stockés dans Qref[0] et Dilref[0]. La gestion dynamique de ces tableaux évite, en particulier dans le cas d'un RTT à débit constant, une occupation inutile de la mémoire de la machine. L'acquisition des données du RTT est complétée par l'entrée de la masse injectée Mref.

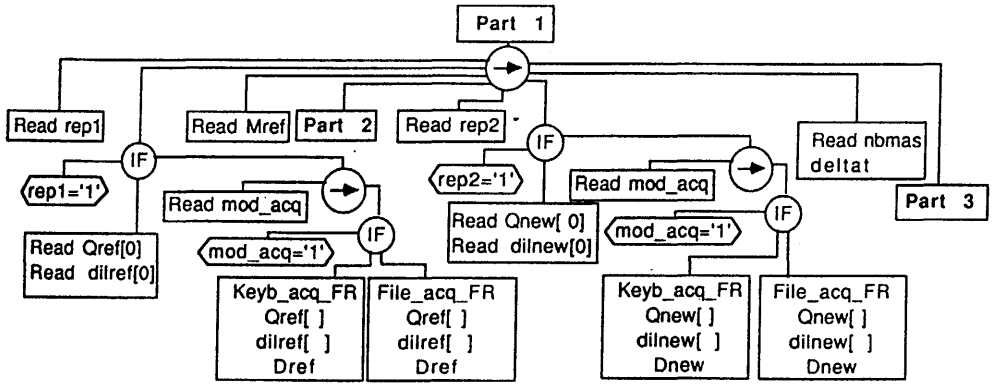


Fig.B37: Part 1 : Acquisition des données de débits et de dilutions relatives aux RTT et STT. Qref[] et Dilref[] : valeurs de débits et de dilutions au pas Dref. Qnew[] et Dilnew[] : valeurs de débits et de dilutions au pas "Dnew".nbmas: nombre de masses injectées au pas deltat pour le STT.

Choix d'un temps significatif pour le RTT.

Afin d'obtenir entre le RTT et le STT, deux points équivalents du nuage de traceur (distance constante) correspond pour le STT à chaque masse injectée, il est nécessaire de définir un temps significatif pour le RTT (Part 2: Fig.B38).

Cinq temps sont proposés à partir de td[], Cref[], idt, Qref[], Dilref[].

- Ta: temps de première arrivée du traceur que le programme détermine en recherchant les quatre premières valeurs consécutives supérieures à zero dans cd[].
- Tharm: temps harmonique défini ci-dessous.
- Tqharm: temps harmonique (pondération par les débits);
- Tarith: temps arithmétique défini ci-dessous;
- Tqarith: temps harmonique (pondération par les débits);

Ces quatres dernières variables sont déterminées par les formules suivantes :

$$Tharm = \frac{\int_0^\infty C(t)\,dt}{\int_0^\infty \frac{C(t)}{t}\,dt} \quad (47) \qquad Tqharm = \frac{\int_0^\infty C(t)\,Q(t)\,dt}{\int_0^\infty \frac{C(t)\,Q(t)}{t}\,dt} \quad (48)$$

$$Tarith = \frac{\int_0^\infty t\,C(t)\,dt}{\int_0^\infty C(t)\,dt} \quad (49) \qquad Tqarith = \frac{\int_0^\infty t\,C(t)\,Q(t)\,dt}{\int_0^\infty C(t)\,Q(t)\,dt} \quad (50)$$

Une sortie graphique à l'écran permet de positionner les différents temps calculés sur la courbe cd[] en fonction de td[], . Le choix du temps caractéristique tr1 pour le RTT est laissé à l'utilisateur. A partir de ce temps tr1, le programme calculera ultérieurement les équivalents tr2 du STT pour chaque masse injectée (t=0, temps d'injection de la première masse).

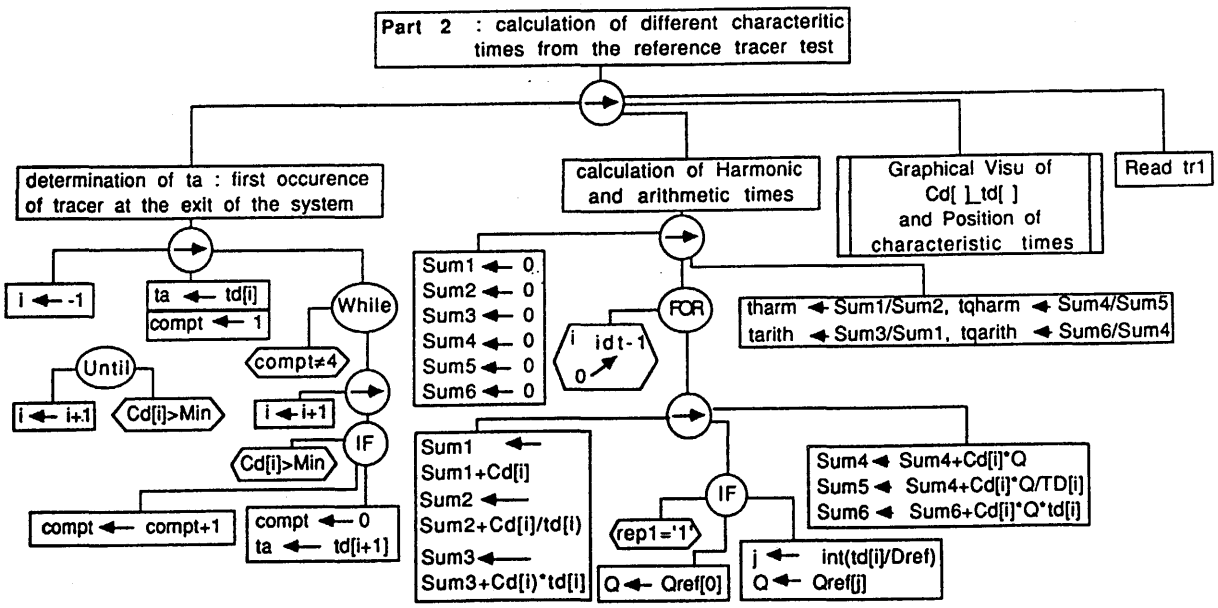


Fig.B38: détermination des temps caractéristiques du RTT à partir des valeurs discrètes de débits et de dilutions Qref[] et Dilref[] au pas "Dref", et des couples (td[],cd[]) au pas "delt".

Définition des conditions relatives au STT.

Qnew[] et Dilnew[] (Fig.B37) représentent les tableaux des valeurs de débits et de dilutions associées au pas "Dnew" pour le STT. Lorsque que le débit et la dilution sont constants (rep2='1'), seuls sont enregistrés Qnew[0] et Dilnew[0]. Comme le STT peut prendre en considération plusieurs masses injectées, il est nécessaire de définir le nombre de masses injectées "nbmas" ainsi que le temps "deltat" constant écoulé entre deux injections successives.

TRANSFORMATION DU RTT ET CONVOLUTION..

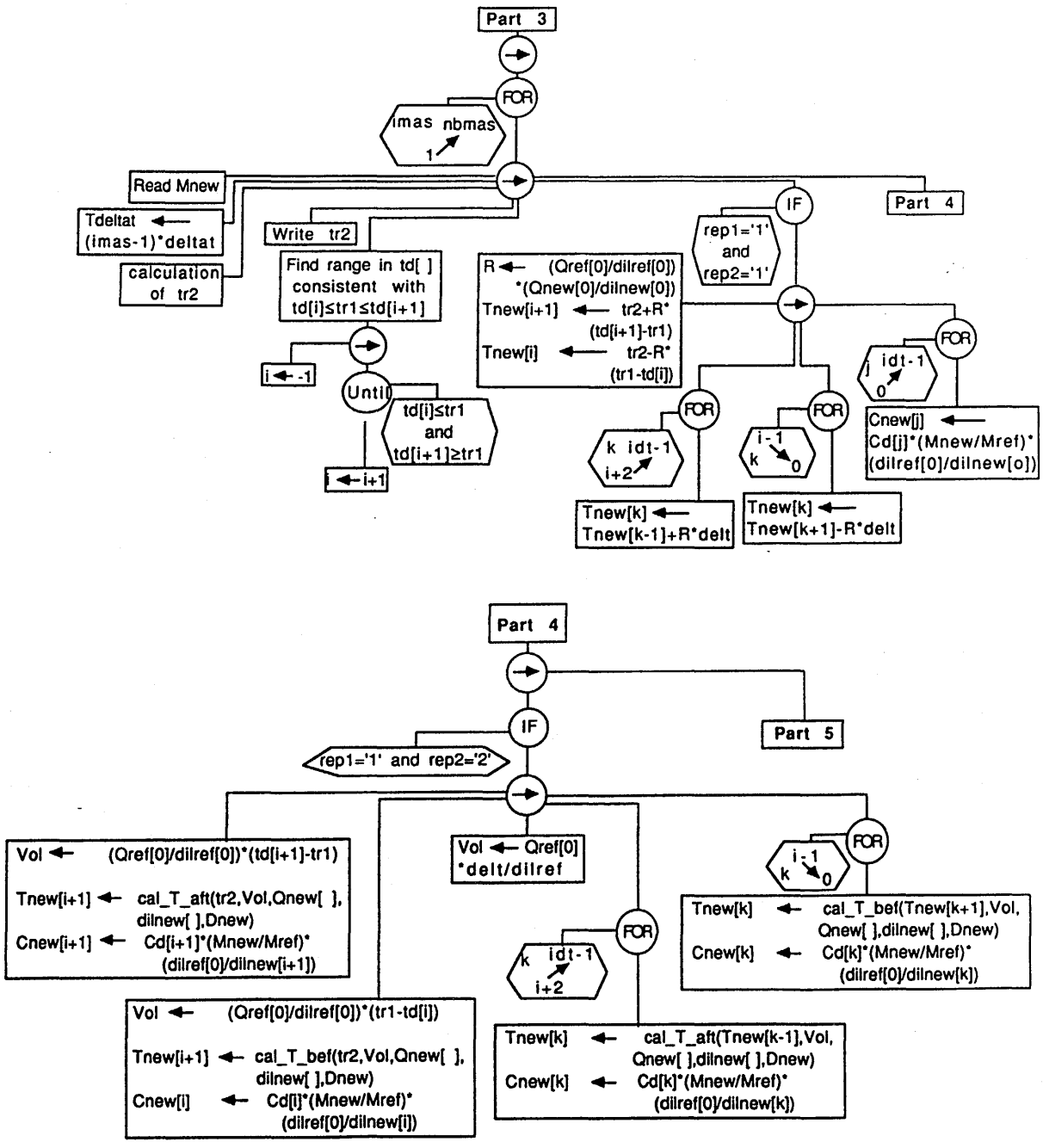
Cette partie constitue le coeur du programme utilisant les relations entre restitutions et débit d'écoulement variable exposées précédemment. La première opération consiste pour chaque masse "Mnew" du STT à rechercher par "transformation" les couples temps-concentrations (Tnew[] ,Cnew[]) dans les nouvelles conditions de débits et de dilutions associées Qnew[] et Dilnew[]). Ces couples (Tnew[],Cnew[]) sont les équivalents des couples de référence (td[],cd[]) du RTT dans les conditions de références Qref[] et Dilref[] pour une masse injectée égale à Mref à partir de Tdeltat, ce dernier temps étant la durée séparant l'injection de la première masse et l'injection de la masse considérée pour la transformation.

Chaque transformation débute par l'entrée de la masse Mnew et la définition de Tdeltat. Ensuite, on calcule tr2 pour chaque masse injectée du STT. tr2 est l'équivalent du temps caractéristique tr1 du RTT. Son calcul repose sur le principe suivant: dans le cas particulier où le STT ne comporte qu'une seule masse injectée, le volume écoulé V à la sortie du système entre le temps d'injection de Mref(t=0) et tr1 pour le RTT est égal au volume écoulé V entre le temps d'injection de Mnew (t=0) et tr2. Le calcul est identique concernant la première masse injectée du STT lorsque ce dernier en comporte plusieurs. En ce qui concerne les masses suivantes, V est le volume écoulé entre Tdeltat et Tdeltat+tr2.
Le programme recherche ensuite les Tnew[] et Cnew[] équivalents de td[] et cd[], de part et d'autres de tr2 (équivalent de tr1). Cette recherche s'effectue selon quatre types de transformations différenciées suivant les conditions hydrodynamiques du RTT et du STT.

- transformation: débit constant-débit constant, définie par rep1='1' et rep2='1' (Part 3: Fig.B39);
- transformation: débit constant-débit variable, définie par rep1='1' et rep2='2' (Part 4: Fig.B39);
- transformation: débit variable-débit constant, définie par rep1='2' et rep2='1' (Part 5: Fig.B39);

- transformation: débit variable-débit variable, définie par rep1='2' et rep2='2'
  (Part 6: Fig.B40).

Enfin à partir des différents couples (Tnew[],Cnew[]) le programme réalise après interpolation pour des temps discrétisés au pas DD une "sommation" dans le temps des concentrations Cnew[] (Fig.B45, General Convolution operation) afin de fournir la réponse (STT) sous forme de variation des concentrations en fonction du temps correspondant aux entrées massiques du STT. Ce processus n'est évidemment nécessaire que lorsque le STT comporte plusieurs injections.



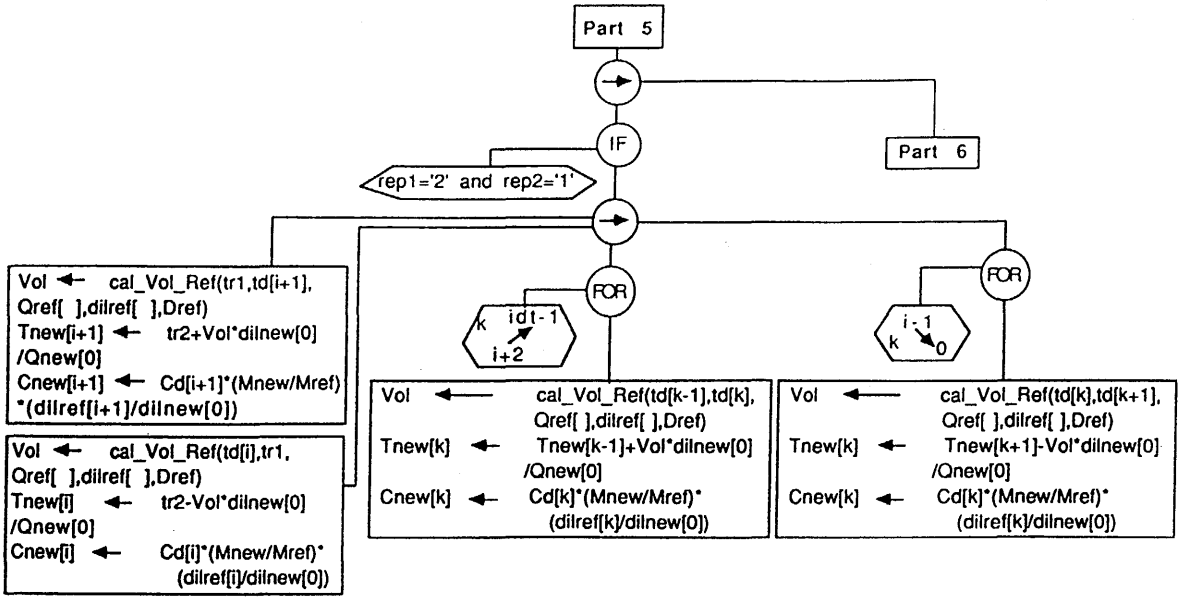


Fig.B39: Algorithmes de transformations. Part 3: Transformation débit constant-débit constant, définie par rep1='1' et rep2='1', Part 4: Transformation débit constant-débit variable, définie par rep1='1' et rep2='2', Part 5: Transformation: débit variable-débit constant, définie par rep1='2' et rep2='1'

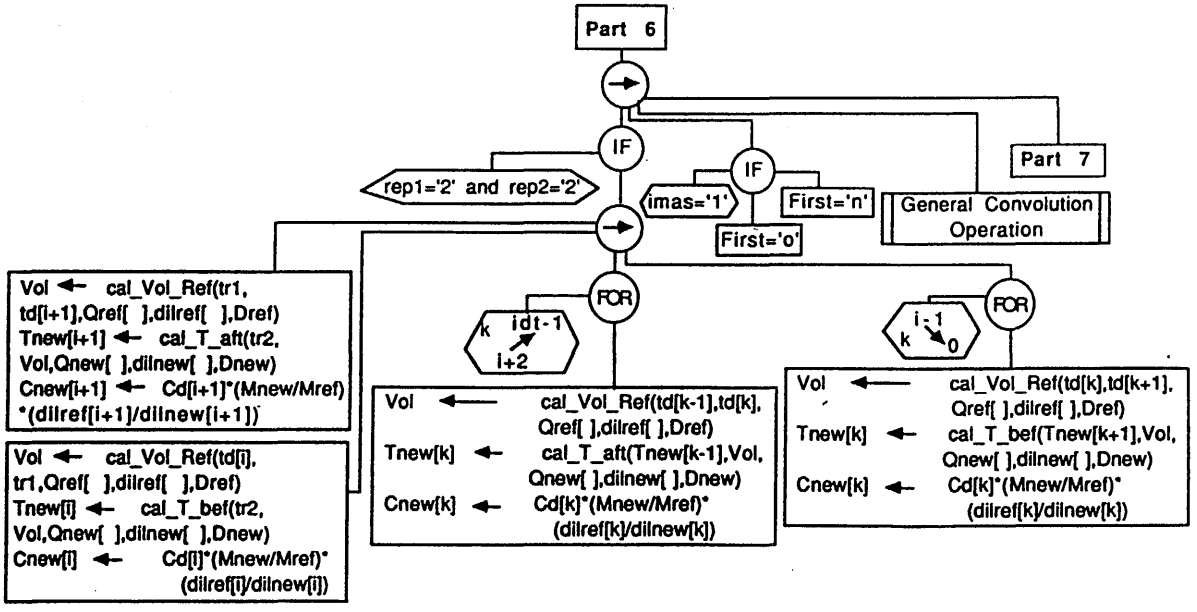


Fig.B40: Part 6: Transformation: débit variable-débit variable, définie par rep1='2' et rep2='2'.

Nous nous limiterons ici au développement du cas de transformation "débit variable-débit variable" qui est le plus complexe et requiert l'utilisation du plus grand nombre de sous-programmes.

Calcul des temps significatifs tr2 pour chaque injection du STT.

Lorsque l'utilisateur a choisi le temps de référence tr1, le processus consiste à déterminer le temps équivalent tr2 pour l'injection considérée du STT. Deux fonctions sont utilisées (Fig.B41).

- Qmoy() qui calcule le débit moyen Qmoy1 entre le temps t=0 (temps d'injection) et tr1 pour le RTT.

-Tmoy() calculant tr2 à partir de tr1 et Qmoy1.

Qmoy1 est calculé suivant le principe suivant :

$$Qmoy1 = \frac{1}{tr1} \int_0^{tr1} \frac{Qref(t)}{dilref(t)}\, dt \qquad (51)$$

avec Qref(t): débit mesuré, et Dilref(t): taux de dilution à la sortie du système.

Les valeurs de Qref[] et Dilref[] étant définies sur des intervalles de temps constants Dref, la particularité de l'algorithmie dans un schéma discret consiste à rechercher Qmoy1 lorsque tr1 n'est pas un multiple de Dref.(Qmoy(): Fig.B41)

Lorsque Qmoy1 et tr1 sont les paramètres réels passés en lieu et place des paramètres formels Q1 et T1 de la fonction Tmoy(), cette dernière estime :

- le volume VE écoulé à la sortie pour le RTT entre t=0: temps d'injection de la première masse et Tdeltat: temps de départ de la masse injectée pour la transformation concernée;
- le volume V1 = Qmoy1*tr1: volume d'eau écoulé pour le RTT entre t=0 et tr1.

tr2 est donc déterminé selon le principe suivant :

$$V1 = \int_0^{tr1} \frac{Qref(t)\, dt}{Dilref(t)} = \int_{Tdeltat}^{tr2} \frac{Qnew(t)\, dt}{Dilnew(t)} \qquad (52)$$

Pour le programme Qnew[] et Dilnew[] sont des valeurs discrètes au pas Dnew, il faut donc tenir compte dans le schéma discret du fait que tr2 n'est généralement pas un multiple de Dnew.

On calcule itérativement un volume V2: addition des volumes élémentaires Qnew[]*Dref[]/Dilnew[] . La boucle est stoppée lorsque V2≥V1.

V2 est initialisé à -VE pour tenir compte suivant la formule (52) de l'injection à partir de Tdeltat (paramètre réel équivalent du paramètre formel Start pour la fonction Tmoy()), le calcul itératif commençant par l'indice i=0 des tableaux. Dans la fonction, la variable T est équivalente à tr2, elle est initialisée à (i+1)*dt (Fig.B41) qui correspond au temps nécessaire pour écoulé un volume V2, par conséquent T est donc référencé à partir de t=0 (injection de la première masse du STT). On calcule donc Tdif représentant le temps lié à l'écoulement du volume V2-V1, T est donc diminuée de Tdif pour correspondre exactement à tr2 avant d'être renvoyée par la fonction.

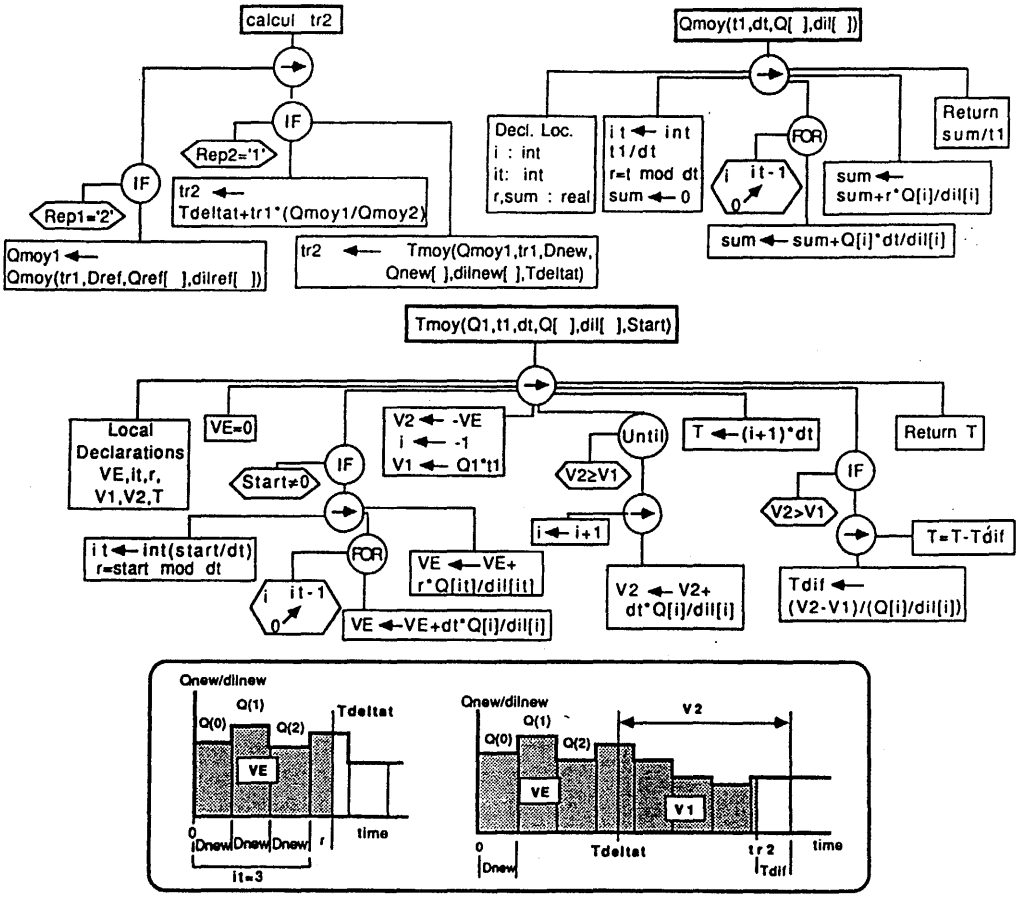


Fig.B41: calcul tr2: calcul du temps équivalent tr2 pour le traçage simulé. rep1: référence aux conditions de débit du traçage de référence.rep2: référence aux conditions du traçage simulé. Qmoy(): calcul du débit moyen entre t=0 et tr1 concernant le RTT quand rep1='2' (débit variable). Tmoy() et diagrammes associés: calcul du temps tr2 lorsque le STT est défini en débit variable (rep2='2').V1: volume écoulé à la sortie entre t=0 et tr1 pour le RTT. Tdeltat: temps de départ de la masse injectée à partir de t=0 pour le STT. VE: volume écoulé à la sortie pendant Tdeltat.

Détermination des nouveaux temps Tnew[] par transformation.

A partir des temps discrétisés td[] du RTT, les temps Tnew[] pour une injection du STT vont être calculés à partir du principe:

$$V_k = \int_{td[k]}^{td[k+1]} \frac{Qref(t)\,dt}{Dilref(t)} = \int_{Tnew[k]}^{Tnew[k+1]} \frac{Qnew(t)\,dt}{Dilnew(t)} \qquad (53)$$

k: indice des tableaux.
V_k: volume écoulé entre td[i] et td[i+1].

Deux volumes particuliers VA et VP vont être calculés:

$$VA = \int_{td[i]}^{tr1} \frac{Qref(t)\,dt}{Dilref(t)} \qquad (54)$$

$$VP = \int_{tr1}^{td[i+1]} \frac{Qref(t)\,dt}{Dilref(t)} \qquad (55)$$

VA: volume écoulé entre td[i] et tr1 pour le RTT
VP: volume écoulé entre tr1 et td[i+1]
td[i]: premier temps discret inférieur à tr1
td[i+1]: premier temps discret supérieur à tr1.

tr2 étant connu, ces volumes particuliers permettent de déterminer Tnew[i] et Tnew[i+1] pour le STT: ces temps sont respectivement les premiers temps calculés inférieurs et supérieurs à tr2. Ce calcul est basé sur le principe suivant:

$$VA = \int_{Tnew[i]}^{tr2} \frac{Qnew(t)\,dt}{Dilnew(t)} \qquad (56)$$

$$VP = \int_{tr2}^{Tnew[i+1]} \frac{Qnew(t)\ dt}{Dilnew(t)} \qquad (57)$$

Le temps Tnew[i] permet à partir de la relation (53) de calculer l'ensemble des temps Tnew[] du STT inférieurs à tr2. A partir de Tnew[i+1], seront déterminés les temps Tnew[] supérieurs à tr2. Nous allons donc maintenant développer cette démarche.

- Calcul du volume écoulé VR entre deux temps quelconques Tb et Th du RTT.

Lorsque le RTT est à débit variable (rep1='2'), il est nécessaire d'estimer le volume écoulé VR entre deux temps du RTT. Ces volumes sont calculés par la fonction Cal_Vol_Ref() (Fig.42). Elle calcule à partir des rapports Qref[]/Dilref[] à chaque pas Dref,le volume écoulé du système traçage VR entre deux temps quelconques Tb (temps bas) et Th (temps haut):
Un entier x est recherché tel que : x*Dref ≥ Th. Si (x-1) Dref ≤Tb , dans ces conditions seul le débit Qref[x-1] intervient dans l'écoulement pendant la durée entre Tb et Th. Le volume VR est alors déterminé par:

$$VR = \frac{Qref[x-1]}{dilref[x-1]} *(Th-Tb) \qquad (58)$$

Dans le cas contraire, si (x-1)*Dref>Tb, alors le débit à changé entre Tb et Th. VR est donc initialisé à :

$$VR = \frac{Qref[x-1]}{dilref[x-1]} *(Th - (x-1)*Dref) \qquad (59)$$

Un calcul itératif décrémentant x est alors réalisé jusqu'à ce que (x-1)*Dref ≤ TB. Dans cet boucle, si (x-1)*Dref est supérieur a Tb, les volumes successifs écoulé durant Dref sont ajoutés à VR, lorsque (x-1)*Dref devient inférieur à Tb, le volume déchargé entre Tb et (x*Dref) est ajouté à VR et le calcul est stoppé (Fig.B42).

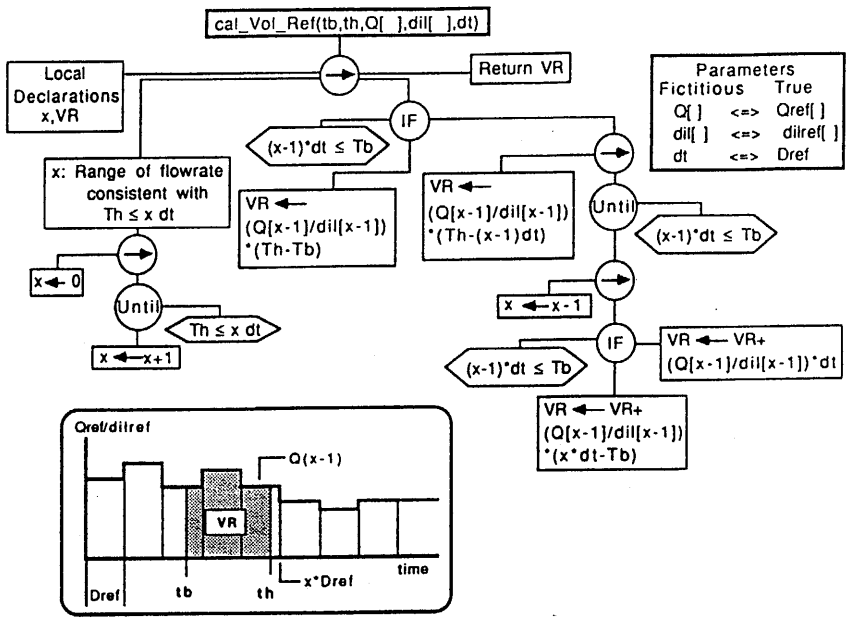


Fig.B42: Cal_Vol_Ref () et diagrammes associés: Calcul du volume d'eau du système-traçage écoulé à la sortie du système entre deux temps quelconques Tb (temps bas) et Th (temps haut). If Tb = tr1 et Th = td[i+1], la fonction renvoie VP. Si Tb = td[i] et Th = tr1, la fonction renvoie VA. Si Tb = td[i-1] et Th = td[i], V_{i-1} sera renvoyé.

- calcul des temps Tnew[] du STT équivalents à td[] du RTT.

Connaissant le volume VR écoulé entre deux temps Tb et Th pour le RTT, on calcule les équivalents de ces temps pour le STT. La fonction Cal_T_aft() calcule à partir d'un temps T connu pour le STT (équivalent du Tb du RTT), le temps équivalent à Th. La fonction Cal_T_bef() calcule à partir d'un temps T connu pour le STT (équivalent du Th du RTT), le temps équivalent à Tb.
Ainsi à partir des temps tr1 et tr2, on calcule les temps Tnew[] supériers à tr2 grâce à la fonction Cal_T_aft() (*: Fig.B43). Les différences avec la fonction Cal_T_bef() et Cal_T_aft() (Fig.B43 et B44) étant mineures, nous ne développeront que les détails de la programmation de la fonction Cal_T_aft().

Dans le cas général où V_{i+1} est le volume écoulé entre Td[i+1] and Td[i+2] du RTT, un volume identique s'écoulera entre Tnew[i+1] and Tnew[i+2] pour le STT. Tnew[i+1] étant

connu et afin de déterminer Tnew[i+2], on recherche le premier entier x tel que: x*Dnew≥ Tnew[i+1].
On calcule donc, à partir des débits du système-traçage Qnew[]/dilnew[] pendant Dnew, un volume VN et un temps Tdif de la façon suivante:

$$VN = \frac{Qnew[x-1]}{dilnew[x-1]} * (x*Dnew - Tnew[i+1]) \qquad (60)$$

$$Tdif = x*Dnew - Tnew[i+1] \qquad (61).$$

SI VN est inférieur à V_{i+1}, Un calcul itératif augmentant la valeur de x additionne, à VN l'expression (Qnew[x-1]/dilnew[x-1])*Dnew, et à Tdif, la valeur Dnew. Les itérations prennent fin lorsque l'expression $VN \geq V_{i+1}$ est satisfaite (Fig.B43). Quand VN est égal à V_{i+1}, Tdif représente la différence Tnew[i+2]-Tnew[i+1]. Lorsque VN est strictement supérieur à V_{i+1}, Tdif est supérieur à la différence Tnew[i+2] -Tnew[i+1], on retranche donc à Tdif la valeur (VN-V_{i+1})*(dilnew[x-1]/Qnew[x-1]) qui représente le temps nécessaire pour écoulé la différence de volume VN-Vi+1.
Cette fonction est appelée dans une boucle afin de calculer l'ensemble des nouveaux temps Tnew[] supérieur à tr2, le premier calcul débutant par la détermination de Tnew[i+1] à partir de tr2 et VP (équation (57)).
La fonction Cal_T_bef() construite sur le même principe, calcule les temps Tnew[i-1] à partir du temps Tnew[i] . le premier calcul débutant par la détermination de Tnew[i+1] à partir de tr2 et VA (équation (56)).

Détermination des concentrations par transformation.

L'ensemble des temps Tnew[] du STT étant déterminé, il est alors possible de calculer les concentrations Cnew[] correspondantes:

$$Cnew[i] = Cd[i] * \frac{Mnew * dilr}{Mref * diln} \qquad (62)$$

avec: Cnew[i]: concentration au temps Tnew[i] pour le STT; Cd[i]: concentration au temps Td[i] pour le RTT; Mnew: masse injectée du STT; Mref: masse injectée du RTT; dilr: dilution pour le RTT au temps Td[i]; diln: dilution pour le STT au temps Tnew[i].

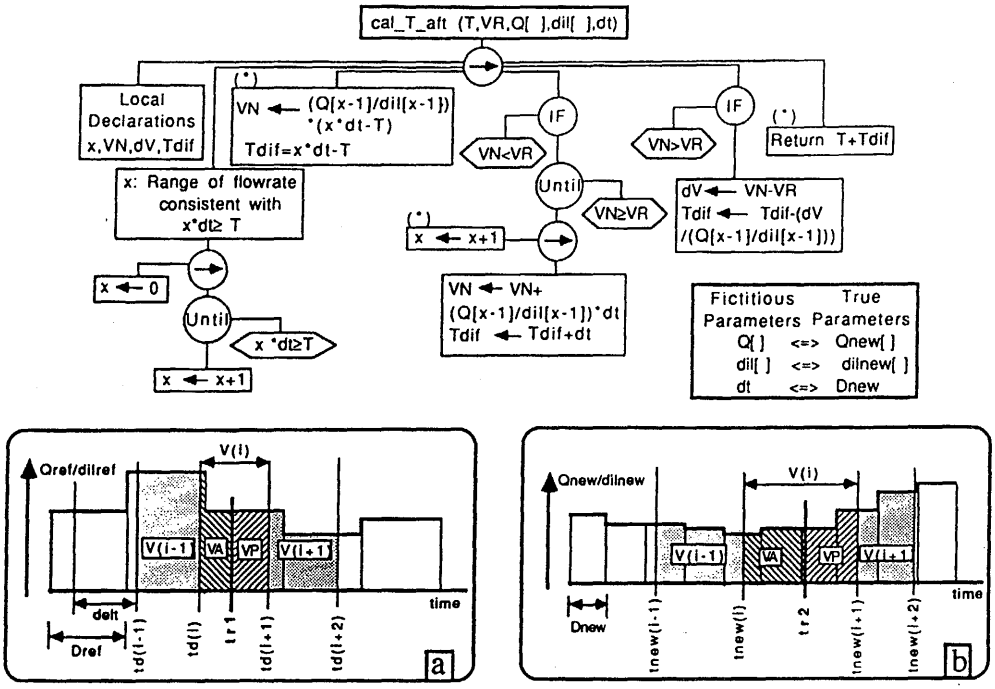


Fig.B43: Cal_T_aft(): calcul des temps équivalents supérieurs à tr2 pour le traçage simulé. Lorsque T=Tnew[i+1] et VR=Vi+1,la fonction renvoie Tnew[i+2].

Pour le calcul des temps équivalents avant tr2 (Cal_T_bef()), les expressions marquées d'un asterix(*) deviennent VN<-- (Q[x-1]/dilref[x-1])*(T-(x-1) dt); Tdif<-- T-(x-1) dt; x<-- x-1; Return T-Tdif.

Diagrammes associés: a: représentation des volumes du système-traçage VA,VP,V[] définis à partir de Qref[]/dilref[], tr1 et td[] du RTT. b: représentation du temps tr2 et des temps Tnew[] définis à partir de Qnew[]/dilnew[], VA,VP et V_k pour le STT.

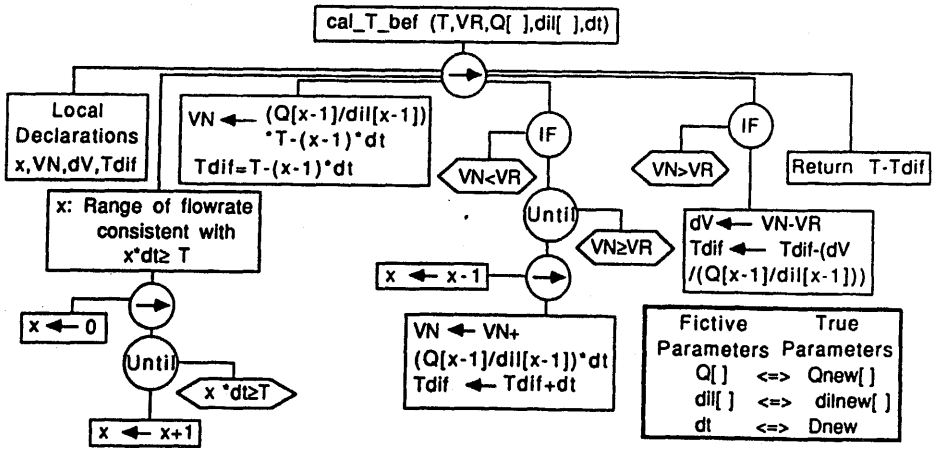


Fig.B44: Cal_T_bef: calcul des temps équivalents inférieurs à tr2 pour le traçage simulé.

Convolution générale des couples temps-concentrations (Tnew[],Cnew[]).

Nous rappelons que cette opération n'est effective que si le STT comporte plusieurs masses de traceur injectées.

Puisque le temps de départ de chaque masse est différent, les conditions hydrodynamiques existante au cours de chaque transfert sont donc différentes. Par conséquent, les valeurs successives dans les tableaux Tnew[] ne sont pas déterminées pour des intervalles de temps constant. La sommation des couples élémentaires (Tnew[],Cnew[]) correspondant à chaque masse injectée constitue la réponse du STT, cette sommation implique une base commune de temps discrétisés pour tous les couples autorisant une simple addition des concentrations.

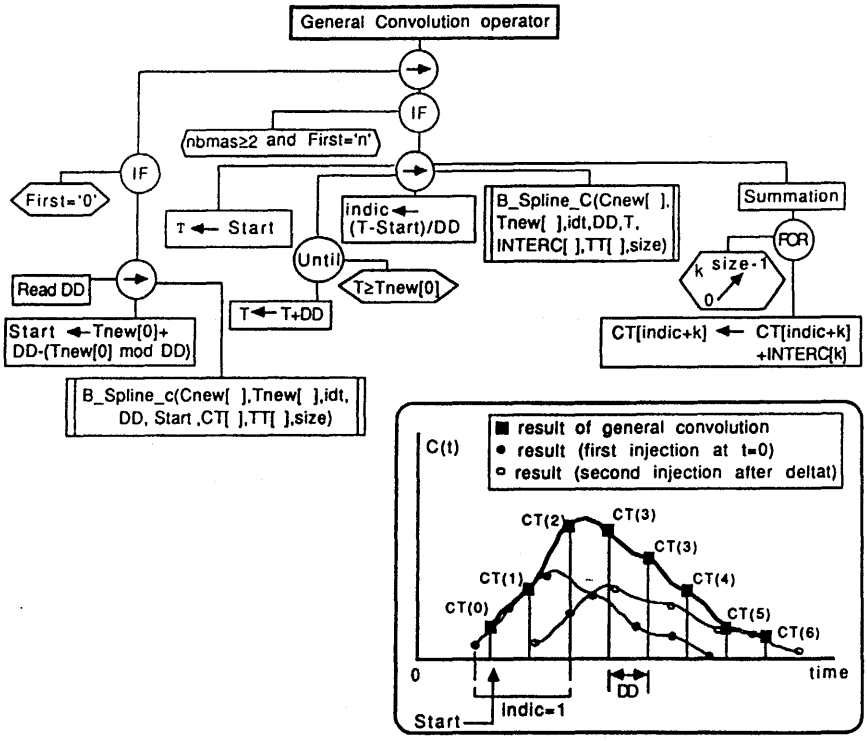


Fig.B45: "General convolution operator" et diagramme associé: sommation des coubes temps-concentrations dans le cas d'une injection de plusieurs (nbmas) masses de traceur à l'entrée du système pour le STT. First='o' pour la première courbe et 'n' pour les suivantes. DD: pas de temps pour le calcul des concentrations discrètes de chaque réponse. Start: premier temps de réference de la première réponse. CT[]: tableau résultant de la sommation des concentrations discrètes. indic: indice dans CT[] où la sommation commence lorsque la nième courbe (Tnew[],Cnew[]) est additionnée.

L'ensemble des couples (Tnew[],Cnew[]) est donc interpolés par la fonction B_Spline_C() déjà mentionnée, afin d'obtenir des valeurs de concentrations discrètes au pas DD. Un tableau TT[] stocke les temps au pas DD et un tableau CT[] stocke le cumul des concentrations au temps correspondant. (Fig.B45). L'algorithme implique, lorsque la n^{ieme} courbe constituée par les couples (Tnew[],Cnew[]) est additionnée au couples (TT[],CT[]), que l'indice du tableau CT[] où commence la sommation est connu. Si Start est la valeur de TT[0], on recherche le premier temps T supérieur au temps d'arrivée (c'est-à-dire Tnew[0]) de la n^{ieme} courbe, avec: T = Start + Indic*DD. Indic est l'indice où la sommation doit commencer (Fig.B45).

GLOSSAIRE

C [ ]: array of concentrations of the reference tracer test.

Cd [ ] : array of discrete concentrations of reference tracer test.

Cnew [ ]: array of new concentrations in the simulated tracer test.

coef: integer value used to divide the original slopes of a B spline interpolation in order to dampen oscillations of the discrete breakthrough concentration/time curves.

CT [ ]: array of discrete cumulated concentrations produced by the convolution of each restitution curve in the simulated tracer test.

DD: time step of the discrete concentration in the simulted tracer test after convolution operator.

Delt : time step of the discrete concentrations in the reference tracer test.

Deltat: time step between two injected masses in the simulated tracer test.

dilnew [ ]: array of discrete values of dilution according to the new hydrodynamic conditions in the simulated tracer test.

dilref [ ]: array of discrete values of dilution according to the hydrodynamic conditions in the reference tracer test.

Dnew: time step of discrete flowrates of the simulated tracer test.

Dref: time step of discrete flowrates of the reference tracer test.

Idt : number of discrete concentrations in the arrays Cd[] and Cnew[].

Mnew[]: injected masses for the simulated tracer test.

Mref: injected mass for the reference tracer test.

Nbmas: number of injected masses for the convolution.

Qmoy1: mean flowrate according to Tr1 in the hydrodynamic conditions of reference.

Qmoy2: mean flowrate according to Tr2 in the hydrodynamic conditions of the simulation.

Qnew [ ]: array of the discrete flowrates in the simulated tracer test.

Qref [ ]: array of the discrete flowrates in the reference tracer test.

Ta: time of first arrival on the reference tracer test.

T [ ]: time according to C[ ].

Tarith: arithmetic time calculated from the reference tracer test in steady state.

Td [ ]: array of discrete time step according to Cd[ ].

Tdeltat: starting time of injected mass for the convolution operation.

Tharm: harmonic time calculated from the reference tracer test in steady state.

Tnew [ ]: array of time of the simulated tracer test according to Cnew[].

Tqarith: arithmetic time calculated from the reference tracer test in transient state.

Tqharm: harmonic time calculated from the reference tracer test in transient state.

Tr1: time taken as reference from the reference tracer test for the simulation.

Tr2: new time of reference of the simulated tracer test calculated from Tr1.

TT [ ]: time according to CT [ ].

V_i: true volume discharged in the system between Td[i] and Td[i+1].

VA: true volume discharged in the system between Td[i] (greatest discrete time below Tr1) and Tr1.

VE: true volume discharged in the system in the simulated tracer test between the time T=0 (starting time of the first injected mass) and the time Tdeltat (starting time of the n^{th} injected mass).

VP: true volume discharged in the system between Td[i+1] (smallest discrete time above Tr1) and Tr1.

VR: true volume discharged in the system between any two times Tb and Th (Tb<Th).

C. APPLICATIONS AUX SYSTEMES KARSTIQUES.

I/ GENERALITES

Avant d'aborder des l'application des méthodes développées dans le chapitre précédent, sur des systèmes karstiques du Causse de Gramat (Lot), nous rappelons le contexte général de la réalisation de traçages dans de tels milieux ainsi que les limites des méthodes de transformation.

Par définition (Paloc, 1975), le karst est une région constituée par des roches carbonatées dans lesquelles apparaissent des formes superficielles et souterraines caractéristiques. La nature du milieu et le développement de la karstification engendrent divers type de circulations des eaux. Atckinson (1985) propose une classification triangulaire présentant les différentes circulations karstiques en fonction de la nature des milieux et des conditions d'écoulement (Fig.C1).

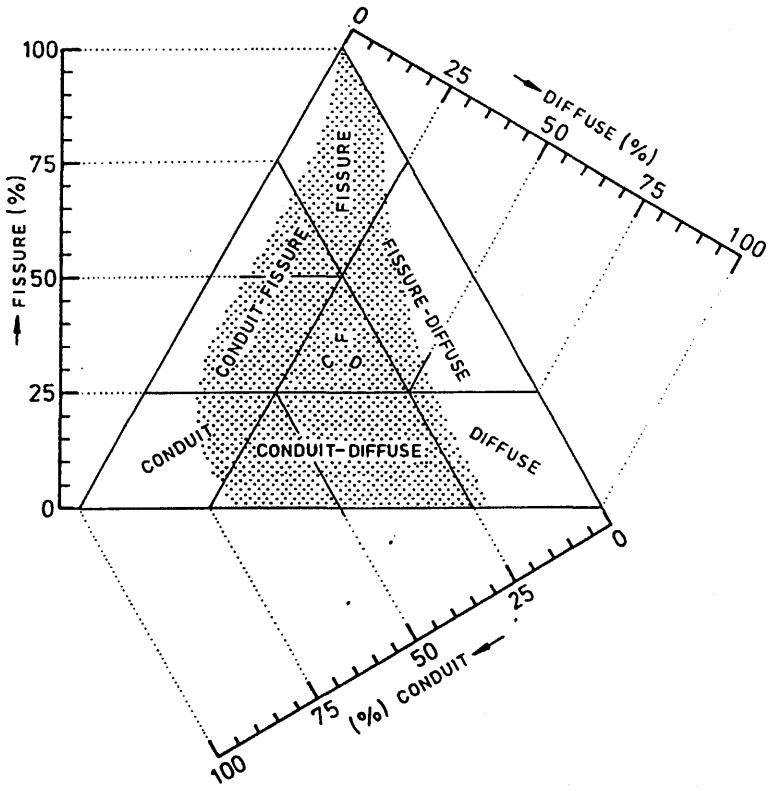


Fig.C1: Classification des aquifères karstiques. Partie gauche du diagramme triangulaire: écoulement turbulent. Partie droite: écoulement laminaire.En bas: écoulement mixte. (d'après Atckinson, 1985 in Gaspar, 1988)

En ce qui concerne les traçages, quatre grands types différenciés par le lieu d'injection sont généralement réalisés dans les milieux karstiques. Quel que soit le point d'injection (perte, cavité, drain ou système annexe), le traceur n'occupe au cours de son transfert qu'une "partie" du système, l'espace occupé par le traceur définit alors le système-traçage (Fig.C2). Les circulations intéressant alors ce dernier sont essentiellement de type conduits ou fissures. Ces cheminements préférentiels (infiltration rapide, ruissellement souterrain, drain) impliquent généralement des vitesses de transit élevées entre le point d'injection et la sortie du système-traçage.

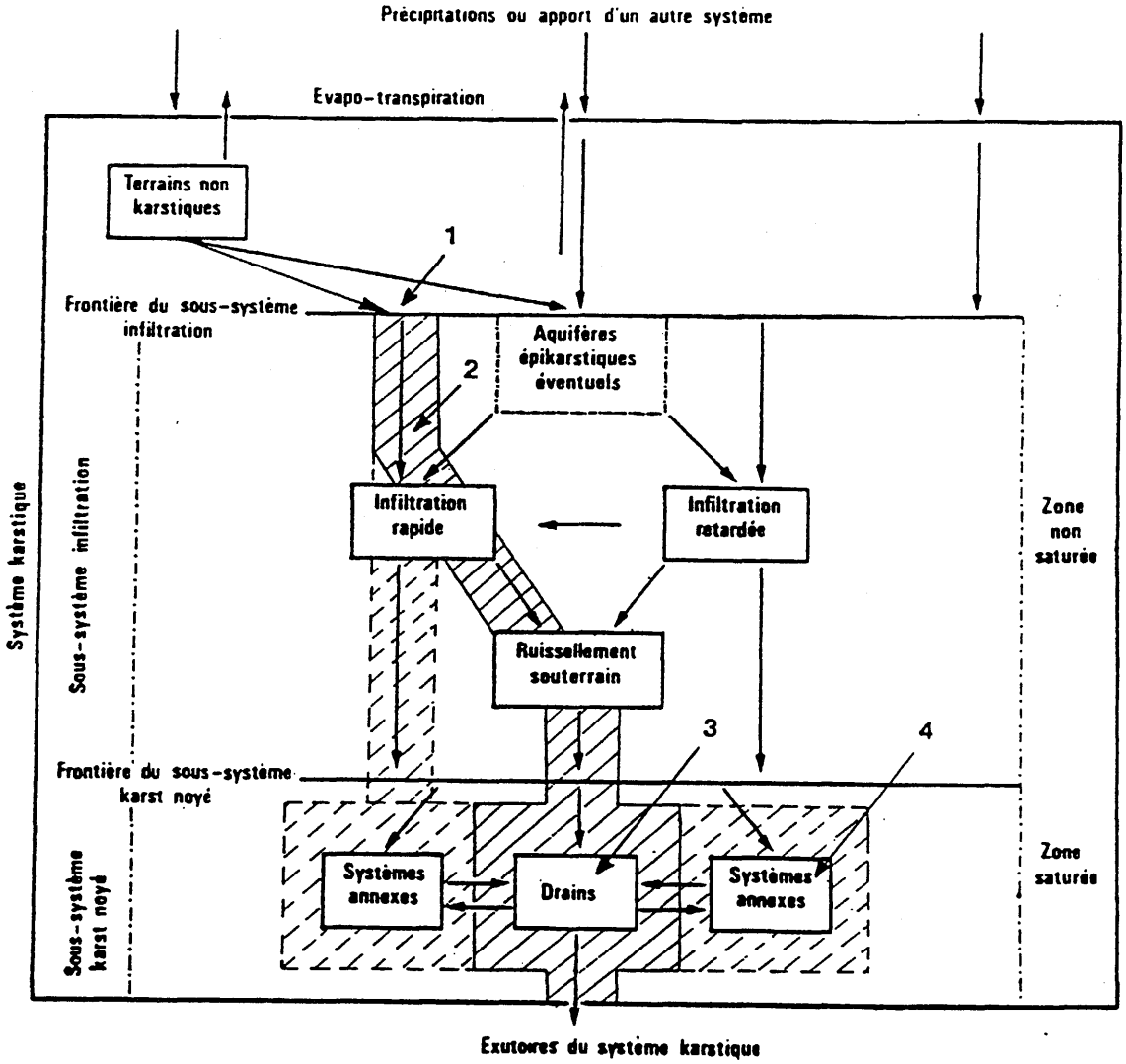


Fig.C2: Représentation du système traçage dans le cadre du système karstique (tiré de Lepiller et Mondain, 1983, modifié d'après Mangin, 1975)). 1: injection à partir de la perte d'un écoulement superficiel. 2: injection à partir d'une cavité siège d'un écoulement. 3: injection dans un drain. 4: injection dans un système annexe.

Les courbes de restitution temps-concentrations, lors de la réalisation de traçages à débit constant, peuvent présenter une plurimodalité que l'on associe généralement à des cheminements multiples du traceur au cours de son transfert (Gaspar et Oraseanu, 1987; Mei Zhengxing, 1988). Lorsque le débit varie, la plurimodalité des restitutions peut être également attribuée en période de crue au piégeage momentané de traceur dans les systèmes annexes (Alessandrello et al,1970 in Mangin et al 1976).

Le problème essentiel dans l'étude des relations entre les restitutions de traceur pour des expériences réalisées entre une même entrée et une même sortie, est de savoir si l'espace occupé par le traceur au cours de son transfert est indépendant des conditions hydrodynamiques au cours des différentes périodes. Stanton et Smart (1981) montrent, à partir de relations "log-log" entre les temps moyens de transfert du traceur dans un système karstique du Mendip (Grande Bretagne) et les débits constants d'écoulement, un comportement identique à celui d'un tube sous pression vis-à-vis du transfert de masse à différents débits.

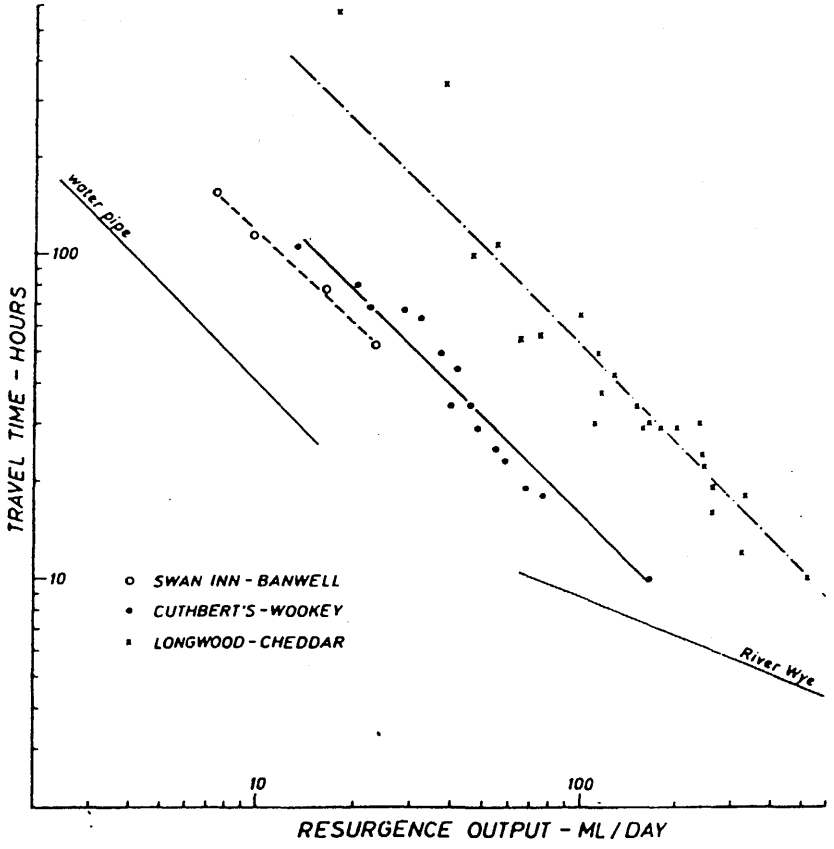


Fig.C3: Relation log-log entre le temps moyen de transfert et le débit d'écoulement du Mendip. souterrains. Comparaison avec un écoulement en tube sous pression et une rivière de surface (d'après Stanton et Smart, 1981)

Néanmoins, des restitutions de traceur pour des traçages effectués à différentes périodes sur le système du Baget ont montré que les cheminements du traceur pouvaient être différents même pour de faibles différences entre les débits constants mesurés à l'exutoire (Mangin 1991, communication orale). Dans ces conditions, la méthode de transformation des restitutions en fonction du débit d'écoulement ne peut être utilisée que dans une gamme de variations de débits dans laquelle le système-traçage reste identique à celui défini par l'espace occupé par le traceur lors du traçage de référence. Cette gamme de débits étant en particulier dépendante de l'échelle des hétérogéneités du système étudié.

II/ LES SYSTEMES KARSTIQUES DE L'OUYSSE (CAUSSE DE GRAMAT)

II.1/ SITUATION GEOGRAPHIQUE.

Le système karstique de l'Ouysse englobe le nord du causse de Gramat, une partie du Limargue et du Ségala. Il s'inscrit en totalité dans le département du Lot. Le causse de Gramat appartient aux causses du Quercy, cette région est constituée par un ensemble de plateaux formés par des calcaires jurassiques qui affleurent dans la partie nord est du bassin d'Aquitaine. Situé entre les causses de Martel et de Limogne, le causse de Gramat est limité au sud par le Lot et par la Dordogne au nord. (Fig.C4).

II.2/ CADRE GEOLOGIQUE.

Plusieurs essais de synthèses sur les connaissances géologiques régionales ont été réalisés au cours de différentes recherches effectués dans cette région (Marchet, 1991).

Le domaine étudié est installé sur la fermeture périclinale du vaste synclinorium Charentes-Quercy. Cet ensemble présente une structure d'orientation NW-SE . Le contact entre le socle et les formations secondaires toujours discordant se fait généralement par des failles normales de direction armoricaine. La genèse des structures observées dans le secteur est sous la dépendance de facteurs intimement liés: l'orogenèse pyrénéenne et le rejeu d'accidents hercyniens (Fig.C5).

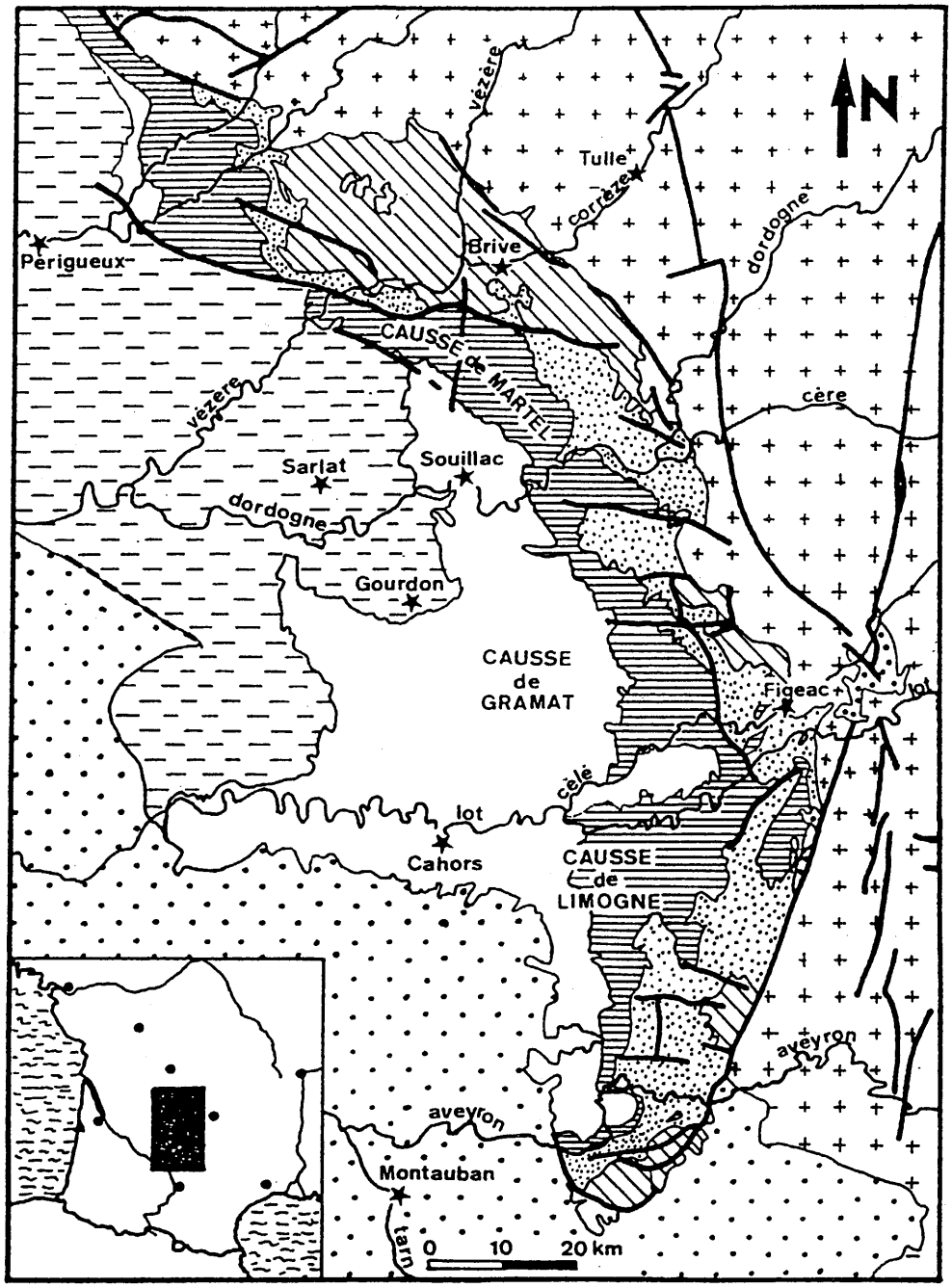


Fig.C4: extrait de la carte géologique de la France au 1/1000 000. (d'après Muet, 1985)

Villes
Crétacé sup.
Lias
Failles
Malm
Permo-trias
Tertiaire
Dogger
Socle cristallin

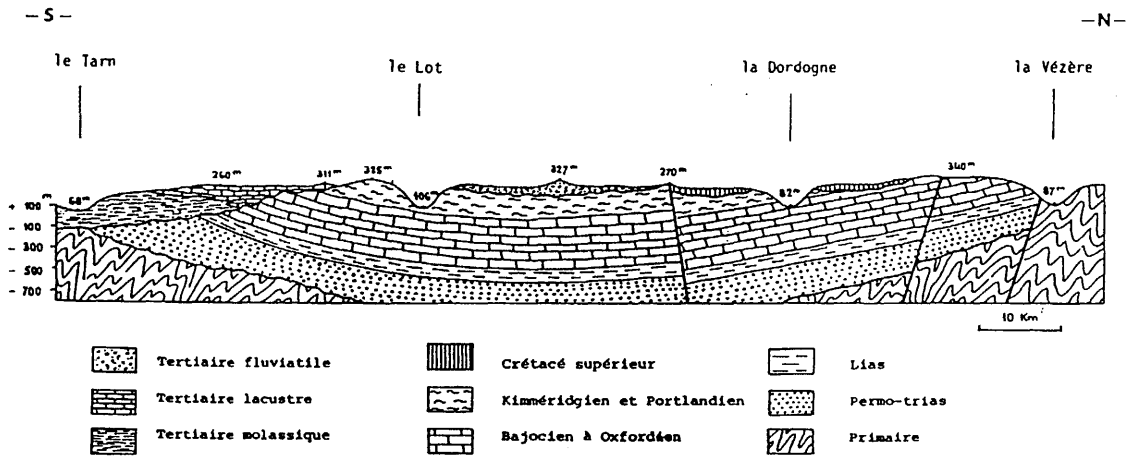


Fig.C5: Coupe géologique schématique N-S entre les vallées du Tarn et de la Vézère.(axe: La Française- Douelle-Nadaillac-Larche)

Le Paléozoïque.

Dans la zone étudiée, les formations paléozoiques affleurent dans la partie orientale. Elles sont essentiellement constituées de micaschistes et de gneiss d'âge cambro-silurien formant le prolongement de la série métamorphique du Bas Limousin.

Le Mésozoïque.

Les descriptions lithostratigraphiques des terrains mésozoïques du département du Lot font référence aux travaux de synthèses effectués par Astruc et Soulé (1977). Les terrains sont décrits du plus ancien au plus récent, ce qui correspond à la stratigraphie rencontrée en se déplaçant d'Est en Ouest.

- Trias et Jurassique.

Le Mésozoique débute par des terrains triasiques constitués de grès et d'argilites. Sur le Trias reposent les formations essentiellement carbonatées du Lias inférieur pouvant atteindre une épaisseur de 130 m .

Le Lias moyen et supérieur d'une puissance de 80 à 125 m est constitué de la base au sommet, par une alternance de petits bancs calcaires et marneux (10 à 20 m), d'une formation d'argilite grise (25 m), d'un niveau de calcaires jaunes ou bleutés détritiques et gréseux (20 m) et enfin de marnes noires surmontées par des marnes compactes gréseuses (25 à 50 m).

Le Jurassique moyen et supérieur dans le département du Lot forme un ensemble essentiellement carbonaté d'une puissance d'environ 500 m. Il englobe la série complète de l'Aalénien au Kimméridgien inférieur et constitue en affleurement le causse de Gramat. Notons également que des variations d'épaisseur d'origine paléogéographique apparaissent dans de nombreux étages.

Du Kimméridgien supérieur au Portlandien se succèdent des bancs de calcaires argileux, de marnes feuilletées et enfin des calcaires noduleux ou à texture fine, ces derniers pouvant être dolomitiques ou cargneulisés. L'ensemble atteint une puissance de 300 à 350 m.

- Crétacé

Il existe une lacune du Crétacé inférieur, les formations s'étagent donc du Cénomanien supérieur au Sénonien. Elles sont constituées de calcaires parfois détritiques ou marneux.

Le Cénozoique.

Le Tertiaire est représenté essentiellement, sur le Causse de Gramat et le Limargue, par des formations d'origine continentale. Elles ne représentent plus que quelques lambeaux suite à une érosion active.

Le Quaternaire.

Il est principalement représenté par des dépôts alluvionnaires en terrasses le long des vallées du Lot et de la Dordogne.

II.3/ CADRE HYDROGEOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE.

La superficie du bassin hydrologique du Causse de Gramat est d'environ 352 km^2. Les traçages utilisés dans les applications des méthodes de transformations concernent les pertes de Thémines et Théminettes, les gouffres de Vitarelles et Besaces (Fig.C3).

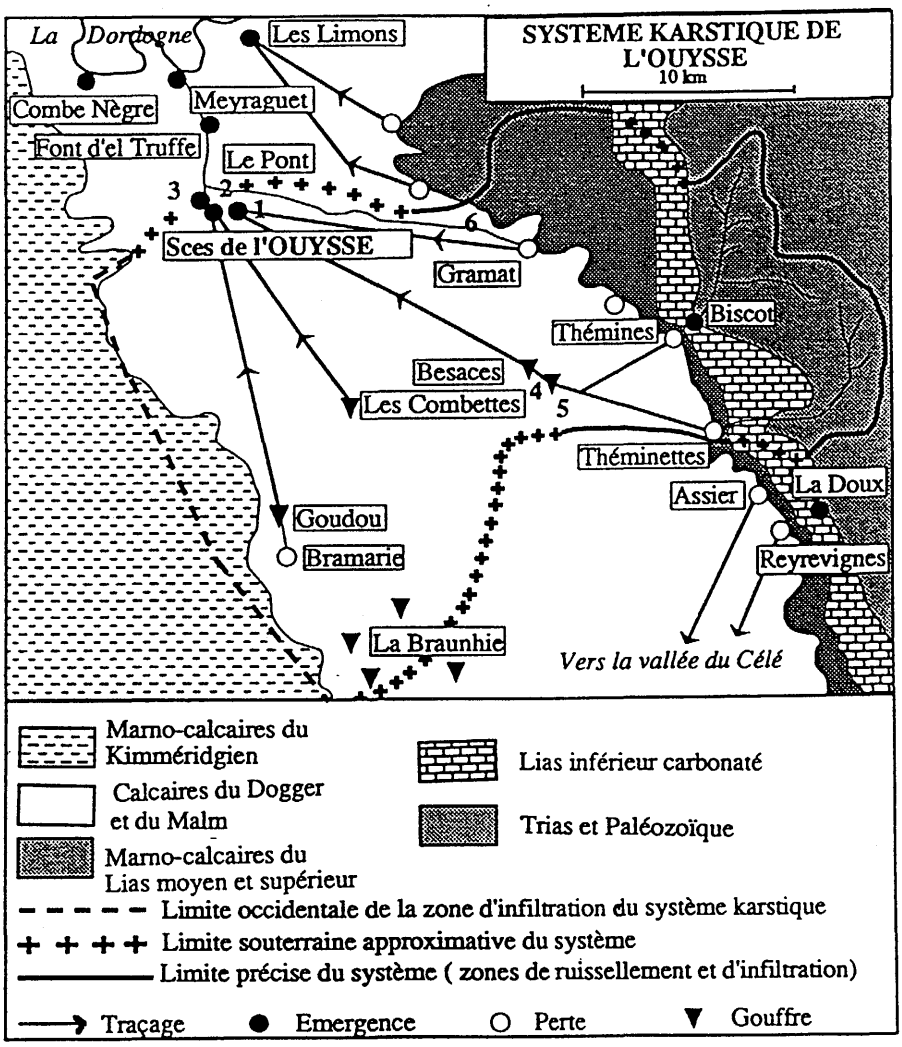


Fig.C6: Schéma du système karstique de l'Ouysse. (d'après Beaudoing et al 1989).
1: résurgence de Cabouy, 2: résurgence de Saint-Sauveur, 3: résurgence de Fontbelle,
4: gouffre de Besaces, 5: Gouffre de Vitarelles, 6: cours temporaire de l'Alzou.

L'ensemble de ces pertes et gouffres se situe dans l'aquifère constitué par les formations carbonatées du Jurassique moyen. Cette série est le siège d'importantes circulations de type karstique, le niveau de base des circulations étant constitué par le Lias marneux (Fig.C7). Les

ruisseaux qui disparaissent aux pertes de Thémines (ruisseau de l'Ouysse), de Théminettes (ruisseau Le Francès) et de l'Hôpital sont collectés par le système karstique de L'Ouysse, l'eau s'écoule ensuite en direction de la vallée de la Dordogne et alimente les résurgences de Cabouy, Fontbelle, Saint-Sauveur et les Fruitières. Les surfaces des bassins versants des eaux alimentant le réseau souterrain au niveau des pertes de Thémines, de Théminettes et de l'Hôpital sont respectivement de 55, 36,5 et 2,25 km^2. Plusieurs pertes ont également été repérées dans le lit de l'Alzou en aval de Gramat. Ce cours d'eau temporaire draine le nord du bassin versant de l'Ouysse et alimente également les résurgenges "des sources de l'Ouysse" précédemment citées. L'Ouysse aval , cours d'eau prenant naissance à la résurgence de Cabouy, est alimenté jusqu'à sa confluence avec la Dordogne par les eaux des résurgences de Saint-Sauveur, de Fontbelle et des Fruitières et également par le cours temporaire de l'Alzou. Beaudoing et al (1989) présentent un schéma interprétatif de la circulation des eaux dans le principal réseau karstique de l'Ouysse (Fig.C8), les eaux en provenance de la partie sud du système (perte de Bramarie et des Combettes) ne figurent pas sur ce schéma qui montrent par contre la limite approximative entre la zone dénoyée et la zone noyée entre le Gouffre de Besaces et les Sources de l'Ouysse.

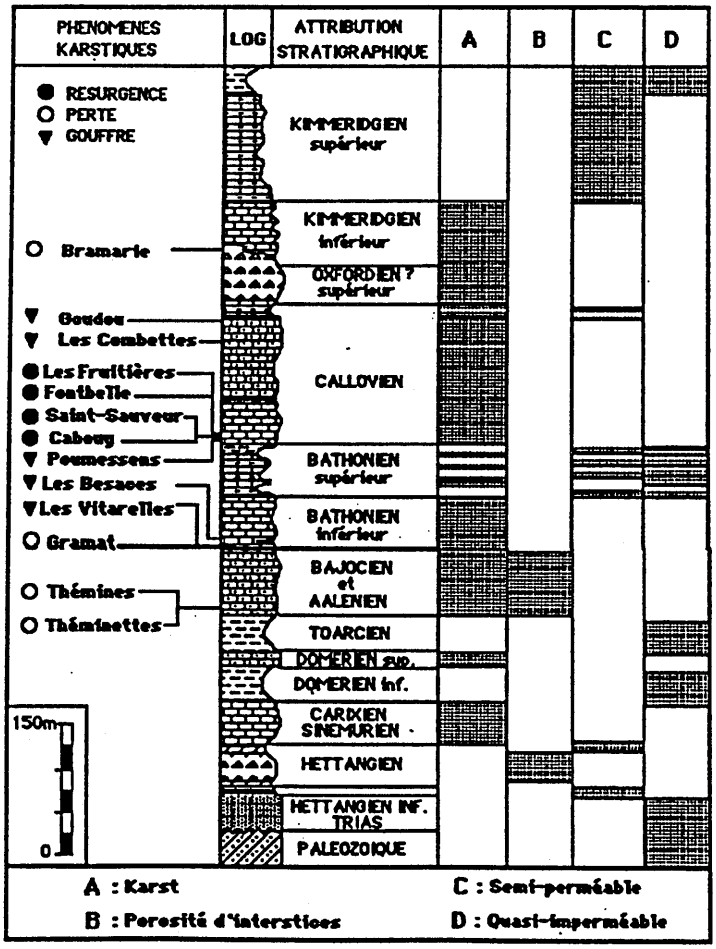


Fig.C7: Caractéristiques hydrogéologiques des terrains du système de l'Ouysse (d'après Beaudoing et al, 1989 modifié et Astruc,1977)

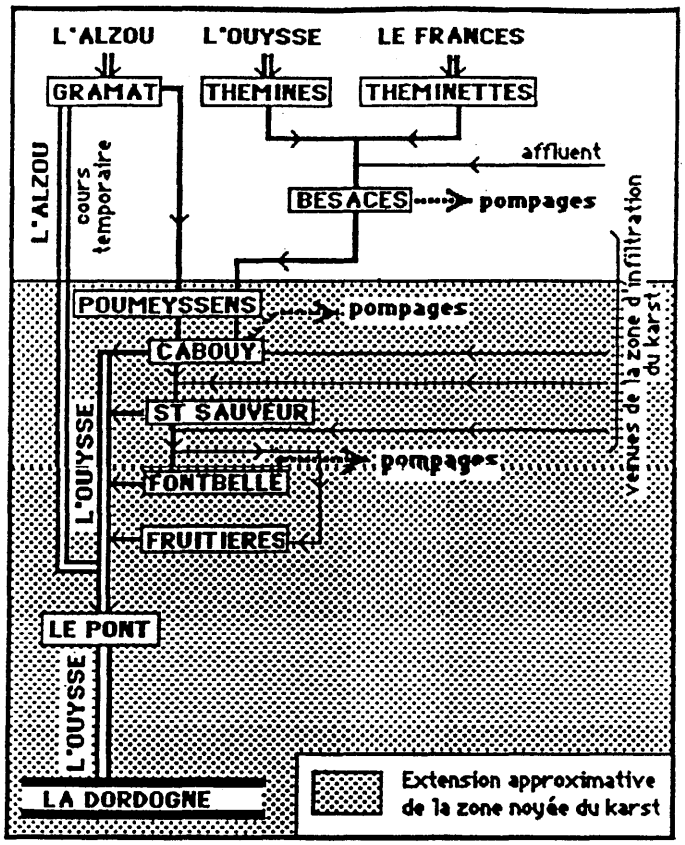


Fig.C8: Schéma de circulation des eaux dans le système karstique de l'Ouysse. (d'après Beaudoing et al, 1989). Les doubles traits représentent les cours d'eau superficiels de l'Alzou temporaire et de l'Ouysse aval.

III/ LES CAMPAGNES DE TRACAGES.

III.1/ PRESENTATION

En 1987, 1988, afin de vérifier l'existence d'un pouvoir épurateur du karst vis-à-vis des eaux qui le traversent, une étude menée par le BRGM (SRG Midi-Pyrenées, Département Eau, Environnement, Energie), le CENG de Grenoble (section d'application des traceurs), le SRAE Midi-Pyrenées, la DDAF du Lot et le groupe spéléologique de Gramat sur le réseau karstique de l'Ouysse a comporté des campagnes de traçages artificiels sur le terrain.
La réalisation de traçages à débit constant a déterminé le choix des périodes d'expérimentation, la deuxième motivation était d'effectuer ces traçages pour des régimes hydrodynamiques bien différenciés.Deux campagnes de mesures se sont donc déroulées, la première en période d'étiage (Mai 1987) et la deuxième, en période de hautes-eaux (Février 1988). Le choix du

système karstique de l'Ouysse est dû à la "bonne" connaissance des écoulements de cette région (Coustou, 1974; 1977; 1984). Ces séries d'expérimentations avaient pour but de préciser les conditions régissant les écoulements souterrains qui affectent ce bassin hydrogéologique.
Les traçages que nous avons utilisés pour les applications des méthodes de transformations sont issus de ces deux campagnes. Les traçages concernés s'appliquent aux systèmes Thémines-Théminettes-Besaces, et Thémines-Vitarelles-Besaces-Le Pont (Fig.C8). Nous ne présentons dans ce mémoire que les résultats issus de ces traçages. Ces derniers ont été choisis, car les expérimentations s'accompagnent d'une variation de débit mesurée soit aux entrées, soit à la sortie des systèmes tracés. L'ensemble des expérimentations a déjà, par ailleurs, fait l'objet de publications et de rapports.(Astruc et al, 1988; Beaudoing et al, 1988 (rapport BRGM); Beaudoing et al 1988; Beaudoing et al 1989).

III.2/ HYDROLOGIE.

Les méthodes de transformation des restitutions concentrations-temps vont être appliquées entre les différentes périodes de réalisation des traçages. Les conditions hydrodynamiques au cours des traçages concernés font référence aux débits mesurés:
- à la station DDAF du Pont de Fialliez sur le Frances en amont de la perte de Théminettes. Cette station installée par la DDAF du Lot est équipée d'un limnigraphe OTT 10.
- à la station DDAF du Pont de Rueyeres sur l'Ouysse amont (perte de Thémines). Cette station est équipée d'un limnigraphe OTT 10.
- à la station S.R.A.E sur l'Ouysse aval. Cette station, également équipé d'un limnigraphe OTT 10, a fait l'objet de jaugeages fréquents durant les périodes d'expérimentation (du 01.05.1987 au 31.03.1988), l'envahissement par les plantes aquatiques du cours de l'Ouysse provoquant en été, un détarage de la station.
La gamme des débits, intéressant les transformations des restitutions concentrations-temps en fonction des périodes de traçages pour les systèmes Thémines-théminettes-Besaces (Mai 1987, Février 1988), est comprise entre; 200 - 960 l/s (Francès), 240 - 1252 l/s (Ouysse amont). Ces débits représentent respectivement le débit le plus bas de la période de basses-eaux (Mai 1987) et le débit le plus élevé de la période de hautes-eaux (Février 1988) pour les différents cours d'eau lors de la réalisation des traçages. Pour le système-traçage Thémines-Vitarelles-Besaces-Pont, la gamme est de 1 - 8,8 m^3/s, ces débits font référence aux débits mesurés à la station Le Pont (Ouysse aval). Ces gammes de débits dans lesquelles les transformations ont été effectuées sont relativement faibles par rapport aux variations de débits sur une période annuelle quels que soient les systèmes étudiés (Fig.C9, Fig.C10 et Fig.C11). La figure C12 présente la

variation des hauteurs de pluie à la station météorologique de Gramat, quelle que soit la période, les injections de traceurs ont été effectuées à la fin d'événements pluvieux.

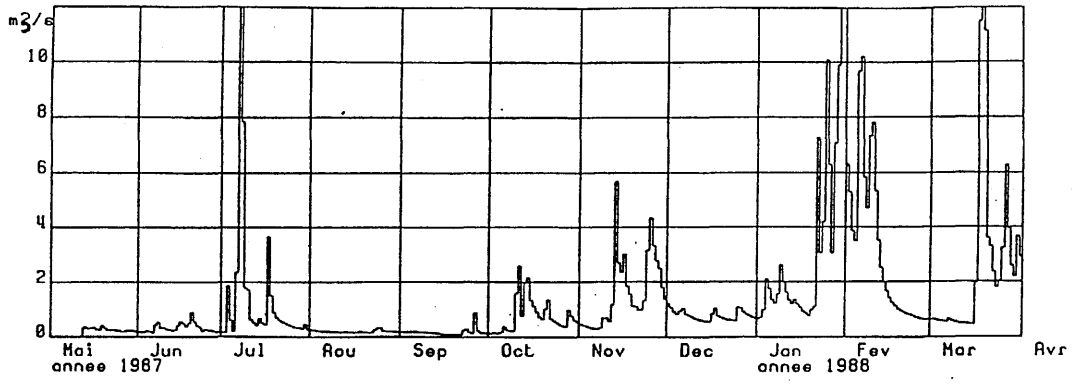


Fig.C9: Hydrogramme de l'Ouysse amont de Mai 1987 à Mars 1988. (DDAF Lot, d'après Astruc et Al,1988).

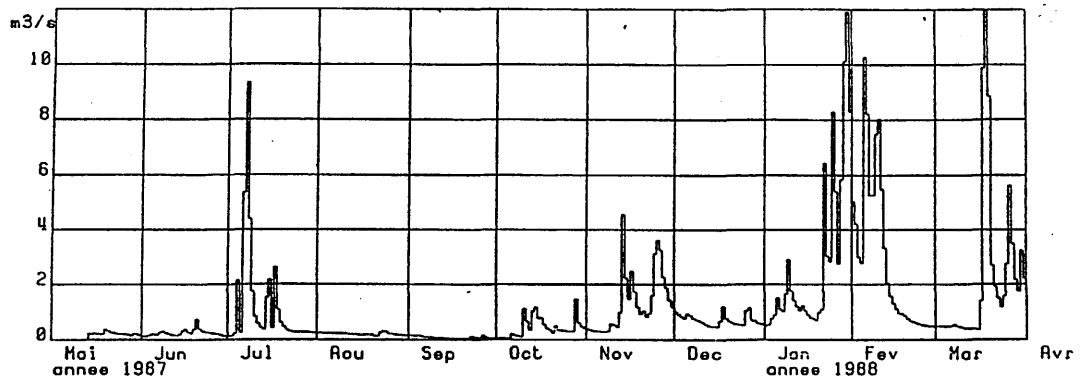


Fig.C10: Hydrogramme du Francès de Mai 1987 à Mars 1988. (DDAF Lot, d'après Astruc et Al,1988).

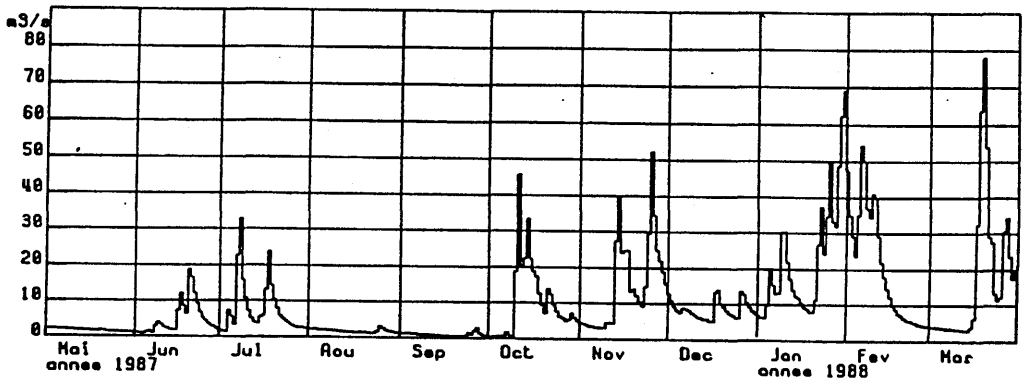


Fig.C11: Hydrogramme de l'Ouysse aval (station Le Pont) de Mai 1987 à Mars 1988. (DDAF Lot, d'après Astruc et Al,1988).

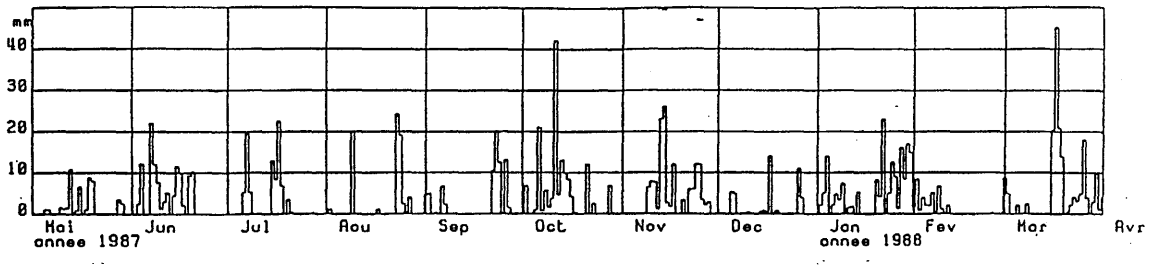


Fig.C12: Hauteurs de pluie à Gramat de Mai 1987 à Mars 1988. (d'après Astruc et Al,1988).

III.3/ APPLICATIONS AU SYSTEME THEMINES-THEMINETTES-BESACES.

La perte du village de Thémines située au fond d'une vallée "aveugle", constitue la perte principale de l'Ouysse amont au contact des terrains imperméables du Limargue avec les roches calcaires du Causse de Gramat. Les pertes de Théminettes sont éparpillées dans le fond d'un vallon fermé au sud du village de Théminettes. Les eaux du Francès disparaissent totalement au contact des calcaires de la bordure NE du Causse, elles confluent avec les eaux de la perte de Thémines en amont de Flaujac pour constituer la rivière des Vitarelles (gouffre de Besaces et Vitarelles). Le système-traçage peut être considéré comme un système à double entrée (Thémines et Théminettes) et une sortie (gouffre de Besaces) (Fig.C13).

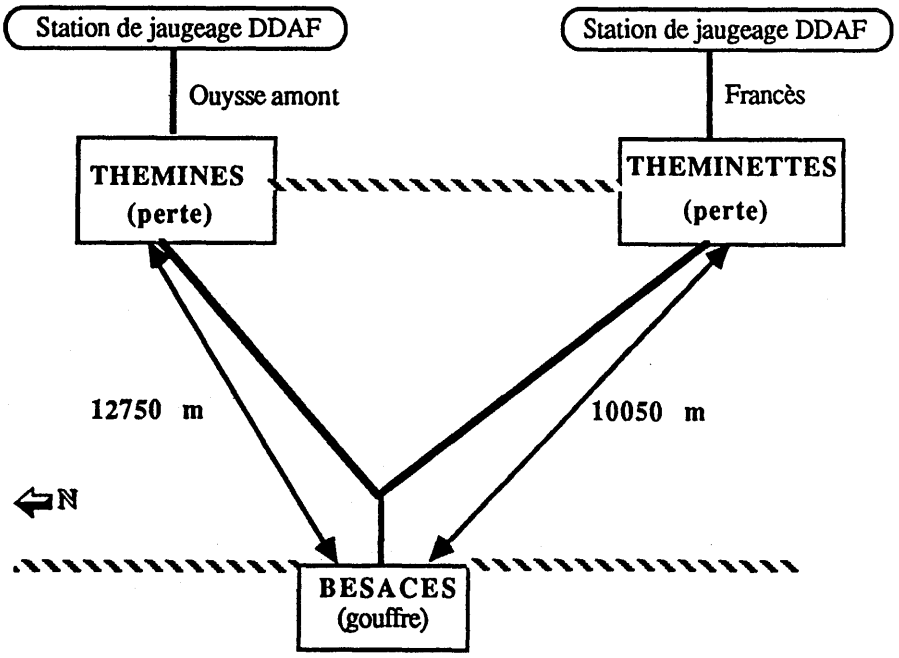


Fig.C13: Schéma du système Thémines-Théminettes-Besaces.

III.3.1/ Réalisation des traçages et résultats.

III.3.1.1/ Injections et échantillonnage.

- Période de Basses-eaux (Mai 1987).

4000 grammes de Rhodamine Wt liquide ont été injectés dans la perte terminale de Thémines le 13 mai 1987 à 11h30.
6000 grammes d'Amino G prédilués dans un bidon de 30 litres ont été injectés à 10 m de la perte de Théminettes le 13 mai 1987 à 11h.

- Période de Hautes-eaux (Février 1988).

20 000 grammes d'Amino G prédilués ont été injectés au droit de la perte terminale de Thémines le 17 février 1988.
Le 17 février 1988 , 10 000 grammes de Jaune Sulfacide dilués sont injectés à 10 mètres de la perte terminale de Théminettes.

L'échantillonnage au Gouffre de Besaces a été effectué par préleveurs automatiques pré-programmés, les échantillons ont été analysés dans les laboratoires de la Section d'Application des Traceurs au Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble.

III.3.1.2/ Résultats. (Annexe 3)

L'ensemble des restitutions de traceur à Besaces est présenté sous forme de graphiques d'évolution des concentrations en fonction du temps. Le temps d'origine (t=0) correspond au temps d'injection du traceur. Sur chaque graphe est associée la variation de la somme des débits de l'Ouysse amont et du Frances. Ne disposant pas de mesures précises de la variation du débit à Besaces, le débit ainsi obtenu, constitue la condition hydrodynamique de référence associée à chaque traçage (Fig.C14 à C17). Chaque graphique montre la variation des concentrations brutes obtenues en fonction du temps, les conditions hydrodynamiques sont représentées par la variation des débits moyens journaliers. Pour les traçages réalisés en période de hautes-eaux, le débit varie peu entre le temps d'injection et la restitution (Fig.C16 et C17), en ce qui concerne les expériences en basses-eaux, la variation des débits montre que la restitution du traceur s'est déroulée lors d'une crue (Fig.C14 et C15).

Les débits moyens jouranliers de l'Ouysse et du Francès au moment de l'injection sont respectivement de 360 l/s et 228 l/s (Mai 1987) et, 1252 l/s et 960 l/s (Février 1988).

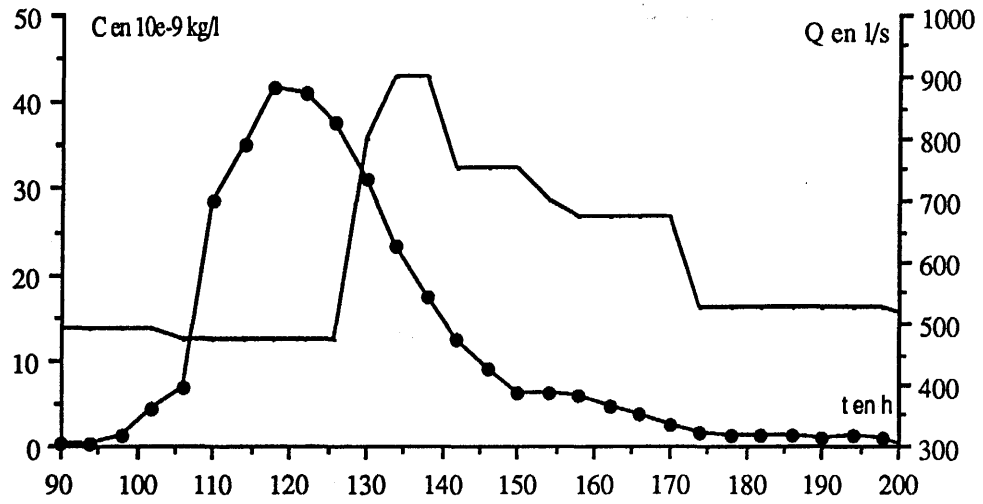


Fig.C14: résultat du traçage Thémines-Besaces et variation du débit (Mai 1987).
Trait plein: débit, rond noirs: concentrations.

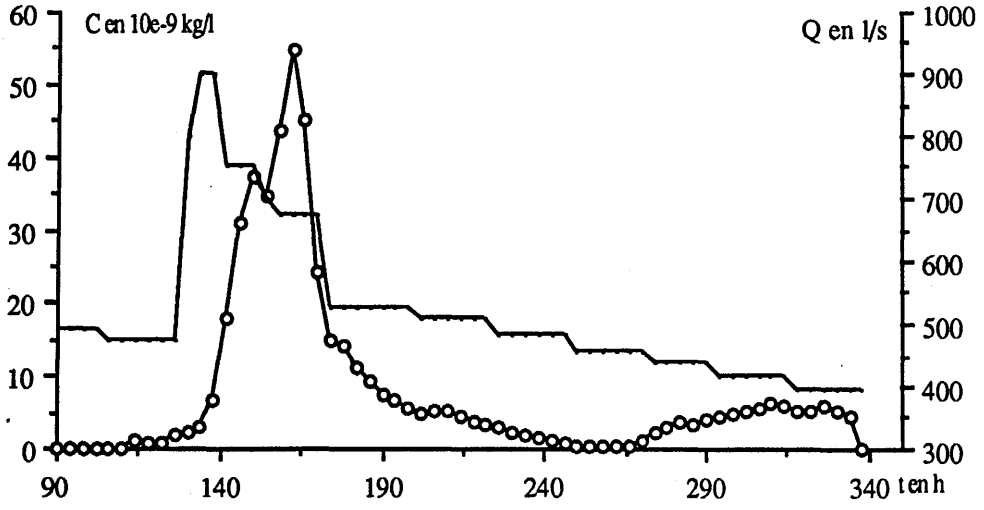


Fig.C15: résultat du traçage Théminettes-Besaces et variation du débit (Mai 1987)
trait plein: débit, cercles: concentrations

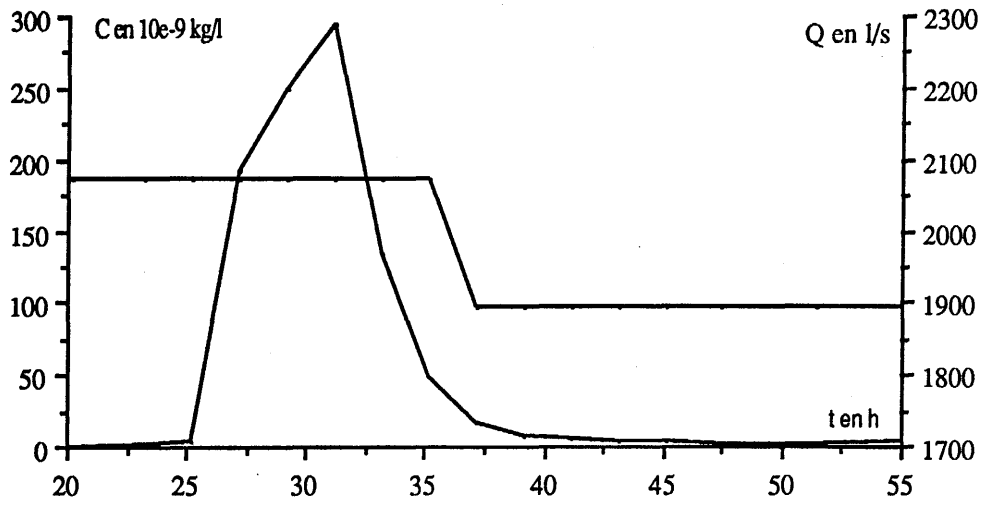


Fig.C16: résultat du traçage Thémines-Besaces et variation du débit (Février 1988)

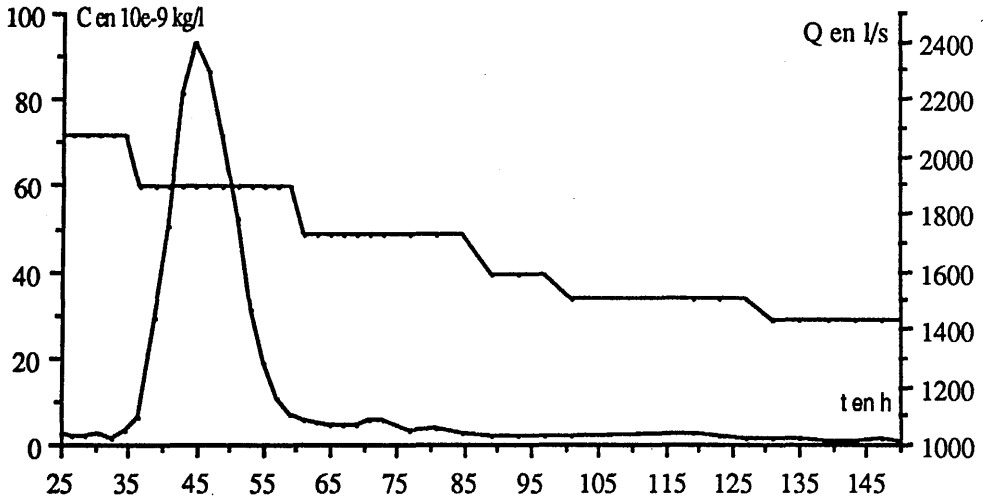


Fig.C17: résultat du traçage Théminettes-Besaces et variation du débit (Février 1988)

III.3.2/ Les applications.

Deux sortes d'applications sont effectuées sur ces systèmes-traçages. La première consiste à conparer les réponses impulsionnelles en fonction des conditions hydrodynamiques choisies de chaque période. La deuxième concerne des opérations de convolution sur les entrées en masse des ions sodium, chlorures et des matières en suspension à Thémines et Théminettes afin d'obtenir la variation des concentrations à Besaces de ces éléments à partir des résultats de traçages.

III.3.2.1/ Comparaison des réponses impulsionnelles.

III.3.2.1.1/ Détermination des réponses impulsionnelles.

Les réponses impulsionnelles sont établies en fonction des conditions hydrodynamiques représentées par la somme des débits moyens journaliers de l'Ouysse amont et du Francès. Elles sont également déterminées à partir de la masse injectée, elles prennent donc en compte les taux de restitution déterminés dans ces conditions. L'ensemble des réponses ainsi définies sont représentées sous formes de courbes (Fig.C18 à C21) où est associée la moyenne des débits moyens journaliers en fonction du temps, à partir du temps d'injection (t=0): $\frac{1}{t}\int_0^t Q(t)\,dt$

Le tableau C1 présente les temps caractéristiques et les taux de restitutions associés à chaque réponse.

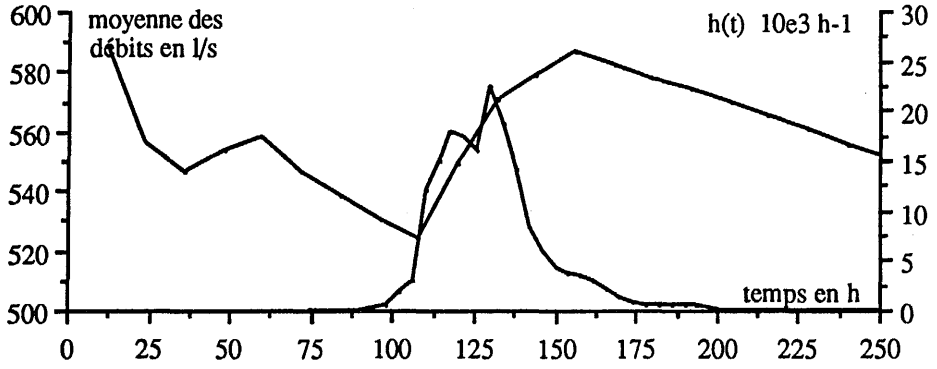


Fig.C18: Réponse impulsionnelle et moyenne des débits pour le système Thémines-Besaces (Mai 1987)

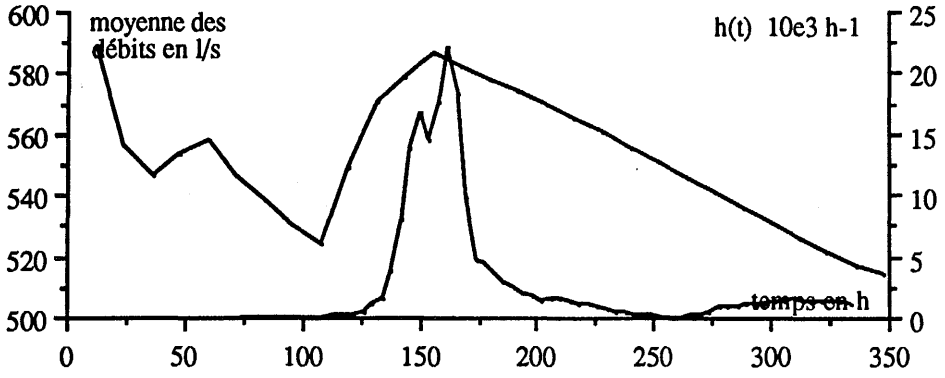


Fig.C19: Réponse impulsionnelle et moyenne des débits pour le système Théminettes-Besaces (Mai 1987)

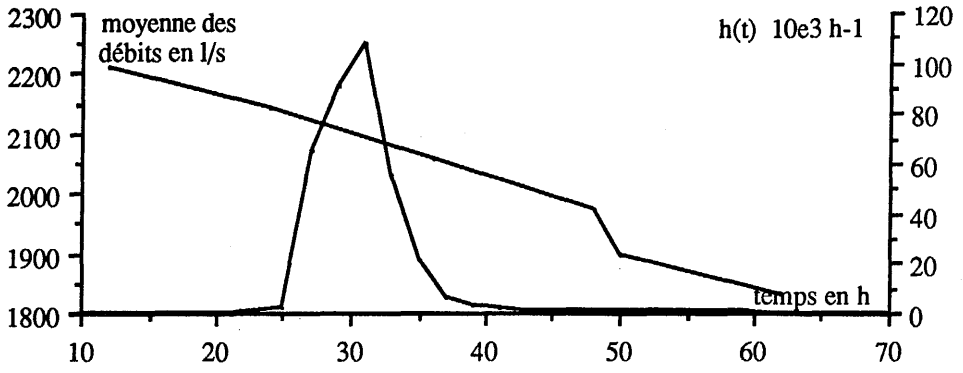


Fig.C20: Réponse impulsionnelle et moyenne des débits pour le système Thémines-Besaces (Février 1988)

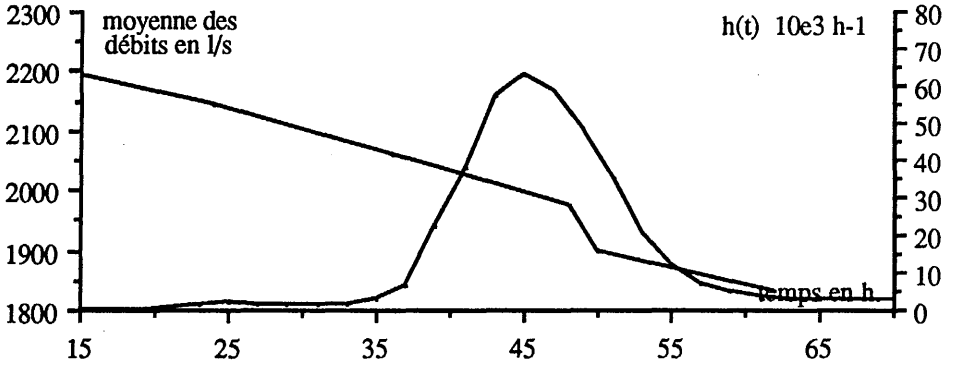


Fig.C21: Réponse impulsionnelle et moyenne des débits pour le système Théminettes-Besaces (Février 1988)

Traçages	Dates	Masse injectée	temps moyen de séjour $\bar{t}$	temps moyen harmonique	taux de restitution
Thémines-Besaces	Mai 1987	4 kg	130 h	128 h	71 %
	Février 1988	20 kg	31 h	30 h	73 %
Théminettes-Besaces	Mai 1987	6 kg	179 h	170 h	90 %
	Février 1988	10 kg	53 h	49 h	73 %

Tab.C1: Caractéristiques des traçages du Système Thémines-Théminettes-Besaces.

III.3.2.1.2/ Méthode de transformation.

La variation des débits au cours de la campagne de traçages en période de basses-eaux est prise en compte afin d'établir par transformation (débit variable - débit constant) les réponses impulsionnelles correspondant aux conditions hydrodynamiques des expériences réalisées au

cours de la période de hautes-eaux. Durant cette période la variation des débits moyens journaliers à partir du temps d'injection est négligeable vis-à-vis des temps de transfert des traceurs dans les différents systèmes. Les réponses impulsionnelles en période de basses eaux (Mai 1987) sont donc transformées pour des débits moyens constants correspondant aux temps de transfert des traceurs durant la période de hautes eaux (Février 1988).
Les réponses impulsionnelles obtenues en basses eaux pour les systèmes Thémines-Besaces et Théminettes-Besaces sont transformées respectivement pour des débits constants de 2180 l / s et 1950 l / s. Ces réponses sont comparées au résultats obtenues en périodes de hautes-eaux.(Fig.C22 et C23) .

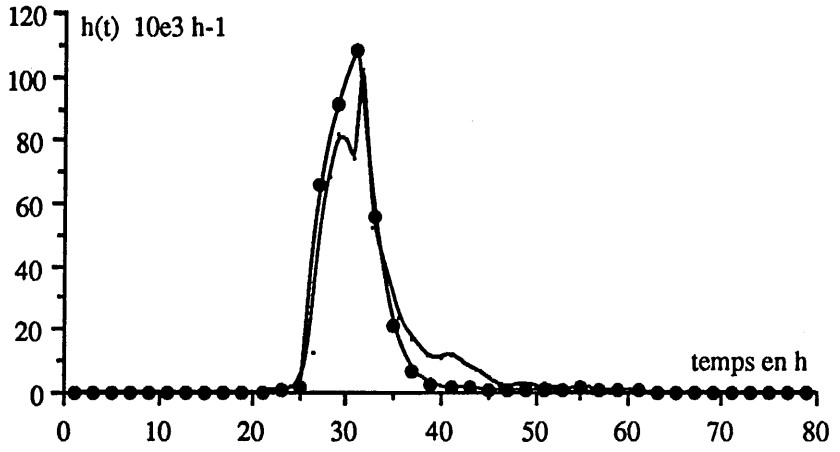


Fig.C22: Comparaison de la réponse impulsionnelle de Mai 1987 transformée pour un débit de 2180 l/s (trait plein) avec la réponse de Février 1988 (ronds noirs). (Thémines-Besaces).

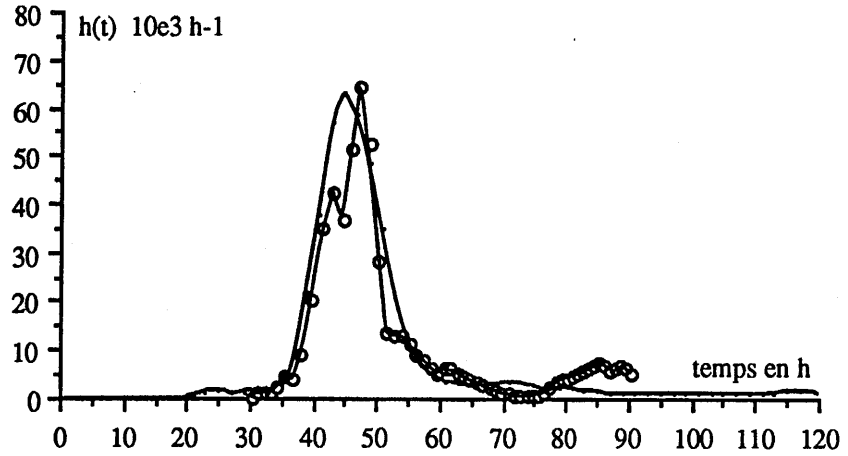


Fig.C23: Comparaison de la réponse impulsionnelle de Mai 1987 transformée pour un débit de 1950 l/s (cercle) avec la réponse de Février 1988 (trait plein). (Théminettes-Besaces).

III.3.2.1.3/ Conclusions.

Les temps de transfert des traceurs semblent être liés aux conditions hydrodynamiques à l'entrée du système.En effet les débits de 2180 et 1950 l / s correspondent aux valeurs moyennes des débits des traçages effectués en février 1988.
La bimodalité des courbes de la période de basses-eaux n'apparait pas en hautes-eaux, toutefois nous remarquons que les réponses impulsionnelles obtenues par transformation s'inscrivent en presque totalité entre les temps d'arrivée et de fin de passage des traceurs définis pour les réponses de février.
Les maxima des réponses impulsionnelles tenant compte des divers taux de restitutions sont assez proches. Il est donc possible d'admettre que le système-traçage (Thémines-Théminettes-Besaces) défini par l'espace occupé par la masse de traceur au cours de son transfert, varie peu entre les périodes de basses et de hautes-eaux dans la gamme des débits intéressant les différents traçages.

III.3.2.2/ Convolution d'entrées massiques.

III.3.2.2.1/ Mesures physico-chimiques.

Parallèlement aux prélèvements d'eau effectués pour doser les traceurs, les préleveurs utilisés ont permis de fournir au S.R.A.E de la région de Toulouse des échantillons d'eau en vue d'y réaliser des dosages physico-chimiques. Des analyses en période de hautes-eaux ont ainsi été effectuées aux pertes de Thémines et Théminettes et au gouffre de Besaces et ont porté sur la détermination: de la conductivité, de l'oxydablité, les teneurs des différentes formes azotées (NO_3^-,NKj NTot) et en matières en suspension, ainsi que sur les concentrations des ions sodiun (Na+), chlorure (Cl^-) et sulfate (SO_4^{2-}). Pour la période de basses-eaux ont été déterminés, la conductivité, l'oxydabilité, les teneurs des différentes formes azotées ainsi que les concentrations en ions sodium, potassium (K+), chlorure, et sulfate.
A partir des variations de concentrations en chlorures (Fig.C24), nitrates (Fig.C25) et les teneurs en matières en suspension (Fig.C26) aux entrées, nous avons convolué avec le programme CONVOX, les entrées massiques correspondant aux concentrations choisies afin de déterminer la restitution de ces paramètres au gouffre de Besaces, ceci à partir des traçages (de référence) réalisés sur ces systèmes.

Pour la période de basses-eaux, les opérations de mesures physico-chimiques de ces paramètres, ont concerné l'analyse de:

- 62 échantillons au niveau de Thémines et Théminettes, les prélèvements ont été effectués entre le 12 / 05 / 1987 à 14 heures et le 20 / 05 / 1987 à 18 heures.

- 19 échantillons à Besaces, prélevés entre le 18/05/1987 à 11 heures et le 21 / 05 / 1987 à 10 heures.

Pour la période de hautes-eaux:

- 40 échantillons prélevés à Théminettes entre le 17 / 02 / 1988 à 14 heures et le 24/02/1988 à 2 heures.

- 38 échantillons à Thémines, les prélèvements ont été effectués à partir du 17 / 02 / 1988 à 18 heures au 24 / 02 / 1988 à 2 heures.

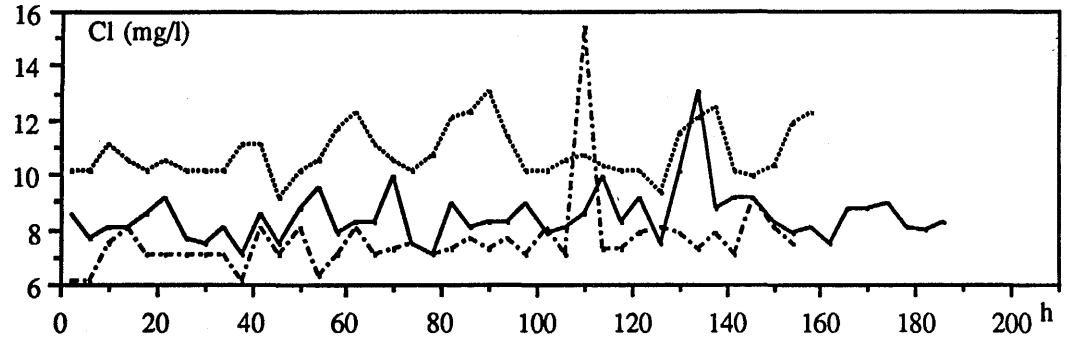


Fig.C24: Variations des concentrations en chlorure en fonction du temps. Pointillés: à Théminettes. Tirets points: à Thémines. Trait plein: Besaces. (t=0, 17 Fevrier à 12 h)

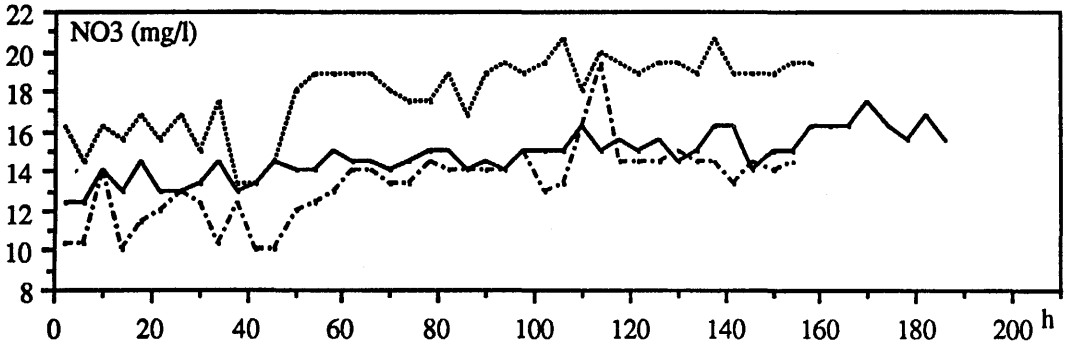


Fig.C25: Variations des concentrations en nitrate en fonction du temps. Pointillés: à Théminettes. Tirets points: à Thémines. Trait plein: Besaces. (t=0, 17 Fevrier à 12 h)

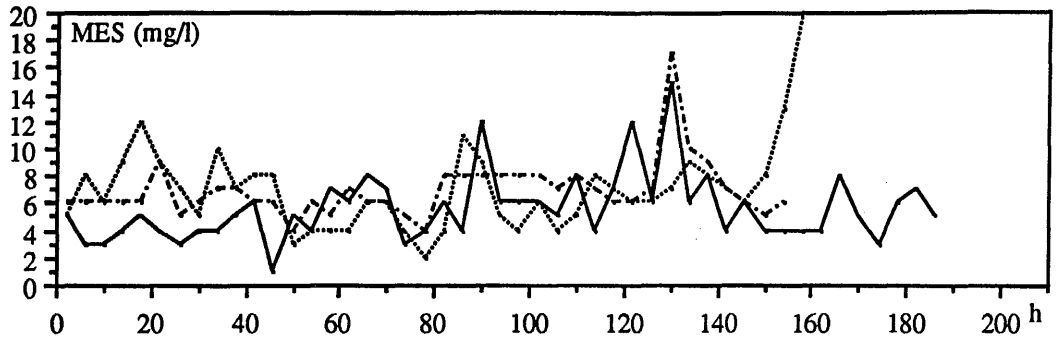


Fig.C26: Variations des concentrations en matières en suspension en fonction du temps. Pointillés: Théminettes. Tirets points: Thémines. Trait plein: Besaces (t=0, 17 Fevrier à 12 h)

III.3.2.2.2/ Comparaison des restitutions en fonction des traçages de référence.

Afin de comparer les restitutions en chlorure à Besaces en fonction des traçages de référence (hautes-eaux,basses-eaux) sur les systèmes Thémines-Besaces et Théminettes-Besaces, nous avons utilisé la variation des teneurs en chlorure aux différentes pertes. Les débits moyens journaliers à Thémines et Théminettes pendant la période de hautes-eaux (Fig.C27) associés aux valeurs de concentrations ont permis de déterminer les flux d'entrée en chlorure à partir du 17 / 02 / 1988.

Les opérations de convolution consistent, à partir de chaque traçage de référence et des conditions hydrodynamiques associées, à transformer les restitutions issues de ces traçages artificiels dans les conditions de débits intéressant chaque masse en chlorure injectée (à Thémines ou à Théminettes) entre le temps d'injection et la restitution complète à Besaces . La restitution globale des masses injectées est déterminée par la sommation des réponses en concentrations obtenues pour chaque injection.

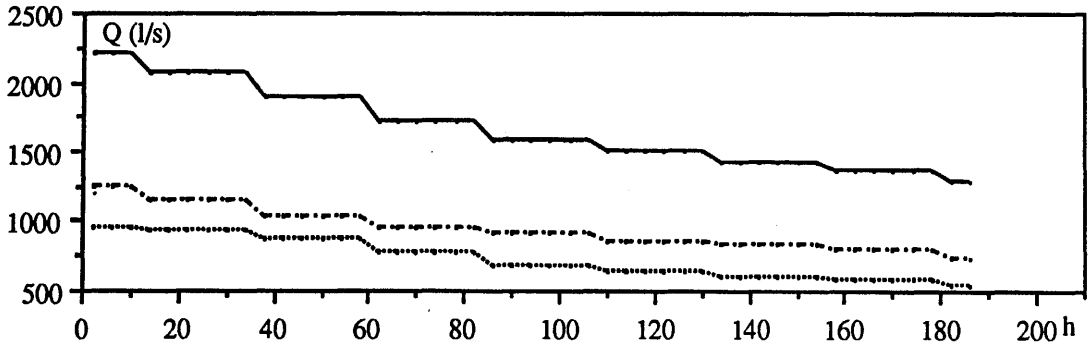


Fig.C27: Variations du débit en fonction du temps. Pointillés: à Théminettes. Tirets points: à Thémines. Trait plein: Thémines + Théminettes. (t=0, 17 Fevrier à 12 h)

Système-traçage Thémines-Besaces.

Le calcul par le programme CONVOX de la variation des teneurs en chlorure à Besaces, issues des entrées à Thémines, correspond à l'injection de 35 masses calculées à partir de la variation du flux d'entrée. Chaque masse est injectée sur un pas de temps de 4 heures, ce qui correspond à une injection en continue sur une durée de 140 heures. Les transformations des restitutions obtenues à partir des traçages en basses-eaux et en hautes-eaux, dans les conditions hydrodynamiques qui leur sont associées, sont effectuées afin de prendre en compte, au cours des entrées (en masse) des chlorures à Thémines, l'évolution des débits représentés par la somme des débits moyens journaliers de l'Ouysse amont et du Francès à partir de la première entrée le 17 / 02 / 1988 (Fig.C26). Aucun apport de dilution externe n'est pris en compte par le programme. La figure C28 montre les résultats de convolution obtenus à partir de chacun des traçages artificiels (basses-eaux et hautes-eaux) pris en référence par le programme.

Système-traçage Théminettes-Besaces.

Les conditions d'injection des entrées en chlorure au niveau de la perte de Théminettes correspondent également à 35 masses injectées sur des pas de temps de 4 heures. Ces masses sont déterminées en fonction de la variation des flux d'entrée. Les conditions de débits pour la simulation de la restitution des concentrations en chlorure à Besaces sont identiques aux précédentes (système Thémines-Besaces). La figure C29 présente les résultats comparés de restitutions simulées en fonction des traçages artificiels réalisés pour chaque période et pris en référence par le programme. Pour ces simulations, aucune dilution externe au système traçage n'est prise en compte.

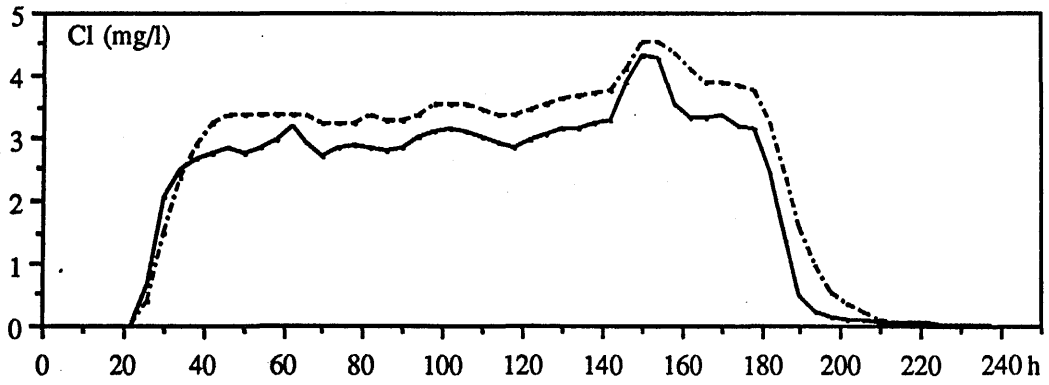


Fig.C28: Comparaison des résultats à Besaces de convolution des entrées en chlorure.(Thémines-Besaces). Trait plein: à partir du traçage de Févier 1988, tirets: à partir du traçage de Mai 1987.

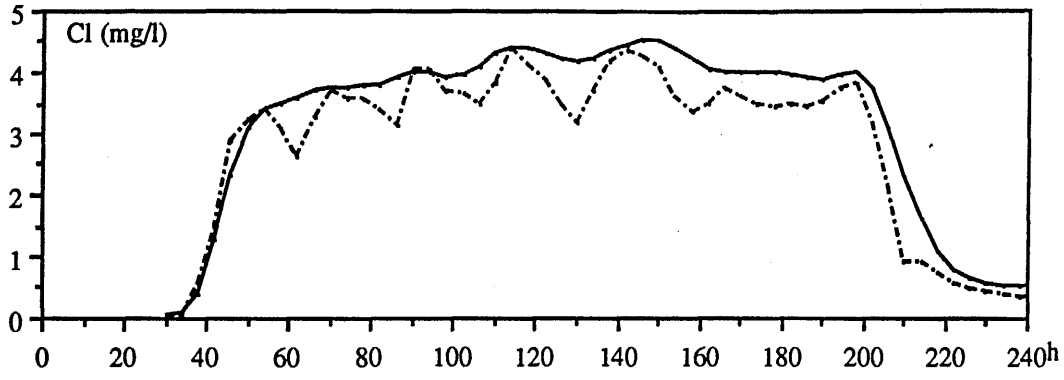


Fig.C29: Comparaison des résultats à Besaces de la convolution des entrées en chlorure. (Théminettes-Besaces).Trait plein: à partir du traçage de Février 1988, tirets: à partir du traçage de Mai 1987.

- Conclusions

Les résultats obtenus sont issus de transformations 'débit variable-débit variable'. Quelles que soient les restitutions simulées à partir du traçage de référence en période de hautes-eaux (pour lequel les conditions hydrodynamiques sont assez proches des conditions de la simulation) ou du traçage en période de basses-eaux, les temps de passage des nuages à Besaces sont similaires, entre 20 et 210 heures pour les entrées à Thémines et, entre 25 et 260 heures pour les entrées à Théminettes. En ce qui concerne les simulations Thémines-Besaces, les valeurs de concentrations maximales obtenues à partir du traçage réalisé en période de basses-eaux sont supérieures à celles obtenues à partir du traçage de la période de hautes-eaux. Cette différence est liée en particulier au fait que pour les mêmes conditions hydrodynamiques, les restitutions transformées à partir du traçage en basses-eaux présentent un étalement des concentrations dans le temps plus important que celles déterminées à partir du traçage en hautes-eaux.
Pour le système Théminettes-Besaces, la restitution simulée à partir du traçage en basses-eaux présente une oscillation de concentrations. Dans ce cas, le phénomène peut être causé par une durée trop importante entre les masses injectées aboutissant au passage d'une succession de nuages correspondant à chaque entrée de masse en chlorure. Pour ces simulations les différences entre les concentrations maximales peuvent liées aux différences entre les taux de restitution obtenus pour les traçages de chaque période.

III.3.2.2.3/ Simulations sur le système Thémines-Théminettes-Besaces.

Les eaux du réseau souterrain de l'Ouysse au niveau du gouffre de Besaces sont issues essentiellement des pertes de Thémines et Théminettes. Nous avons donc réalisé un ensemble

de simulations portant sur les entrées en chlorure (Fig.C24), en nitrate (Fig.C25), en matières en suspension (Fig.C26) aux deux entrées afin de calculer l'évolution des concentrations résultantes à Besaces. Le traçage pris en référence par le programme CONVOX est le traçage réalisé en hautes-eaux. Les conditions hydrodynamiques pour les simulations sont également représentées par la somme des débits moyens journaliers de l'Ouysse amont et du Francès à partir du 17 / 02 / 1988 à 12 heures. La durée séparant les masses injectées aux pertes de Thémines et Théminettes est égale à 4 heures. Dans chaque cas 35 masses sont prises en compte. Aucune des simulations ne fait intervenir de dilution externe aux systèmes-traçage. Les figures C30 à C32 montrent respectivement les résultats de convolution obtenus pour chaque paramètre. Deux courbes simulées sont présentées. Dans un premier cas, les masses injectées de référence pour le traçage en hautes-eaux sont les masses expérimentales, dans le deuxième cas, sont prises en compte les masses restituées, calculées pour chaque expérience. Le taux de restitution calculé est égal à 71 %. Pour chacune des simulations, nous avons également associé la variation des paramètres considérés, mesurés à Besaces.

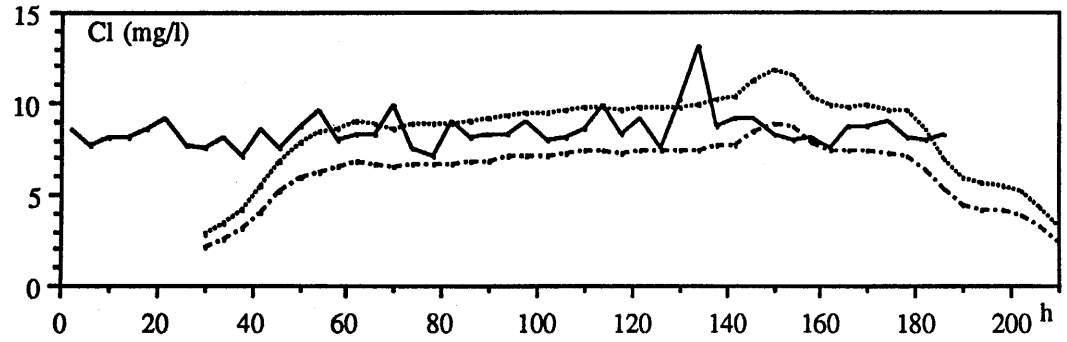


Fig.C30: Résultat à Besaces des convolutions des entrées en chlorure à Thémines et Théminettes.Trait plein: concentrations à Besaces, tirets points: calcul à partir de la masse injectée. Pointillés: calcul à partir de la masse restituée.

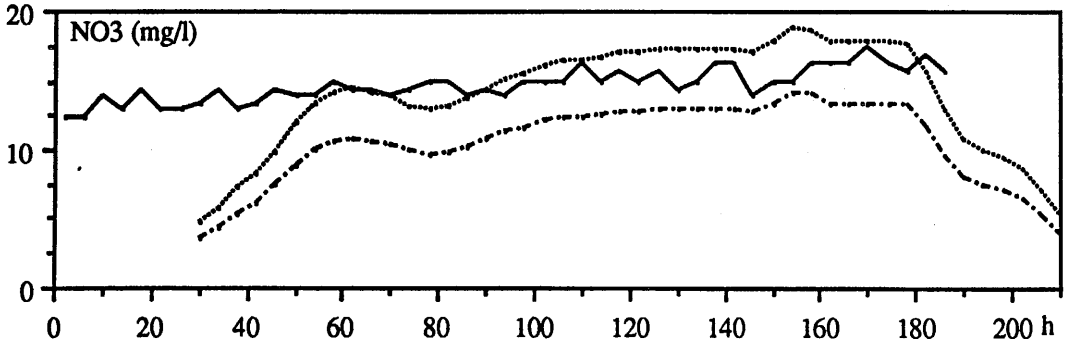


Fig.C31: Résultat à Besaces des convolutions des entrées en nitrate à Thémines et Théminettes. Trait plein: concentrations à Besaces, tirets points: calcul à partir de la masse injectée. Pointillés: calcul à partir de la masse restituée.

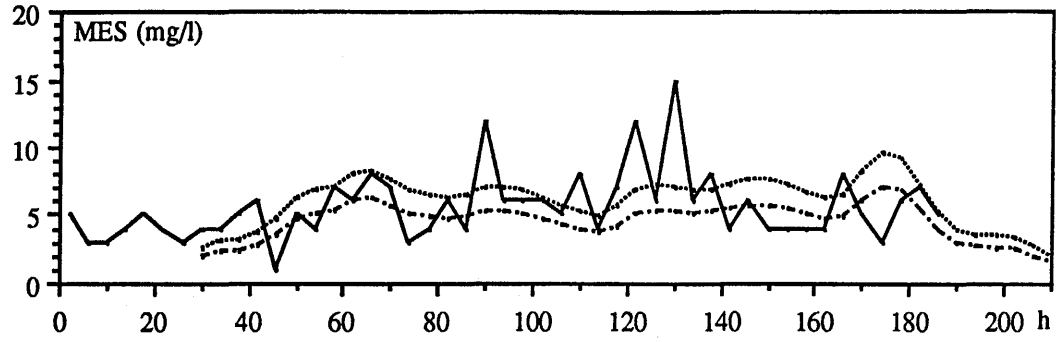


Fig.C32: Résultat à Besaces des convolutions des entrées en matières en suspension à Thémines et Théminettes. Trait plein: concentrations à Besaces, tirets points: calcul à partir de la masse injectée. Pointillés: calcul à partir de la masse restituée.

L'ensemble des simulations effectués aurait nécessité, pour une meilleure cohérence avec les développements théoriques, l'utilisation de la variation des débits mesurés au gouffre de Besaces. Néanmoins, la somme des débits de l'Ouysse amont et du Francès définie comme condition hydrodynamique des systèmes-traçages permet d'obtenir un certain nombre de résultats d'opération de convolution.

Quels que soient les paramètres d'entrée considérés (chlorure, nitrate et matières en suspension) et dans l'hypothèse où les eaux du gouffre de Besaces sont essentiellement issues des pertes de Thémines et Théminettes, les restitutions simulées ne reproduisent pas les oscillations des valeurs de concentrations expérimentales. L'utilisation des débits moyens journaliers peut expliquer ce résultat, toutefois des débits déterminés sur des périodes plus courtes pourraient ne plus être représentatifs des conditions hydrodynamiques des systèmes.

Il est possible cependant d'obtenir des paliers de concentrations simulées, inférieurs aux valeurs réelles, mais relativement proches. Dans ce cas, il faut considérer, que les flux en chlorure, nitrate et en matières en suspension à Besaces sont en presque totalité expliqués par les entrées au niveau de Thémines et Théminettes, et que ces éléments ne subissent aucune "altération" dans le système.

Une période d'enregistrement plus longue des différentes concentrations, présentant des variations plus importantes aurait permis de tester la validité des hypothèses, ainsi que des méthodes de transformations appliquées sur le système Thémines-Théminettes-Besaces pour une plus large gamme de débits.

La trop courte durée d'enregistrement des concentrations à Besaces durant la campagne de Mai 1987 et la période d'enregistrement elle-même précédant les restitutions simulées des entrées aux deux pertes n'ont pas permis d'effectuer les mêmes opérations de convolution en basses-eaux.

III.4/ APPLICATIONS AU SYSTEME THEMINES-VITARELLES-BESACES-PONT.

L'ensemble des applications effectuées sur ces systèmes-traçages concernent les restitutions des différents traceurs à la station Le Pont (Ouysse aval) , injectés dans la perte de Thémines, aux gouffres de Besaces et des Vitarelles (Fig.C33)

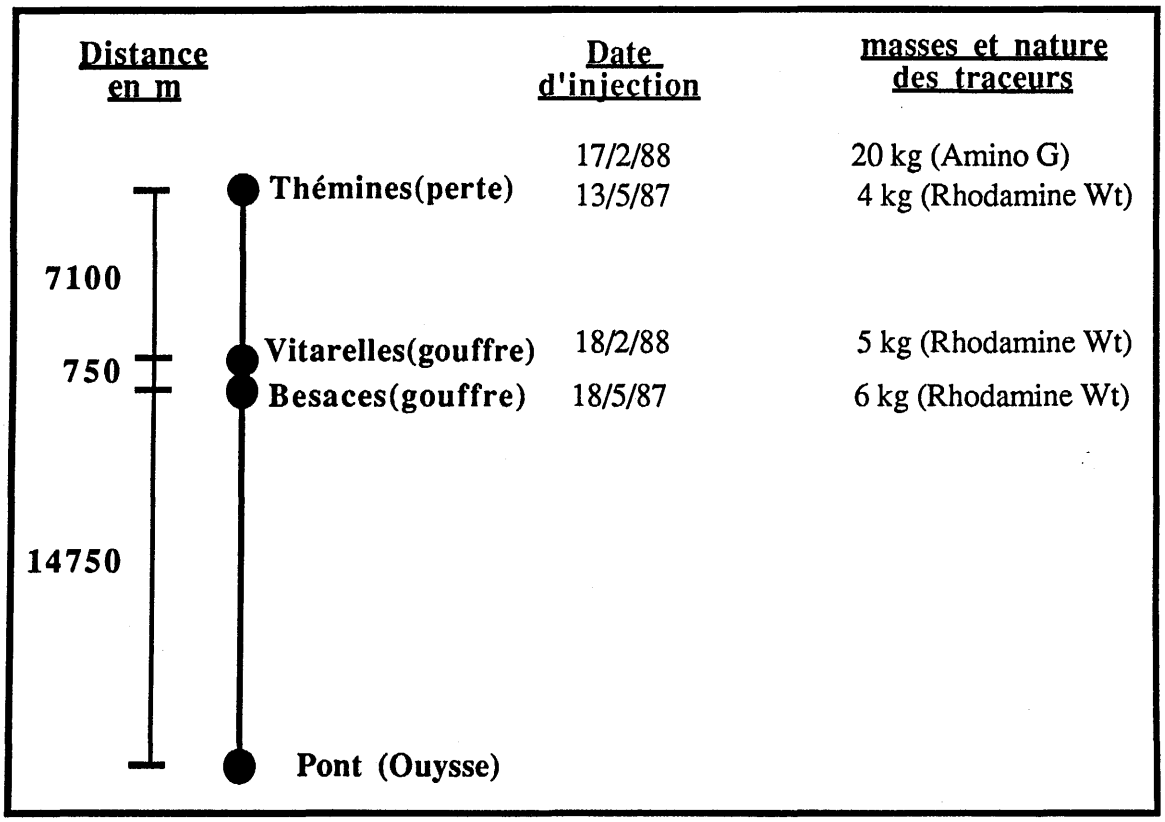


Fig.C33: Schéma du système étudié et des opérations de traçages.

III.4.1/ Injections et échantillonage.

- Période de basses-eaux.

L'injection au niveau de la perte de Thémines est l'opération réalisée le 13 Mai 1987, elle a consisté à injecter 4 kg de Rhodamine Wt.
Après quatre jours d'échantillonnage des eaux à la station Le Pont sans détection du traceur issu de la perte de Thémines, une injection relais de 6 kg de Rhodamine Wt a été effectuées le 18 Mai 1987 à 11 heures au fond du gouffre de Besaces et en aval des points de pompage des eaux souterraines.

- Période de hautes-eaux.

L'injection au niveau de Thémines est celle effectuée le 17 Février 1988 à 11 heures où 20 kg d' Amino G ont été introduite dans l'Ouysse en amont de la perte.
Le 18 février 1988 à 11 heures 5 kg de Rhodamine Wt ont été injectés au fond du gouffre de Vitarelles.

Quarante six échantillons prélevés à la station le Pont entre le 17 Février à 14 heures et le 25 février à 10 heures ont été analysés.

III.4.2/ Résultats

Les opérations de traçage réalisées en période de basses-eaux ont abouti à une restitution simultanée au Pont de la Rhodamine Wt injectée à Thémines et à Besaces. En effet la quantité de Rhodamine restituée est égale à 10 kg (Tab.C2). Quels que soient les traceurs utilisés, les taux de restitution déterminés en fonction de la variation des débits mesurés à la station le Pont sont de 100 %.

Lieu d'injection	Date d'injection	Masse injectée	% de restitution	Distance au Pont	ta	Q moyen au ta
Vitarelles	18/2/88	5 kg	100	15500 m	72,5 h	7425 l/s
Thémines	17/2/88	20 kg	100	22600 m	120 h	7548 l/s
Thémines	13/5/87	4 kg	100	22600 m	?	?
Besaces	18/5/87	6 kg		14750 m	370 h	1415 l/s

Tab.C2: Caractéristiques de traçages du système Thémines-Vitarelles-Besaces-Pont.

Les résultats de ces traçages pour les périodes concernées sont présentés sous forme de graphique où est associée à la variation des concentration, l'évolution au cours du temps des débits moyens journaliers mesurés au Pont. Pour les opérations en basses-eaux, la figure C34 signale les différentes injections expliquant l'évolution des concentrations au Pont. Si le débit d'écoulement peut être considéré comme constant entre les temps d'injection et le temps de première arrivée du traceur, la restitution est affectée d'une variation de débit comprise entre 1000 et 10000 l/s.

Les figures C35 et C36 montrent respectivement pour les traçages réalisé en hautes-eaux, l'évolution des concentrations au Pont issu des injections à Thémines et à Besaces. Si les restitutions sont accompagnée d'une faible variation de débit, celui décroit à partir du temps d'injection, de 10000 à 4500 l/s pour le traçage Thémines-Pont et de 9000 à 4500 l/s pour le traçage Vitarelles-Pont.

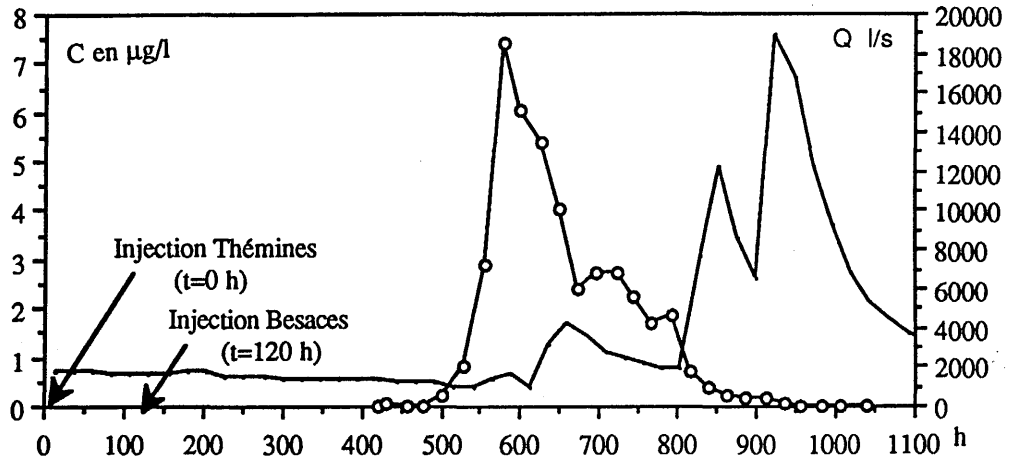


Fig.C34: Résultat des traçages Thémines-Pont et Besaces-Pont (Mai 1987) et variation du débit en fonction du temps au Pont (t=0, 13 Mai 1987). Trait plein: débit, cercles: concentrations.

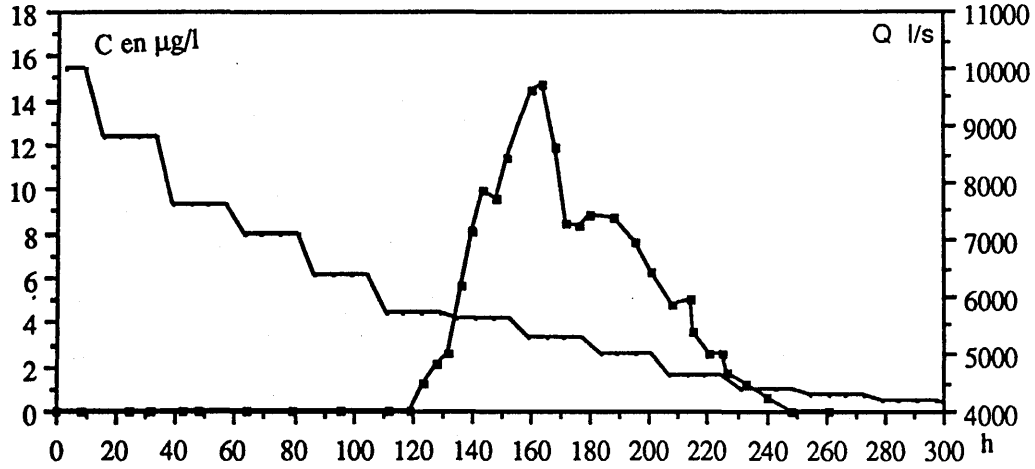


Fig.C35: Résultat des traçages Thémines-Pont (Février 1988) et variation du débit en fonction du temps au Pont (t=0, 17 Février 1988 12 h). Trait plein: débit, carrés noirs: concentrations

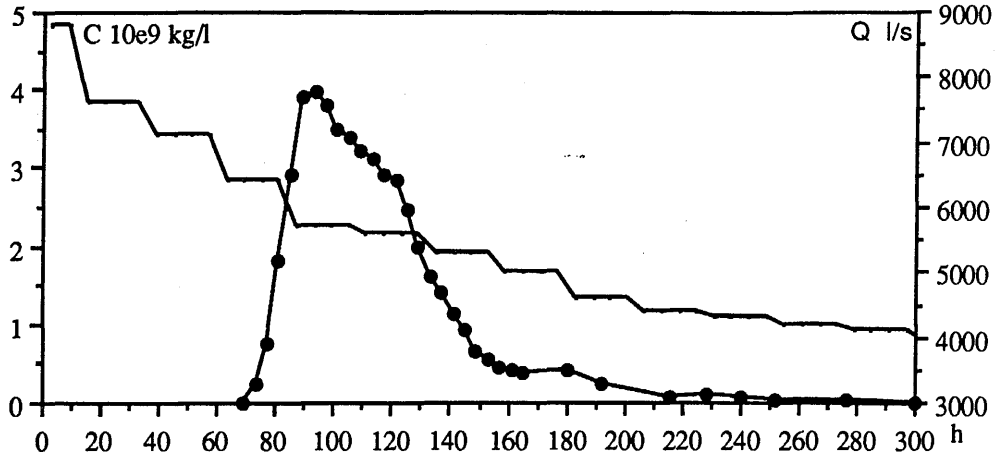


Fig.C36: Résultat des traçages Vitarelles-Pont (Février 1988) et variation du débit en fonction du temps au Pont (t=0, 17 Février 1988 12 h). Trait plein: débit. ronds noirs: concentrations.

III.4.3/ Les applications

A partir des deux traçages réalisés entre la perte de Thémines, le gouffre de Besaces et la sortie le Pont, nous avons tenté, en tenant compte des conditions hydrodynamiques à la station de sortie représentées par l'évolution des débits moyens jouranaliers, de simuler les conditions opératoires des traçages réalisés en période de basses-eaux dans les conditions de débits qui leur sont associées. Cette simulation a donc pour but de définir la variations des concentrations en traceur à la station le Pont durant la période de basses-eaux.

Le traçage entre la perte de Thémines et le Pont en hautes-eaux pris en référence par le programme CONVOX va permettre de simuler une restitution pour les conditions de réalisation du traçage en basses-eaux.

Pour simuler la restitution du traceur au Pont issue de l'injection à Besaces en Mai 1987, nous avons pris comme référence le traçage Vitarelles le Pont en période de hautes-eaux en considérant que le transfert du traceur entre le gouffre de Vitarelles et le gouffre de Besaces n'influence pas la restitution au Pont. La distance séparant ces deux points est de 750 m et celle séparant le gouffre de Besaces de la station le Pont est de 14 750 m. La restitution à Besaces du traceur injecté au gouffre de Vitarelles ont permis de déterminer un temps moyen de séjour d'environ 5 heures, 90 % du traceur étant recuperés en moins de 16 heures. Nous avons donc considéré que le traceur, expérimentalement injecté à Vitarelles, l' a été à Besaces 5 heures après.

Aucune dilution externe au système-traçage n'a été prise en compte par le modèle, bien que les pluies survenues fin Mai et début juin 1987 (Fig.C12) aient pu créer une dilution des restitutions de traceur du système-traçage en particulier par les apports d'eau superficielle du cours temporaire de l'Alzou. Ces évènements pluvieux interviennent en effet au cours de la restitution du traceur au Pont pendant la période de basses-eaux. Les conditions de dilution

seraient alors différentes de celles de la période de hautes-eaux où aucun événement pluvieux n'intervient au cours des restitutions de traceur. La figure C37 montre le résultat de cette simulation comparée à la restitution réelle issue des injections de Rhodamine Wt à Thémines et Besaces en Mai 1987.

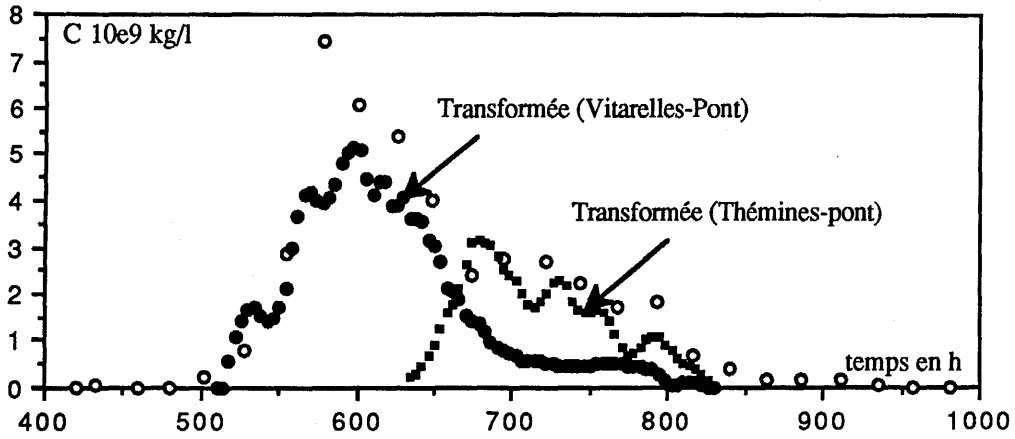


Fig.C37: Résultats des transformations des restitutions Thémines-Pont et Vitarelles-Pont (Février 1988) pour les conditions hydrodynamiques de Mai 1987. Cercle: résultat du traçage Thémines-Théminettes-pont (Mai 1987).

III.4.4/ Conclusions

La simulation proposée met en évidence, sur la restitution obtenue en basses-eaux, la part de traceur issue du gouffre de Besaces et celle issue de la perte de Thémines en basses-eaux. Elle montre en particulier que le temps de première apparition du traceur au Pont, et injecté à Thémines, est de l'ordre de 27 jours pour les conditions de débits de la période Mai-Juin 1987. Les concentrations calculées ne simulent qu'approximativement les concentrations réelles. Si l'on admet la validité des transformations, trois causes principales peuvent expliquer ces différences :

-Les erreurs commises sur les mesures de débit au Pont.

L'utilisation des débits moyens journaliers insuffisamment precis pour simuler les variations de concentrations.

- L'existence d'une dilution externe au système-traçage différentielle en fonction des périodes d'expérimentation. Pour ce dernier cas, le programme aurait pu prendre en compte un effet de dilution, mais ce dernier reste interprétatif lorsque qu'il n'est pas confirmé sur le terrain.

III.5/ DISCUSSION

Dans le cadre des transferts de masse en milieu karstique, la méthode de transformation des réponses (Concentrations-temps) et par conséquent les opérations de convolution à débit variable ne peuvent être appliquées que dans une gamme de débit où le système-traçage est identique. Nous illustrons par la figure C38 un exemple de système-traçage entre une perte PP et une source S où les conditions hydrodynamiques peuvent modifier les cheminements du traceur entre l'entrée et la sortie.
Lorsqu'un traçage de référence a "intéressé" le système [1] (Fig.C38), ce dernier ne peut être transformé que dans une gamme de débits à la source S comprise entre Q min et Qmax en relation avec les niveau d'eau H min et H max dans la perte PP. Un débit supérieur implique un écoulement dans le conduit n° [2] et par conséquent un espace différent occupé par le traceur au cours de son transfert entre les point PP et S.

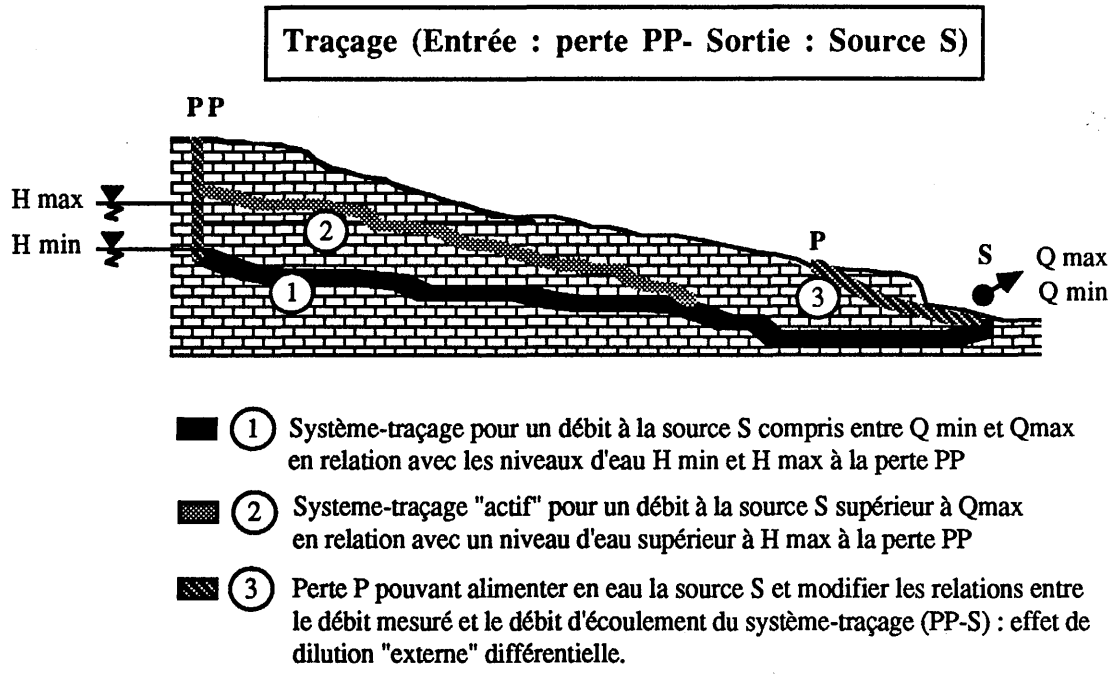


Fig.C38 : Illustration de la limite de la méthode de transformation dans une gamme de débits mesurés à la sortie d'un système à volume constant.

La figure C38 montre également que des eaux "externes" au système-traçage peuvent alimenter la source S à partir de la perte P, ces eaux vont donc diluer les quantités de traceur au point de sortie. Les débits mesurés à la sortie ne seront plus représentatifs du système-traçage. Si les apports d'eau varient en fonction des périodes hydrodynamiques, on observera un effet de dilution "externe" différentielle qu'il convient de prendre en compte lors des transformations des réponses concentrations-temps.

- CONCLUSION -

Ce travail à permis d'aboutir à la conception d'un modèle de transformation des réponses impulsionnelles, déterminées à partir de traçages artificiels, en fonction des conditions hydrodynamiques. Couplé à des opérations de convolution, ce modèle permet de déterminer les réponses en concentrations d'un système à volume constant pour des entrées en masses quelconques en fonction du temps. La méthode de transformation établie s'applique aux systèmes non stationnaires, mais linéaires. Elle nécessite également une indépendance entre l'espace occupé par le traceur au cours de son transfert et les conditions hydrodynamiques auxquelles ce dernier peut être soumis.

Pour des systèmes à volume constant, les applications en colonne ont montré les limites d'application de la méthode de transformation des réponses impulsionnelles. Les phénomènes de densité liés à la masse injectée, modifient les restitutions de traceur en fonction du débit d'écoulement à l'intérieur d'un tube. Ces phénomènes étant dépendants de la concentration en traceur à l'entrée du système, la gamme de débits dans laquelle les transformations peuvent s'effectuer ne peut être définie qu'en fonction d'une gamme de masses injectées.

En milieu crayeux granulaire, les phénomènes d'adsorption ou de diffusion matricielle de traceur sont des facteurs de non linéarité. En effet l'adsorption peut être différente en fonction du temps de séjour du traceur dans la colonne. Ce temps variant en fonction du débit d'écoulement, les transformations ne donnent des résultats satisfaisants que pour de faibles variations de débit entre les traçages.

L'utilisation de la méthode de transformation, pour des traçages réalisés sur le système karstique de l'Ouysse, a permis de montrer la validité d'applications à:
- l'établissement de relations entre les réponses, sur le système Thémines-Théminettes-Besaces pour des périodes hydrodynamiques différentes dépendantes du débit aux entrées et sur le système Thémines-Vitarelles-Besaces-Pont, dépendantes du débit de sortie au Pont.
- la détermination, au gouffre de Besaces, de la variation des concentrations en chlorure, nitrate et matières en suspension à partir des entrées en masse de ces éléments au pertes de Thémines et Théminettes.

Pour les milieux karstiques, la gamme de débit, dans laquelle les transformations peuvent s'effectuer, dépend de la karstification du système étudié. En effet les écoulements peuvent être modifiés en fonction des conditions hydrodynamiques. Il est donc nécessaire de disposer, à partir de traçages, de plusieurs réponses d'un système afin de s'assurer de l'immuabilité du système-traçage dans la gamme de débit auquel les transformations vont être effectuées.

Nous nous sommes attachés à démontrer qu'un système-traçage naturel pouvait avoir pour une gamme de débits donnée un espace occupé par le traceur au cours de son transfert identique quelles que soient les conditions hydrodynamiques.

La méthode de transformation des réponses concentrations-temps, dans l'hypothèse d'un système à volume constant permet de "s'affranchir" des conditions hydrodynamiques dans l'analyses des systèmes-traçages, elle autorise également des opérations de convolution à débit variable (système non stationnaire). C'est aussi un outil d'étude qui offre la possibilité de comparer le comportement d'un système naturel vis-à-vis des transferts de masse à celui d'un système sous pression. C'est dans ce sens que la méthode ouvre de nouveaux champs d'étude des milieux naturels.
En ce qui concerne l'utilisation de la méthode pour la prévision de pollution, la condition d'un système à volume constant limite les applications. Il est donc nécessaire d'envisager la possibilité d'établir des relations entre les réponses concentrations-temps et les conditions hydrodynamiques pour les systèmes à surface d'eau libre ce qui entraine une variation du volume en fonction du temps mais également des relations complexes entre les débits mesurés en sortie et les vitesses d'écoulement lors du transfert de la masse dans le milieu.

BIBLIOGRAPHIE

Ackerer P. (1985). Propagation d'un fluide en aquifère poreux saturé en eau. Prise en compte et localisation des hétérogénéités par outils théoriques et expérimentaux; Thèse de Dr. Ing., Univ. Louis Pasteur, Strasbourg.

Alessandrello S., Amiot M. et Delance J.H. (1970). Restitution de colorant par vagues successives (Rivière souterraine de Bèze, Côte d'Or). Spelunca Memoires,7. Actes du IX Congrés nat. de Speleol., pp 49-59.

Atckinson T. C. (1985). Present and future directions in karst hydrogeology, in Ann. Soc. Geol. Belg. 108,293.

Astruc J. G. (1988). Le paléokarst quercynois au paléogène. Altérations et sédimentations associées. Document du BRGM n°133, Diplôme Universitaire de Recherche, UPS Toulouse, 135p.

Astruc J. G. et Soule J. C. (1977). Hydrogéologie du Quercy. Suppl. de Quercy Recherche, vol 3, 110 p.

Beaudoing G., Astruc J.G., Baradat J M.,Bouziges M., Charentus T., Coustou J.C, Getto D., Mouyou P., Ricard J., Sauty J.P., Tarrisse A., Vicente A. (1988).Méthodologie des traceurs appliquée à la détermination des paramètres de transfert de l'eau et du pouvoir autoépurateur des réseaux karstiques: étude du Causse de Gramat (Lot,France). Actes du 4e Colloque d'Hydrogéologie en Pays Calcaire, tome 1.

Astruc J.C., Baradat J.M., Beaudoing G., Bouziges M., Coustou J.C., Getto D., Ricard J., Sauty J.P., Tarrisse A., Vicente A. (1988). Evaluation de l'épuration naturelle des eaux circulant dans un milieu karstique. Application à la protection des ressources en eau. Réseau karstique de l'Ouysse, Causse de Gramat (Lot). Rapport BRGM-CENG-SRAE Midi-Pyrénées-DDAF du Lot-Groupe spéléologique de Gramat, n° 88 SGN 293 MPY.

Beaudoing G., Astruc J.G., Baradat J M.,Bouziges M., Charentus T., Coustou J.C, Getto D., Mouyou P., Ricard J., Sauty J.P., Tarrisse A., Vicente A. (1989). Traçages et protection des captages dans le karst : détermination des paramètres de transfert et prévision de la propagation des pollutions dans le réseau karstique de l'Ouysse Causse de Gramat (Lot, France). Hydrogéologie, n°4,1989,pp 279 à 292, 18 fig., 6 tabl.

Bear J. (1972). Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier, Amsterdam, 764 p.

Bouleau N. (1986). Probabilités de l'ingénieur. Variables aléatoires et simulations. Ed. Herman, Paris, 387p.

Box G. E. P. and Jenkis G. M. (1976). Time Series Analysis : Forecasting and Control. Edité par Holden Day. 575 p.

Burden R. L. & Faires J. D. (1989). Numerical analysis, fourth edition. PWS Kent Eds., Boston, 729p.

Chandrasekhar S. (1943). Stochastic problems in physics and astronomy, Rev. Mod. Phys. 15, pp 1-89.

Charrière R. (1974). Perfectionnement à la mesure des traceurs fluorescents. Application à l'hydrogéologie. Thèse de 3e cycle, Univ. Sc. et Méd. de Grenoble, 197 p.

Chui C.L. et Bitler R.P (1969). Linear time varying model of rainfall-runoff relation. Water Ress. Res. Vol 5, N°2.

Coustou J.C. (1974). La rivière souterraine des Vitarelles sous le Causse de Gramat. Quercy recherche, n°1, pp 40-47.

Coustou J.C. (1977). A propos de l'hydrographie de la partie nord du Causse de Gramat. Bull. de la société des études du Lot, n°1, pp 37-42.

Coustou J.C. (1984). Le système karstique de l'Ouysse. Spéléoc. Bull., n° 28, pp 26-32.

Crampon N. (1987). Détermination approchée des caractéristiques hydrodispersives en traçage par injection brève. Méthode des trois points. Ann. Soc. Géol. Nord. Vol. CV, pp. 243-248.

De Jong J. (1958). Longitudinal and transverse diffusion in granular deposits. Trans Amer. Geophys. Union 39, pp 67-74.

Diaconu V., Bulgar A. et Oancea V. (1984). The Use of Transfer Function in Establishing the Water Circulation Characteristics in the Karst. Theorical and Applied Karstology, 1. pp 225-230.

Dooge J. C. I. (1973). Linear theory of hydrologic systems. U. S. Dep. Agric., Washington D. C. Tech. Bull N° 1468. 327p.

Dreiss S. J. (1982). Linear Kernels for Karst Aquifers. Water Ress. Res., Vol 18, N° 4, pp 865-876.

Dreiss S. J. (1983). Linear unit-response functions as indicators of recharge areas for large karst springs. J. of Hydrol. N°61, pp 31-44.

Dreiss S. J. (1989). Regional Scale Transport in a Karst Aquifer, 2. Linear Systems and Time Moment Analysis. Water Ress. Res., Vol 25, N° 1, pp 126-134.Januar 1989.

Duffy C. J. and Gelhar L. W. (1985). A frequency Domain Approch to Water Quality Modelling in Groundwater : Theory. Water Res. Res., Vol 21, N° 8, pp 1175-1184, August 1985.

Duffy C. J. and Gelhar L. W. (1986). A Frequency Domain Analysis of Groundwater Quality Fluctuations: Interpretation of Field Data. Water Ress. Res., Vol 22, N° 7, pp 1115-1128, July1985.

Duffy C. J. and Harrison J. (1987). The Statistical Structure and Filter Characteristics of Tritium Fluctuations in Fractured Basalts. Water Ress. Res., Vol 23, N° 5, pp 894-902.

Dzikowski M. (1988). Modélisation des langues salées issues des terrils Alex et Rodolphe par la méthode de résolution: " Marche au hasard" (Modèle bidimensionnel bicouche de Bollwiller à Colmar) D.E.A, Univ. Paris VI.

Dzikowski M., Carlier E., Crampon N. et Marsily G. de, (1991). Relations entre réponses impulsionnelles et conditions hydrodynamiques des systèmes dans le cadre de traçages artificiels : théorie et applications sur colonne de laboratoire.J. of Hydrol., Vol. 125 pp.129-148.

Fried J. J. et Combarnous M. A. (1971). Dispersion in porous media. Advances in Hydrosciences, Ed Van Te Chow, Vol 7 pp; 167-282

Gaillard B. (1976). Methode de traceurs pour la Détermination des paramètres de transfert de substances en solution dans l'eau des aquifères.Contribution à la délimitation des périmètres de protection des captages d'eau d'alimentation publique. Thèse Doctorat d'Université.Univ. Sc. et Med. de Grenoble. 113 p.

Gaspar E. (1987) Modern Trends in Tracer Hydrology, Vol 1, CRC Press, Inc, Florida, U.S.A.

Gaspar E. and Oraseanu I. (1987). Natural and artificial tracers in the study of the hydrodynamic of karst. Theoritical and applied karstology. Vol n°3, pp 31-107.

Goblet P. (1981). Modélisation des transferts de masse et d'énergie en aquifère. Thèse de Docteur-Ingénieur, Paris.

Grisak G.E. et Pickens J.F. (1981). An Analytical solution for Solute Transport Through Fractured Media with Matrix Diffusion. J. of Hydrol., N° 52, pp 47-57.

Guizerix J. (1988). A geometrical interpretation of traceur experiments in non steady (flow,volume) systems. 4th conference on Radiosotope Application and Radiation Processing in Industry. Leipzig-G.D.R. Sept 1988.

Guizerix J. et Margrita R. (1976). Méthodologie d'étude par traceur des transferts de masses. La Houille Blanche. N° 3/4.1976 Tech. des traceurs en hydrologie et en hydraulique. pp 187-196.

Guizerix J., Margrita R., Molinari J. (1976). Etude par traceurs des modalités de transfert dans un réseau hydrographique.La Houille Blanche. N° 3/4.1976 Tech. des traceurs en hydrologie et en hydraulique, pp 277-284.

Gupta S. K., Batta R. K., et Pandey R. N. (1980). Evaluating hydrodynamic dispersion coefficients. J. of Hydrol., Vol 47, pp 369-372.

Jenkins G.M. and Watts D.G. (1968). Spectral analysis and its applications, 525 p Holden-Day, San Francisco, Calif.

Jun Xia (1991). Identification of a Constrained Nonlinear Hydrological System Described by Volterra Functional Series. Water Res. Res., vol 27, N° 9,pp 2415-2420, Sept 1991.

Jury W. A., Sposito G. and White R.E. (1986). A transfer function model of solute transport through soil, 1, Fundamental concepts. Water Res. Res., Vol 22, N° 2, pp 243-247.

Klotz D., Seiler K. P., Moser H. et Neumaier F. (1980). Dispersivity and velocity relationship from laboratory and field experiments. J. of Hydrol., Vol 45, pp 169-184.

Knisel W. G. (1972). Response of karst aquifers to recharge. Hydrol. Pap.60, Colo. State Univ.,Ft Collins.

Koopmans L.H. (1974). The spectral analysis of time series, 365 p, Academic Press, Orlando, Fla.

Lemke K.A. (1991). Transfer Function Models of Suspended Sediment Concentration.Water Res. Res., Vol 27, N° 3, pp 293-305, March 1991.

Lepiller M.,Mondain P.H. (1986). Les traçages artificiels en hydrologie karstique. Mise en oeuvre et interprétation. Hydrogéologie,n° 1, 1986, pp.33 - 52,12 fig., 3 tabl..

Maloszewski P. and Zuber A. (1986). Mathematical models for interpretating tracer experiments in fissured aquifers. Advisory group meeting on "the application of isotope techniques in the study of the hydrogeology of fractured and fissured rocks". I.A.E.A., Vienna, 17-21 Nov. 1986, 18 p.

Mangin A. (1975). Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, Thèse de Doctorat d'Etat. Dijon.124 p.

Mangin A., Molinari J., Paloc H. (1976). Les traceurs en hydrogéologie karstique. Leur apport à la connaissance des réservoirs aquifères calcaires. La Houille Blanche. N° 3/4.1976 Tech. des traceurs en hydrologie et en hydraulique. pp 261-267

Marchet P. (1991). Approche de la structure et de l'évolution des systèmes aquifères par l'analyse de leur fonctionnement: Application au NW du Causse de Martel (Quercy-France). Thèse de Doctorat. Toulouse.

Margrita R., Guizerix J., Corompt P., Gaillard B., Calmels P., Mangin A. and Bakalowicz M.(1983). Réflections sur la théorie des traceurs : Applications en Hydrologie isotopique. Sym. Isotope Hydrology 1983,I.A.E.A., Vienna, pp 653-678.

Marsily G.,de (1978). De l'identification des systèmes hydrologiques. Thèse de Doctorat d'Etat . Univ. P. et M. Curie. Paris VI.

Molinari J. (1973). Les techniques de traceur dans l'étude des problèmes de pollution. Nuissances et environnement. Ed. hors série STAP,17 p.

Morel-Seytoux H.J. (1981). Optimisation methods in Rainfall-Runoff Modeling.in Rainfall-Runoff Relationship.pp 487-506.Proceedings of the International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling. May 18-21. Mississipi State University.U.S.A.

Muet P. (1985). Structure, fonctionnement et évolution de deux systèmes aquifères karstiques du Nord du Causse de Martel (Corrèze). Thèse 3e cycle, Orléans.

Niemi A.J. (1977). Residence Time Distributions of Variable Flow Process. International Journal of Applied Radiation and Isotopes. Vol 28, pp 855-860. Pergamon Press.

Nir A. (1984). Role of Tracer methods in Hydrology as a Source of Physical Information. Basic Concepts and Definitions. Time Relationship in Dynamic Systems. Proc. I.A.E.A and Held, TECDOC 391, Vienna, 17-21 Sept. 1984, pp 7-44.

Nir A. (1986). Role of tracer method in hydrology as a source of physical information. Basic concepts and definitions. Time relationship in dynamic systems. Proc. on Mathemetical Models for Interpretation of Tracer Data in Groundwater Hydrology. I.A.E.A, Vienna, 1986.

Paloc H. (1975). Glossaire d'hydrogéologie du karst. Hydrogeology of karstic terranes, Mem. n°3, série B, UGGI & AIH. Paris.

Pfannkuch H. O. (1963). Contribution à l'étude des déplacement de fluides miscibles en milieu poreux. Revue de l'I.F.P., vol 18, N° 2, pp 215-270.

Poitrinal D.et Marsily G.,de (1973). Relation du type entrée-sortie en hydrogéologie : procédé d'identification de l'opérateur, Bull. Bur. Rech. Geol. Min., sér. 2, 3(2); 119, 1973.

Porel G. (1988). Transfert de soluté en aquifère crayeux. Causes de modifications des résultats de traçages. Thèse de Doctorat en Géologie Appliquée de l'Université de Lille-Flandres-Artois.

Rodriguez-Hernandez J.Y. (1989). Modélisation Pluie-Débit par la Methode DPFT: Développement de la méthode initiale et extension à des cas bi-entrées. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble. 280 p.

Sauty J. P. (1977). Contribution à l'identification des paramètres de didpersion dans les aquifères par l'interprétation des expériences de traçages. Thèse Dr. Ing. Univ. de Grenoble.

Scheidegger A. E. (1954). Statistical hydrodynamics of porous matter, J. Appl. Phys., N° 25, pp 994-1001.

Sherman (1932). Stream flow rainfall by the unit Hydrograph method. Eng. News. Res. N° 108, pp 501-505.

Singh K.P., Banijkeewzic A. et Ram R.S. (1981). Some Empirical Methods of determining the Unit Hydrograph. in Rainfall-Runoff Relationship.pp 67- 90. Proceedings of the International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling. May 18-21. Mississipi State University.U.S.A.

Stanton W. I. and Smart P. L. (1981). Repeated dye traces of underground streams in the Mendip hills, Somerest. Proc. Univ. Bristol Spelaeol. Soc. 1981, 16(1) pp 47-58.

Sudicky E.A. and Frind E.O. (1984). Contaminant transport in fractured porous media : Analitycal solution for two-member Decay Chain in a Single Fracture. Water Res. Res., Vol 20, N° 7, pp 1021-1029.

Taylor, Sir G. (1953). Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube. Proc. Royal Society, London, Serie A, Vol.219.

Uffinck G.J.M. (1983). A random walk method for the simulation of monodispersion in a stratified aquifer. IUGG 18th. General Assembly, Hambourg, Proceedings of IAHS Symposia vol.,H52.

Villermaux J., Van Swaaij W.P.M. (1969). Modèle représentatif de la distribution des temps de séjour dans un réacteur semi-infini à dispersion axiale avec zones stagnantes. Application à l'écoulement ruisselant dans les colonnes d'anneaux Raschig. Chem Eng.Sci. G.B, 24, 1097.

Voltera V. (1930). Theory of functional and of integro-differential equation. Blackie and sons Ltd, London.

Walliser B. (1977). Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse des systèmes.Ed.du Seuil,248 p.

Wang H. Q., Crampon N., Huberson S. et Garnier J.M. (1987). A linear method for determining hydrodispersive characteristics in tracer experiments with instantaneous injection. J. of Hydrol., Vol 95, N° 1/2, pp. 143-154.

Zhengxing M. (1988). An outline of the underground water tracing in karst regions of china. Karst hydrogeology and karst environment protection. Proc. of the IAH 21st Congres. Oct.1988, Guilin, China.

Zuber A. (1974). Theoretical possibilities of two-well pulse method. Isotop. Techn. in Groundwater Hydrology. Vol 2, I.A.E.A., Vienna, pp 277-294.

Zuber A. (1986). On the interpretation of tracer data in variable flow systems. J. of Hydrol., 86 ,1986, pp 45 à 57.

- LISTE DES FIGURES -

Pages

Fig.A1 : Système "boite noire"..... 12

Fig.A2: Sortie s(t) à l'intant t représentée par la somme pondérée des entrées..... 14

Fig.A3 : Schéma des temps associés au principe de convolution..... 15

Fig.A4 : réponse à un signal de Dirac..... 15

Fig.A5 : représentation d'un système vectoriel..... 17

Fig.A6 : représentation d'un traçage artificiel dans un système..... 26

Fig.A7 : traçage et restitution..... 28

Fig.A8 : Représentation des temps et concentrations caractéristiques pour une restitution unimodale..... 28

Fig.B1 : représentation parabolique des vitesses au sein d'un tube..... 40

Fig.B2 : signal d'entrée (cas d'une injection continue)..... 41

Fig.B3 : représentation du nuage dans le cas d'une injection continue..... 41

Fig.B4 : signal d'entrée, cas d'une injection brève..... 42

Fig.B5 : représentation du nuage, cas d'une injection brève..... 43

Fig.B6 : sortie du signal d'entrée au temps t..... 48

Fig.B7 : Système vectoriel stationnaire..... 53

Fig.B8 : Système vectoriel non stationnaire..... 55

Fig.B9 : transformation de t et du signal h(t) au débit Q en t' et h'(t') au débit Q'..... 59

Fig.B10 : chevauchement des signaux après transformation au débit Q'(t)..... 59

Fig.B11 : Disjonction des signaux après transformation au débit Q'(t)..... 60

Fig.B12 : transformation de la réponse impulsionnelle1 à débit constant en une réponse impulsionnelle2 à débits variables..... 60

Fig.B13 : comparaison de la réponse impulsionnelle (tmoy = 3h) avec les réponses impulsionnelles transformées à partir des réponses impulsionnelles (tmoy = 6,tmoy = 9h, tmoy = 12h)..... 66

Fig.B14 : variation du débit à partir du temps d'injection..... 67

Fig.B15 : réponse impulsionnelle à débit variable transformée à partir de la réponse impulsionnelle à débit constant égal à 80 l/ s..... 67

Fig.B16 : comparaison des réponses impulsionnelles obtenues par le modèle R.I.M.H et par transformation (débit constant-débit variable)..... 68

Fig.B17: Dispositif générale de la colonne expérimentale..... 70

Fig.B18: Schéma du système occupé par le traceur (en noir)..... 72

Fig.B19: Résultat des traçages n° 1,2 et 3 (1ere série). Croix: n° 3 (640 ml/mn), Cercles: n°2 (320 ml/mn), Carrés noirs: n°1(148 ml/mn)..... 73

Fig.B20: Résultat du traçage n° 4 (1ere série). Losanges: concentrations, trait continu: débit 73

Fig.B21: Comparaison entre la réponse impulsionnelle (148 ml/mn) tranformée pour un débit de 640 ml/mn et le résultat expérimental (Croix)..... 76

Fig.B22: Comparaison entre la réponse impulsionnelle (320 ml/mn) tranformée pour un débit de 640 ml/mn et le résultat expérimental..... 77

Fig.B23: Comparaison entre la réponse impulsionnelle (640 ml/mn) tranformée pour la variation de débit du traçage n°4 et le résultat expérimental..... 78

Fig.B24: Schéma du système occupé par le traceur (en noir)..... 79

Fig.B25: Représentation schématique des nuages de traceur au niveau du robinet trois voies central..... 81

Fig.B26: Résultat des traçages n° 1 et 2 (2e série)..... 82

Fig.B27: Représentation schématique du nuage de traceur (effet de densité) à l'entrée du tube inférieur..... 82

Fig.B28: Résultat des traçages n° 2 et 4 (2e série)..... 83

Fig.B29: Résultat du traçage n° 3 (2e série). 83

Fig.B30: Comparaison entre la réponse impulsionnelle (391 ml/mn) tranformée pour un débit de 620 ml/mn et le résultat expérimental 84

Fig.B31: Comparaison entre la réponse à débit variable (traçage n°3) tranformée pour un débit de 620 ml/mn et le résultat expérimental 84

Fig.B32 : comparaison des réponses impulsionnelles transformées à la solution réelle..... 87

Fig.B33 : comparaison des réponses impulsionnelles transformées à la solution réelle.... 87

Fig.B34: Programme CONVOX, déclarations des variables et fonctions, traitement des données..... 97

Fig.B35: Méthode d'interpolation utilisant une fonction B_Spline de degré 2..... 98

Fig.B36: Exemple d'oscillations limitées par les valeurs de coef pour la méthode d'interpolation utilisant une fonction B_Spline_Carrée..... 99

Fig.B37: Part 1 : Acquisition des données de débits et de dilutionds relatives aux RTT et STT..... 100

Fig.B38: détermination des temps caractéristiques du RTT à partir des valeurs discrètes de débits et de dilutions..... 101

Fig.B39: Algorithmes de transformations. Part 3: Transformation débit constant-débit constant. Part 4: Transformation débit constant-débit variable Part 5: Transformation: débit variable-débit constant..... 104

Fig.B40: Part 6: Transformation: débit variable-débit variable..... 104

Fig.B41: calcul tr2: calcul du temps équivalent tr2 pour le traçage simulé. Qmoy(): calcul du débit moyen entre t=0 et tr1 concernant le RTT. Tmoy() et diagrammes associés: calcul du temps tr2 lorsque le STT est défini en débit variable..... 106

Fig.B42: Cal_Vol_Ref () et diagrammes associés: Calcul du volume d'eau du système-traçage écoulé à la sortie du système entre deux temps quelconques Tb (temps bas) et Th (temps haut) 109

Fig.B43: Cal_T_aft(): calcul des temps équivalents supérieurs à tr2 pour le traçage simulé. Diagrammes associés: a: représentation des volumes du système-traçage du RTT. b: représentation du temps tr2 et des temps Tnew[] pour le STT..... 111

Fig.B44: Cal_T_bef: calcul des temps équivalents inférieurs à tr2 pour le traçage simulé...111

Fig.B45: "General onvolution operator" et diagramme associé: sommation des coubes temps-concentrations dans le cas d'une injection de plusieurs (nbmas) masses de traceur à l'entrée du système pour le STT..... 112

Fig.C1: Classification des aquifères karstiques. (d'après Atckinson, 1985 in Gaspar, 1988)..... 115

Fig.C2: Représentation du système traçage dans le cadre du système karstique (tiré de Lepiller et Mondain, 1983, modifié d'après Mangin, 1975))..... 112

Fig.C3: Relation log-log entre temps moyen de séjour et débit d'écoulement..... 117

Fig.C4: tirée de la carte géologique de la France au 1/1000 000. (d'après Muet, 1985)... 119

Fig.C5: Coupe géologique schématique N-S entre les vallées du Tarn et de la Vézère.... 120

Fig.C6: Schéma du système karstique de l'Ouysse. (d'après Beaudoing et al 1989)..... 122

Fig.C7: Caractéristiques hydrogéologiques des terrains du système de l'Ouysse..... 123

Fig.C8: Schéma de circulation des eaux dans le système karstique de l'Ouysse..... 124

Fig.C9: Hydrogramme de l'Ouysse amont de Mai 1987 à Mars 1988..... 126

Fig.C10: Hydrogramme du Frances de Mai 1987 à Mars 1988.....126

Fig.C11: Hydrogramme de l'Ouysse aval (station Le Pont) de Mai 1987 à Mars 1988... 126

Fig.C12: Hauteurs de pluie à Gramt de Mai 1987 à Mars 1988..... 127

Fig.C13: Schéma du système Thémines-Théminettes-Besaces..... 127

Fig.C14: résultat du traçage Themines-Besaces et variation du débit (Mai 1987)..... 129

Fig.C15: résultat du traçage Theminettes-Besaces et variation du débit (Mai 1987)..... 129

Fig.C16: résultat du traçage Themines-Besaces et variation du débit (Février 1988)..... 130

Fig.C17: résultat du traçage Theminettes-Besaces et variation du débit (Février 1988).... 130

Fig.C18: Réponse impulsionnelle et moyenne des débits pour le système Thémines-Besaces (Mai 1987)..... 131

Fig.C19: Réponse impulsionnelle et moyenne des débits pour le système Théminettes-Besaces (Mai 1987)..... 131

Fig.C20: Réponse impulsionnelle et moyenne des débits pour le système Thémines-Besaces (Février 1988)..... 132

Fig.C21: Réponse impulsionnelle et moyenne des débits pour le système Théminettes-Besaces (Février 1988)..... 132

Fig.C22: Comparaison de la réponse impulsionnelle de Mai 1987 transformée pour un débit de 2180 l/s avec la réponse de Février 1988. (Thémines-Besaces)..... 133

Fig.C23: Comparaison de la réponse impulsionnelle de Mai 1987 transformée pour un débit de 1950 l/s avec la réponse de Février 1988. (Théminettes-Besaces)..... 133

Fig.C24: Variations des concentrations en chlorure en fonction du temps..... 135

Fig.C25: Variations des concentrations en nitrate en fonction du temps..... 135

Fig.C26: Variations des concentrations en matières en suspension en fonction du temps. 136

Fig.C27: Variations du débit en fonction du temps..... 136

Fig.C28: résultat à Besaces de convolution des entrées en chlorure..... 137

Fig.C29: résultat à Besaces des convolutions des entrées en chlorure..... 138

Fig.C30: Résultat à Besaces des convolutions des entrées en chlorue à Thémines et Théminettes..... 139

Fig.C31: Résultat à Besaces des convolutions des entrées en nitrate à Thémines et Théminettes..... 139

Fig.C32: Résultat à Besaces des convolutions des entrées en matières en suspension à Thémines et Théminettes..... 140

Fig.C33: Schéma du système étudié et des opérations de traçages..... 141

Fig.C34: Résultat des traçages Thémines-Pont et Besaces-Pont (Mai 1987)..... 143

Fig.C35: Résultat des traçages Thémines-Pont (Février 1988)..... 143

Fig.C36: Résultat des traçages Vitarelles-Pont (Février 1988)..... 144

Fig.C37: Résultats des transformations des restitutions Thémines-Pont et Vitarelles-Pont (Février 1988) pour les conditions hydrodynamiques de Mai 1987. 145

Fig.C38 : Illustration de la limite de la méthode de transformation dans une gamme de débits mesurés à la sortie d'un système à volume constant..... 146

- LISTE DES TABLEAUX -

Pages

Tab.B1 : Caractéristiques des traçages de la première série..... 74

Tab.B2: Comparaison entre le produit (Débit, temps moyen de séjour) et le volume du système..... 75

Tab.B3 : Comparaisons de la réponse impulsionnelle (N° 1) transformée avec le résultat expérimental (N° 3)..... 76

Tab.B4 : Comparaisons de la réponse impulsionnelle (N° 3) transformée avec la réponse expérimentale (N° 4)..... 78

Tab.B5: Caractéristiques des traçages de la deuxième série..... 80

Tab.B6: Comparaison entre le produit (Débit,temps moyen de séjour) et le volume du système..... 81

Tab.B7: Principaux résultats de traçages effectués en milieu granulaire crayeux..... 86

Tab.B8: détermination du volume défini par le produit entre débit et temps modal.....86

Tab.B9: Comparaison entre les réponses impulsionnelles, expérimentale (Q=89,16 ml/mn) et transformée..... 87

Tab.B10: Différence entre réponse impulsionnelle expérimentale (Q=89,16 ml/mn) et transformée.....88

Tab.B11: Synthèse des cas de restitution simulée par me programme CONVOX..... 94

Tab.C1: Caractéristiques des traçages du Système Thémines-Théminettes-Besaces.....132

Tab.C2: Caractéristiques de traçages du système Thémines-Vitarelles-Besaces-Pont..... 142

- LISTE DES SYMBOLES -

A : nombre aléatoire de la loi uniforme compris entre -1 et 1.

α, (L) : dispersivité.

α_L, (L) : dispersivité longitudinale.

A_n : nombre pseudoaléatoire de la loi uniforme compris entre 0 et 1.

C(t), (ML^{-3}) : Concentration en fonction du temps.

Ce(t), (ML^{-3}) : Concentration d'entrée en fonction du temps.

Co, (ML^{-3}) : concentration initiale.

Cmax, (ML^{-3}) : concentration maximale.

Cref(t), (ML^{-3}) : Concentration de référence en fonction du temps.

Cs(t), (ML^{-3}) : Concentration de sortie en fonction du temps.

Cv : coefficient adimensionnel de variation.

$\delta(t)$, (T^{-1}): signal de Dirac.

DC, (L) : déplacement convectif.

DD, (L) : déplacement dispersif.

DT, (L) : déplacement total.

e(t), $e_i(t)$: fonctions d'entrée d'un système.

e, e_i : point d'entrée.

h(t), $h_i(t)$, $h_{i,j}(t)$, (T^{-1}) : valeur de la réponse impulsionnelle au temps t.

h'(t) , $h'_i(t)$, (T^{-1}) : valeur de la réponse impulsionnelle transformée au temps t

$h(t,\tau)$ (T^{-1}) : valeur de la réponse impulsionnelle au temps t (cas des systèmes non stationnaires) .

INT : partie entière.

M, (M) : masse injectée.

m,m_i, (M) : masse.

MOD : modulo.

Mr, (M) : masse restituée.

Mref, (M) : masse injectée de référence.

Nt ,N : nombres de particules.

Q, (L^3T^{-1}): débit volumique constant.

Q(t), (L^3T^{-1}): débit volumique variable.

Qe, Qe(t), $Qe_i(t)$, (L^3T^{-1}): débit d'entrée en fonction du temps.

Qm, Qm_i, (L^3T^{-1}): débit moyen.

Qs, Qs(t), $Qs_j(t)$, (L^3T^{-1}): débit d'entrée en fonction du temps.

r%, r_i% : taux de restitution en %.

R, (L) : rayon du tube.

r ; r*, (L): distance radiale à partir de l'axe du tube.

s(t), $s_j(t)$: fonctions de sortie d'un système.

S, (L^2) : surface d'écoulement.

s, s_j : point de sortie.

σ^2, (T^2) : variance de temps.

t,τ,τ_i (T): temps.

$\overline{t}$, (T) : temps moyen de séjour (moyenne arithmétique des temps).

ta, (T): temps de première arrivée du nuage.

t_c, (T): temps de transit par convection pure.

t_{harm} (T): moyenne harmonique des temps de transit.

tf, (T): temps de fin de passage du nuage.

tm, (T) : temps modal

tmoy, (T) : temps moyen de transfert d'un signal d'une réponse impulsionnelle.

u, ($L T^{-1}$): vitesse effective.

V(r),($L T^{-1}$): vitesse en r.

V, V(t), (L^3) : volume d'un système.

Vapp,($L T^{-1}$): vitesse apparente.

Vm, (LT^{-1}): vitesse maximale dans un tube.

v_{max}, ($L T^{-1}$): vitesse maximale.

$\overline{v}$, ($L\ T^{-1}$): vitesse moyenne de transit.

X, L, (L) : distance entrée - sortie.

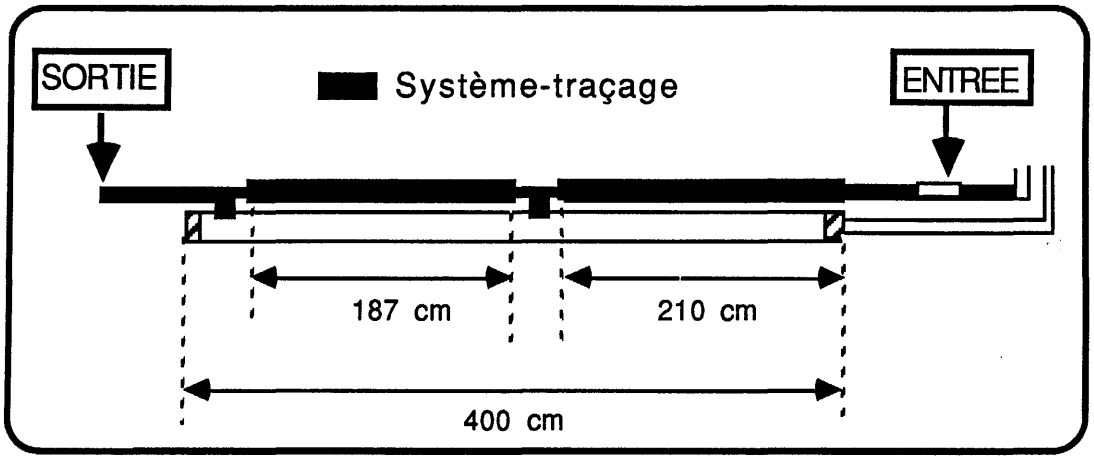
μ_n : moment d'ordre n.

Δt, $\Delta t'$, ΔT ,(T) : pas de temps.

ANNEXES

- ANNEXE 1 -

RESULTATS DE LA PREMIERE SERIE DE TRAÇAGES EN TUBE



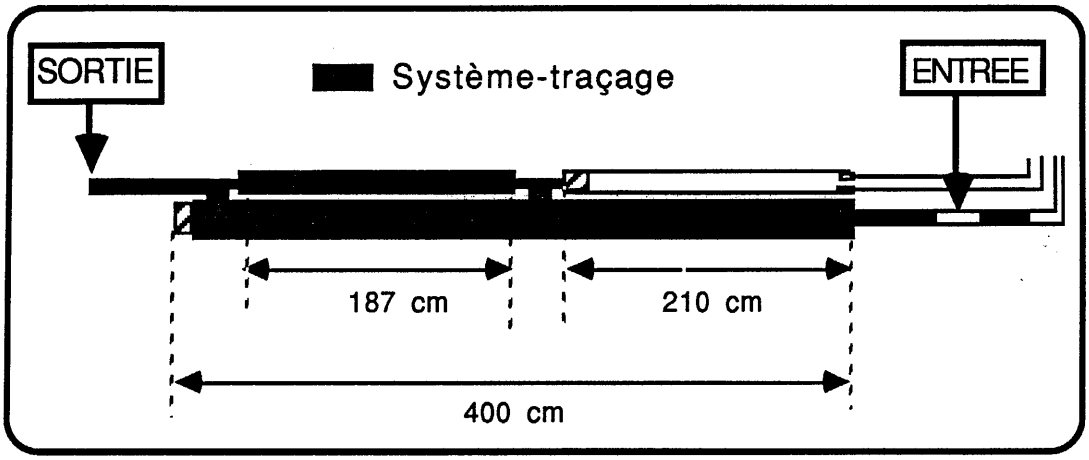
	MASSE INJECTEE	DEBIT
TRAÇAGE N°1	5000 µg	148 ml/mn
TRAÇAGE N°2	5500 µg	320 ml/mn
TRAÇAGE N°3	6500 µg	640 ml/mn
TRAÇAGE N°4	5500 µg	variable

TRACAGE N°1		TRACAGE N°2				TRACAGE N°3	
temps mn	Concentrations µg/l	temps mn	Concentrations µg/l	temps mn	Concentrations µg/l	temps mn	Concentrations µg/l
13,83	164,4	5,32	44,1	13,07	631,3	2,88	0,0
14,00	299,0	5,58	51,1	14,4	506,8	3,03	21,1
14,15	461,9	5,75	79,5	15,4	380,4	3,18	520,8
14,30	695,6	5,88	143,2	16,17	324,2	3,32	1475,9
14,43	1082,6	6,03	373,4	17,07	239,9	3,42	2641,6
14,60	1307,4	6,17	667,3			3,52	3043,9
14,75	1532,1	6,33	1054,5			3,65	3603,3
14,88	1728,7	6,48	1447,8			3,75	4197,7
15,05	1911,3	6,62	1869,1			3,87	4687,2
15,23	2178,1	6,77	2318,5			4,00	4757,2
15,38	2529,3	6,87	2571,4			4,13	4687,2
15,55	2865,2	7,02	2824,2			4,30	4407,5
15,72	2935,2	7,17	3148,8			4,42	4127,8
15,85	3005,1	7,33	3358,6			4,53	3813,1
16,00	3075,0	7,48	3498,4			4,67	3148,8
16,15	3144,9	7,62	3778,1			4,82	2799,1
16,33	3214,9	7,75	3848,1			4,93	2519,4
16,53	3354,7	7,88	3918,0			5,08	2134,8
16,70	3424,7	7,98	3987,9			5,18	1925,0
16,93	3634,5	8,12	3987,9			5,32	1750,2
17,08	3669,4	8,23	3918,0			5,42	1540,4
17,33	3634,5	8,40	3708,2			5,58	1260,7
17,52	3494,6	8,53	3743,2			5,73	1190,7
17,68	3424,7	8,65	3708,2			5,85	1120,8
17,88	3354,7	8,80	3568,4			6,38	928,1
18,07	3214,9	9,00	3358,6			6,53	829,8
18,23	3005,1	9,17	3148,8			6,67	745,6
18,50	2935,2	9,33	3008,9			6,87	675,3
18,73	2865,2	9,53	2869,1			7,10	577,0
18,95	2795,3	9,70	2659,3			7,25	405,2
19,15	2725,4	9,92	2449,5			7,42	334,4
19,40	2585,5	10,10	2239,7			7,58	299,0
19,60	2515,6	10,28	2099,8			7,85	263,6
19,80	2515,6	10,52	1820,1			8,17	221,1
20,00	2445,6	10,73	1645,3			8,25	206,9
20,13	2375,7	10,97	1540,4			8,43	199,9
20,33	2305,8	11,15	1470,5			8,98	143,2
21,17	1991,1	11,42	1330,6			9,88	100,7
23,83	1256,8	11,60	1190,7				
28,43	557,5	11,82	1050,9				
35,05	277,8	12,23	911,0				
39,62	241,7	12,50	841,1				
46,08	100,0	12,75	701,2				

TRACAGE N°4							
temps mn	Concentrations µg/l	temps mn	Concentrations µg/l	temps mn	Débits ml/mn	temps mn	Débits ml/mn
2,33	0,0	9,33	717,5	0,10	759	8,10	176
2,50	352,3	9,50	717,5	0,30	759	8,30	176
2,67	731,5	9,67	717,5	0,50	759	8,50	176
2,83	1897,2	9,83	689,4	0,70	759	8,70	122
3,00	2655,4	10,00	689,4	0,90	759	8,90	122
3,17	3354,7	10,17	689,4	1,10	759	9,10	122
3,33	3844,2	10,33	661,3	1,30	759	9,30	122
3,50	4263,8	10,50	661,3	1,50	759	9,50	122
3,67	4333,8	10,67	647,2	1,70	759	9,70	122
3,83	4263,8	10,83	647,2	1,90	759	9,90	122
4,00	4193,9	11,00	633,2	2,10	660	10,10	122
4,17	3984,1	11,50	563,0	2,30	660	10,30	122
4,33	3634,5	12,83	436,6	2,50	530	10,50	122
4,50	3424,7	16,00	268,0	2,70	530	10,70	122
4,67	3144,9			2,90	530	10,90	122
4,83	2690,4			3,10	501	11,10	122
5,00	2375,7			3,30	501	11,30	122
5,17	2165,9			3,50	501	11,50	122
5,33	1956,1			3,70	501	11,70	122
5,50	1746,3			3,90	501	11,90	122
5,67	1606,5			4,10	501	12,10	122
5,83	1466,6			4,30	501	12,30	122
6,00	1396,7			4,50	501	12,50	122
6,17	1326,8			4,70	501	12,70	122
6,33	1256,8			4,90	391	12,90	122
6,50	1151,9			5,10	391	13,10	122
6,67	1117,0			5,30	391	13,30	122
6,83	1047,0			5,50	391	13,50	122
7,33	1026,5			5,70	302	13,70	122
7,50	970,3			5,90	302	13,90	122
7,67	970,3			6,10	302	14,10	122
7,83	942,2			6,30	243	14,30	122
8,00	886,0			6,50	243	14,50	122
8,17	886,0			6,70	243	14,70	122
8,33	857,9			6,90	243	14,90	122
8,50	829,8			7,10	243	15,10	122
8,67	745,6			7,30	176	15,30	122
8,83	745,6			7,50	176	15,50	122
9,00	745,6			7,70	176	15,70	122
9,17	745,6			7,90	176	15,90	122

- ANNEXE 2 -

RESULTATS DE LA DEUXIEME SERIE DE TRAÇAGES EN TUBE



	MASSE INJECTEE	DEBIT
TRAÇAGE N°1	10 000 µg	620 ml/mn
TRAÇAGE N°2	10 000 µg	391 ml/mn
TRAÇAGE N°3	10 000 µg	variable
TRAÇAGE N°4	4 000 µg	391 ml/mn

TRACAGE N°1	
temps mn	Concentrations µg/l
5,08	249,4
5,50	681,4
5,67	1138,8
6,00	1391,6
6,17	1433,8
6,42	1827,0
6,67	1644,4
7,00	2178,1
7,17	2515,2
7,33	2445,0
7,58	2613,5
7,83	2430,9
8,00	2360,7
8,25	2515,2
8,42	2459,0
8,62	2402,9
8,73	2051,7
8,93	2164,1
9,17	2122,0
9,33	2037,7
9,50	1841,1
9,60	1841,1
9,77	1911,3
9,97	1967,5
10,12	1953,4
10,22	1967,5
10,33	2037,7
10,55	1981,5
10,67	2079,8
10,83	2079,8
10,93	1981,5
11,28	1756,8
11,52	1616,3
11,68	1672,5
11,92	1574,2
12,15	1532,1
12,58	1251,2
12,75	1195,0
13,00	1026,4
13,33	843,9
14,37	436,6
15,08	249,4
15,62	185,7
16,93	136,1
17,47	164,4
18,75	72,4

TRACAGE N°2			
temps mn	Concentrations µg/l	temps mn	Concentrations µg/l
5,00	0,0	29,00	284,8
6,00	2,3	30,00	245,9
8,00	0,1	31,00	206,9
8,50	42,3	33,00	144,6
9,25	1504,0	35,00	117,3
9,75	1781,3	38,00	61,0
10,25	2375,7	41,17	48,9
10,75	2725,4		
11,00	2690,4		
11,50	2935,1		
11,75	2795,3		
12,00	2585,5		
12,50	2375,7		
12,75	2235,8		
13,25	1886,2		
13,75	2402,9		
14,25	2065,8		
14,50	1841,1		
15,00	1630,4		
15,75	1237,1		
16,50	688,5		
17,50	504,4		
18,75	334,4		
19,50	274,2		
20,50	256,5		
20,75	270,7		
21,00	492,7		
21,25	591,1		
21,50	675,3		
21,75	872,0		
22,00	886,0		
22,25	970,3		
22,50	1110,7		
22,75	1138,8		
23,00	1138,8		
23,50	1068,6		
24,00	1026,4		
24,25	1096,7		
24,75	1068,6		
25,00	970,3		
25,50	956,2		
26,00	699,1		
26,50	600,0		
27,00	511,5		
27,50	447,7		
28,00	391,1		

TRACAGE N°3									
temps mn	Concentrations µg/l	temps mn	Concentrations µg/l	temps mn	Débits ml/mn	temps mn	Débits ml/mn	temps mn	Débits ml/mn
7,83	300,0	14,33	1363,5	0,1	214	7,9	798	15,7	650
8,05	619,1	14,50	1251,2	0,3	214	8,1	798	15,9	650
8,25	914,1	14,67	1293,3	0,5	214	8,3	798	16,1	550
8,50	1251,2	14,83	1335,4	0,7	214	8,5	798	16,3	550
8,67	1532,1	15,00	1672,5	0,9	214	8,7	798	16,5	550
8,83	1756,8	15,17	1616,3	1,1	214	8,9	798	16,7	550
9,00	1883,2	15,33	1475,9	1,3	214	9,1	798	16,9	550
9,17	2065,8	15,50	1475,9	1,5	321	9,3	798	17,1	550
9,33	2234,3	15,67	1363,5	1,7	321	9,5	798	17,3	451
9,50	2318,6	15,83	1082,6	1,9	321	9,7	798	17,5	451
9,67	2402,9	16,00	436,6	2,1	321	9,9	798	17,7	451
9,83	2487,1	16,17	829,8	2,3	321	10,1	690	17,9	451
10,00	2402,9	16,33	801,7	2,5	321	10,3	690	18,1	451
10,17	2501,2	16,50	745,6	2,7	321	10,5	690	18,3	451
10,33	2374,8	16,67	689,4	2,9	321	10,7	690	18,5	451
10,50	2332,6	16,83	661,3	3,1	451	10,9	690	18,7	451
10,67	2262,4	17,00	605,1	3,3	451	11,1	600	18,9	451
10,83	2122,0	17,17	914,1	3,5	451	11,3	600	19,1	451
11,00	2093,9	17,33	492,7	3,7	451	11,5	600	19,3	451
11,17	2262,4	17,50	478,7	3,9	451	11,7	600	19,5	451
11,83	2290,5	17,67	492,7	4,1	451	11,9	600	19,7	451
11,50	2402,9	17,83	312,7	4,3	451	12,1	600	19,9	451
11,67	2459,0	18,00	326,9	4,5	451	12,3	600	20,1	451
11,83	2445,0	18,17	298,6	4,7	451	12,5	600	20,3	451
12,00	2430,9	18,33	319,8	4,9	451	12,7	600	20,5	451
12,17	2262,4	19,33	263,2	5,1	451	12,9	600	20,7	451
12,33	2262,4	19,67	249,1	5,3	451	13,1	600	20,9	451
12,50	2093,9	20,00	220,8	5,5	451	13,3	600	21,1	451
12,67	1897,2	20,33	199,6	5,7	451	13,5	501	21,3	451
12,83	1784,9	20,83	181,9	5,9	451	13,7	501	21,5	451
13,00	1728,7	21,33	164,2	6,1	650	13,9	501	21,7	451
13,17	1672,5			6,3	650	14,1	501		
13,33	1616,3			6,5	650	14,3	401		
13,50	1616,3			6,7	650	14,5	401		
13,67	1546,1			6,9	650	14,7	401		
13,83	1489,9			7,1	650	14,9	401		
14,00	1447,8			7,3	650	15,1	401		
14,17	1546,1			7,5	650	15,3	550		
				7,7	650	15,5	550		

TRACAGE N°4			
temps mn	Concentrations µg/l	temps mn	Contrations Mg/l
7,50	0,0	14,75	685,0
7,75	18,3	15,25	697,3
8,00	24,4	15,75	749,2
8,25	87,9	16,25	756,5
8,50	109,1	16,75	796,2
8,75	192,4	17,25	727,6
9,00	365,9	17,75	796,3
9,25	457,0	18,25	752,9
9,50	533,0	18,75	659,0
9,75	602,1	19,25	529,7
10,00	697,6	19,75	453,7
10,25	725,1	20,25	394,6
10,50	803,6	22,00	369,5
10,75	945,3	23,00	154,8
11,00	909,4	24,00	105,4
11,25	953,1	25,00	69,4
11,50	1083,4	26,00	57,3
11,75	1095,3	27,00	60,4
12,00	1058,0	28,00	51,2
12,25	942,2	29,00	45,7
12,50	883,2	30,00	32,1
12,75	871,0	31,00	29,4
13,00	857,8	33,00	33,7
13,25	902,3	35,00	29,4
13,50	952,5	37,00	25,9
13,75	883,3	39,00	17,7
14,00	850,6	41,00	12,4
14,25	732,2	43,00	12,4

- ANNEXE 3 -

DONNEES RELATIVES AUX CAMPAGNES D'EXPERIMENTATIONS SUR L'OUYSSE

LES TRAÇAGES (BASSES - EAUX) PP. 173 - 175

LES TRAÇAGES (HAUTES - EAUX) PP. 176 - 180

LES MESURES DE DEBIT PP. 181

LES MESURES PHYSICOCHIMIQUES PP. 182

INJECTION : THEMINETTES (le 14/5/87 à 15 h)
TRACEUR : Amino G (6 kg)
RESTITUTION : LES BESACES

N°	DATE	HEURE	temps en h	C en µg/l	N°	DATE	HEURE	temps en h	C en µg/l
1	19/5/87	7:07	112,1	0,768	36		3:51	185,0	9,166
2		8:45	113,8	1,229	37		6:12	187,3	9,700
3		10:47	115,8	0,404	38		8:02	188,6	8,800
4		12:49	117,8	0,861	39		10:17	190,9	6,690
5		14:00	119,0	0,647	40		11:35	192,9	6,790
6		18:14	123,2	1,037	41		13:51	195,2	6,330
7		20:23	125,4	1,732	42		15:53	197,1	5,420
8		23:28	133,3	2,737	43		18:12	198,7	5,470
9	20/5/87	2:17	135,2	2,944	44		20:08	200,9	4,614
10		4:16	136,8	6,842	45		21:41	206,2	5,236
11		6:10	138,7	6,820	46		23:52	211,4	5,010
12		7:48	140,6	11,403	47	23/5/87	5:12	215,6	4,147
13		9:39	142,8	21,666	48		10:21	221,0	3,407
14		11:35	144,5	24,724	49		14:37	225,9	2,916
15		13:50	146,3	32,261	50		19:58	231,0	2,173
16		15:31	148,5	37,564	51	24/5/87	0:55	236,2	1,590
17		17:18	150,8	37,343	52		5:59	240,8	1,096
18		19:30	152,9	33,115	53		11:11	245,4	0,915
19		21:45	155,3	36,490	54		15:45	249,6	0,501
20		23:53	156,7	34,304	55		20:26	255,7	0,286
21	21/5/87	2:19	159,7	55,528	56	25/5/87	0:38	261,0	0,237
22		3:39	161,4	58,471	57		6:39	266,5	0,466
23		6:41	162,5	51,990	58		11:59	271,4	1,180
24		8:23	164,9	47,930	59		17:28	276,2	2,770
25		9:28	166,5	43,556	60	26/5/87	8:19	281,3	3,640
26		11:55	169,0	33,403	61		12:42	285,7	3,370
27		13:30	169,2	29,023	62		23:03	290,9	4,042
28		15:59	170,9	18,787	63	27/5/87	4:05	296,1	4,680
29		16:09	172,7	17,969	64		8:44	305,7	5,640
30		17:55	172,7	15,525	65		13:47	310,8	6,636
31		19:40	174,7	14,794	66		18:55	315,9	5,312
32		19:42	176,7	13,904	67		23:43	320,7	5,112
33		21:44	178,8	14,440	68	28/5/87	4:33	325,6	5,990
34		23:42	180,9	12,616	69		9:31	330,5	5,306
35	22/5/87	1:47	183,2	9,591	70		15:38	336,6	3,650

INJECTION : THEMINES (le 13/5/87 à 11h)
TRACEUR : Rhodamine Wt (4 kg)
RESTITUTION : LES BESACES

N°	DATE	HEURE	temps en h	C en µg/l	N°	DATE	HEURE	temps en h	C en µg/l
1	13/5/87	11:00	0,00	0,000	38	21/5/87	1:34	158,57	5,828
2	16/5/87	12:03	73,05	0,156	39		3:35	160,58	5,882
3	18/5/87	7:51	92,85	0,190	40		5:11	162,18	4,568
4		11:11	96,18	0,665	41		7:33	164,55	4,113
5		12:24	97,40	0,834	42		9:49	166,82	3,478
6		13:07	98,12	1,152	43		11:59	168,98	3,097
7		14:21	99,35	1,610	44		13:19	170,32	2,147
8		16:57	101,95	4,293	45		15:18	172,30	1,804
9		18:14	103,23	5,544	46		16:53	173,88	1,645
10		20:58	104,70	5,916	47		19:33	176,55	1,259
11		?	105,97	6,541	48		21:09	178,15	1,280
12		22:27	107,45	18,499	49		23:15	180,25	1,153
13		23:31	108,52	16,612	50	23/5/87	1:33	182,55	1,132
14	19/2/87	1:08	110,13	29,518	51		3:39	184,65	1,184
15		2:56	111,93	33,652	52		5:09	186,15	1,170
16		5:08	114,13	35,183	53		7:32	188,53	2,195
17		6:04	115,07	39,723	54		9:31	190,52	0,661
18		8:20	117,33	42,192	55		11:40	192,67	0,028
19		9:23	118,38	41,460	56		13:48	194,80	1,776
20		10:50	119,83	40,833	57		15:28	196,47	0,007
21		12:41	121,68	41,394	58		17:27	198,45	1,093
22		14:46	123,77	38,487	59		19:41	200,68	0,026
23		18:17	127,28	37,300	60		21:46	202,77	0,066
24		20:46	129,77	31,322	61	23/5/87	0:10	205,17	0,088
25		23:11	132,18	28,665	62		2:53	207,88	0,068
26	20/5/87	0:54	133,90	23,235	63		5:29	210,48	0,044
27		3:26	136,43	22,274	64		7:29	212,48	0,061
28		5:09	138,15	16,988	65		10:35	215,58	0,069
29		7:05	140,08	13,217	66		14:11	219,18	0,000
30		8:45	141,75	12,588	67		17:23	222,38	0,066
31		11:09	144,15	9,895	68		20:40	225,67	0,096
32		13:28	146,47	8,647	69				
33		15:40	148,67	7,255	70				
34		17:11	150,18	6,014	71				
35		19:18	152,30	6,175	72				
36		21:18	154,30	6,156	73				
37		23:36	156,60	6,135	74				

INJECTION : THEMINES (le 13/5/87 à 15 h) TRACEUR : Rhodamine Wt (4 kg)			
INJECTION : LES BESACES (le 18/5/87 à 11 h) TRACEUR : Rhodamine Wt (6 kg)			
RESTITUTION : LE PONT			
N°	DATE	HEURE	C en µg/l
1	18/5/87	11:00	0,000
2	18/5/87	11:32	0,045
3	31/5/87	11:03	0,029
4	1/6/87	13:55	0,006
5	2/6/87	10:34	0,013
6	3/6/87	8:23	0,216
7	4/6/87	10:29	0,828
8	5/6/87	14:06	2,885
9	6/6/87	13:39	7,407
10	7/6/87	10:46	6,060
11	8/6/87	13:25	5,387
12	9/6/87	11:58	4,019
13	10/6/87	12:08	2,376
14	11/6/87	9:37	2,719
15	12/6/87	12:29	2,696
16	13/6/87	9:36	2,248
17	14/6/87	9:29	1,690
18	15/6/87	11:06	1,842
19	16/6/87	11:18	0,690
20	17/6/87	10:59	0,382
21	18/6/87	11:16	0,199
22	19/6/87	9:18	0,161
23	20/6/87	11:13	0,143
24	21/6/87	10:29	0,366
25	22/6/87	8:39	0,000
26	23/6/87	9:08	0,000
27	24/6/87	9:37	0,000
28	25/6/87	17:18	0,000

INJECTION : THEMINETTES (le 17/2/88 à 12:20 h)
TRACEUR : Jaune sulfacide (10 kg)
RESTITUTION : LES BESACES

N°	DATE	HEURE	temps en h	C en µg/l	N°	DATE	HEURE	temps en h	C en µg/l
1	17/2/88	12:20	0,00	0,000	27		5:15	64,92	4,484
2		14:00	1,67	0,050	28		7:15	66,92	4,116
3		20:00	7,67	0,000	29		9:15	68,92	4,653
4	18/2/88	2:00	13,67	0,000	30		11:15	70,92	5,311
5		8:00	19,67	0,033	31		13:15	72,92	5,728
6		11:00	22,67	1,604	32		17:15	76,92	3,037
7		13:00	24,67	2,543	33		21:15	80,92	3,516
8		15:00	26,67	1,819	34	21/2/88	1:15	84,92	2,433
9		17:00	28,67	1,657	35		5:15	88,92	1,927
10		19:00	30,67	2,561	36		9:15	92,92	1,873
11		21:00	32,67	1,496	37		13:15	96,92	1,999
12		23:00	34,67	3,350	38		17:15	100,92	1,711
13	19/2/88	1:00	36,67	5,955	39	22/2/88	11:30	119,17	2,730
14		3:00	38,67	28,912	40		15:30	123,17	1,657
15		5:00	40,67	50,452	41		19:30	127,17	1,212
16		7:00	42,67	81,588	42		23:30	131,17	1,106
17		9:00	44,67	93,253	43	23/2/88	3:30	135,00	1,000
18		11:15	46,92	86,580	44		7:30	139,17	0,668
19		13:15	48,92	71,660	45		11:30	143,17	0,616
20		15:15	50,92	52,089	46		15:30	147,17	1,053
21		17:15	52,92	31,351	47		19:30	151,17	0,873
22		19:15	54,92	18,416	48		23:30	155,17	0,564
23		21:15	56,92	10,359	49	24/2/88	3:30	159,17	0,564
24		23:15	58,92	7,120	50		7:30	163,17	0,564
25	20/2/88	1:15	60,92	5,785	51		11:30	167,17	0,616
26		3:15	62,92	5,141	52		15:30	171,17	0,616
					53		17:30	173,17	0,616

INJECTION : THEMINES (le 17/2/88 à 11:50 h) TRACEUR : Amino G (20 kg) RESTITUTION : LES BESACES				
N°	DATE	HEURE	temps en h	C en µg/l
1	17/2/88	11:50	0	0,124
2		14:00	2,167	0,621
3		18:00	6,167	0,497
4		22:00	10,167	0,497
5	18/2/88	2:00	14,167	0,373
6		6:00	18,167	0,373
7		8:00	20,167	0,373
8		11:00	23,167	2,375
9		13:00	25,167	4,53
10		15:00	27,167	192,09
11		17:00	29,167	250,127
12		19:00	31,167	294,151
13		21:00	33,167	134,923
14		23:00	35,167	48,761
15	19/2/88	1:00	37,167	17,314
16		3:00	39,167	7,353
17		5:00	41,167	4,913
18		7:00	43,167	4,53
19		9:00	45,167	3,006
20		11:15	47,417	1,621
21		15:15	51,417	2,501
22		19:15	55,417	4,148
23		23:15	59,417	1,998
24	20/2/88	3:15	63,417	0,871
25		5:15	65,417	0,373
26		9:15	69,417	0

INJECTION : THEMINES (le 17/2/88 à 11:50 h) TRACEUR : Amino G (20 kg) RESTITUTION : LE PONT				
N°	DATE	HEURE	temps en h	C en µg/l
1	21/2/88	11:29	95,65	0
2	22/2/88	3:32	111,7	0
3		11:26	119,6	0
4		15:41	123,85	1,281
5		20:05	128,25	2,114
6		23:33	131,717	2,626
7	23/2/88	4:43	136,883	5,612
8		8:20	140,5	8,137
9		11:52	144,033	9,921
10		15:43	147,883	9,594
11		19:58	152,133	11,436
12	24/2/88	3:32	159,7	14,447
13		7:37	163,783	14,718
14		11:41	167,85	11,889
15		15:39	171,817	8,395
16		19:51	176,017	8,354
17		23:33	179,717	8,762
18	25/2/88	7:57	188,117	8,703
19		14:58	195,133	7,555
20		20:53	201,05	6,245
21	26/2/88	4:02	208,2	4,733
22		10:08	214,3	4,999
23		10:40	214,833	3,555
24		16:21	220,167	2,566
25		20:26	224,6	2,62
26		22:59	227,15	1,679
27	27/2/88	5:00	233,167	1,184
28		12:21	240,517	0,577
29		20:39	248,817	0,02
30	28/2/88	9:15	261,417	0

INJECTION : VITARELLES (le 19/2/88 à 9:35 h)				
TRACEUR : Fluoresceine (100 g)				
RESTITUTION : LES BESACES				
N°	DATE	HEURE	temps en h	C en µg/l
1	19/2/88	9:35	0	0,000
2	19/2/88	11:15	1,66	19,024
3	19/2/88	13:15	3,66	226,094
4	19/2/88	15:15	5,66	173,205
5	19/2/88	17:15	7,66	53,121
6	19/2/88	19:15	9,66	112,955
7	19/2/88	21:15	11,66	7,538
8	19/2/88	23:15	13,66	5,014
9	20/2/88	1:15	15,66	0,000
10	20/2/88	3:15	17,66	18,024
11	20/2/88	5:15	19,66	3,756
12	20/2/88	7:15	21,66	1,249
13	20/2/88	9:15	23,66	5,014

INJECTION : VITARELLES (le 18/2/88 à 11 h)
TRACEUR : Rhodamine Wt (5 kg)
RESTITUTION : LE PONT

N°	DATE	HEURE	temps en h	C en µg/l
1	21/2/88	8:00	69	0,000
2	21/2/88	12:00	73	0,237
3	21/2/88	16:00	77	0,742
4	21/2/88	20:00	81	1,830
5	22/2/88	0:00	85	2,928
6	22/2/88	4:00	89	3,888
7	22/2/88	8:00	93	3,984
8	22/2/88	12:00	97	3,791
9	22/2/88	16:00	101	3,503
10	22/2/88	20:00	105	3,407
11	23/2/88	0:00	109	3,216
12	23/2/88	4:00	113	3,120
13	23/2/88	8:00	117	2,928
14	23/2/88	12:00	121	2,832
15	23/2/88	16:00	125	2,450
16	23/2/88	20:00	129	1,973
17	24/2/88	0:00	133	1,593
18	24/2/88	4:00	137	1,403
19	24/2/88	8:00	141	1,119
20	24/2/88	12:00	145	0,930
21	24/2/88	16:00	149	0,648
22	24/2/88	20:00	153	0,554
23	25/2/88	0:00	157	0,461
24	25/2/88	4:00	161	0,423
25	25/2/88	8:00	165	0,367
26	25/2/88	23:00	180	0,405
27	26/2/88	11:00	192	0,237
28	26/2/88	23:00	204	0,145
29	27/2/88	11:00	216	0,072
30	27/2/88	23:00	228	0,108
31	28/2/88	11:00	240	0,054
32	28/2/88	23:00	252	0,018
33	29/2/88	23:00	276	0,027
34	1/3/88	23:00	300	0,000

DEBITS MOYENS JOURNALIERS A LA STATION DU PONT DE LA RN 73 OUYSSE AVAL

	1987		1988	
	MAI	JUIN	FEV.	MARS
1	2,300	1,200	47,400	4,100
2	2,200	1,200	34,800	4,000
3	2,200	1,000	29,000	3,900
4	2,200	1,000	23,600	3,800
5	2,100	1,400	35,200	3,700
6	2,100	1,700	54,600	3,500
7	2,100	1,000	50,000	3,500
8	2,000	3,100	36,900	3,600
9	2,000	4,200	34,500	3,500
10	1,900	3,500	41,000	3,200
11	1,900	2,700	39,800	3,200
12	1,900	2,500	29,000	3,100
13	1,800	2,200	21,900	3,100
14	1,800	1,900	17,900	3,000
15	1,800	1,900	14,500	4,000
16	1,700	7,600	12,200	6,400
17	1,700	12,300	10,000	32,500
18	1,700	8,600	8,800	64,000
19	1,600	6,500	7,600	78,000
20	1,800	18,900	7,100	54,000
21	1,800	16,700	6,400	29,000
22	1,500	12,300	5,700	27,500
23	1,500	9,300	5,600	13,500
24	1,500	6,800	5,300	11,500
25	1,400	5,300	5,000	12,400
26	1,400	4,500	4,600	30,700
27	1,400	3,700	4,400	34,500
28	1,300	3,100	4,300	23,600
29	1,300	2,900	4,200	17,500
30	1,300	2,300		19,500
31	1,200			21,500

Débits en m3/s

DEBITS MOYENS JOURNALIERS A LA STATION DU PONT DE RUEYRES OUYSSE AMONT (THEMINES)

	1987		1988	
	MAI	JUIN	FEV.	MARS
1		0,187	6,325	0,660
2		0,175	5,300	0,655
3		0,178	3,875	0,630
4		0,228	3,500	0,605
5		0,205	9,670	0,590
6		0,163	10,210	0,572
7		0,432	5,850	0,663
8		0,527	4,700	0,610
9		0,333	7,320	0,570
10		0,342	7,800	0,530
11		0,297	5,350	0,500
12	0,320	0,262	3,525	0,500
13	0,360	0,232	2,525	0,500
14	0,300	0,237	2,000	0,480
15	0,317	0,410	1,675	0,460
16	0,340	0,557	1,427	1,957
17	0,275	0,492	1,252	11,492
18	0,260	0,385	1,138	16,800
19	0,407	0,499	1,025	11,150
20	0,330	0,887	0,960	3,600
21	0,255	0,555	0,905	3,300
22	0,248	0,407	0,855	2,375
23	0,248	0,349	0,825	1,810
24	0,240	0,312	0,785	2,050
25	0,225	0,272	0,735	3,230
26	0,203	0,245	0,698	6,175
27	0,197	0,234	0,668	3,950
28	0,222	0,209	0,650	2,600
29	0,242	0,187	0,655	2,200
30	0,226	0,167		3,667
31	0,203			2,933

DEBITS MOYENS JOURNALIERS A LA STATION DU PONT DE FIALLIEZ FRANCES (THEMINETTES)

	1987		1988	
	MAI	JUIN	FEV.	MARS
1		0,130	5,037	0,490
2		0,131	4,217	0,490
3		0,155	3,000	0,485
4		0,196	2,780	0,480
5		0,205	10,275	0,480
6		0,183	8,217	0,490
7		0,265	5,266	0,548
8		0,317	5,267	0,490
9		0,257	7,460	0,465
10		0,235	8,033	0,430
11		0,191	5,500	0,410
12		0,180	3,325	0,405
13	0,228	0,156	2,055	0,405
14	0,225	0,199	1,587	0,390
15	0,235	0,313	1,317	0,370
16	0,235	0,380	1,115	1,407
17	0,215	0,283	0,960	9,876
18	0,215	0,245	0,935	13,650
19	0,370	0,382	0,870	8,850
20	0,345	0,747	0,765	2,700
21	0,271	0,398	0,680	1,925
22	0,259	0,320	0,645	1,510
23	0,235	0,288	0,605	1,190
24	0,215	0,268	0,570	1,581
25	0,214	0,245	0,540	2,737
26	0,214	0,230	0,520	5,625
27	0,200	0,214	0,500	3,475
28	0,152	0,184	0,500	2,175
29	0,225	0,155	0,490	1,760
30	0,209	0,132		3,223
31	0,174			2,217

ANALYSES DES CHLORURES (Cl-) NITRATES (NO3-) ET MATIERES EN SUSPENSION (MES)

THEMINETTES				
DATE	HEURE	Cl -	NO3 -	MES
17/2/88	14:00	10,1	16,2	5,0
	18:00	10,1	14,4	8,0
	22:00	11,1	16,2	6,0
18/2/88	2:00	10,5	15,6	9,0
	6:00	10,1	16,8	12,0
	10:00	10,5	15,6	9,0
	14:00	10,1	16,8	7,0
	18:00	10,1	15,0	5,0
	22:00	10,1	17,5	10,0
19/2/88	2:00	11,1	13,4	7,0
	6:00	11,1	13,4	8,0
	10:00	9,1	14,4	8,0
	14:00	10,1	18,0	3,0
	18:00	10,5	18,8	4,0
	22:00	11,7	18,8	4,0
20/2/88	2:00	12,3	18,8	4,0
	6:00	11,1	18,8	6,0
	10:00	10,5	18,0	6,0
	14:00	10,1	17,5	4,0
	18:00	10,7	17,5	2,0
	22:00	12,1	18,8	4,0
21/2/88	2:00	12,3	16,8	11,0
	6:00	13,1	18,8	9,0
	10:00	11,4	19,4	5,0
	14:00	10,1	18,8	4,0
	18:00	10,1	19,4	6,0
	22:00	10,5	20,6	4,0
22/2/88	2:00	10,7	18,0	5,0
	6:00	10,3	20,0	8,0
	10:00	10,1	19,4	7,0
	14:00	10,1	18,8	6,0
	18:00	9,3	19,4	6,0
	22:00	11,5	19,4	7,0
23/2/88	2:00	12,1	18,8	9,0
	6:00	12,5	20,6	8,0
	10:00	10,1	18,8	7,0
	14:00	9,9	18,8	6,0
	18:00	10,3	18,8	8,0
	22:00	11,9	19,4	13,0
24/2/88	2:00	12,3	19,4	20,0

THEMINES				
DATE	HEURE	Cl -	NO3 -	MES
17/2/88	14:00	6,1	10,4	6,0
	18:00	6,1	10,4	6,0
	22:00	7,5	14,0	6,0
18/2/88	2:00	8,1	10,0	6,0
	6:00	7,1	11,4	6,0
	10:00	7,1	12,0	9,0
	14:00	7,1	13,0	5,0
	18:00	7,1	12,4	6,0
	22:00	7,1	10,4	7,0
19/2/88	2:00	6,1	12,4	7,0
	6:00	8,1	10,0	6,0
	10:00	7,1	10,0	6,0
	14:00	8,1	12,0	4,0
	18:00	6,3	12,4	6,0
	22:00	7,1	13,0	5,0
20/2/88	2:00	8,1	14,0	7,0
	6:00	7,1	14,0	6,0
	10:00	7,3	13,4	6,0
	14:00	7,5	13,4	5,0
	18:00	7,1	14,4	4,0
	22:00	7,3	14,0	8,0
21/2/88	2:00	7,7	14,0	8,0
	6:00	7,3	14,0	8,0
	10:00	7,7	14,0	8,0
	14:00	7,1	15,0	8,0
	18:00	8,1	13,0	8,0
	22:00	7,1	13,4	7,0
22/2/88	2:00	15,4	16,2	8,0
	6:00	7,3	19,4	7,0
	10:00	7,3	14,4	6,0
	14:00	7,9	14,4	6,0
	18:00	8,1	14,4	7,0
	22:00	7,9	15,0	17,0
23/2/88	2:00	7,3	14,4	10,0
	6:00	7,9	14,4	9,0
	10:00	7,1	13,4	7,0
	18:00	9,1	14,4	6,0
	22:00	8,1	14,0	5,0
24/2/88	2:00	7,5	14,4	6,0

LES BESACES				
DATE	HEURE	Cl -	NO3 -	MES
17/2/88	14:00	8,5	12,4	5,0
	18:00	7,7	12,4	3,0
	22:00	8,1	14,0	3,0
18/2/88	2:00	8,1	13,0	4,0
	6:00	8,5	14,4	5,0
	10:00	9,1	13,0	4,0
	14:00	7,7	13,0	3,0
	18:00	7,5	13,4	4,0
	22:00	8,1	14,4	4,0
19/2/88	2:00	7,1	13,0	5,0
	6:00	8,5	13,4	6,0
	10:00	7,5	14,4	1,0
	14:00	8,7	14,0	5,0
	18:00	9,5	14,0	4,0
	22:00	7,9	15,0	7,0
20/2/88	2:00	8,3	14,4	6,0
	6:00	8,3	14,4	8,0
	10:00	9,9	14,0	7,0
	14:00	7,5	14,4	3,0
	18:00	7,1	15,0	4,0
	22:00	8,9	15,0	6,0
21/2/88	2:00	8,1	14,0	4,0
	6:00	8,3	14,4	12,0
	10:00	8,3	14,0	6,0
	14:00	8,9	15,0	6,0
	18:00	7,9	15,0	6,0
	22:00	8,1	15,0	5,0
22/2/88	2:00	8,5	16,2	8,0
	6:00	9,9	15,0	4,0
	10:00	8,3	15,6	7,0
	14:00	9,1	15,0	12,0
	18:00	7,5	15,6	6,0
	22:00	10,1	14,4	15,0
23/2/88	2:00	13,1	15,0	6,0
	6:00	8,7	16,2	8,0
	10:00	9,1	16,2	4,0
	14:00	9,1	14,0	6,0
	18:00	8,3	15,0	4,0
	22:00	7,9	15,0	4,0
24/2/88	2:00	8,1	16,2	4,0
	6:00	7,5	16,2	4,0
	10:00	8,7	16,2	8,0
	14:00	8,7	17,5	5,0
	18:00	8,9	16,2	3,0
	22:00	8,1	15,6	6,0
30736,0	2:00	8,0	16,8	7,0
	6:00	8,3	15,6	5,0

CONCENTRATION EN MG/L

Résumé

Le problème de la caractérisation du transport conservatif d'un traceur est étudié dans les systèmes où les conditions hydrodynamiques sont susceptibles de varier. L'approche utilisée est une approche dite «système» faisant référence à l'espace occupé par le traceur au cours de son transfert.

La conception d'un modèle de transformation des réponses impulsionnelles, déterminées à partir de traçages artificiels, en fonction des conditions hydrodynamiques, permet d'obtenir la réponse en concentration d'un système li une entrée quelconque en masse. La méthode de transformation établie s'applique aux systèmes non stationnaires, mais linéaires. Elle nécessite également une indépendance entre l'espace occupé par le traceur au cours de son transfert et les conditions hydrodynamiques auquel ce dernier peut être soumis.

Pour des systèmes à volume constant, des applications en colonnes ont montré les limites de la méthode de transformation des réponses impulsionnelles; ces dernières étant liées, en particulier, à des phénomènes de densité du traceur dans un tube uniquement rempli d'eau. En milieu crayeux granulaire, les phénomènes d'adsorption ou de diffusion matricielle de traceur sont des facteurs de non linéarité qui limitent également les applications dans une gamme de débit relativement étroite.

L'utilisation de la méthode de transformation, pour des traçages réalisés sur le système karstique de l'Ouysse du Causse de Gramat (Lot, France), a permis de montrer la validité d'applications pour des périodes hydrodynamiques différentes. On se gardera néanmoins pour les milieux karstiques, de généraliser les transformations à toute la gamme des débits auxquels ce dernier peut être soumis. En effet, les conditions hydrodynamiques peuvent modifier les écoulements et par conséquent le système-traçage.

Mots·c1és : Traçages, réponses impulsionnelles, système non stationnaire, karst, Gramat.

Tracer test system analysis (constant volume) in transient now conditions. Possibilities of application in karstic medium.

Abstract

The problem of the characterization of a conservative mass transfer is studied in the case of a system where the hydrodynamic. conditions may vary. This approach is a «system analysis» refering to the space occupatcd by the mass during its transfer.

A transformation model of impulse responses, determined from tracer test in transient state, permits to obtain the response in time-concentrations of a system from an input of several injected masses. The transfonnation method can be applied both in non stationary and linear systems. Il has to be employed when the space occupated by the mass during its transfer and the hydrodynamic conditions of the system are independent.

For constant volume, the applications in columns in a laboratory show the limits of the method according to phenomena of tracer density in a tube. In chalky granular medium, the non linear phenomena of the adsorption or matrix diffusion limit the transformation of impulse responses in a small range of flowrates.

For tracer tests realized in the kar$tic system of Ouysse in the «Causse de Gramat» (Lot, France), the use of the transformation method of impulse responses show the validity of the application in different hydrodynamic periods. In karstic media, the range of flowrates, where the transformations can be realized, is dependent of the karstification of the studied system. So the flows can he modified according to the hydrodynamic conditions.

Keywords: Tracer tests, impulse responses, non steady state, karst, Gramat.