

Surveillance d'une structure confinante

Fiabilité d'un réseau piézométrique



C4H5O2_5 2/ 9/99 THERMC 4H 50 2 0G 300.000 5000.000/ 1392.000 1
1.64121890E+01 1.20184883E-02-4.40468566E-06 7.30124728E-10-4.42784365E-14 2

SURVEILLANCE D'UNE STRUCTURE CONFINANTE
FIABILITE D'UN RESEAU PIEZOMETRIQUE

RAPPORT FINAL

août 1994

G. BEAUDOING - CEN Grenoble

Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :

RECORD, Surveillance d'une structure confinante : Fiabilité d'un réseau piézométrique, 1994, 102 p, n°92-0502/1A.

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 1994

RESUME

Dans le cadre du contrat n° 92502 l'Association RE.CO.RD. a demandé à la Section d'Application des Traceurs d'appliquer la méthodologie des traceurs à l'étude de la fiabilité d'un réseau piézométrique de surveillance de la qualité des eaux souterraines. Ce réseau est implanté en aval d'un CET sur lequel les conditions techniques observables sont celles d'un site de stockage de type classe 2.

L'étude réalisée s'est déroulée suivant trois phases :

- Phase 1 : implantation de forages supplémentaires à ceux existants pour augmenter la densité de piézomètres en élargissant la base du réseau pour avoir une plus grande probabilité d'intercepter le front de propagation de l'eau tracée injectée au pied des extrémités Nord-Ouest et Nord-Est du CET respectivement intitulés :
 - . site SM1 : constitué des piézomètres à grandes profondeurs PZ1, PZ5 et PZ9 qui sont distants de ; PZ1-PZ9 = 65 m et PZ1-PZ5 = 230 m,
 - . site SM2 : constitué des piézomètres à moyennes profondeurs PZ6, PZ8 et PZ2 qui sont distants de : PZ6-PZ8 = 85 m et PZ6-PZ2 = 285 m.
- Phase 2 : première campagne de traçages réalisée au cours du premier semestre 1993 en période de position basse du toit de la nappe. Les résultats expérimentaux ont fait l'objet du rapport précédent DTA/DAMRI/SAR/SAT/RAP/93.20 [1].
- Phase 3 : seconde campagne de traçages réalisée au cours du second semestre 1993 en période de hautes eaux consécutives aux précipitations d'automne. Ces essais ont fait l'objet du rapport référencé DTA/DAMRI/SAR/SAT/RAP/94.03 [1].

Les résultats expérimentaux obtenus ont mis en évidence les relations inter-piézo-mètres PZ1-PZ9, PZ1-PZ5 du site SM1 et PZ6-PZ8, PZ6-PZ2, PZ6-puits La Ferme du site SM2 au cours de deux régimes d'écoulements souterrains : basses eaux et hautes eaux.

Les valeurs obtenues au cours des traçages effectués en basses et hautes eaux ont conduit aux conclusions suivantes :

. site SM1 : PZ1-PZ9-PZ5

$1,0 \leq$ vitesse moyenne dans les pores ≤ 23 m/j

$0,02 \leq$ coefficient de dispersion longitudinale ≤ 150 m²/j

. site SM2 : PZ6-PZ8-PZ2-puits La Ferme

$1,2 \leq$ vitesse moyenne dans les pores $\leq 72,5$ m/j

$0,02 \leq$ coefficient de dispersion longitudinale ≤ 150 m²/j

Les fenêtres de variations de chacun des paramètres \bar{U}_X et D_X résultent de la complexité des écoulements globaux dus à l'hétérogénéité du sous-sol qui génère des superpositions d'écoulements macroscopiques individualisés très différents d'un point d'observation à l'autre.

En conclusion, dans le cadre de cette étude méthodologique sur le site du CET "X" il conviendrait pour assurer un meilleur suivi de la qualité des eaux souterraines sous-jacentes de faire réaliser les opérations suivantes :

- implantation de quelques piézomètres supplémentaires parallèlement à la bordure Nord-Est du CET qui s'étale sur une distance évaluée à 1000 mètres sans contrôle, à l'exception du Puits La Ferme éloigné,
 - respect de la procédure d'échantillonnage des eaux souterraines qui a été appliquée au cours de nos essais pour s'assurer que les eaux prélevées au cours de l'échantillonnage sont bien représentatives des eaux souterraines extérieures au tubage plus ou moins bien crépiné ou partiellement colmaté. Cette opération pouvant aisément être réalisée par l'équipement permanent de dispositif d'échantillonnage constitué par une pompe immergée d'un type similaire à celles mises en oeuvre dans le cadre de nos essais.
-

SOMMAIRE

1 - POSITION DU PROBLEME

2 - SITE EXPERIMENTAL : réseaux localisés en aval du CET

2.1. Situation et contexte hydrogéomorphologique du site

2.1.1. Contexte géologique

2.1.2. Contexte hydrogéologique

2.2. Equipements des sites piézométriques

2.2.1. Site migration SM1

2.2.2. Site migration SM2

3 - METHODOLOGIE DES TRACEURS

4 - PLANNING DES EXPERIMENTATIONS

5 - CAMPAGNE DE TRACAGES N° 1 : janvier 1993

5.1. Technologie des essais

5.2. Echantillonnage d'eau dans les piézomètres

5.3. Conditions hydrauliques au cours de la campagne

5.4. Courbes de restitution en traceur ou Distribution des Temps de Séjour

5.5. Interprétation des résultats

5.5.1. Interprétation des traçages

5.5.2. Représentation analytique des D.T.S.

a - système PZ1-PZ9-PZ5

b - système PZ6-PZ8-PZ2

5.5.3. Interprétation des relevés piézométriques

6 - CAMPAGNES DE TRACAGES N° 2 : août 1993

6.1. Technologie des essais

6.2. Conditions hydrauliques au cours de la campagne

6.3. Courbes de restitution en traceur ou Distribution des Temps de Séjour

6.4. Interprétation des résultats

- 6.4.1. Interprétation des traçages
- 6.4.2. Représentation analytique des D.T.S.
 - a - système PZ1-PZ9-PZ5
 - b - système PZ6-PZ8-PZ2-Puits La Ferme
- 6.4.3. Interprétation des relevés piézométriques

7 - SYNTHÈSE ET INTERPRÉTATIONS

7.1. Synthèse des 2 campagnes de traçages

7.1.1. Site SM1 : PZ1-PZ9-PZ5

7.1.2. Site SM2 : PZ6-PZ8-PZ2

8 - CONCLUSIONS

ANNEXE

Annexe 1 : Méthodologie générale des traceurs.

AVERTISSEMENT

L'ETUDE PONCTUELLE ET TRES LOCALISEE SUR DEUX ZONES EQUIPEES DE PIEZOMETRES DU CENTRE D'ENFOUISSEMENT TECHNIQUE "X" NE PEUT PAS CONSTITUER L'ETUDE DU CET LUI-MEME.

Les résultats obtenus sous la forme de courbes concentration-temps consécutives à des injections quasi-instantanées dans les forages PZ1 et PZ6 caractérisent deux parties du site et permettent seulement de présenter nos moyens méthodologiques d'exploitation de ces courbes et de caractérisation de la propagation des eaux souterraines tracées.

Dans le cadre de la présente étude, seul l'aspect méthodologique a un caractère formel. En effet, l'intervention sur un site réel équipé parfois de piézomètres anciens plus ou moins crépinés peut conduire à des erreurs d'appréciation des courbes de passage du traceur. C'est le cas en particulier du piézomètre PZ1 où la hauteur crépinée est faible devant la hauteur mouillée, ce qui conduit à des âges internes du traceur dans le volume crépiné qui sont surestimés par rapport au temps de séjour moyen réel.

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1 : Equipements piézométriques des sites SM1 et SM2.
- Tableau 2 : Conditions opératoires de l'injection en période de basses eaux sur le site SM1.
- Tableau 3 : Conditions opératoires de l'injection en période de basses eaux sur le site SM2.
- Tableau 4 : Caractéristiques temporelles des DTS brutes des sites SM1 et SM2..
- Tableau 5 : Rapports de dilution minimale (C_o/C_{maxi}) observés sur les sites SM1 et SM2.
- Tableau 6 : Représentation analytique de la distribution des temps de séjour en PZ9 : système PZ1-PZ9.
- Tableau 7 : Représentation analytique de la Distribution des Temps de Séjour en PZ5 : système PZ1-PZ5.
- Tableau 8 : Représentation analytique de la distribution des temps de séjour en PZ8 : système PZ6-PZ8.
- Tableau 9 : Représentation analytique de la distribution des temps de séjour en PZ2 : système PZ6-PZ2.
- Tableau 10 : Conditions opératoires de l'injection en période de hautes eaux sur le site SM1.
- Tableau 11 : Conditions opératoire de l'injection en période de hautes eaux sur le site SM2.
- Tableau 12 : Caractéristiques temporelles des D.T.S. brutes des sites SM1 et SM2.
- Tableau 13 : Rapports de dilution minimale (C_o/C_{maxi}) observés sur les sites SM1 et SM2.
- Tableaux 14 à 18 : Représentation analytiques des Distributions des Temps de Séjour entre les piézomètres d'observation des systèmes SM1 (PZ1-PZ9-PZ5) et SM2 (PZ6-PZ8-PZ2-Puits La Ferme).
- Tableau 19 : Synthèse des résultats obtenus par décomposition analytique des D.T.S. expérimentales.

1 - POSITION DU PROBLEME

L'implantation, l'exploitation et le suivi en fin d'exploitation d'un stockage de déchets nécessitent au niveau de la gestion technique du site, la réalisation d'un aménagement fiable de contrôle de l'efficacité des différentes barrières confinantes et des dispositifs de drainage des lixiviats éventuellement produits. Cet aménagement est constitué sur de tels sites par l'implantation d'un réseau de piézomètres extérieurs au Centre d'Enfouissement Technique et pouvant descendre jusqu'au substratum imperméable pour permettre d'échantillonner les eaux à différentes profondeurs sur lesquelles des analyses physico-chimiques permettront de suivre qualitativement et quantitativement la qualité des eaux souterraines.

L'objectif d'un tel réseau d'implantation est de permettre d'alerter rapidement l'exploitant du site que ses eaux souterraines sont contaminées par ses lixiviats et donc qu'une, ou plusieurs de ses barrières de confinement a été détériorées.

Pour de tels réseaux piézométriques d'observations, il conviendra de s'assurer de la fiabilité de leur implantation par rapport à l'interception de tout panache de dispersion provenant d'une fuite d'effluents du CET.

2 - SITE EXPERIMENTAL : réseaux piézométriques localisés en aval d'un CET

2.1. Situation et contexte hydrogéomorphologique du site

Dans le cadre du contrat "Etude de fiabilité d'un réseau piézométrique de contrôle d'une décharge", la Section d'Application des Traceurs est conduite à intervenir sur un site de décharge X.

La situation géographique locale et régionale du site "X" est présentée sur les figures 1, 2 et 4.

2.2. Contexte géologique : figures 3 - 5

<Le Centre d'Enfouissement est situé dans un arc marainique. Cette unité géologique correspond à une relique de moraine frontale de la dernière glaciation. Cet ensemble comprend des vallums morainiques dont l'orientation Nord-Sud est encore bien visible en surface. Les terrains y sont hétérogènes, avec :

- des graves très argileuses compactées,

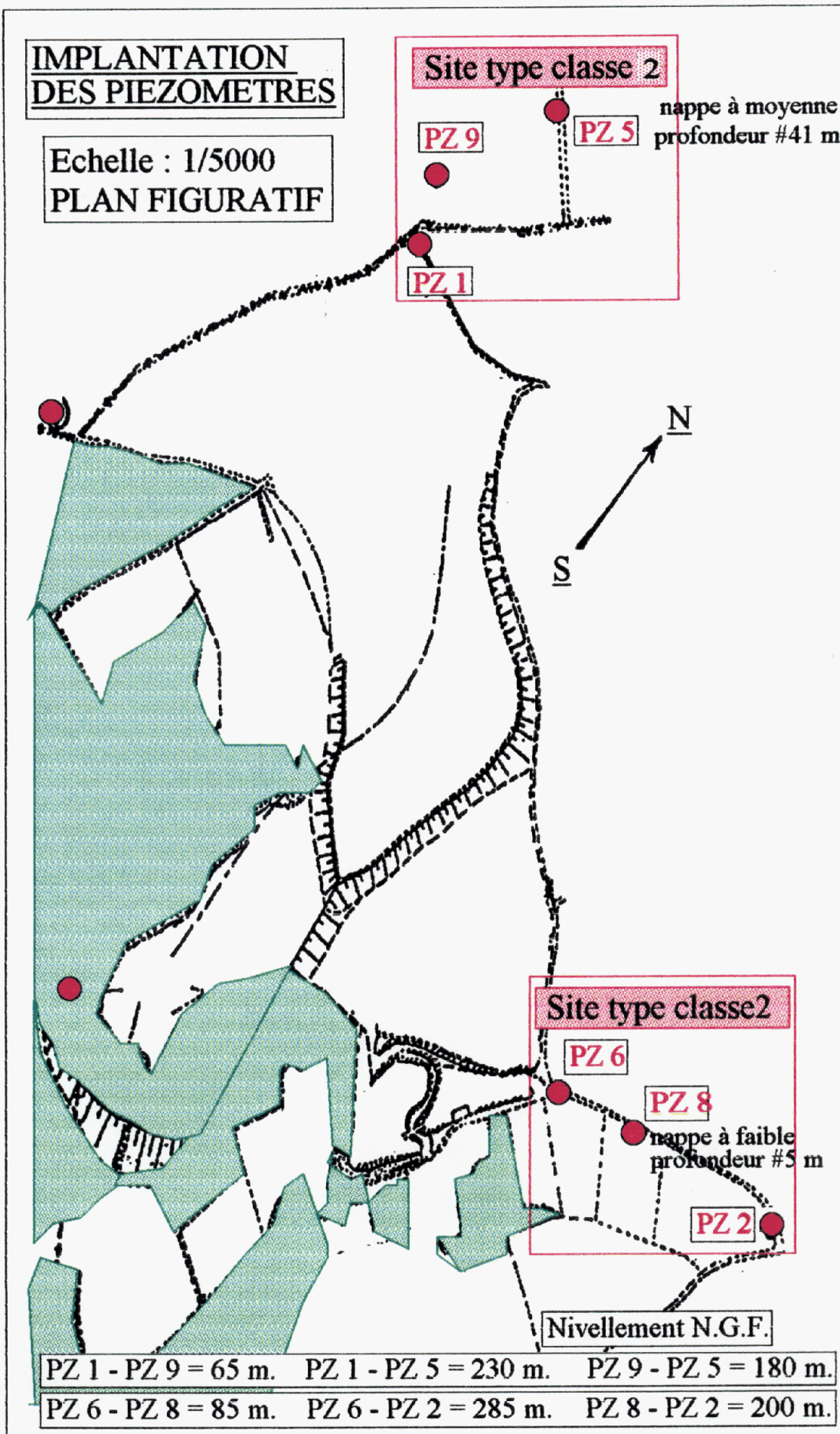


Figure 1 : Situation géographique des sites SM1 et SM2

- des sables et des graviers disposés en lits discontinus ou dans des chenaux. Leur géométrie dépend des épisodes de fonte des glaces,
- des graviers propres, de part et d'autre du secteur étudié, formant de grandes plaines "fluvio-glaciaires".

L'ensemble repose sur un substratum de grès et sable mollassiques>.

2.3. Contexte hydrogéologique : figures 3 - 5

<Le contexte hydrogéologique du secteur peut être caractérisé par la proximité de réservoirs aquifères intéressants et utilisés :

- à l'Est, la nappe aquifère associée à la plaine fluvio-glaciaire de la RONTA. Dans cette plaine, on note plusieurs zones de captages,
- à l'Ouest, le début d'un chenal aquifère,
- l'arc morainique où est implanté le Centre d'Enfouissement ne correspond pas à une zone de ressources aquifère ; par contre, on note de petites nappes ou des sources quand il y a des chenaux graveleux.>

Des mesures de perméabilités réalisées dans les piézomètres de contrôle du site PZ1 à PZ4 par le CETE en 1990 conduisent à des valeurs moyennes variant de 10^{-6} à 10^{-3} m/s suivant la localisation du piézomètre.

Essai	Origine	Perméabilité	Matériau testé	
PZ1	CETE - 90	$1,7 \cdot 10^{-6}$ m/s	z = - 30 m	molasse
PZ2	-	$0,7 \cdot 10^{-5}$ m/s	z = - 10 m	sable
PZ3	-	$2,5 \cdot 10^{-5}$ m/s	z = - 30 m	molasse
PZ4	CETE -90	$4,0 \cdot 10^{-3}$ m/s	z = - 10 m	gravier

Les valeurs ci-dessus ont été déterminées par les foreurs au cours des sondages à l'aide d'essais de type impulsional dans les piézomètres de contrôle PZ1 à PZ4.

2.2. Equipements des sites piézométriques

Au moment de l'intervention de la Section d'Application des Traceurs sur le site de stockage, les directions principales d'écoulement étaient déjà appréciées par le CETE de LYON à partir des relevés piézométriques du site proche.

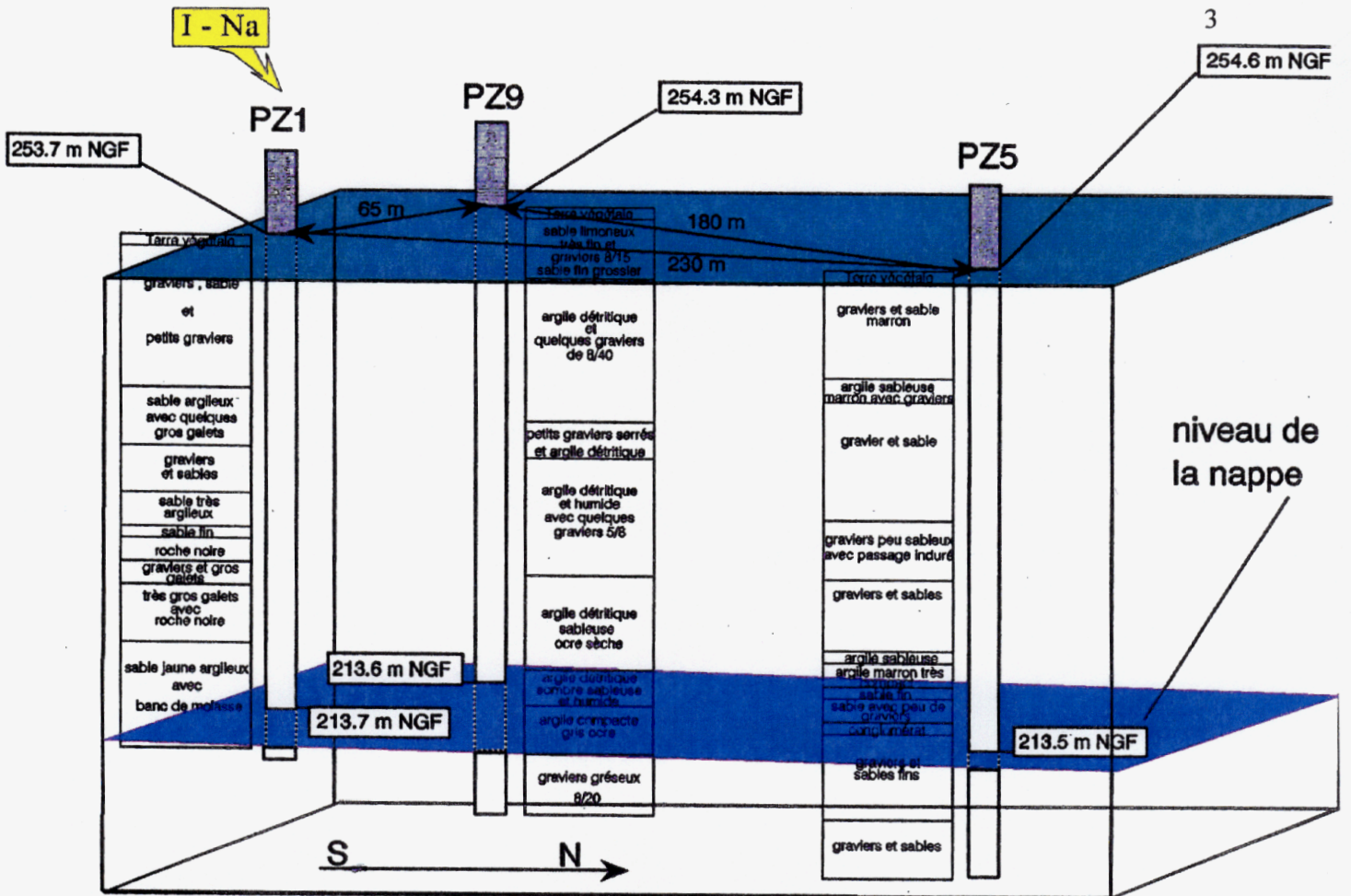


Figure 3 : Coupe géologique du site SM1.

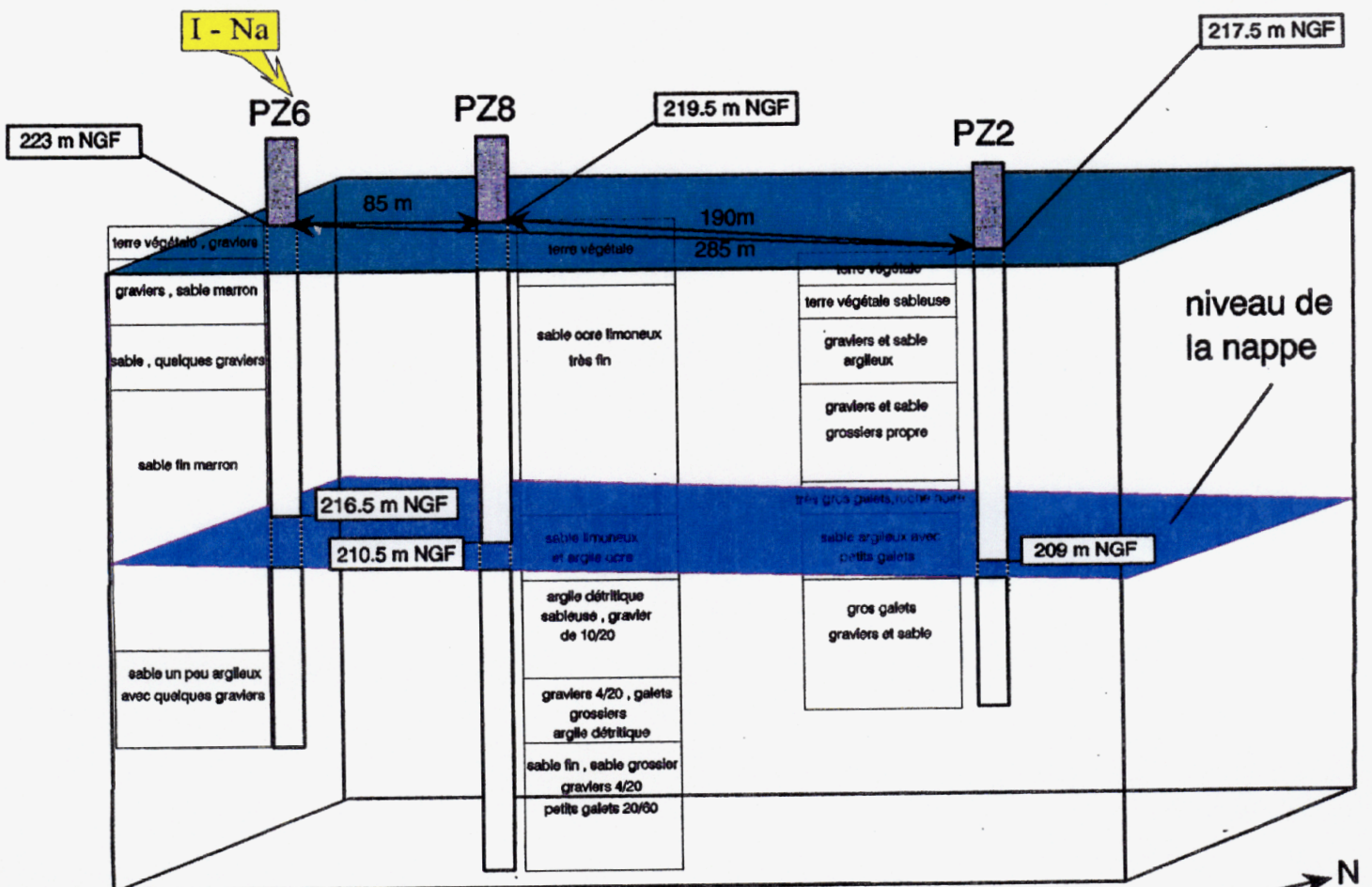


Figure 5 : Coupe géologique du site SM2.

La localisation des deux implantations des piézomètres PZ8 et PZ9 a été définie suivant les schémas des figures 2-3 et 4-5.

Chaque forage des sites SM1 et SM2 est équipé d'un tube P.V.C. crépiné. Le détail des équipements effectués est présenté dans le tableau 1.

Piézomètres	Equipements
PZ1	Tubage PVC 92 x 110 mm avec crépinage et écrans périphériques filtrants : avant le 20/08/92
PZ9	Tubage PVC 113 x 125 mm avec crépinage (fentes 0,5 mm de large) et écran filtrant constitué de gravillons (200 kg) : 20/0892
PZ5	Tubage acier avec crépinage en partie inférieur (fente 1 mm de large) et écran filtrant constitué de gravillons : avant le 20/08/92
PZ6	Tubage PVC 113 x 125 mm avec crépinage (fentes 1 mm de large) et écran périphérique filtrant : avant le 20/08/92
PZ8	Tubage PVC 113 x 125 mm avec crépinage (fentes 0,5 mm de large) et écran filtrant constitué de gravillons (200 kg) : 20/08/92
PZ2	Tubage PVC 92 x 110 mm avec crépinage en partie inférieure : avant le 20/08/92

Tableau 1 : Equipements piézométriques des sites SM1 et SM2.

2.2.1. Site migration SM1

Le site migration est composé de trois piézomètres de grande profondeur qui sont référencés PZ1, PZ9 et PZ5 et situés aux abords du Bois...

Au cours de l'exécution des forages, la coupe géologique du sous-sol a été réalisée. La nature des terrains rencontrés est présentée dans la figure 3.

Le toit de la nappe d'eaux souterraines évolue avec quelques fluctuations autour d'une profondeur de 41 mètres.

2.2.2. Site migration SM2

A l'autre extrémité du site de stockage de déchets, le site migration SM2 est implanté au-delà du bois de la Le site est composé de trois piézomètres de moyenne profondeur. Les coupes géologiques réalisées au cours de la foration de chacun des piézomètres sont présentées dans la figure 5.

La côte du toit de la nappe phréatique fluctue autour d'une profondeur moyenne évaluée à 5 mètres.

3 - METHODOLOGIE DES TRACEURS [2 - 3 - 4 - 6]

La méthodologie des traceurs qui est mise en oeuvre associe d'une part les techniques de marquage des fluides d'écoulement et leur identification dans les courbes de restitution ou de perçage en aval du ou des points d'injection et d'autre part l'analyse systémique qui permet l'exploitation des Distributions des Temps de Séjour. L'optimisation numérique des courbes expérimentales est réalisée avec des modèles d'écoulement de type hydrodispersif.

Un développement plus complet de la méthodologie est présenté en partie annexe 1.

Remarque 1 :

Par ailleurs, compte tenu de la nature complexe des D.T.S. expérimentales et pour mieux les exploiter, nous avons dû les décomposer en somme de D.T.S. unitaires de type hydrodispersif basées sur deux paramètres (convectif : \bar{U}_x , dispersif : D_x). Ces décompositions ont été réalisées à l'aide des logiciels suivants : SIGMA PLOT, PEAK FIT.

Cette technique d'exploitation des D.T.S. expérimentales complexes (présence de plusieurs maxima) ne peut pas à priori conduire à assimiler le sous-sol du site à un système hydrogéologique multicouches continues à perméabilités différentes. En effet, rappelons que seul une identification géologique préalable du site basée sur un maillage serré (par exemple : échelle décimétrique d'observations géologiques par rapport à une échelle hectométrique d'observations des données d'écoulement) permettrait d'avancer une telle hypothèse d'écoulement stratifié multicouches avec des échanges verticaux plus ou moins importants.

Remarque 2 :

La mesure des profils de débits spécifiques de filtration par application de traceurs permet aussi de quantifier les flux respectifs de filtration par pas d'auscultation prédéfinis. Mais, en général avant de réaliser de telles expérimentations, il est préférable d'avoir connaissance des identifications géologiques pour apprécier la grandeur des pas d'auscultation (épaisseur verticale de sol) compris entre les packers du dispositif mis en oeuvre).

4 - PLANNING DES EXPERIMENTATIONS

La Section d'Application des Traceurs a réalisé ou fait réaliser les aménagements techniques et interventions suivants conformément au planning ci-dessous :

- . 01/07/92 Signature du contrat d'étude.
- . 20-24/07/92 Travaux de foration et d'équipement des piézomètres PZ9 et PZ8 situés respectivement sur le site SM1 (PZ1, PZ9, PZ5) et sur le site SM2 (PZ6, PZ8, PZ2). Ces forations ont été réalisées par la Société SONDALP LYON - sondage forage - captage puits (90 route de Paris - 69890 La Tour du Salvagny).
- . 11-16/12/92 Réception des piézomètres équipés par SONDALP LYON et essais complémentaires de pompages réalisés par la SAT : études de rabattements et remontées de la nappe soumise à un pompage de débit connu.
- . 14-23/12/92 Aménagement des piézomètres PZ9, PZ5 (site SM1) et PZ8, PZ2 (site SM2) par l'installation de dispositifs d'échantillonnage constitués principalement de pompes immergées GRUNDFOSS.
- . 01/02/93 Rapport trimestriel d'avancement.
- . 11-13/01/93 Traçages réalisés sur chaque site piézométrique.
- . Date > 13/01/93 Suivi du transfert des traceurs injectés (Amino G et Iodure de Sodium) par dosages physique et chimique des eaux souterraines prélevées périodiquement "in situ" sur chacun des sites SM1 et SM2 équipés d'échantillonneurs immergés.
- . 10/07/93 Rapport semestriel relatif aux campagnes de traçages réalisées sur chacun des sites SM1 et SM2.
- . 26/07/93 Traçages réalisés sur les sites piézométriques.
- . Date > 26/07/93 Suivi du transfert du traceur injecté (Iodure de Sodium) par dosages chimiques des eaux souterraines prélevées périodiquement "in situ" sur chacun des sites SM1 et SM2.
- . 23/02/94 Rapport semestriel relatif aux campagnes de traçages réalisées sur chacun des sites SM1 et SM2.
- . 08/94 Rédaction du rapport de synthèse des essais : études comparatives, exploitations analytiques et interprétations.

5 - CAMPAGNE DE TRACAGES N° 1 : janvier 1993

5.1. Technologie des essais [3 - 4 -6]

Au cours de la campagne de traçages réalisée en période de basses eaux, les traceurs utilisés et les moyens techniques qui ont été mis en oeuvre sont présentés dans les tableaux 2 et 3. Ils concernent respectivement les sites SM1 (PZ1 : PZ9 : PZ5) et SM2 (PZ6 : PZ8 : PZ2).

Pour chaque opération d'injection, une prédilution du traceur est réalisée dans une piscine mobile de capacité au moins égale à 3 m³ d'eau.

Les pompes immergées dans les piézomètres d'échantillonnage étaient destinées à réaliser une homogénéisation préalable des eaux avant tout prélèvement.

Au cours de la campagne de traçages, des relevés périodiques de la position du toit de la nappe sont effectués. Ces relevés permettent en particulier d'apprécier les mouvements du toit de la nappe et de vérifier si la stationnarité de la nappe est bien maintenue durant les essais.

Les dosages d'Iode effectués dans chaque prélèvement conduisent au tracé des courbes concentration-temps. Les courbes de disparition de traceur obtenues dans les piézomètres d'injection constituent par ailleurs chacune des fonctions d'entrée dans les systèmes hydrauliques PZ1-PZ9, PZ1-PZ5 et PZ6-PZ8, PZ6-PZ2.

SITE SM1 : PZ1 - PZ9 - PZ5						
Injection des traceurs			Durée	Echantillonnage		
			d'injection		Prélèvement	
Lieu	Nature	Masse			technique	pas de temps
PZ1	Iodure de Sodium (traceur chimique I-Na) Amino G (traceur fluorescent)	50 kg 10 kg	le 12/01/93 10 h 55 - 11 h 18 $\Delta t = 23$ mn	PZ1 PZ9 PZ5	pompes immergées Grundfoss + manuel en surface	$\Delta t = 3$ jours

Tableau 2 : Conditions opératoires de l'injection en période de basses eaux sur le site SM1.

SITE SM2 : PZ6 - PZ8 - PZ2						
Injection des traceurs			Durée		Echantillonnage	
			d'injection		Prélèvement	
Lieu	Nature	Masse		Lieu	technique	pas de temps
PZ1	Iodure de Sodium (traceur chimique I-Na)	100 kg	le 13/01/93	PZ6	pompes immergées Grundfoss + manuel en surface	$\Delta t = 3$ jours
	Amino G (traceur fluorescent)	20 kg	$\Delta t = 15$ mn	PZ8	Préleveur automatique ISCO	$\Delta t = 1$ jours
				PZ2	Préleveur manuel	$\Delta t = 3$ jours

Tableau 3 : Conditions opératoires de l'injection en période de basses eaux sur le site SM2.

5.2. Echantillonnage d'eau dans les piézomètres

Tout piézomètre équipé d'un tube crépiné est caractérisé par un volume mouillé V_1 . Avant chaque prélèvement "global" d'eau, il convient de réaliser une homogénéisation préalable des eaux de volume V_1 du piézomètre par mise en oeuvre de chaque pompe immergée Grundfoss de débit de recyclage Q_M qui équipe le forage concerné. Lorsque le piézomètre subit une homogénéisation efficace, il peut être assimilé à un mélangeur parfait dont la Distribution des Temps de Séjour du circuit d'homogénéisation est assimilable à une fonction de type $h(t) = 1 - \exp[-t / (V_1 / Q_M)]$ avec $\tau = V_1 / Q_M$ dénommé temps d'homogénéisation.

Au cours des opérations de prélèvement, les opérateurs de la S.A.T. ont réalisés systématiquement avant toute opération d'échantillonnage à une préhomogénéisation d'une durée équivalente correspondant au moins à un temps $t_1 = 4 \tau$. La valeur de t_1 optimisée a été évaluée à 20 min. (durée de pompage préalable) sur chacun des piézomètres PZ1-PZ9-PZ5, PZ6 et PZ2. Le piézomètre PZ8 était initialement équipé d'un préleveur automatique ISCO.

Par ailleurs, cette opération de préhomogénéisation a été réalisée deux fois sur chaque forage pour avoir une durée totale de mélangeage équivalent à $t_2 = 2 \times t_1 = 40$ min. égale à 8τ et qui correspond à un niveau de mélangeage ≥ 99 % quelle que soit l'importance de la

fraction débitante de chaque strate perméable de sol. La seule conditions nécessaire étant que $Q_M \gg \sum q_j$ infiltration.

Remarque :

Précisons que cette phase préliminaire à tout prélèvement d'eaux souterraines dans un piézomètre est en particulier indispensable quand on veut, à un instant défini prélever des eaux sur lesquelles seront réalisées des dosages physico-chimiques et biologiques.

En effet, les eaux prélevées dans le tubage piézométrique crépiné se doivent d'être représentatives de la qualité des eaux de la nappe à cet instant.

Sur le plan méthodologique, il convient notamment de s'assurer des données suivantes :

- évaluer le taux de renouvellement global des eaux d'un piézomètre par la détermination à l'aide de traçage localisé de sa Distribution des Temps de Séjour et plus particulièrement de son temps de renouvellement τ ,
- déterminer le profil vertical des couches débitantes et de quantifier les débits spécifiques de filtration pour adapter le débit d'homogénéisation de la pompe immergée (Q_M) par rapport aux débits de filtration Q_j avec $Q_M \gg Q_j$.

5.3. Conditions hydrauliques au cours de la campagne de traçages

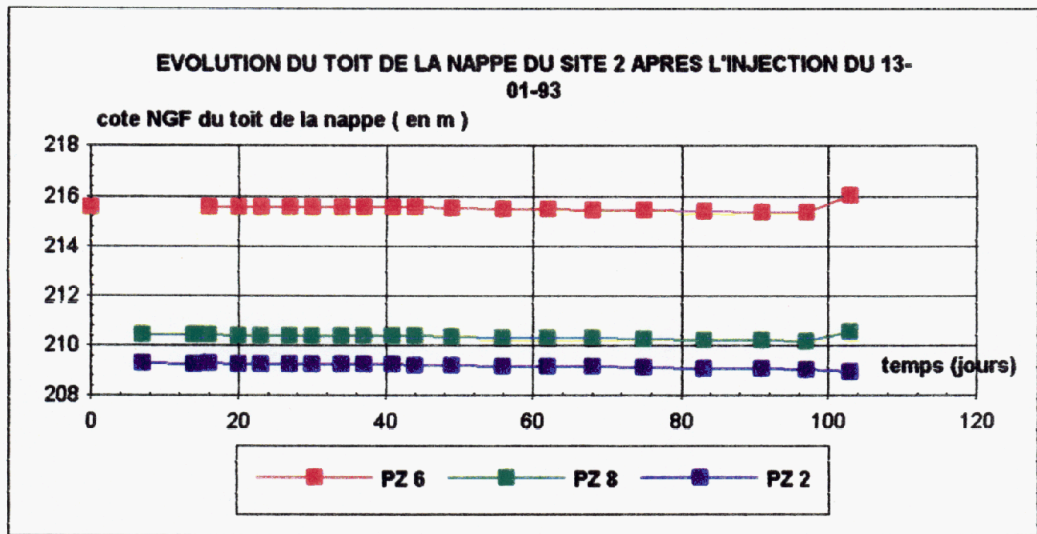
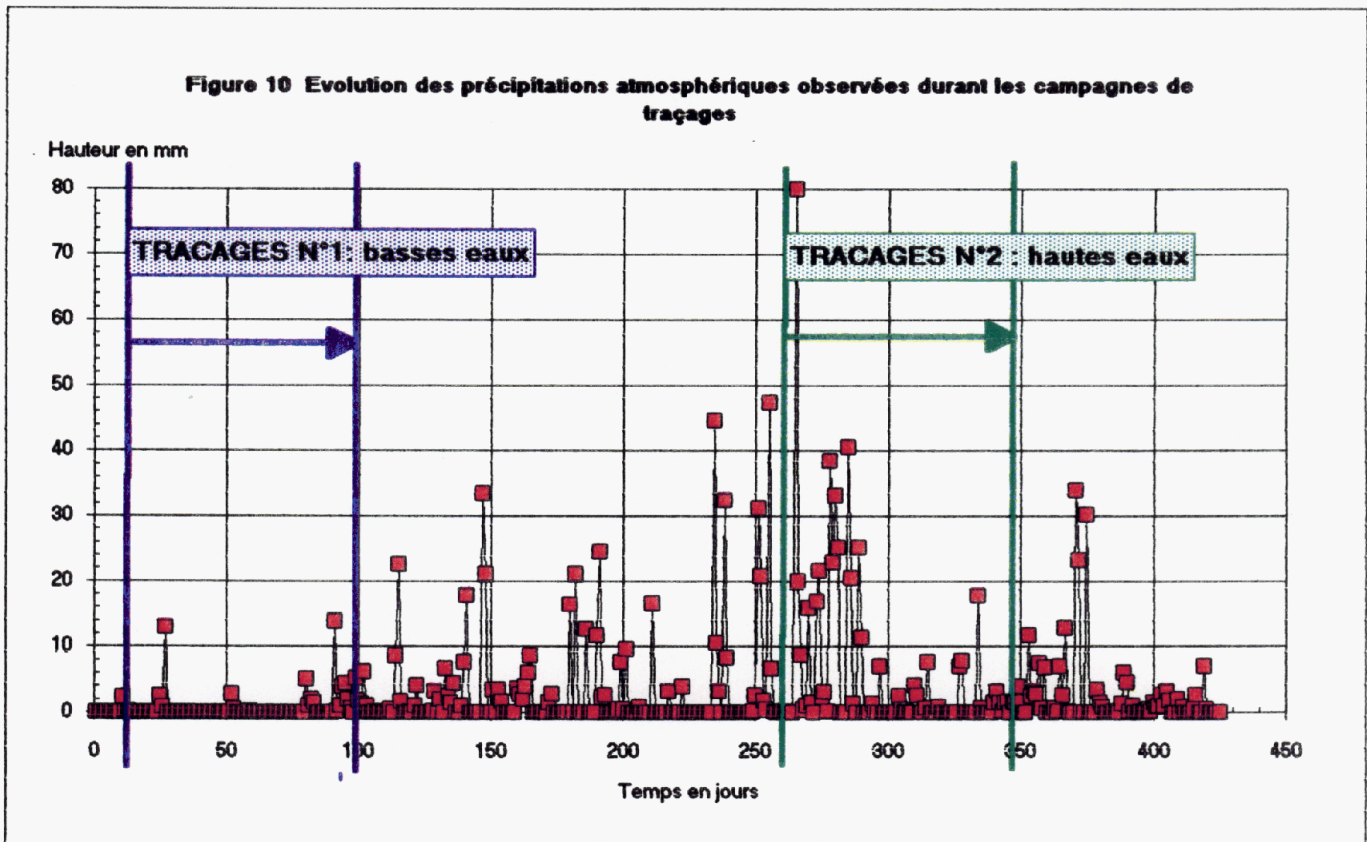
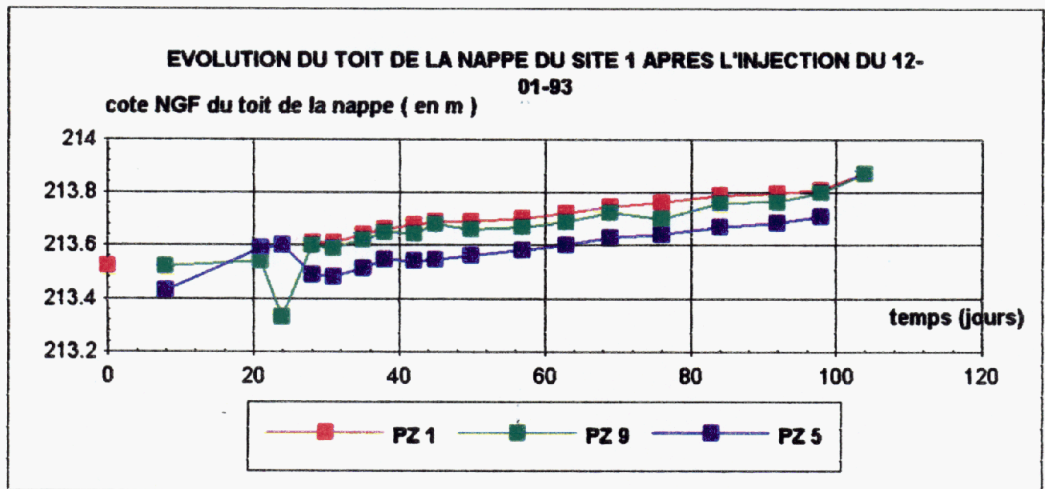
L'intérêt des mesures piézométriques réalisées sur chaque piézomètre des sites SM1 et SM2 consiste à connaître le ou les mouvements du toit de la nappe durant les traçages pour :

- sur un même site, vérifier si les conditions aux limites restent constantes durant la phase des essais dans chacun des piézomètres,
- vérifier si les gradients hydrauliques inter-piézomètres évoluent en sens et en intensité des mêmes ordres de grandeur durant les essais. Sur les sites homogènes, la variabilité des gradients permet de voir les périodes d'accélération ou de ralentissement d'écoulement, ainsi que les périodes de stabilisation de l'écoulement,

Les figures 6 à 9 montrent l'évolution du toit de la nappe et font nettement apparaître :

- une accélération du transfert souterrain au cours des essais (figure 6) sur le site SM1 entre les piézomètres PZ1-PZ9 et PZ1-PZ5. Par contre, notons une diminution sensible du gradient entre les piézomètres PZ6-PZ2.

Comme durant la première campagne, il s'avère que l'écoulement des eaux souterraines sur le site SM2 (PZ6-PZ8-PZ2) est plus stable que sur le site SM1 (PZ1-PZ9-PZ5-puits La Ferme) (figure 10).



5.4. Courbes de restitution en traceur ; Distribution des Temps de Séjour

Les courbes brutes de restitution en traceur I-Na obtenues après déduction du bruit de fond aux piézomètres PZ9-PZ5 et PZ8-PZ2 sont présentées sur les figures 11 et 12.

Les valeurs discrètes des concentrations (temps) obtenues conduisent aux Distributions des Temps de Séjour.

Remarque 1 :

Le nombre insuffisant de points expérimentaux obtenus au cours de cette campagne conduit à la prudence quant aux interprétations sur les écoulements (direction principale, hétérogénéité du sous-sol, dispersion transversale, ...). Néanmoins, à l'aide d'un logiciel de décomposition des D.T.S. et d'ajustements avec un modèle analytique hydrodispersif (\bar{U} , D_e), une première analyse des écoulements respectifs sur les sites SM1 et SM2 est réalisée.

Remarque 2 :

Pour la seconde campagne de traçages réalisée en "hautes eaux", des aménagements techniques d'homogénéisation et de prélèvements d'eau ont été réalisés par implantation de pompes immergées Grundfoss.

Remarque 3 :

La fonction d'entrée dans le système hydraulique PZ6-PZ8-PZ2 ou fonction de disparition du traceur dans le piézomètre PZ6 est difficilement exploitable du fait du mauvais renouvellement des eaux du PZ6 par l'écoulement des eaux souterraines (crépilage insuffisant).

5.5. Interprétation des résultats

5.5.1. Interprétation des traçages

- a) Les résultats expérimentaux obtenus dans chacun des piézomètres montrent que le transit d'une fraction des eaux marquées est rapide, en particulier dans le piézomètre PZ5 du site SM1 et dans le piézomètre PZ8 du site SM2.
- b) Les résultats obtenus sur le site SM1 montrent nettement que le piézomètre PZ5 est plus proche de la direction principale d'écoulement. En effet, les concentrations en Iode en PZ5 (distance PZ1-PZ5 = 230 m) sont de 1 à 10 fois plus élevés que les valeurs de concentrations en PZ9 (distance PZ1-PZ9 = 65 m).
- c) La fonction de disparition du traceur dans le piézomètre présente un pseudo-palier de concentration signifiant ainsi un faible taux de renouvellement des eaux du

piézomètre et donc un écoulement souterrain lent. Cependant les résultats obtenus aux piézomètre PZ5 et PZ9 montrent que ces vitesses de transfert ne sont pas faibles. Il convient donc de supposer que le crépinage du piézomètre d'injection est insuffisant et que par ailleurs, il pourrait faire l'objet d'un colmatage malgré les nombreux essais de pompage réalisés au cours de la réception des sites SM1 et SM2. après les forages des piézomètres PZ9 et PZ8. Aussi dans le cadre de cette campagne d'essais, il est fait l'hypothèse que la fonction d'entrée est assimilable à une impulsion de Dirac.

- d) L'exploitation analytique des courbes expérimentales est réalisée par leur décomposition à l'aide de modèles hydrodispersifs à deux paramètres \bar{U}_{xj} et D_{xj} . Cette interprétation est effectuée au paragraphe 5.5.2.
- e) Les paramètres temporels qui caractérisent chacun des transferts bruts au cours de la campagne sont les suivants :

Références	PZ9	PZ5	PZ8	PZ2
Distance / injection	$d_{19} = 65\text{m}$	$d_{15} = 230\text{ m}$	$d_{68} = 85\text{ m}$	$d_{62} = 285\text{ m}$
Temps d'arrivée ; jour	8	8	6	6
Temps de la concentration maximale ; j	25	38	12	20
Temps de fin de passage ; jour	57	46	56	63

Tableau 4 : Caractéristiques temporelles des D.T.S. des sites SM1 et SM2.

- f) Les rapports de dilution observés entre la solution d'injection à la concentration C_0 et la concentration maximale C_M des piézomètres "aval" sont évalués à :

Références	PZ9	PZ5	PZ8	PZ2
Distance / injection	$d_{19} = 65\text{m}$	$d_{15} = 230\text{ m}$	$d_{68} = 85\text{ m}$	$d_{62} = 285\text{ m}$
Rapport de dilution : $C_0 / C_M =$	564 000	88 000	62 600	313 000

Tableau 5 : Rapports de dilution minimale (C_0 / C_{maxi}) observés sur les sites SM1 et SM2.

5.5.2. Représentation analytique des D.T.S.

Chaque Distribution des Temps de Séjour expérimentale obtenue entre le volume mouillé du piézomètre d'injection A et le volume mouillé du piézomètre d'observation B est représentée analytiquement par la somme des fonctions élémentaires hydrodispersives du type :

$$DTS_A^B \text{ expérimentale} = \sum_{i=1}^j \frac{m_j \cdot \bar{U}_{xj}}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot D_{xj} \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{(d_{AB} - \bar{U}_{xj} \cdot t)^2}{4 \cdot D_{xj} \cdot t}\right)$$

de la forme : $DTS_A^B \text{ expérimentale} = \sum_{j=1}^j m_j \cdot h_j(\bar{U}_{xj}, D_{xj}; t)$ avec m_j : facteur de pondération de chaque "sous D.T.S." correspondant à l'aire de cette "sous D.T.S." qui est une fraction de l'aire totale de la D.T.S. expérimentale (m_0).

Remarque :

La complexité des D.T.S. expérimentales nécessite pour mieux les exploiter d'utiliser un logiciel de décomposition en somme de fonctions analytiques de type hydrodispersif basé sur deux paramètres (convectif : \bar{U}_x , D_x). Cette technique d'exploitation des D.T.S. ne peut pas à priori conduire à assimiler le sous-sol du site à un système hydrogéologique multicouches continues. En effet, seul, l'identification géologique du site qui serait basée sur un maillage serré permettrait d'avancer une telle hypothèse.

a) Système PZ1-PZ9-PZ5

La représentation analytique des D.T.S. expérimentales PZ1-PZ9 et PZ1-PZ5 est décrite par les coefficients des tableaux 6 et 7 et des figures 13 et 14 :

. PZ1-PZ9 : les transferts sont principalement représentés par trois couples d'écoulements superposés :

- les écoulements (19.1-19.2) avec $m_j = m_1 + m_2 = 23,9 \% m_0$
 $4,5 \leq \bar{U}_x \leq 6,1 \text{ m/j}$ et $1,1 \leq D_x \leq 4,2 \text{ m}^2/\text{j}$
- les écoulements (19.3-19.4) avec $m_j = m_3 + m_4 = 38,8 \% m_0$
 $1,7 \leq \bar{U}_x \leq 2,5 \text{ m/j}$ et $0,2 \leq D_x \leq 2,7 \text{ m}^2/\text{j}$
- les écoulements (19.5-19.6) avec $m_j = m_5 + m_6 = 37,3 \% m_0$
 $1,3 \leq \bar{U}_x \leq 1,4 \text{ m/j}$ et $0,02 \leq D_x \leq 0,08 \text{ m}^2/\text{j}$

. PZ1-PZ5 : les transferts sont principalement modélisables par deux groupes d'écoulements superposés :

- les écoulements (15.1-15.2) avec $m_j = m_1 + m_2 = 27,8 \% m_0$
 $13 \leq \bar{U}_x \leq 23 \text{ m/j}$ et $15 \leq D_x \leq 100 \text{ m}^2/\text{j}$
- les écoulements (15.3-15.4-15.5-15.6) avec $m_j = m_3 + m_4 + m_5 + m_6 = 72,2 \% m_0$
 $4,8 \leq \bar{U}_x \leq 8,8 \text{ m/j}$ et $1 \leq D_x \leq 15 \text{ m}^2/\text{j}$

Système PZ1 - PZ9 ; distance $d_{19} = 65$ m			
$DTS_{19} = m_{19}(t) = \sum_{i=1}^5 \frac{m_i \cdot \bar{U}_{xi}}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot D_{xi} \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{(d_{19} - \bar{U}_{xi} \cdot t)^2}{4 \cdot D_{xi} \cdot t}\right)$			
$DTS_{19,j}$	$\bar{U}_{xi} : \text{m/j}$	$D_{xj} : \text{m}^2/\text{j}$	$(\text{mj}/m_{19}) \%$
$DTS_{19,1}$	6,1	4,2	12,2
$DTS_{19,2}$	4,5	1,1	11,7
$DTS_{19,3}$	2,5	2,7	25,5
$DTS_{19,4}$	1,7	0,2	13,3
$DTS_{19,5}$	1,4	0,08	5,9
$DTS_{19,6}$	1,3	0,02	31,4

Tableau 6 : Représentation analytique de la Distribution des Temps de Séjour en PZ9 : système PZ1-PZ9.

Système PZ1 - PZ5 ; distance $d_{15} = 230$ m			
$DTS_{15} = m_{15}(t) = \sum_{i=1}^6 \frac{m_i \cdot \bar{U}_{xi}}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot D_{xi} \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{(d_{15} - \bar{U}_{xi} \cdot t)^2}{4 \cdot D_{xi} \cdot t}\right)$			
$DTS_{15,j}$	$\bar{U}_{xi} : \text{m/j}$	$D_{xj} : \text{m}^2/\text{j}$	$(\text{mj}/m_{15}) \%$
$DTS_{15,1}$	23	100	24,2
$DTS_{15,2}$	13	15	3,6
$DTS_{15,3}$	8,8	5,4	19,4
$DTS_{15,4}$	8	15	14,6
$DTS_{15,5}$	6	12	31,6
$DTS_{15,6}$	4,8	1	6,6

Tableau 7 : Représentation analytique de la Distribution des Temps de Séjour en PZ5 : système PZ1-PZ5.

b) Système PZ6-PZ8-PZ2

La représentation analytique des D.T.S. expérimentales PZ6-PZ8 et PZ6-PZ2 est décrite par les coefficients des tableaux 8 et 9 et des figures 15 et 16 :

. PZ6-PZ8 : les transferts observés sont principalement représentés par deux groupes d'écoulements superposés :

- l'écoulement (68.1) avec $m_j = m_1 = 77,8 \%$ mo

$$\bar{U}_x = 7,6 \text{ m/j} \quad \text{et} \quad D_x = 9 \text{ m}^2/\text{j}$$

- les écoulements (68.2-68.3-68.4-68.5) avec $m_j = m_2 + m_3 + m_4 + m_5 = 22,2 \%$ mo

$$\text{et } 1,8 \leq \bar{U}_x \leq 4,3 \text{ m/j} \quad \text{et} \quad 0,2 \leq D_x \leq 1,1 \text{ m}^2/\text{j}$$

. PZ6-PZ2 : les transferts observés "in situ" peuvent être principalement représentés par deux couples d'écoulements superposés :

- l'écoulement (62.1-62.2) avec $m_j = m_1 + m_2 = 77,2 \%$ mo

- $15 \leq \bar{U}_x \leq 31 \text{ m/j}$ et $38 \leq D_x \leq 300 \text{ m}^2/\text{j}$
 - l'écoulement (62.3-62.4) avec $m_j = m_3 + m_4 = 22,8 \%$ mo
 $6,5 \leq \bar{U}_x \leq 8,7 \text{ m/j}$ et $2 \leq D_x \leq 10 \text{ m}^2/\text{j}$

Système PZ6 - PZ8 ; distance $d_{68} = 85 \text{ m}$			
$\text{DTS}_{68} = m_{68}(t) = \sum_{i=1}^8 \frac{m_i \cdot \bar{U}_{xi}}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot D_{xi} \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{(d_{68} - \bar{U}_{xi} \cdot t)^2}{4 \cdot D_{xi} \cdot t}\right)$			
$\text{DTS}_{68.j}$	$\bar{U}_{xi} : \text{m/j}$	$D_{xj} : \text{m}^2/\text{j}$	$(m_j/m_{68}) \%$
$\text{DTS}_{68.1}$	7,6	9	77,8
$\text{DTS}_{68.2}$	4,3	1,1	13,5
$\text{DTS}_{68.3}$	3,1	0,2	3,4
$\text{DTS}_{68.4}$	2,4	0,3	2,0
$\text{DTS}_{68.5}$	1,8	0,3	3,3

Tableau 8 : Représentation analytique de la Distribution des Temps de Séjour en PZ8 : système PZ6-PZ8.

Système PZ6 - PZ2 ; distance $d_{62} = 285 \text{ m}$			
$\text{DTS}_{62} = m_{62}(t) = \sum_{i=1}^6 \frac{m_i \cdot \bar{U}_{xi}}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot D_{xi} \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{(d_{62} - \bar{U}_{xi} \cdot t)^2}{4 \cdot D_{xi} \cdot t}\right)$			
$\text{DTS}_{62.j}$	$\bar{U}_{xi} : \text{m/j}$	$D_{xj} : \text{m}^2/\text{j}$	$(m_j/m_{62}) \%$
$\text{DTS}_{62.1}$	31	300	35,9
$\text{DTS}_{62.2}$	15	38	41,3
$\text{DTS}_{62.3}$	8,7	10	14,6
$\text{DTS}_{62.4}$	6,5	2	8,2

Tableau 9 : Représentation analytique de la Distribution des Temps de Séjour en PZ2 : système PZ6-PZ2.

5.5.3. Interprétation des relevés piézométriques

L'intérêt des mesures piézométriques réalisées sur chaque piézomètre des sites SM1 et SM2 consiste à connaître le ou les mouvements du toit de la nappe durant les traçages pour :

- sur un même site, vérifier si le toit de la nappe évolue de la même façon sur chacun des piézomètres,
- vérifier si les gradients hydrauliques inter-piézomètres évoluent en sens et en intensité des mêmes ordres de grandeur durant les essais. Sur les sites homogènes, la variabilité des gradients permet de voir les périodes d'accélération ou de ralentissement d'écoulement, ainsi que les périodes de stabilisation de l'écoulement.

Les figures 17 à 20 montrent l'évolution des côtes de la nappe et indiquent que sur le site SM1, l'écoulement est plus rapide dans la direction PZ1-PZ5 alors que sur le site SM2 l'écoulement est plus rapide dans la direction PZ6-PZ2.

Les observations qualitatives et quantitatives obtenues sont corroborées par les courbes d'évolution temporelles des gradients hydrauliques.

Remarquons que l'écoulement du site SM2 est plus stable dans le temps (figure 20) ce qui n'est pas le cas du site SM1 où des apports latéraux d'eaux doivent modifier sensiblement la direction principale d'écoulement.

6 - CAMPAGNE DE TRACAGES N° 2 : AOUT 1993

6.1. Technologie des essais

Les conditions opératoires des campagnes de traçages effectuées les 16 et 17 août 1993 respectivement sur les sites SM1 et SM2 au cours d'une période de hautes eaux du toit de la nappe sont présentées dans les tableaux 10 et 11. Ces données concernent en particulier les sites SM1 (PZ1-PZ9-PZ5) et le site SM2 (PZ6-PZ8-PZ2-Puits La Ferme).

Chaque opération d'injection dans les piézomètres PZ1 et PZ6 a conduit à une prédilution du traceur dans une piscine de 3 m³ d'eau.

L'homogénéisation des traceurs injectés dans les piézomètres a été obtenue par mise en action des pompes immergées durant plusieurs heures.

La position du toit de la nappe a été suivie pendant la durée des traçages dans chacun des piézomètres des sites SM1 et SM2.

Les courbes de disparition du traceur dans les piézomètre d'injection conduisent au tracé des fonctions d'entrée des sites SM1 et SM2.

Seul la fonction de disparition obtenue dans le piézomètre d'injection PZ6 suffisamment crépiné pourra être exploitée pour déterminer la réponse impulsionnelle du système d'écoulement souterrain compris entre PZ6 et les piézomètres "aval".

Injection des traceurs			Durée	Echantillonnage		
			d'injection		Prélèvement	
Lieu	Nature	Masse			technique	pas de temps
PZ1	Iodure de Sodium (traceur chimique I-Na)	78 kg	le 16/08/93 14 h 45 - 16 h 00 $\Delta t = 75$ mn	PZ1 PZ9 PZ5	pompes immergées Grundfoss + manuel en surface	$\Delta t = 3$ jours

Tableau 10 : Conditions opératoires de l'injection en hautes eaux sur le site SM1.

Injection des traceurs			Durée	Echantillonnage		
			d'injection		Prélèvement	
Lieu	Nature	Masse		Lieu	technique	pas de temps
PZ1	Iodure de Sodium (traceur chimique I-Na)	131 kg	le 17/08/93 11 h 30 - 11 h 50 $\Delta t = 20$ mn	PZ6 PZ8 PZ2 La Ferme	pompes immergées Grundfoss + manuel en surface Préleveur automatique ISCO Préleveur manuel Préleveur automatique ISCO	$\Delta t = 3$ jours $\Delta t = 12$ h $\Delta t = 3$ jours $\Delta t = 12$ h

Tableau 11 : Conditions opératoires de l'injection en hautes eaux sur le site SM2.

6.2. Conditions hydrauliques au cours de la campagne de traçages

Les relevés piézométriques (figure 17) effectués durant la campagne d'essais montrent sur chacun des sites des variations des gradients hydrauliques.

Sur le site SM1, une montée significative de la nappe est observée en PZ1 durant une durée d'au moins 30 jours et conduisant ainsi à un transfert d'eau plus rapide en particulier entre les piézomètres PZ1 et PZ9.

Sur le site SM2, on observe une montée plus élevée de la nappe en PZ2. Cela conduit à une diminution du gradient hydraulique d'environ 15 % qui implique à un léger ralentissement de l'écoulement du traceur entre les piézomètres PZ6-PZ2 après 30 jours d'essai.

Ces mouvements de nappe sont en particulier corrélables avec les précipitations orageuses locales qui conduisent notamment à des remontées de nappe et des apports collinaires.

Les figures 18 à 21 montrent l'évolution du toit de la nappe et mettent nettement en évidence la remontée du toit de la nappe dans le piézomètre PZ1 qui provoque ainsi une accélération des transferts souterrains entre les piézomètres PZ1-PZ9 et PZ1-PZ5.

6.3. Courbes des restitution en traceur, Distribution des Temps de Séjour

Les courbes expérimentales de restitution du traçage I^- de I-Na sont présentées après déduction du bruit de fond pour chacun des piézomètres PZ9-PZ5 et PZ8-PZ2-Puits La Ferme, sur les figures 22 à 24 et 25 à 28.

Les valeurs de concentrations d'Iode obtenues conduisent aux remarques suivantes :

Remarque 1 :

Sur le site SM2, la fonction de disparition de traceur dans le piézomètre d'injection ou fonction d'entrée dans le système d'écoulement PZ6-PZ8 et PZ6-PZ2 est représentée sur la figure 25.

L'assimilation du piézomètre PZ6 à un mélangeur parfaitement mélangé de volume V et l'exploitation de la courbe de disparition de traceur du piézomètre PZ6 permettent d'accéder au débit de filtration Q_I .

La fonction de disparition du traceur dans le piézomètre PZ6 sera aisément caractérisable par une fonction exponentielle. Le débit spécifique de filtration Q_I pour le volume mouillé V du piézomètre sera déterminé à l'aide d'un tracé semi-logarithmique.

Remarque 2 :

PZ8 : La courbe de restitution obtenue en PZ8 à une distance de 85 m est caractérisée par un rapport signal / sur bruit de fond évalué en moyenne à 10. Par ailleurs, la courbe obtenue paraît mettre en évidence la contribution de plusieurs strates de sous-sol qualifiées de perméabilités variables : figure 26.

PZ2 : A une distance de 285 m, la courbe de restitution obtenue est caractérisée par un faible rapport signal / sur bruit de fond évalué en moyenne à 1,5. Notons un très faible temps d'arrivée du traceur qui va conduire à des fortes vitesses de transfert : figure 27.

Puits La Ferme : La courbe de passage du traceur Iode I⁻ dans le puits "La Ferme" à une distance de 820 m est caractérisée par des valeurs élevées de concentration en traceur malgré l'atténuation attendue de concentration causée par la dispersion longitudinale sur une distance aussi importante : figure 28.

6.4. Interprétations des résultats6.4.1. Interprétation des tracages

- a) L'exploitation analytique des courbes expérimentales est réalisée par leur décomposition à l'aide de modèles hydrodispersifs à deux paramètres : convection pour \bar{U}_{xj} et dispersion pour D_{xj} .
- b) La solution injectée d'Iodure de Sodium (I⁻) en PZ6 avait initialement une concentration $C_0 = 5,8 \cdot 10^{-6}$ ppb soit $5,8 \cdot 10^{-3}$ kg.l. Les concentrations maximale et moyenne observées en chacun des piézomètres PZ8, PZ2 et puits La Ferme permettent d'évaluer les rapports de dilution-dispersion :

- piézomètre PZ8

$$C_{\max} = 118 \text{ ppb} \quad \bar{C}_{\text{moyen}} = 12 \text{ ppb}$$

Rapports de dilution

$$\lambda = C_{\max} / C_0 = 118 / 5,8 \cdot 10^6 = 2 \cdot 10^{-5}$$

$$\bar{\lambda} = \bar{C}_{\text{moyen}} / C_0 = 12 / 5,8 \cdot 10^6 = 2 \cdot 10^{-6}$$

- piézomètre PZ2

$$C_{\max} = 27 \text{ ppb} \quad \bar{C}_{\text{moyen}} = 12 \text{ ppb}$$

Rapports de dilution

$$\lambda = C_{\max} / C_0 = 27 / 5,8 \cdot 10^6 = 5 \cdot 10^{-6}$$

$$\bar{\lambda} = \bar{C}_{\text{moyen}} / C_0 = 12 / 5,8 \cdot 10^6 = 2 \cdot 10^{-6}$$

- puits La Ferme

$$C_{\max} = 60 \text{ ppb} \quad \bar{C}_{\text{moyen}} = 6 \text{ ppb}$$

Rapports de dilution

$$\lambda = C_{\max} / C_0 = 60 / 5,8.10^6 = 5.10^{-5}$$

$$\bar{\lambda} = \bar{C}_{\text{moyen}} / C_0 = 6 / 5,8.10^6 = 1.10^{-6}$$

c) La courbe de disparition d'Iode dans le piézomètre PZ1 (site SM1) ne sera pas exploitée du fait d'une trop faible circulation des eaux de la nappe à l'intérieur et d'un renouvellement quasi nulle des eaux tracées à l'I-Na.

Dans une première phase, les résultats bruts de traçage sont présentés sur les figures 22 à 28.

d) L'exploitation analytique des courbes expérimentales est réalisée par une décomposition à l'aide de modèles hydrodispersifs à deux paramètres \bar{U}_{xy} et D_{xy} . Cette interprétation est effectuée au paragraphe 6.4.2.

e) Les paramètres temporels qui caractérisent chacun des transferts bruts de traceur au cours de la campagne n° 2 sont les suivants :

Références	PZ9	PZ5	PZ8	PZ2	La Ferme
Distance / injection	$d_{19} = 65\text{m}$	$d_{15} = 230 \text{ m}$	$d_{68} = 85 \text{ m}$	$d_{62} = 285 \text{ m}$	$d_{6F} = 820 \text{ m}$
Temps d'arrivée ; jour	3	6	2	4	
Temps de la concentration maximale : jour	6	16	39	52	
Temps de fin de passage : jour	72	72	68	72	

Tableau 12 : Caractéristiques temporelles des D.T.S. brutes des sites SM1 et SM2.

f) Les rapports de dilution observés entre la solution injectée à la concentration C_0 et la concentration maximale des piézomètres "aval" sont évalués à :

Références	PZ9	PZ5	PZ8	PZ2	La Ferme
Distance / injection	$d_{19} = 65\text{m}$	$d_{15} = 230 \text{ m}$	$d_{68} = 85 \text{ m}$	$d_{62} = 285 \text{ m}$	$d_{6F} = 820 \text{ m}$
Rapport de dilution : C_0/C_M	$1,1.10^6$	458 000	308 000	$1,3.10^6$	

$$C_0 = 22,0.10^{-3} \text{ kg/l}$$

$$C_0 = 37,0.10^{-3} \text{ kg/l}$$

Tableau 13 : Rapports de dilution minimale (C_0/C_{maxi}) observés sur les sites SM1 et SM2.

6.4.2. Représentation analytique des D.T.S.

Chaque D.T.S. expérimentale sera représentée par la somme de D.T.S. théoriques pondérées du type :

$$DTS_A^B \text{ expérimentale} = \sum_{i=1}^j \frac{m_j \cdot \bar{U}_{xj}}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot D_{xj} \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{(d_{AB} - \bar{U}_{xj} \cdot t)^2}{4 \cdot D_{xj} \cdot t}\right)$$

\bar{U}_{xj} : vitesse moyenne unidirectionnelle de la D.T.S. j théorique suivant l'axe A --> B,

D_{xj} : coefficient de dispersion longitudinale de la DTS j théorique suivant l'axe A --> B.

Ainsi le transfert de masse du traceur qui caractérisera l'écoulement du piézomètre d'injection vers celui de détection situé en aval, sera identifié par des couples de paramètres convectif (\bar{U}_j) et dispersif (D_{xj}) de la fonction hydrodispersive de type :

$$h_j(t) = \frac{\bar{U}_{xj}}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot D_{xj} \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{(d_{AB} - \bar{U}_{xj} \cdot t)^2}{4 \cdot D_{xj} \cdot t}\right)$$

avec un facteur multiplicateur de pondération massique m_j . Ainsi on aura :

$$DTS_A^B \text{ expérimentale} = \sum_{j=1}^j m_j \cdot h_j(\bar{U}_{xj}, D_{xj}, t)$$

a) Système PZ1-PZ9-PZ5

La représentation analytique des D.T.S. expérimentales PZ1-PZ9 et PZ1-PZ5 est décrite par les coefficients des tableaux 14 et 15 et des figures 29 et 30.

Les valeurs numériques obtenues montrent l'hétérogénéité du milieu souterrain qui influence les vitesses d'écoulement et les effets dispersifs pour un même gradient hydraulique.

PZ1-PZ9 : les transferts sont principalement représentés par trois types d'écoulement superposés :

- l'écoulement (19.1) avec $m_j = m_1 = 37,9 \%$ mo

$$\bar{U}_x = 9,5 \text{ m/j} \quad \text{et} \quad D_x = 150 \text{ m}^2/\text{j}$$

- les écoulements (19.2-19.3) avec $m_j = m_2 + m_3 = 3,9 \%$ mo

$$3,0 \leq \bar{U}_x \leq 3,6 \text{ m/j} \quad \text{et} \quad 0,7 \leq D_x \leq 4,0 \text{ m}^2/\text{j}$$

- les écoulements (19.4-19.5) avec $m_j = m_4 + m_5 = 58,2 \%$ mo

$$1,2 \leq \bar{U}_x \leq 1,9 \text{ m/j} \quad \text{et} \quad 0,3 \leq D_x \leq 0,6 \text{ m}^2/\text{j}$$

Système PZ1 - PZ9 ; distance $d_{19} = 65$ m			
$DTS_{19} = m_{19}(t) = \sum_{i=1}^5 \frac{m_i \cdot \bar{U}_{xi}}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot D_{xi} \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{(d_{19} - \bar{U}_{xi} \cdot t)^2}{4 \cdot D_{xi} \cdot t}\right)$			
$DTS_{19,j}$	$\bar{U}_{xi} : \text{m/j}$	$D_{xj} : \text{m}^2/\text{j}$	$(\text{mj}/m_{19}) \%$
DTS _{19.1}	9,5	150	37,9
DTS _{19.2}	3,6	0,7	2,6
DTS _{19.3}	3,0	4,0	1,3
DTS _{19.4}	1,9	0,3	5,2
DTS _{19.5}	1,2	0,6	53,0

Tableau 14

Système PZ1 - PZ5 ; distance $d_{15} = 230$ m			
$DTS_{15} = m_{15}(t) = \sum_{i=1}^6 \frac{m_i \cdot \bar{U}_{xi}}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot D_{xi} \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{(d_{15} - \bar{U}_{xi} \cdot t)^2}{4 \cdot D_{xi} \cdot t}\right)$			
$DTS_{15,j}$	$\bar{U}_{xi} : \text{m/j}$	$D_{xj} : \text{m}^2/\text{j}$	$(\text{mj}/m_{15}) \%$
DTS _{15.1}	19,7	150	16,3
DTS _{15.2}	13,9	29	14,1
DTS _{15.3}	10,1	7,8	5,3
DTS _{15.4}	7,4	50	41,4
DTS _{15.5}	5,2	4	15,0
DTS _{15.6}	4,3	4,1	7,9

Tableau 15

Système PZ6 - PZ8 ; distance $d_{68} = 285$ m			
$DTS_{68} = m_{68}(t) = \sum_{i=1}^8 \frac{m_i \cdot \bar{U}_{xi}}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot D_{xi} \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{(d_{68} - \bar{U}_{xi} \cdot t)^2}{4 \cdot D_{xi} \cdot t}\right)$			
$DTS_{68,j}$	$\bar{U}_{xi} : \text{m/j}$	$D_{xj} : \text{m}^2/\text{j}$	$(\text{mj}/m_{68}) \%$
DTS _{68.1}	37,3	10,2	1,4
DTS _{68.2}	17,5	4,7	3,3
DTS _{68.3}	3,9	0,1	7,1
DTS _{68.4}	2,9	0,03	13,0
DTS _{68.5}	2,1	0,02	27,5
DTS _{68.6}	1,8	0,03	22,2
DTS _{68.7}	1,6	0,03	17,6
DTS _{68.8}	1,5	0,05	7,9

Tableau 16

Système PZ6 - PZ2 ; distance $d_{62} = 285$ m			
$DTS_{62} = m_{62}(t) = \sum_{i=1}^6 \frac{m_i \cdot \bar{U}_{xi}}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot D_{xi} \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{(d_{62} - \bar{U}_{xi} \cdot t)^2}{4 \cdot D_{xi} \cdot t}\right)$			
$DTS_{62,j}$	$\bar{U}_{xj} : \text{m/j}$	$D_{xj} : \text{m}^2/\text{j}$	$(\text{mj}/m_{62}) \%$
DTS _{62.1}	41,5	150	8,6
DTS _{62.2}	18,0	42	6,3
DTS _{62.3}	12,8	3,6	4,0
DTS _{62.4}	8,8	8,9	31,7
DTS _{62.5}	6,6	2,6	12,5
DTS _{62.6}	5,2	2,6	36,9

Tableau 17

Système PZ6 - puits La Ferme ; distance $d_{6p.F} = 820$ m			
$DTS_{6p.F} = m_{6p.F}(t) = \bar{U}_x$			
$DTS_{6p.F}$	$\bar{U}_{xj} : \text{m/j}$	$D_{xj} : \text{m}^2/\text{j}$	$(\text{mj}/m_{62}) \%$
DTS _{6p.F.1}	72,5	147,9	9,6
DTS _{6p.F.2}	61,0	17,7	20,8
DTS _{6p.F.3}	45,6	150,0	28,2
DTS _{6p.F.4}	24,2	51,7	19,9
DTS _{6p.F.5}	15,1	6,0	11,8
DTS _{6p.F.6}	15,0	0,08	3,1
DTS _{6p.F.7}	13,0	0,4	6,6

Tableau 18

Tableaux 14 à 18 : Représentations analytiques des Distributions des Temps de Séjour entre les piézomètres d'observation des système SM1 (PZ1-PZ9-PZ5) et SM2 (PZ6-PZ8-PZ2-puits La Ferme).

- PZ1-PZ5 : les principaux transferts souterrains sont représentés par trois types d'écoulement superposés :
 - l'écoulement (15.1) avec $m_j = m_1 = 16,3 \%$ mo
 $\bar{U}_x = 19,7 \text{ m/j}$ et $D_x = 150 \text{ m}^2/\text{j}$
 - les écoulements (15.2-15.3) avec $m_j = m_2 + m_3 = 19,4 \%$ mo
 $10,1 \leq \bar{U}_x \leq 13,9 \text{ m/j}$ et $7,8 \leq D_x \leq 29 \text{ m}^2/\text{j}$
 - les écoulements (15.4-15.5-15.6) avec $m_j = m_4 + m_5 + m_6 = 64,3 \%$ mo
 $4,3 \leq \bar{U}_x \leq 7,4 \text{ m/j}$ et $4 \leq D_x \leq 50 \text{ m}^2/\text{j}$

b) Système PZ6-PZ8-PZ2-puits La Ferme

La représentation analytique des D.T.S. expérimentales PZ6-PZ8, PZ6-PZ2 et PZ6-puits La ferme est décrite par les coefficients des tableaux 16 à 18 et des figures 31 à 33.

- PZ6-PZ8 : les transferts observés "in situ" peuvent être principalement représentés par trois types d'écoulement superposés :
 - l'écoulement (68.1) avec $m_j = m_1 = 1,4 \% \text{ mo}$
 $\bar{U}_x = 37,3 \text{ m/j}$ et $D_x = 10,2 \text{ m}^2/\text{j}$
 - l'écoulement (38.2) avec $m_j = m_2 = 3,3 \% \text{ mo}$
 $\bar{U}_x = 17,5 \text{ m/j}$ et $D_x = 4,7 \text{ m}^2/\text{j}$
 - les écoulements (68.3-68.4-68.5-68.6-68.7-68.8) avec $m_j = m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7 + m_8 = 95,3 \% \text{ mo}$
 $1,5 \leq \bar{U}_x \leq 3,9 \text{ m/j}$ et $0,02 \leq D_x \leq 0,1 \text{ m}^2/\text{j}$

- PZ6-PZ2 : les transferts souterrains observés "in situ" sont principalement représentés par trois types d'écoulement superposés :
 - l'écoulement (62.1) avec $m_j = m_1 = 8,6 \% \text{ mo}$
 $\bar{U}_x = 41,5 \text{ m/j}$ et $D_x = 150 \text{ m}^2/\text{j}$
 - les écoulements (62.2-62.3) avec $m_j = m_2 + m_3 = 10,3 \% \text{ mo}$
 $12,8 \leq \bar{U}_x \leq 18 \text{ m/j}$ et $3,6 \leq D_x \leq 42 \text{ m}^2/\text{j}$
 - les écoulements (62.4-62.5-62.6) avec $m_j = m_4 + m_5 + m_6 = 81,1 \% \text{ mo}$
 $5,2 \leq \bar{U}_x \leq 8,8 \text{ m/j}$ et $2,6 \leq D_x \leq 8,9 \text{ m}^2/\text{j}$

- PZ6-puits La Ferme : les transferts observés peuvent être représentés à l'aide des trois types d'écoulements principaux superposés :
 - les écoulements (6pF.1-6pF.2) avec $m_j = m_1 + m_2 = 30,4 \% \text{ mo}$
 $61 \leq \bar{U}_x \leq 72,5 \text{ m/j}$ et $17,7 \leq D_x \leq 147,9 \text{ m}^2/\text{j}$
 - les écoulements (6pF.3-6pF.4) avec $m_j = m_3 + m_4 = 48,1 \% \text{ mo}$
 $24,2 \leq \bar{U}_x \leq 45,6 \text{ m/j}$ et $51,7 \leq D_x \leq 150 \text{ m}^2/\text{j}$
 - les écoulements (6pF.5-6pF.6-6pF.7) avec $m_j = m_5 + m_6 + m_7 = ? \% \text{ mo}$
 $13,0 \leq \bar{U}_x \leq 15,1 \text{ m/j}$ et $0,08 \leq D_x \leq 6 \text{ m}^2/\text{j}$

Remarque :

Rappelons que la décomposition des Distributions des Temps de Séjour par des fonctions analytiques de type hydrodispersifs sont un moyen analytique pour les caractériser par un modèle phénoménologique représentatif et des coefficients de convection et de dispersion. Cependant, il convient d'être prudent quant à l'assimilation de chaque courbe de la décomposition analytique comme étant la réponse d'un sol stratifié avec des couches plus ou moins perméables. En effet, pour confirmer cette hypothèse, il conviendrait d'avoir une bonne connaissance de la géologie de chaque couche du sous-sol, de sa continuité sur l'ensemble du système souterrain étudié et de la contribution identifiée et isolée de chacune de ces couches. Bien évidemment, sur un site expérimental, il est rare que les opérateurs disposent de telles

données expérimentales. Néanmoins, une telle représentation analytique des transferts de masse des eaux tracées contribue à une meilleure compréhension des écoulements souterrains de lixiviats simulés quand il y en a.

6.4.3. Interprétation des relevés piézométriques

L'intérêt des mesures piézométriques réalisées sur chaque piézomètre des sites SM1 et SM2 consiste à connaître le ou les mouvements du toit de la nappe durant les traçages pour :

- sur un même site, vérifier si les conditions aux limites restent constantes durant la phase des essais dans chacun des piézomètres,
- vérifier si les gradients hydrauliques inter-piézo mètres évoluent en sens et en intensité des mêmes ordres de grandeur durant les essais. Sur les sites homogènes, la variabilité des gradients permet de voir les périodes d'accélération ou de ralentissement d'écoulement, ainsi que les périodes de stabilisation de l'écoulement.

Les figures 18 à 21 montrent l'évolution du toit de la nappe et font nettement apparaître :

- une accélération du transfert souterrain au cours des essais (figure 18) sur le site SM1 entre les piézomètres PZ1-PZ9 et PZ1-PZ5. Par contre, notons une diminution sensible du gradient entre les piézomètres PZ6-PZ2. La présence des tuyaux de prélèvement des préleveurs automatiques ISCO moyennes profondeurs dans le piézomètre PZ8 n'a pas permis de faire des lectures régulières du toit de la nappe.

Comme durant la première campagne, il s'avère que l'écoulement des eaux souterraines sur le site SM2 (PZ6-PZ8-PZ2) est plus stable que sur le site SM1 (PZ1-PZ9-PZ5-puits La Ferme).

7 - SYNTHESE ET INTERPRETATIONS

7.1. Synthèse des 2 campagnes de traçages

7.1.1. Site SM1 : PZ1-PZ9-PZ5

Les traçages réalisés sur ce site au cours de deux périodes hydrologiques différentes font apparaître une accélération des écoulements en période dite de "hautes eaux", évaluée à environ 50 % des vitesses observées en "basses eaux". Par ailleurs, il est observé :

- l'influence de l'hétérogénéité du sous-sol qui semble caractérisé par des couches débitantes à perméabilités très différentes. Cette remarque est en particulier étayée par l'allure des Distributions des Temps de Séjour,
- une augmentation bien identifiée du gradient hydraulique entre les distances 65 m (PZ1-PZ9) et 230 m (PZ1-PZ5) qui produit en conséquence des vitesses plus forte d'une liaison inter-piézomètres à une autre. Ces écarts de vitesse sont évalués par le rapport $\bar{U} (PZ1-PZ5) / \bar{U} (PZ1-PZ9) \# 4$. Il est à noter par ailleurs une dispersion longitudinale plus importante entre PZ1-PZ5.

La synthèse des valeurs expérimentales exprimées en vitesse longitudinale moyenne réelle et en coefficient de dispersion longitudinale est exprimée dans le tableau 19.

Des simulations analytiques ont conduit aux D.T.S. virtuelles prévisibles aux piézomètres homonymes à ceux existants (c'est-à-dire respectivement disposés aux mêmes distances mais dans les directions des piézomètres existants). Elles permettent de mieux appréhender la localisation de la direction principale d'écoulement. Sur ce site, la direction principale semble être décalée angulairement et au-delà de la direction PZ1-PZ5 (à l'inverse de la direction PZ1-PZ9). Par ailleurs, compte tenu de l'allure des D.T.S. expérimentales et virtuelles il semble plus réaliste de ne pas aller plus en avant dans les interprétations. Néanmoins, la méthode applicable dans des cas moins complexes permet à chaque instant de caler une distribution de type gaussienne sur les profils transversaux de concentration.

Un développement du réseau piézométrique et d'observation de la qualité des eaux souterraines et, en particulier, de détection des eaux de percolation à travers le CET nécessiterait l'implantation latérale de piézomètres parallèlement à la direction PZ1-PZ5, à des distances similaires et dans le sens site SM1 vers SM2.

	Site SM1		Site SM2		
B	PZ1-PZ9 : d=65 m	PZ1-PZ5 : d=230 m	PZ6-PZ8 : d=85 m	PZ6-PZ2 : d=285 m	PZ6-Ferme : d=820 m
A	. écoulement 1	. écoulement 1	. écoulement 1	. écoulement 1	Absence de données
S	$4,5 \leq \bar{U}_x \leq 6,1$ m/j	$13 \leq \bar{U}_x \leq 23$ m/j	$\bar{U}_x = 7,6$ m/j	$15 \leq \bar{U}_x \leq 31$ m/j	
S	$1,1 \leq D_x \leq 4,2$ m ² /j	$15 \leq D_x \leq 100$ m ² /j	$D_x = 9$ m ² /j	$38 \leq D_x \leq 300$ m ² /j	
E	. écoulement 2	. écoulement 2	. écoulement 2	. écoulement 2	Absence de données
S	$1,7 \leq \bar{U}_x \leq 2,5$ m/j	$4,5 \leq \bar{U}_x \leq 8,8$ m/j	$4,5 \leq \bar{U}_x \leq 4,3$ m/j	$4,5 \leq \bar{U}_x \leq 6,7$ m/j	
E	$0,2 \leq D_x \leq 2,7$ m ² /j	$1 \leq D_x \leq 15$ m ² /j	$0,2 \leq D_x \leq 1,1$ m ² /j	$2 \leq D_x \leq 10$ m ² /j	
A	. écoulement 3				Absence de données
U	$1,3 \leq \bar{U}_x \leq 1,4$ m/j				
X	$0,02 \leq D_x \leq 0,08$ m ² /j				
H	. écoulement 1	. écoulement 1	. écoulement 1	. écoulement 1	. écoulement 1
A	$\bar{U}_x = 9,5$ m/j	$\bar{U}_x = 19,5$ m/j	$\bar{U}_x = 37,3$ m/j	$\bar{U}_x = 41,5$ m/j	$61 \leq \bar{U}_x \leq 72,5$ m/j
U	$D_x = 150$ m ² /j	$D_x = 150$ m ² /j	$D_x = 10,2$ m ² /j	$D_x = 150$ m ² /j	$17,7 \leq D_x \leq 147,9$ m ² /j
T	. écoulement 2	. écoulement 2	. écoulement 2	. écoulement 2	. écoulement 2
E	$3,0 \leq \bar{U}_x \leq 3,6$ m/j	$10,1 \leq \bar{U}_x \leq 13,9$ m/j	$\bar{U}_x = 17,5$ m/j	$12,8 \leq \bar{U}_x \leq 18$ m/j	$24,2 \leq \bar{U}_x \leq 45,6$ m/j
S	$0,7 \leq D_x \leq 4,0$ m ² /j	$7,8 \leq D_x \leq 29$ m ² /j	$D_x = 4,7$ m ² /j	$3,6 \leq D_x \leq 42$ m ² /j	$51,7 \leq D_x \leq 150$ m ² /j
E	. écoulement 3	. écoulement 3	. écoulement 3	. écoulement 3	. écoulement 3
A	$1,2 \leq \bar{U}_x \leq 1,9$ m/j	$4,3 \leq \bar{U}_x \leq 7,4$ m/j	$1,5 \leq \bar{U}_x \leq 3,9$ m/j	$5,2 \leq \bar{U}_x \leq 8,8$ m/j	$13,0 \leq \bar{U}_x \leq 15,1$ m/j
U	$0,3 \leq D_x \leq 0,6$ m ² /j	$4 \leq D_x \leq 50$ m ² /j	$0,02 \leq D_x \leq 0,1$ m ² /j	$2,6 \leq D_x \leq 8,9$ m ² /j	$0,08 \leq D_x \leq 6$ m ² /j
X					

Tableau 19 : Synthèse des résultats obtenus par décomposition analytique des D.T.S. expérimentales.

7.1.2. Site SM2 : PZ6-PZ8-PZ2

Le sous-sol de ce site piézométrique a été étudié à partir des traçages réalisés en basses et hautes eaux. Ces traçages ont montré :

- l'hétérogénéité du sous-sol est mise en évidence en particulier par l'allure des D.T.S. expérimentales qui sont concrétisées par la présence bien identifiée de plusieurs maxima de concentrations,
- il n'est pas noté de variations fortes du gradient hydraulique entre les deux campagnes de traçages (basses et hautes eaux) sur la liaison inter-piézomètres PZ6-PZ2. Notons en basses eaux une chute du gradient hydraulique au-delà du piézomètre PZ8 (distance 65 m de PZ1) passant de 6.10^{-2} à 2.10^{-2} respectivement entre PZ6-PZ8 et PZ6-PZ2. Cette donnée qui devrait conduire à des transferts plus lents "in situ" n'est pas observée par le traçage, ce qui nous conduit à penser qu'une couche plus débitante (perméabilité plus forte) est traversée par les eaux marquées.

Par ailleurs, observons (tableau 19) en période de hautes eaux que les transferts et donc les vitesses observées sont du même ordre de grandeur entre PZ6-PZ8 et PZ6-PZ2, à l'exception cependant des valeurs des coefficients de dispersion longitudinale qui sont plus fortes.

- des simulations analytiques réalisées dans le cadre de l'étude ont conduit aux D.T.S. virtuelles PZ6-Z2V et PZ6-PZ8V associées aux D.T.S. expérimentales. Elles permettent de penser que la direction principale d'écoulement se trouve décalée angulairement au-delà de la direction PZ6-PZ8 et à l'inverse de la direction PZ6-PZ2.

Un développement du réseau piézométrique et d'observation de la qualité des eaux souterraines et en particulier de détection des eaux de percolation à travers le CET nécessiterait l'implantation latérale de piézomètres parallèlement à la direction PZ6-PZ8, à des distances similaires et à plus grandes profondeurs pour observer en particulier un volume mouillé plus important dans chaque piézomètre. Le sens d'implantation pourrait être orienté de SM2 à SM1.

8 - CONCLUSION

Les campagnes de traçages réalisées en basses et hautes eaux ont permis d'améliorer nettement la connaissance des écoulements réels entre les piézomètres implantés actuellement à ce jour dans les zones d'extrémités du CET "X".

Elles ont montré en particulier l'intérêt des méthodes de traçage pour :

- valider un réseau piézométrique d'observation de la qualité des eaux souterraines pendant un cycle hydrogéologique au cours duquel un battement angulaire de la direction principale de la nappe phréatique et une variation des paramètres d'écoulement (U_x , D_x) peuvent être observés,
- apprécier les paramètres de transfert et les rapports de dilution prévisibles d'une substance non interactive avec le milieu qui peuvent servir par ailleurs au calage de modèles mathématiques prévisionnels de transferts de substances (eau, polluant) dans un milieu poreux.

Au cours des campagnes de traçages effectués en basses et en hautes eaux, les résultats expérimentaux obtenus sont :

- Site SM1 : PZ1-PZ9-PZ5

SITE SM1 : PZ1-PZ9-PZ5			
Nappe en basses eaux		Nappe en hautes eaux	
PZ1-PZ9 d = 65 m	PZ1-PZ5 d = 230 m	PZ1-PZ9 d = 65 m	PZ1-PZ5 d = 230 m
$1,3 \leq \bar{U}_x \leq 6,1 \text{ m/j}$	$1 \leq \bar{U}_x \leq 23 \text{ m/j}$	$1,2 \leq \bar{U}_x \leq 9,5 \text{ m/j}$	$4,3 \leq \bar{U}_x \leq 19,5 \text{ m/j}$
$0,02 \leq D_x \leq 4,2 \text{ m}^2/\text{j}$	$1 \leq D_x \leq 100 \text{ m}^2/\text{j}$	$0,3 \leq D_x \leq 4,0 \text{ m}^2/\text{j}$	$4,0 \leq D_x \leq 150 \text{ m}^2/\text{j}$

Les piézomètres PZ1, PZ9, PZ5 sont bien validés par traçages. Après traçages en PZ1, il apparaît en effet que ces piézomètres interceptent les éventuelles eaux de percolation du CET qui proviennent en particulier de la zone située en coin d'angle. Par ailleurs, compte tenu de la dimension latérale du CET, il conviendrait pour une meilleure surveillance du site d'implanter quelques piézomètres supplémentaires à une distance équivalente du CET d'au moins de 65 mètres et suivant un axe transversal parallèle au bord N.W.-S.E. du CET.

- Site SM2 : PZ6-PZ8-PZ2-puits La Ferme

SITE SM2 : PZ6-PZ8-PZ2			
Nappe en basses eaux		Nappe en hautes eaux	
PZ6-PZ8 d = 85 m	PZ6-PZ2 d = 285 m	PZ6-PZ8 d = 85 m	PZ6-PZ2 d = 285 m
$1,8 \leq \bar{U}_x \leq 7,6 \text{ m/j}$ $0,2 \leq D_x \leq 9 \text{ m}^2/\text{j}$	$6,5 \leq \bar{U}_x \leq 31 \text{ m/j}$ $2 \leq D_x \leq 300 \text{ m}^2/\text{j}$	$1,2 \leq \bar{U}_x \leq 9,5 \text{ m/j}$ $0,3 \leq D_x \leq 150 \text{ m}^2/\text{j}$	$1,5 \leq \bar{U}_x \leq 37,3 \text{ m/j}$ $0,02 \leq D_x \leq 10,2 \text{ m}^2/\text{j}$

PZ6-puits La Ferme d = 820 m	PZ6-puits La Ferme d = 820 m
Absence de données ; les préleveurs n'étaient pas encore installés	$13,0 \leq \bar{U}_x \leq 72,5 \text{ m/j}$ $0,08 \leq D_x \leq 150 \text{ m}^2/\text{j}$

Les piézomètres PZ6, PZ8, PZ2 et puits La Ferme sont bien validés par traçages. Ils ressort des traçages en PZ6 que chacun des points PZ8, PZ2 et puits La Ferme interceptent les éventuelles eaux de percolation du CET qui seraient issues du coin d'angle du CET localisé au S.E. du stockage.

En conclusion, pour un meilleur suivi des percolats du CET "X" transitant dans la nappe, il conviendrait de réaliser les opérations suivantes [5] :

- nouvelles implantations de piézomètres (FUTUR j) figure 34 parallèlement au bord N.W. --> S.E. du CET qui s'étale sur environ 1000 mètres sans contrôle, à l'exception du puits La Ferme éloigné,
- respect de la procédure d'échantillonnage des eaux souterraines appliquée durant nos essais en particulier lors des prélèvements effectués pour les contrôles d'analyse physico-chimique et biologique.

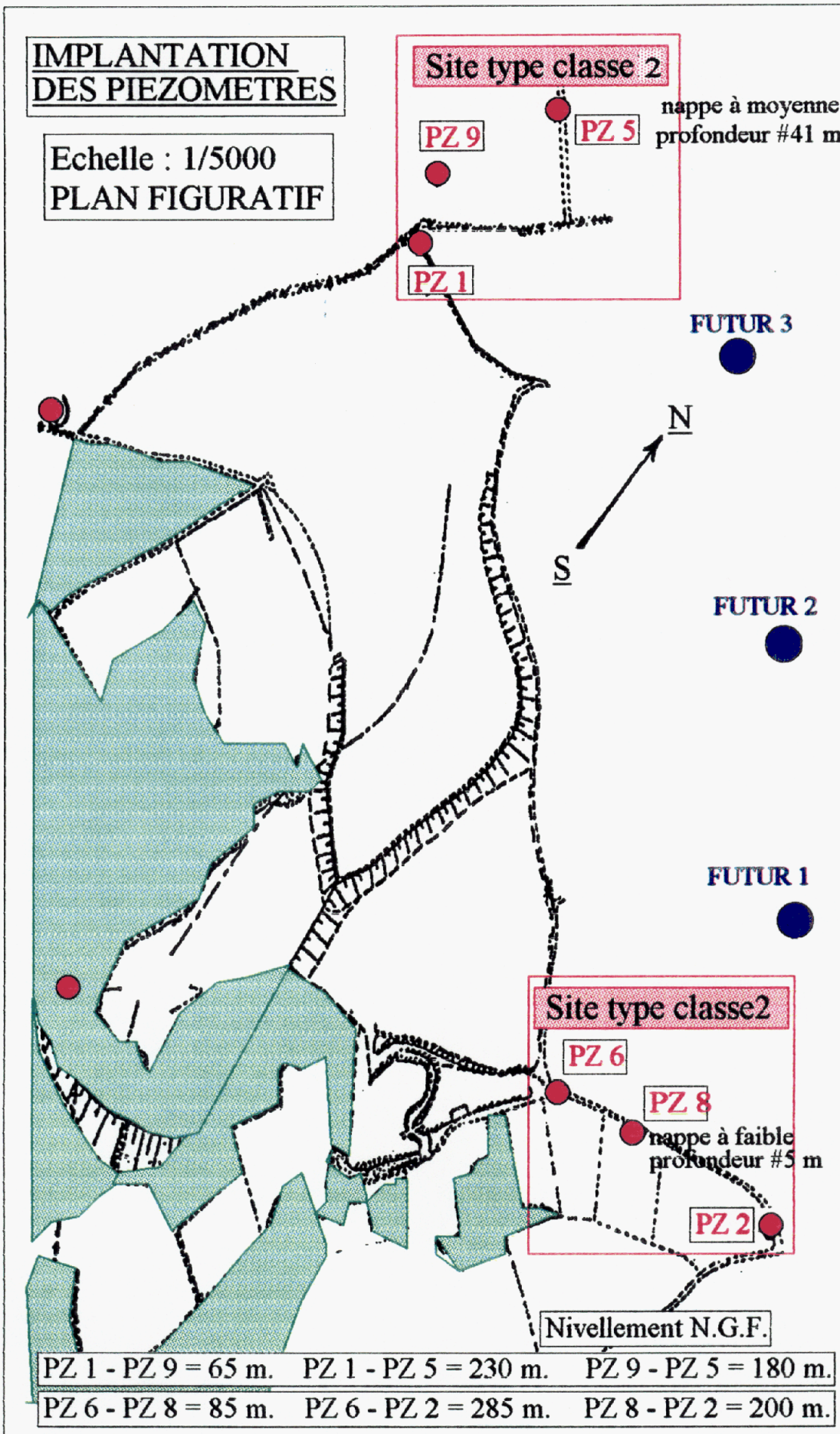


Figure 34 : Prospective d'implantations futures de piézomètres d'observation de la qualité des eaux souterraines

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. BEAUDOING, P. MOUYON, T. CHARENTUS, M. LAUNAY
Etude méthodologique sur la fiabilité du réseau piézométrique de contrôle d'une décharge"
Rapport DTA/DAMRI/SAR/SAT/93.03 : février 1993,
Rapport DTA/DAMRI/SAR/SAT/93.20 : juillet 1993,
Rapport DTA/DAMRI/SAR/SAT/94.03 : février 1994.
- [2] Groupe Applications des Traceurs à l'Hydrologie.
"Notice technologique : méthodologie générale des traceurs".
- [3] B. GAILLARD
"Méthode de traceurs pour la détermination des paramètres de transfert de substances en solution dans l'eau des aquifères"
Thèse à l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble : 06/1976.
- [4] G. BEAUDOING, P. MOUYON, T. CROZE, T. CHARENTUS, R. MARGRITA
"Transfert d'un lixiviat naturel de déchets industriels à travers une barrière géologique naturelle : nécessité d'un confinement ouvrages"
Géoconfine 93 : Montpellier - France
- [5] Ministère de l'Environnement
"Arrêté : relatif au stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés",
arrêté du 18/12/1992.
- [6] J. GUIZERIX, R. MARGRITA, B. GAILLARD, P. CALMELS, P. COROMPT,
G. BEAUDOING
"Développements récents des méthodes de traceurs pour la protection de l'environnement"
Conférence Internationale sur les Applications Industrielles de la Technologie des Radioisotopes et des Rayonnements. Grenoble 2-10-1981 ; IAEA-CN-40.
-

FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique des sites SM1 et SM2.

CARACTERISATION DES RESEAUX PIEZOMETRIQUES

Figure 2 : Etude de fiabilité du réseau piézométrique d'observation de la qualité des eaux souterraines en aval du C.E.T.

Figure 3 : Coupe géologique du site SM1.

Figure 4 : Etude de fiabilité du réseau piézométrique d'observation de la qualité des eaux souterraines en aval du C.E.T.

Figure 5 : Coupe géologique du site SM2.

CAMPAGNE N° 1 DE TRACAGES EN BASSES EAUX

Figure 6 : Piézométrie du site SM1 : PZ1-PZ9-PZ5.

Figure 7 : Evolution des gradients hydrauliques du site SM1.

Figure 8 : Piézométrie du site SM2 : PZ6-PZ8-PZ2.

Figure 9 : Evolution des gradients hydrauliques du site SM2.

Figure 10 : Evolution des précipitations atmosphériques observées durant les campagnes de traçages : campagne de basses eaux.

Figure 11 : Distributions des Temps de Séjour inter-piézomètre sur le site expérimental SM1 sans bruit de fond : PZ1-PZ9 et PZ1-PZ5.

Figure 12 : Distributions des Temps de Séjour inter-piézomètre sur le site expérimental SM2 sans bruit de fond : PZ6-PZ8 et PZ6-PZ2.

Figure 13 : Décomposition analytique et optimisation de la D.T.S. expérimentale du site SM1 : PZ9.

Figure 14 : Décomposition analytique et optimisation de la D.T.S. expérimentale du site SM1 : PZ5.

Figure 15 : Décomposition analytique et optimisation de la D.T.S. expérimentale du site SM2 : PZ8.

Figure 16 : Décomposition analytique et optimisation de la D.T.S. expérimentale du site SM2 : PZ2.

CAMPAGNE N° 2 DE TRACAGES EN HAUTES EAUX

Figure 17 : Evolution des précipitations atmosphériques et piézométriques observées durant les campagnes de traçages : campagne de hautes eaux.

Figure 18 : Evolution du toit de la nappe du site 1 après l'injection du 16/08/93.

Figure 19 : Evolution du gradient de la nappe du site 1 après l'injection du 16/8/93.

Figure 20 : Evolution du toit de la nappe du site 2 après l'injection du 17/08/93.

Figure 21 : Evolution du gradient de la nappe du site 2 après l'injection du 17/08/93.

Figure 22 : Evolution de la concentration en traceur dans le forage d'injection PZ1.

Figure 23 : Restitution en PZ9 de l'Iode injectée en PZ1, sans bruit de fond.

Figure 24 : Restitution en PZ5 de l'Iode injectée en PZ1, sans bruit de fond.

Figure 25 : Evolution de la concentration en traceur dans le forage d'injection PZ6.

Figure 26 : Restitution en PZ8 de l'Iode injectée en PZ6, sans bruit de fond.

Figure 27 : Restitution en PZ2 de l'Iode injectée en PZ6, sans bruit de fond.

Figure 28 : Restitution au puits de La Ferme de l'Iode injectée en PZ6.

Figure 29 : Représentation analytique de la D.T.S. en PZ9 du système PZ1-PZ9.

Figure 30 : Représentation analytique de la D.T.S. en PZ5 du système PZ1-PZ5.

Figure 31 : Représentation analytique de la D.T.S. en PZ8 du système PZ6-PZ8.

Figure 32 : Représentation analytique de la D.T.S. en PZ2 du système PZ6-PZ2.

Figure 33 : Représentation analytique de la D.T.S. au puits La Ferme du système PZ6-puits La Ferme.

Figure 34 : Prospective d'implantations futures de piézomètres d'observation de la qualité des eaux souterraines.

**SITUATION ET CONTEXTE
GEOMORPHOLOGIQUE DU SITE**

IMPLANTATION DES PIEZOMETRES

Echelle : 1/5000
PLAN FIGURATIF

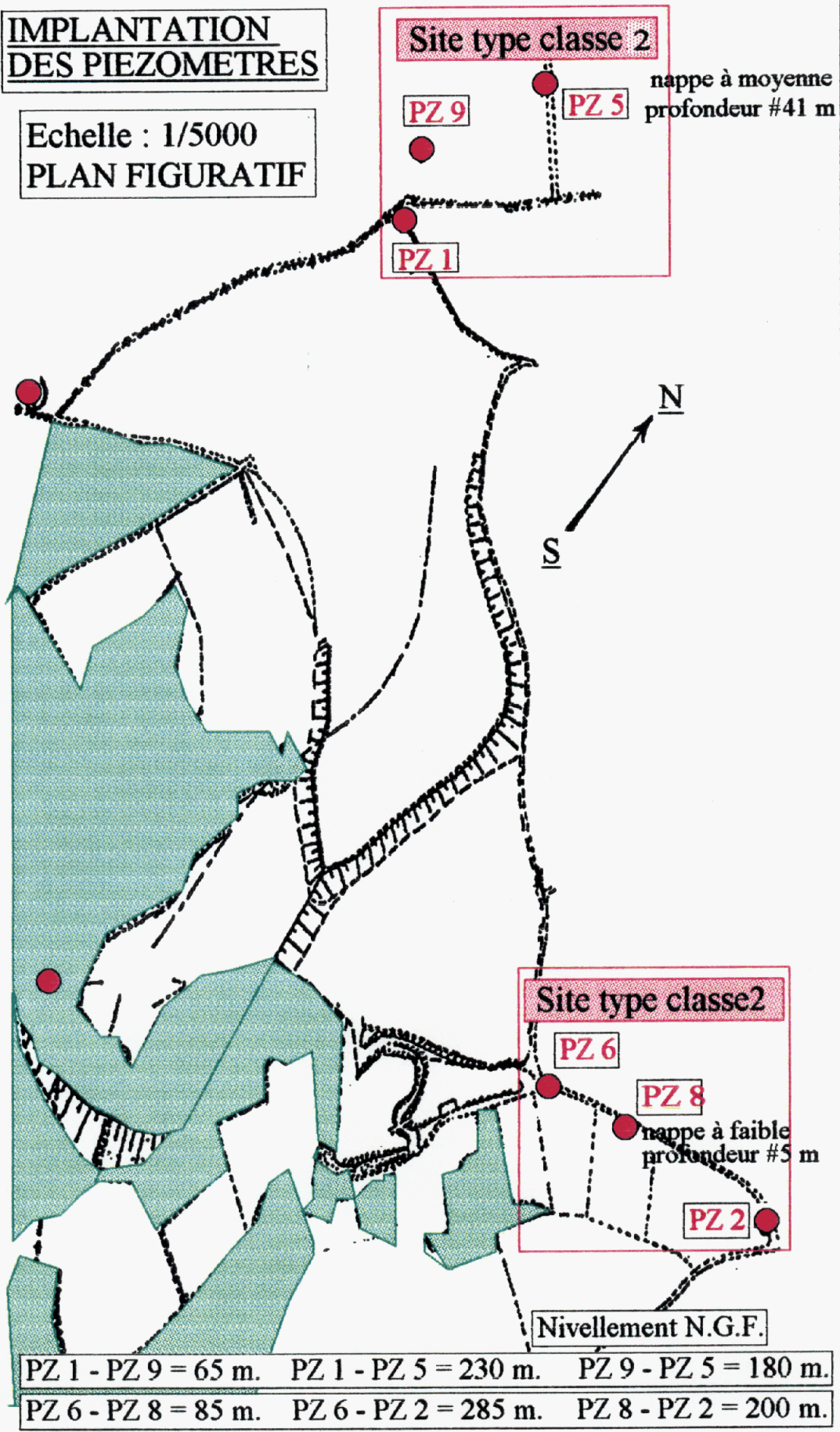


Figure 1 : Situation géographique des sites SM1 et SM2

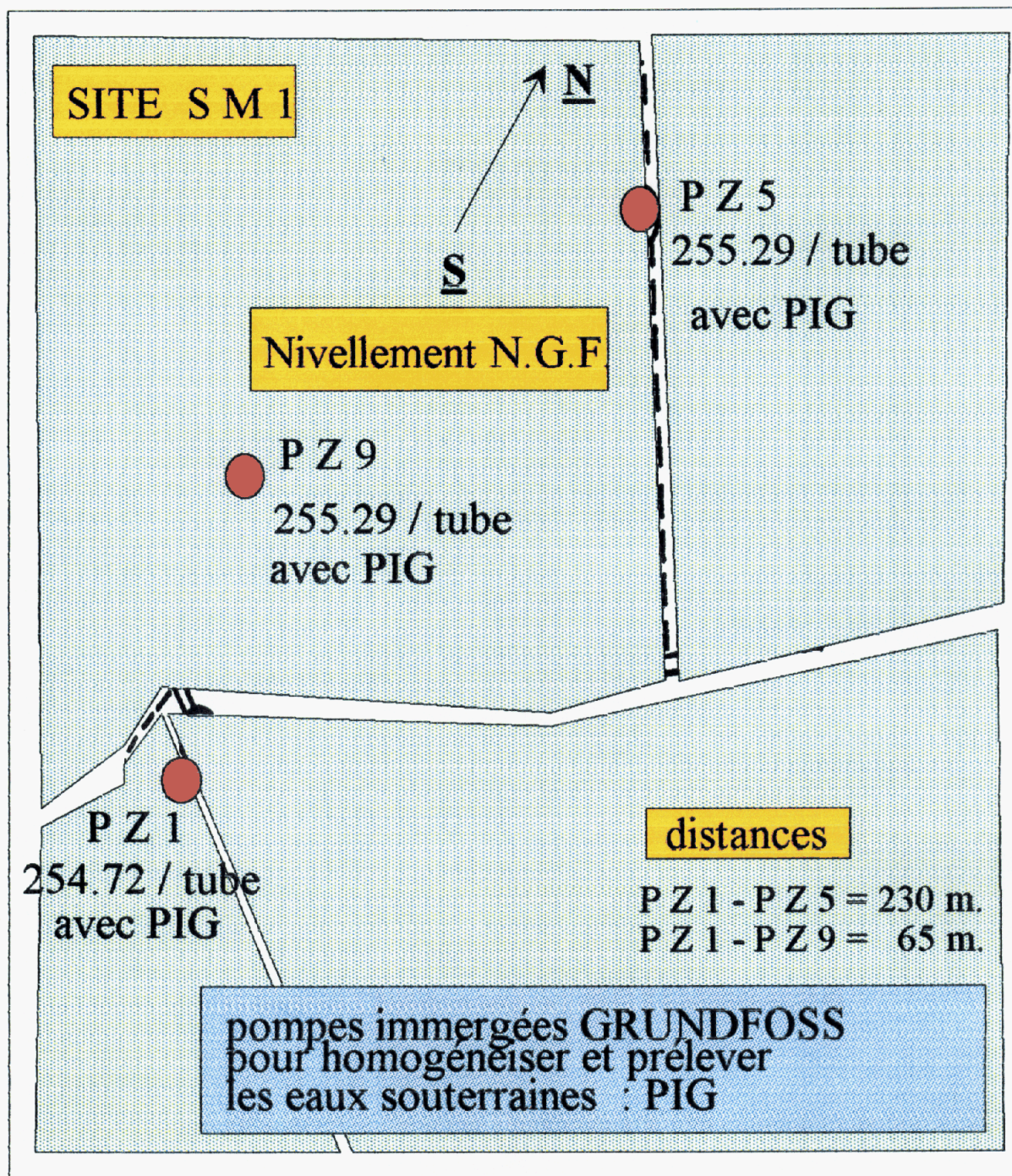


Figure 2 Etude de fiabilité du réseau piézométrique d'observation de la qualité des eaux souterraines en aval du C.E.T..

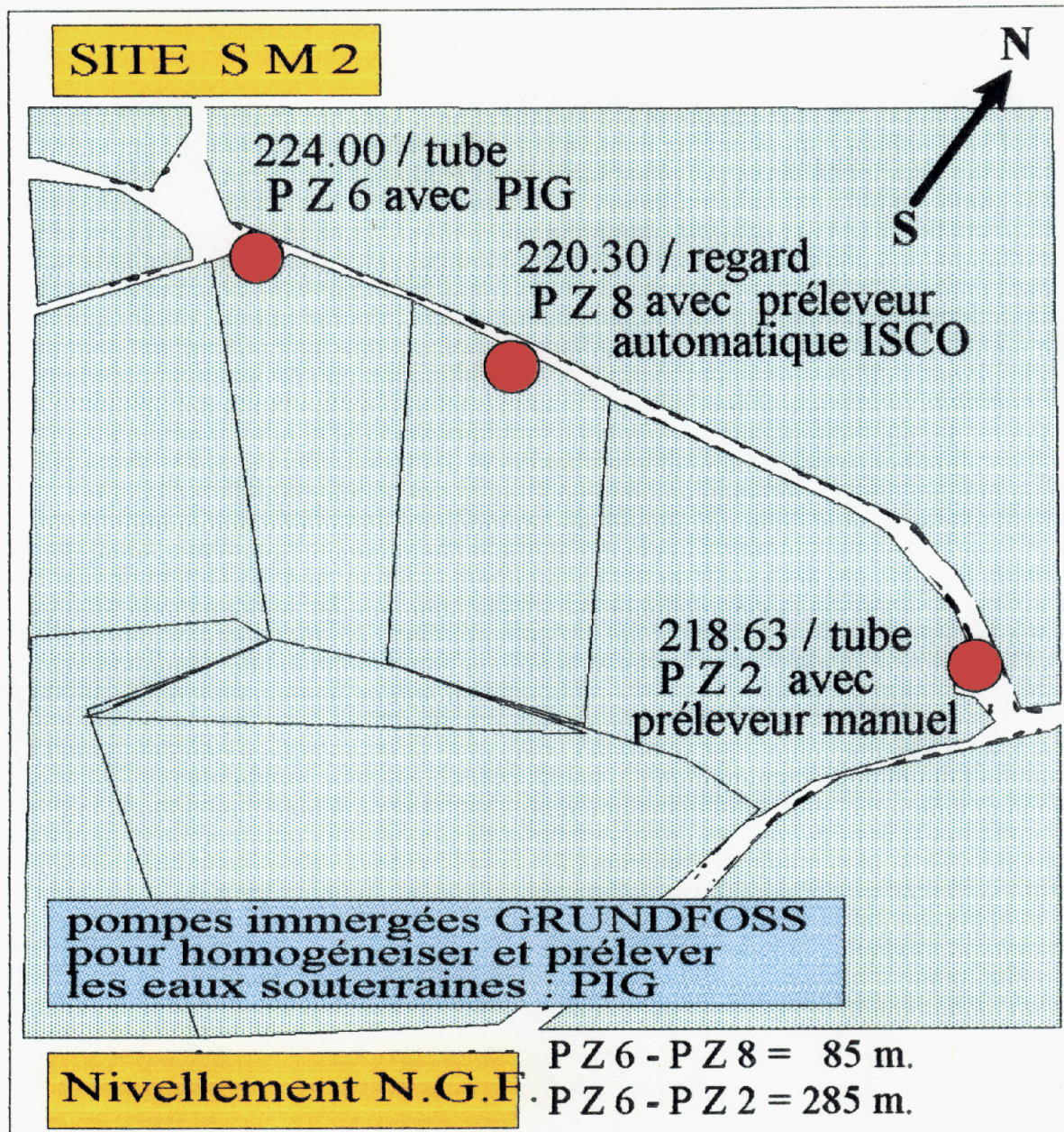


Figure 4 Etude de fiabilité du réseau piézométrique
d'observation de la qualité des eaux souterraines
en aval du C.E.T.

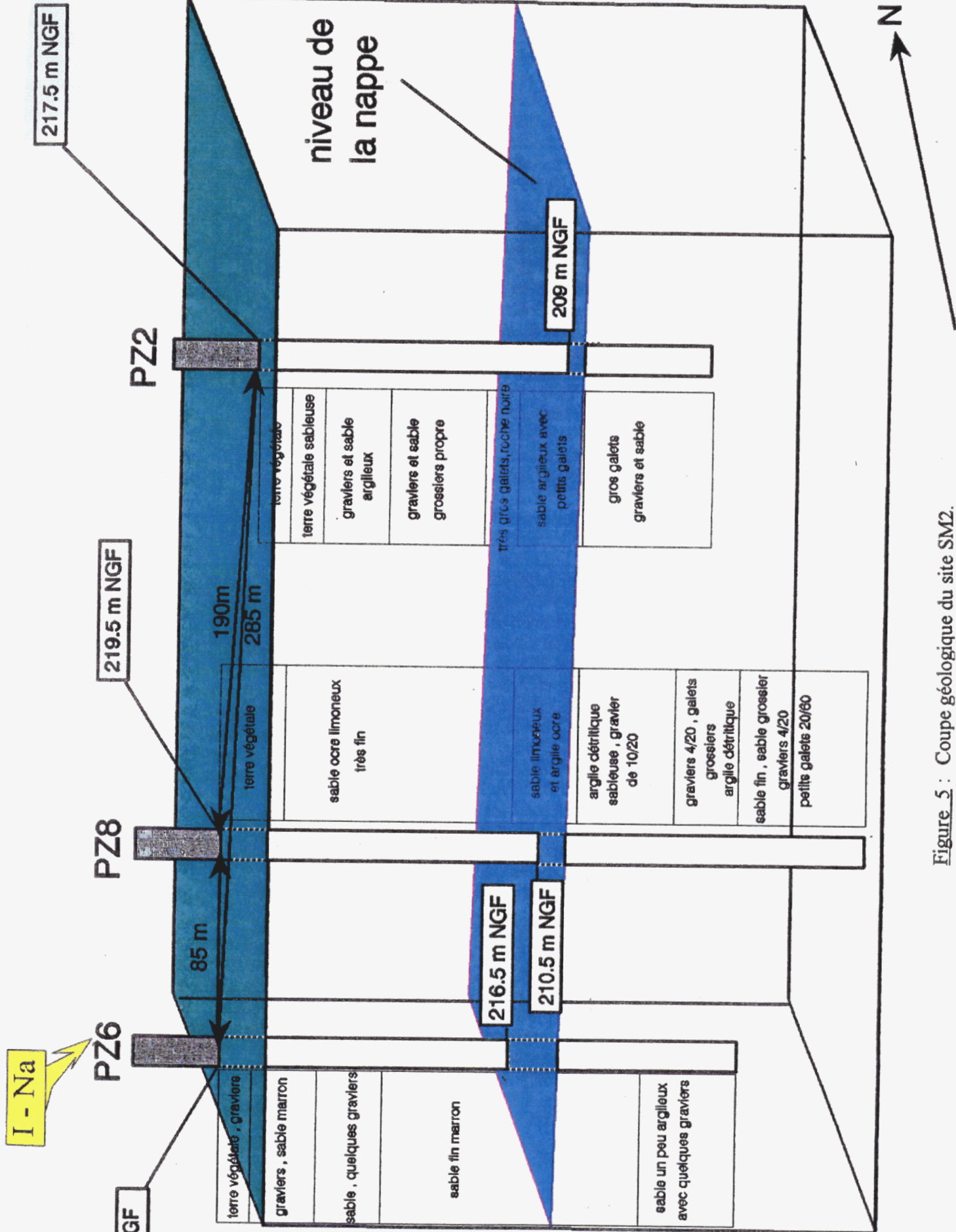


Figure 5 : Coupe géologique du site SM2.

**TRACAGES DES
ECOULEMENTS SOUTERRAINS**

A/ TRACAGES : Campagne N° 1

11 janvier - juin 1993

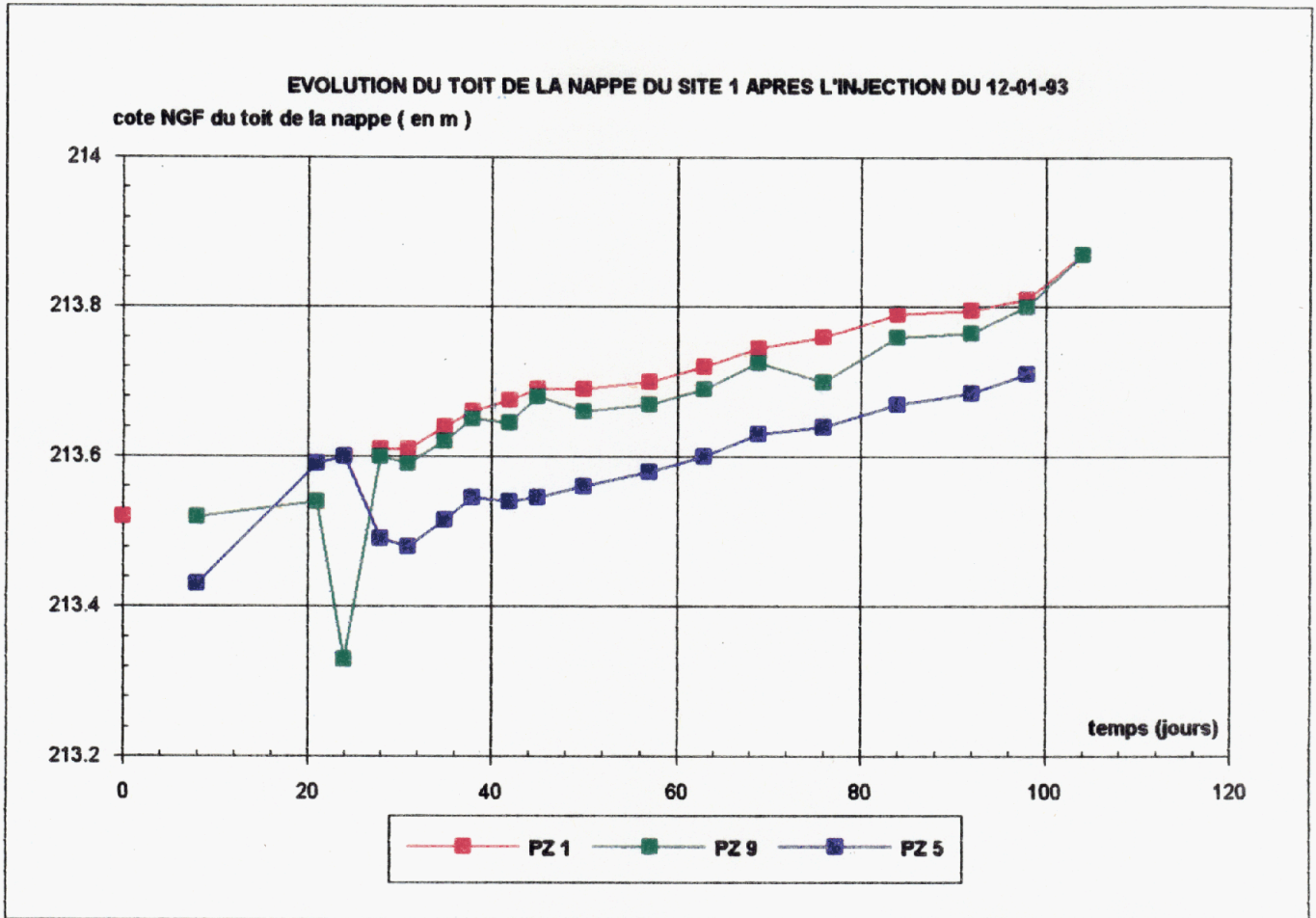


Figure 6 Piézométrie du site SM1 : PZ1 - PZ9 - PZ5

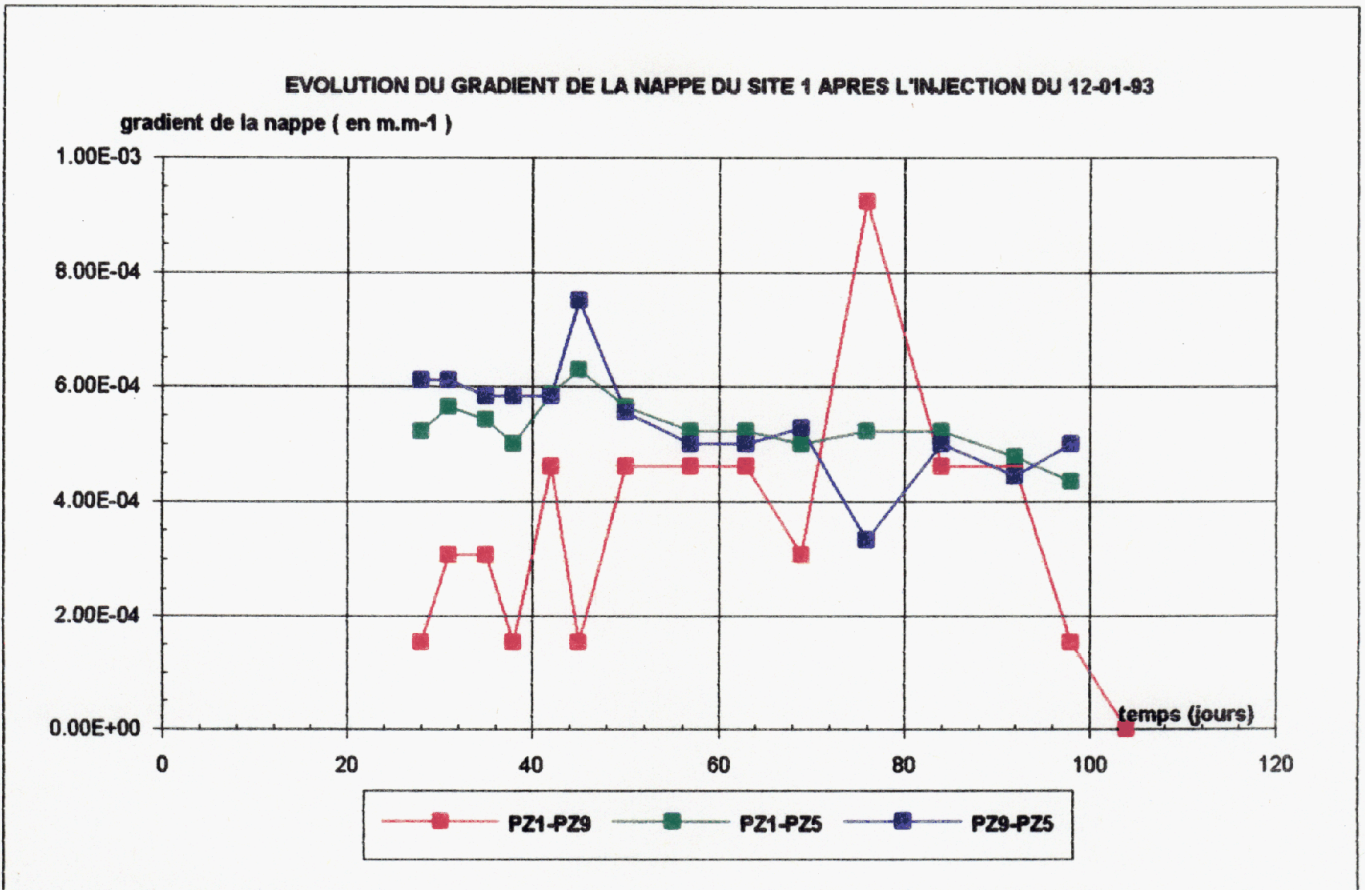


Figure 7 Evolution des gradients hydrauliques du site SM1

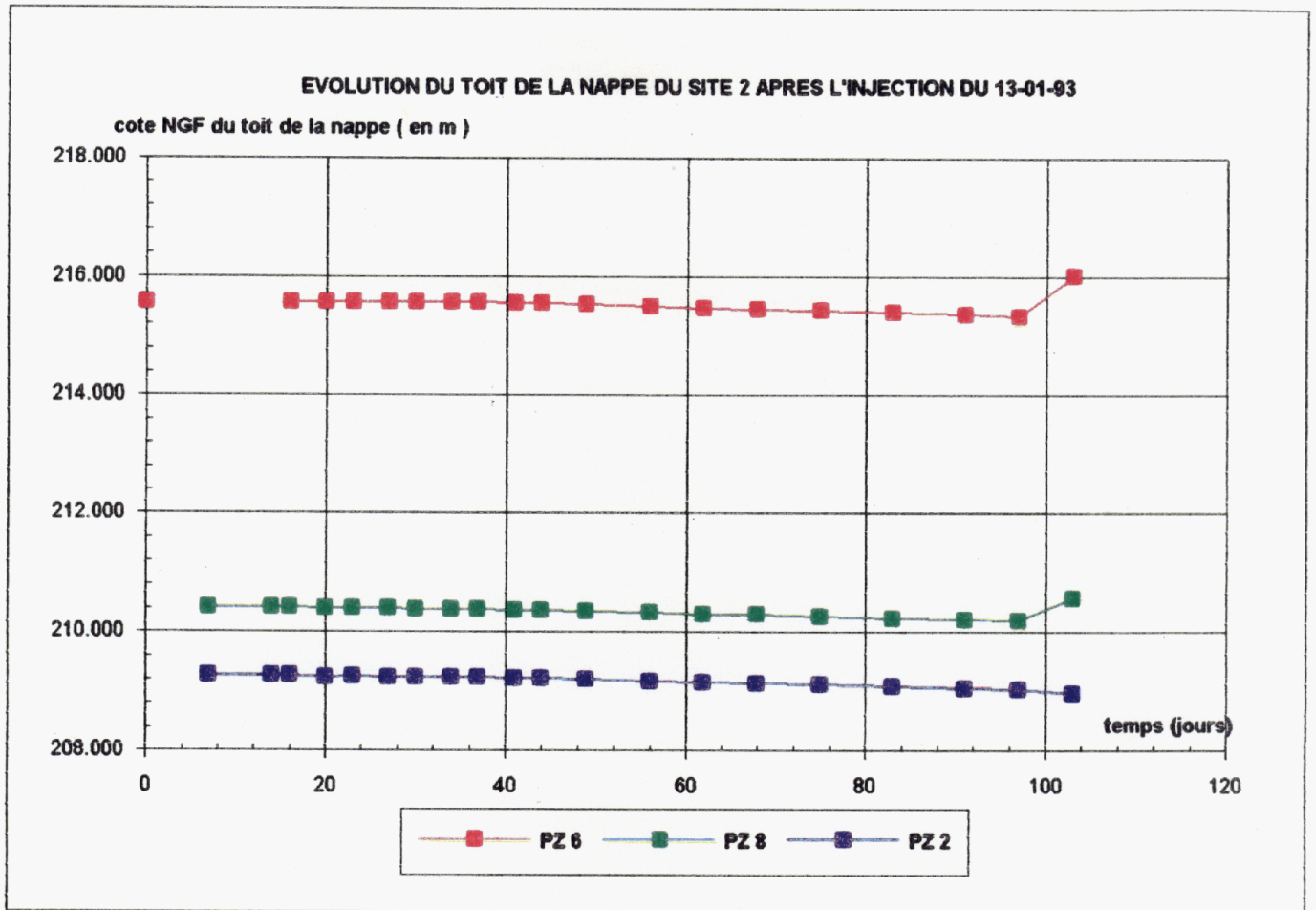


Figure 8 Piézométrie du site SM2 : PZ6 - PZ8 - PZ2

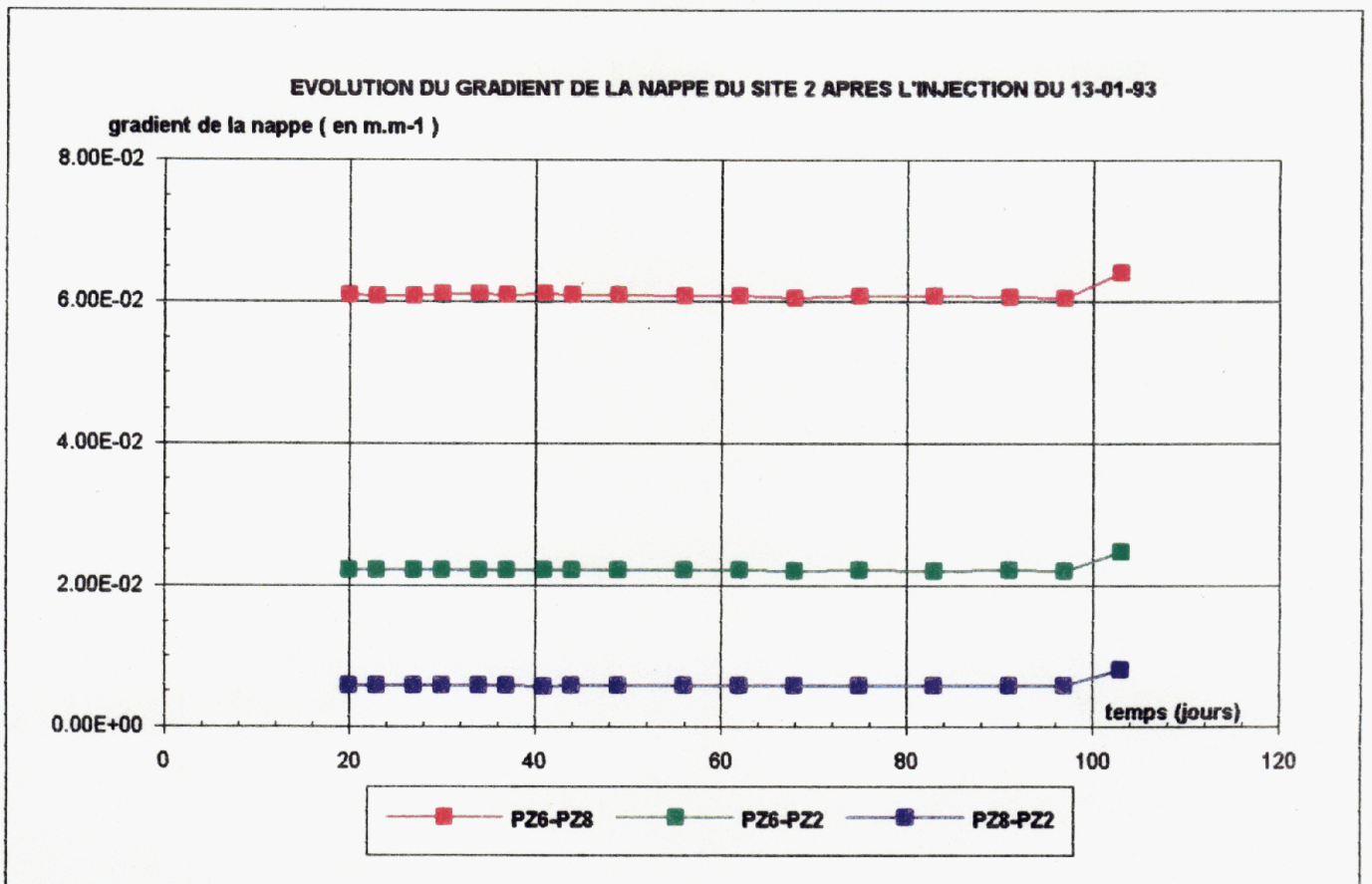


Figure 9 Evolution des gradients hydrauliques du site SM2

EVOLUTION DU TOIT DE LA NAPPE DU SITE 1 APRES L'INJECTION DU 12-01-93

cote NGF du toit de la nappe (en m)

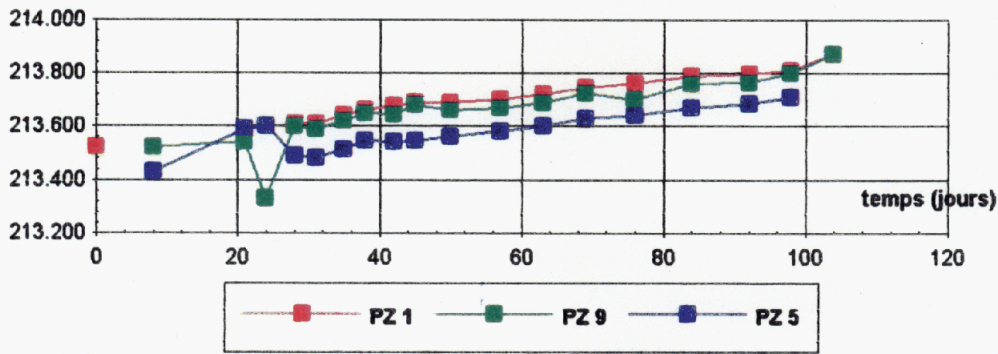
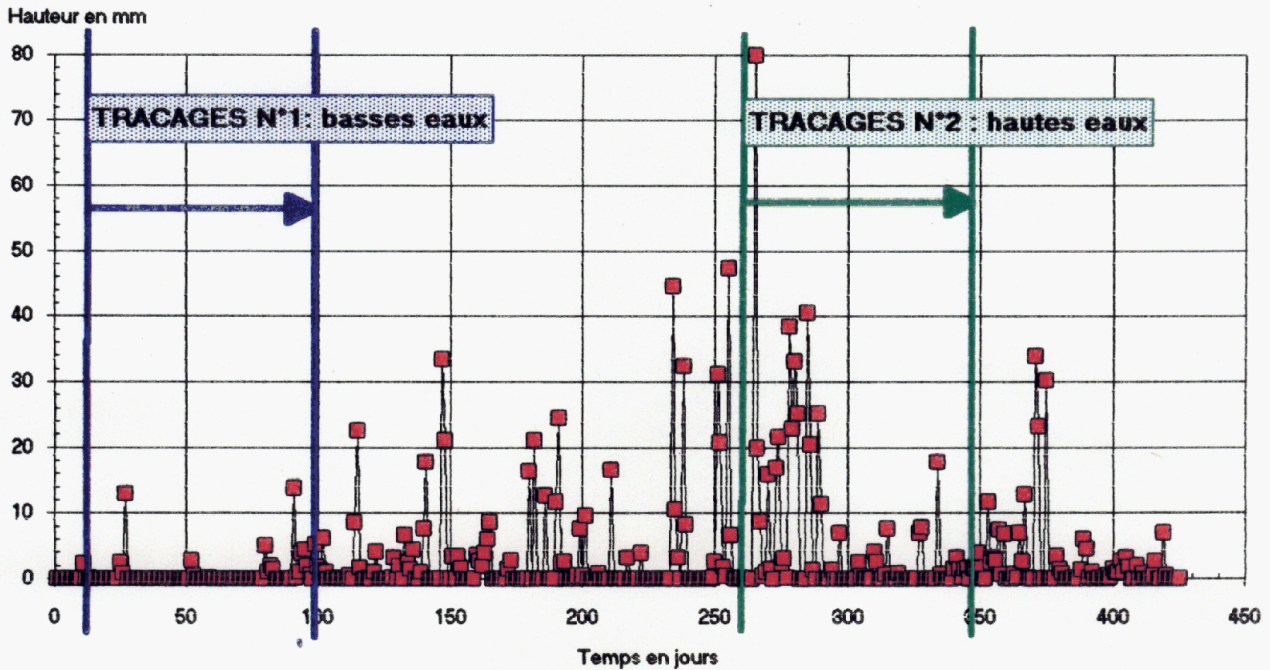


Figure 10 Evolution des précipitations atmosphériques observées durant les campagnes de traçages



EVOLUTION DU TOIT DE LA NAPPE DU SITE 2 APRES L'INJECTION DU 13-01-93

cote NGF du toit de la nappe (en m)

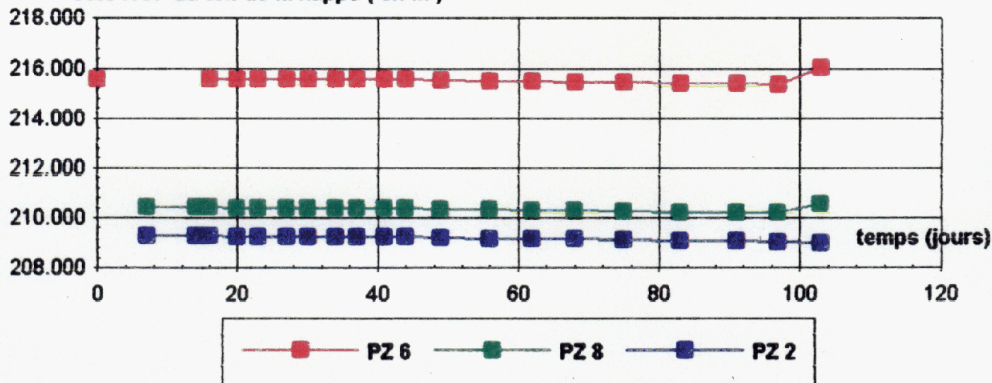


Figure 11 Distribution des temps de séjour interpiézomètres sur le site expérimental SM1 sans bruit de fond : PZ1-PZ9 et PZ1-PZ5

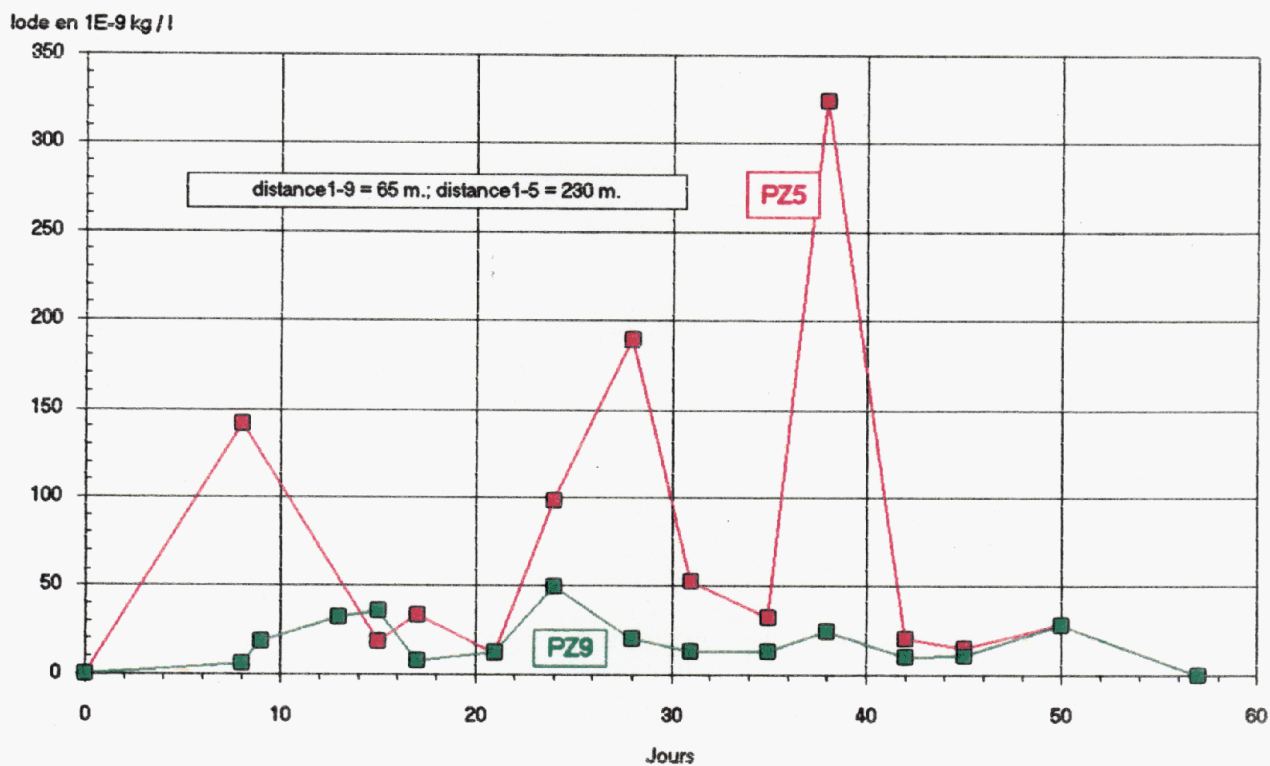
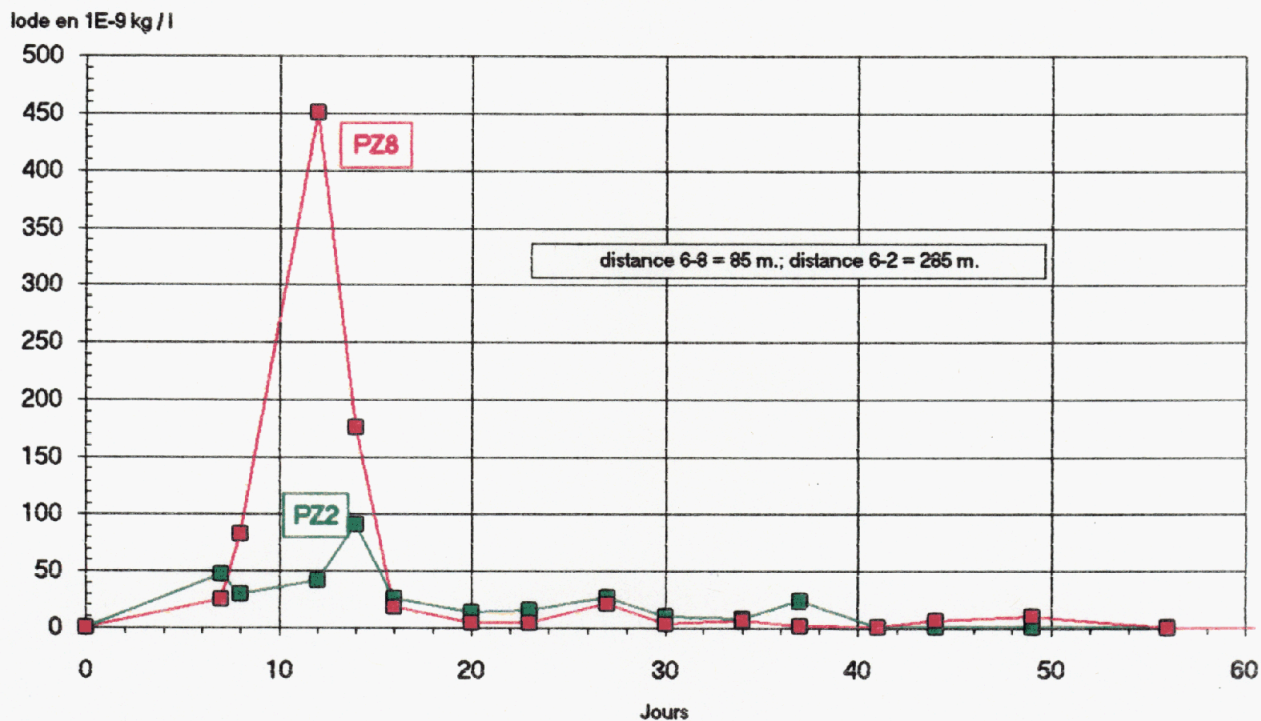


Figure 12 Distribution des temps de séjour interpiézomètres sur le site expérimental SM2 sans bruit de fond PZ6-PZ8 et PZ6-PZ2



pz9sbf

pist0002(6.11051, 4.23698, 128.447) pist00022(4.5123, 1.14689, 123.212)
pist00023(2.48928, 2.66893, 267.745) pist00024(1.68928, 0.226453, 139.546)
pist00025(1.39677, 0.0839085, 61.99) pist00026(1.25009, 0.0202406, 329.784)
No Background X2=0.00055709459 r2=0.9999998

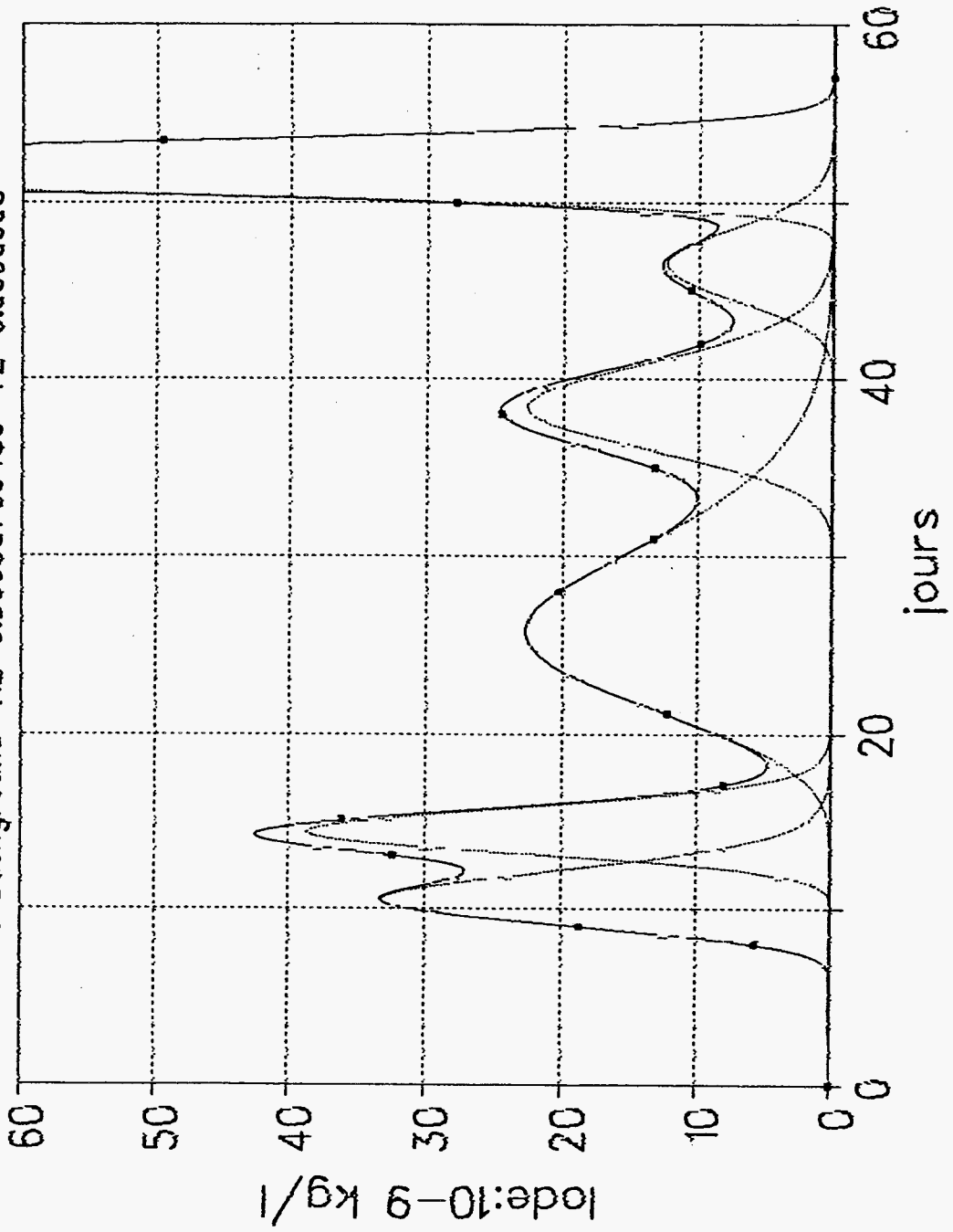


Figure 13 : Décomposition analytique et optimisation de la D.T.S. expérimentale du site SM1

pz5sbf

pist00011(23, 100, 1000) pist00012(13, 15, 150)
pist00013(8.8, 5.4, 800) pist00014(8, 15, 600)
pist00015(6, 1.2, 1300) pist00016(4.8, 1, 270)
No Background X2=3642.26 r2=0.98275638

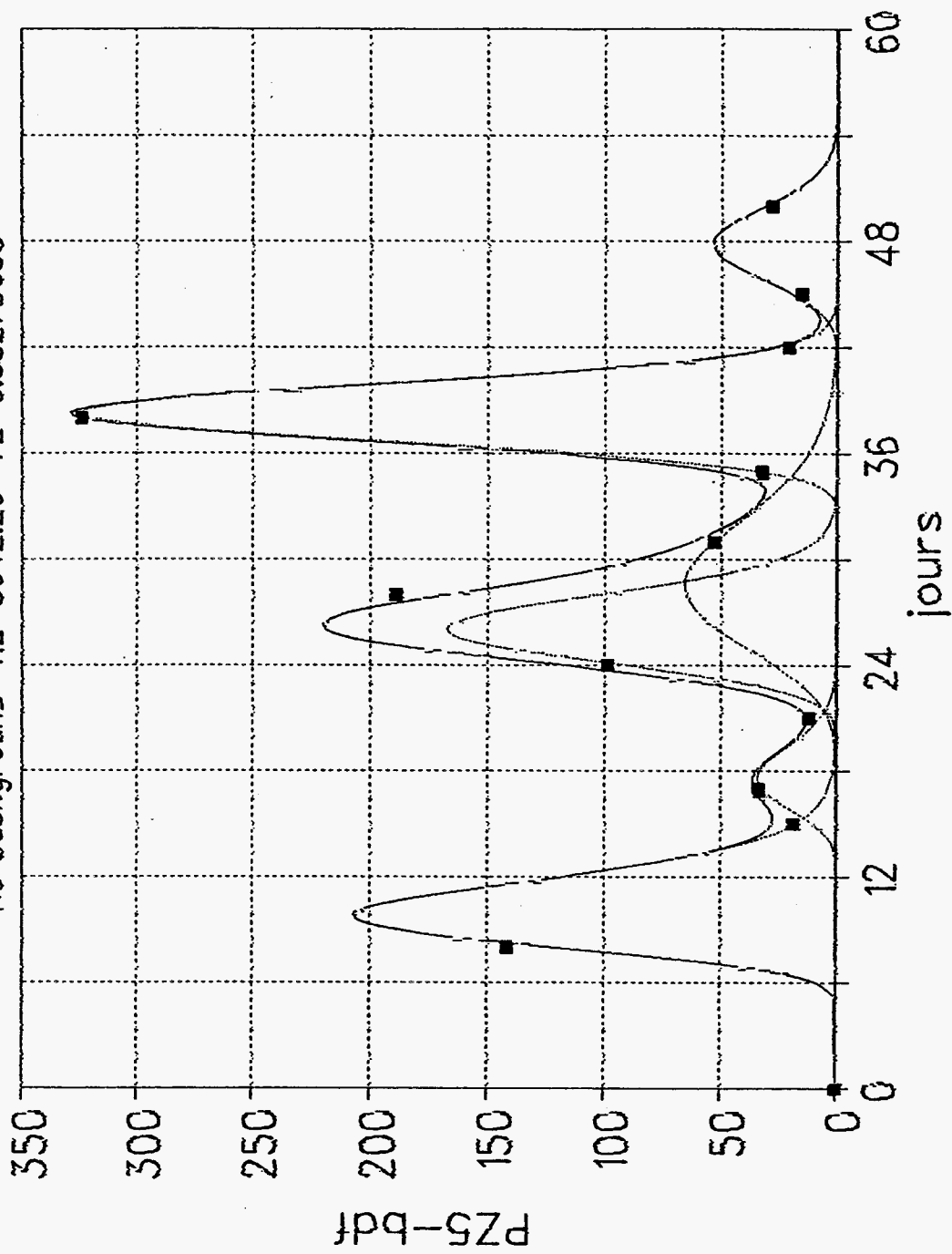


Figure 14 : Décomposition analytique et optimisation de la D.T.S. expérimentale du site SM1

disp8sbf1(7.6, 9, 2300)
disp8sbf2(4.3, 1.1, 400) disp8sbf3(3.05, 0.2, 100)
disp8sbf4(2.35, 0.3, 60) disp8sbf5(1.78, 0.3, 95)
No Background X2=11017.848 r2=0.94653153

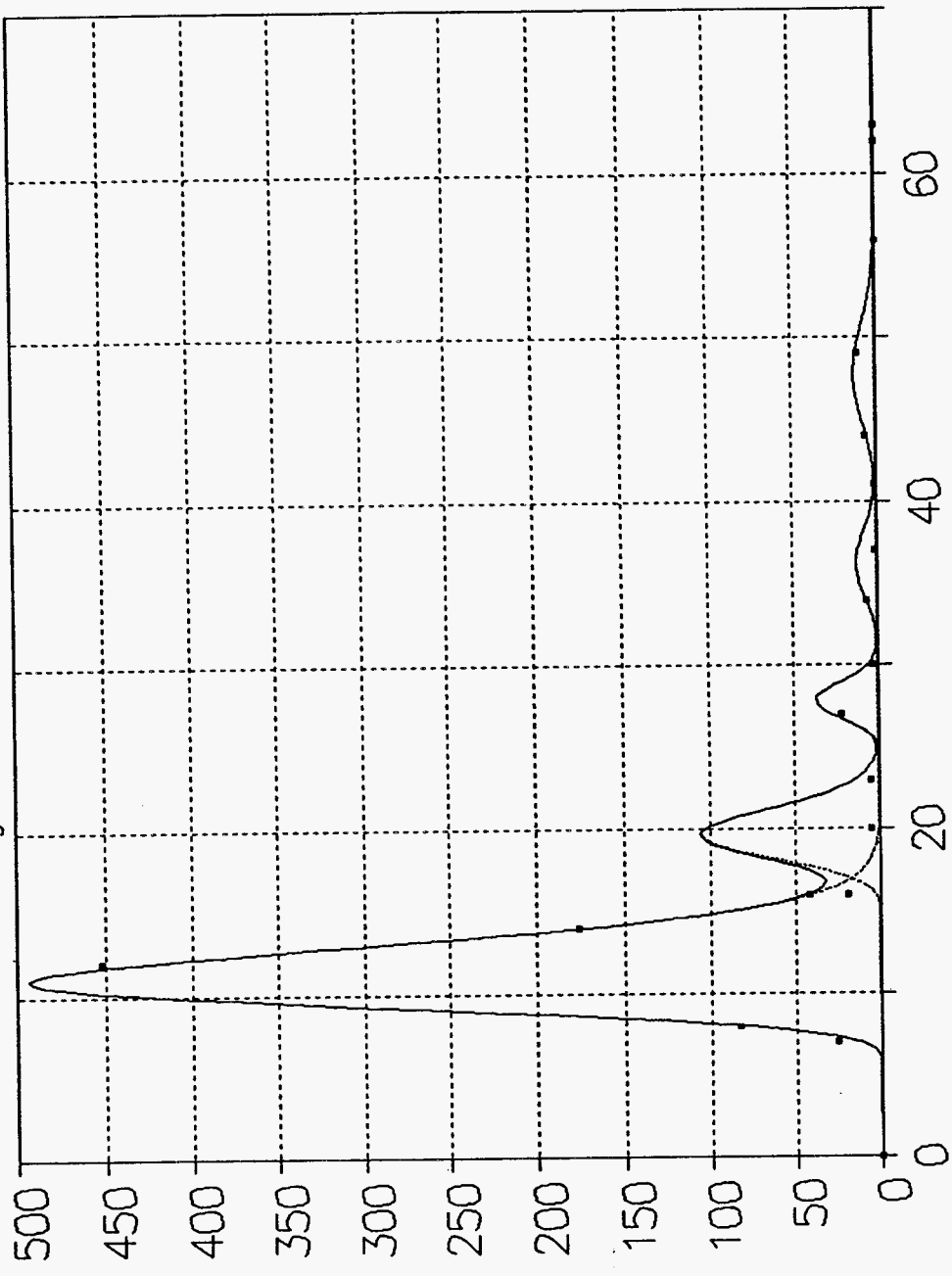


Figure 15 : Décomposition analytique et optimisation de la D.T.S. expérimentale du site SM2

: PZ8.

disp2sbf1(31, 300, 565.035)
disp2sbf2(15, 38, 650) disp2sbf3(8.7, 10, 230)
disp2sbf4(6.5, 2, 130)
No Background X2=593.99151 r2=0.9336784

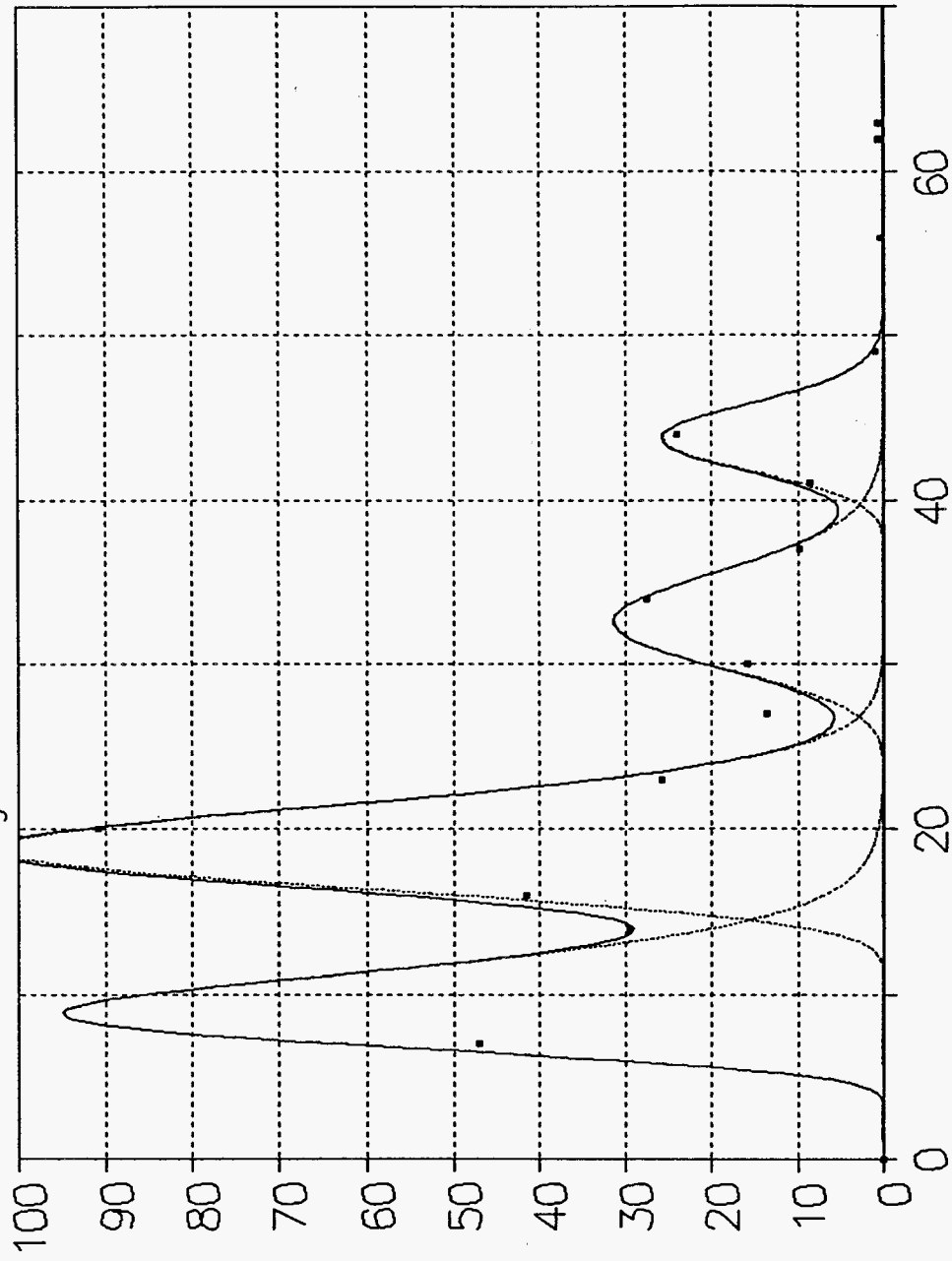


Figure 16 : Décomposition analytique et optimisation de la D.T.S. expérimentale du site SM2
: PZ2.

A/ TRACAGES : Campagne N° 2

17 août - novembre 1993

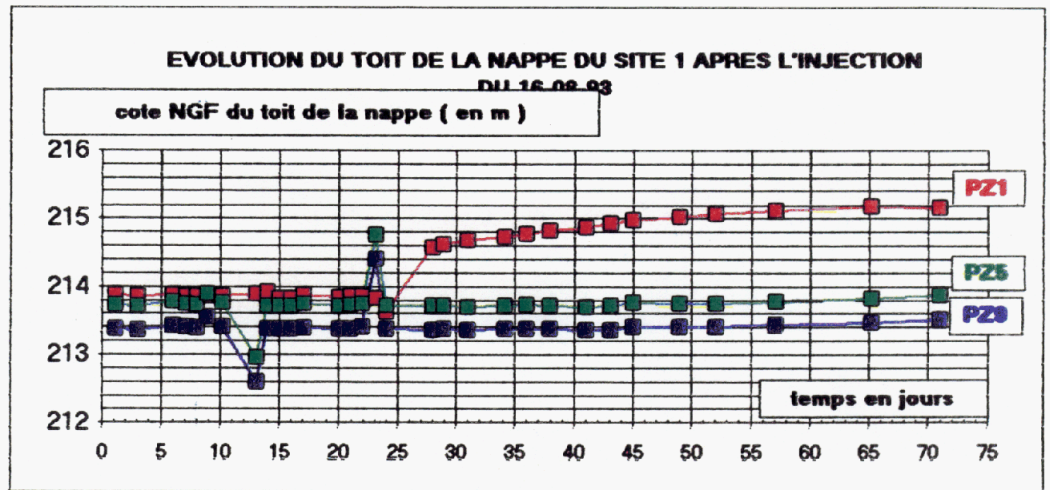


Figure 17 Evolution des précipitations atmosphériques observées durant les campagnes de traçages

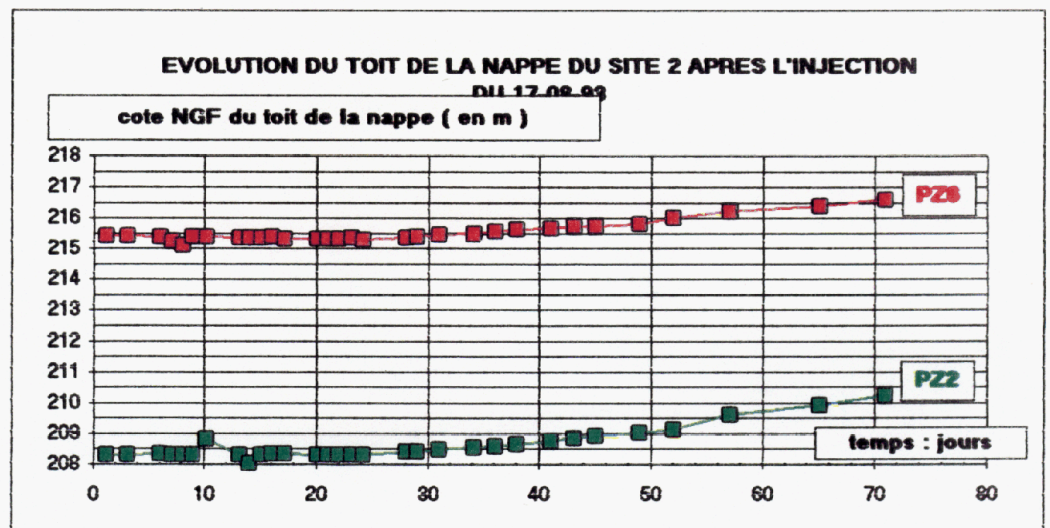
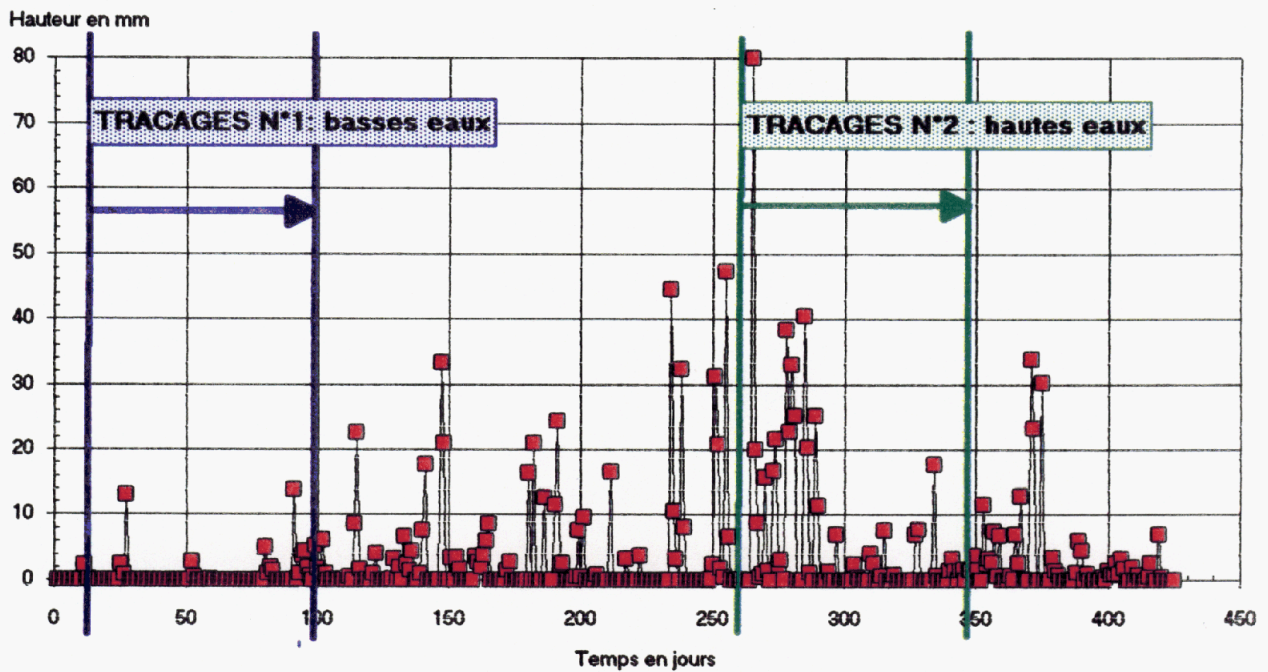


Figure 18 EVOLUTION DU TOIT DE LA NAPPE DU SITE 1 APRES L'INJECTION DU 16-08-93

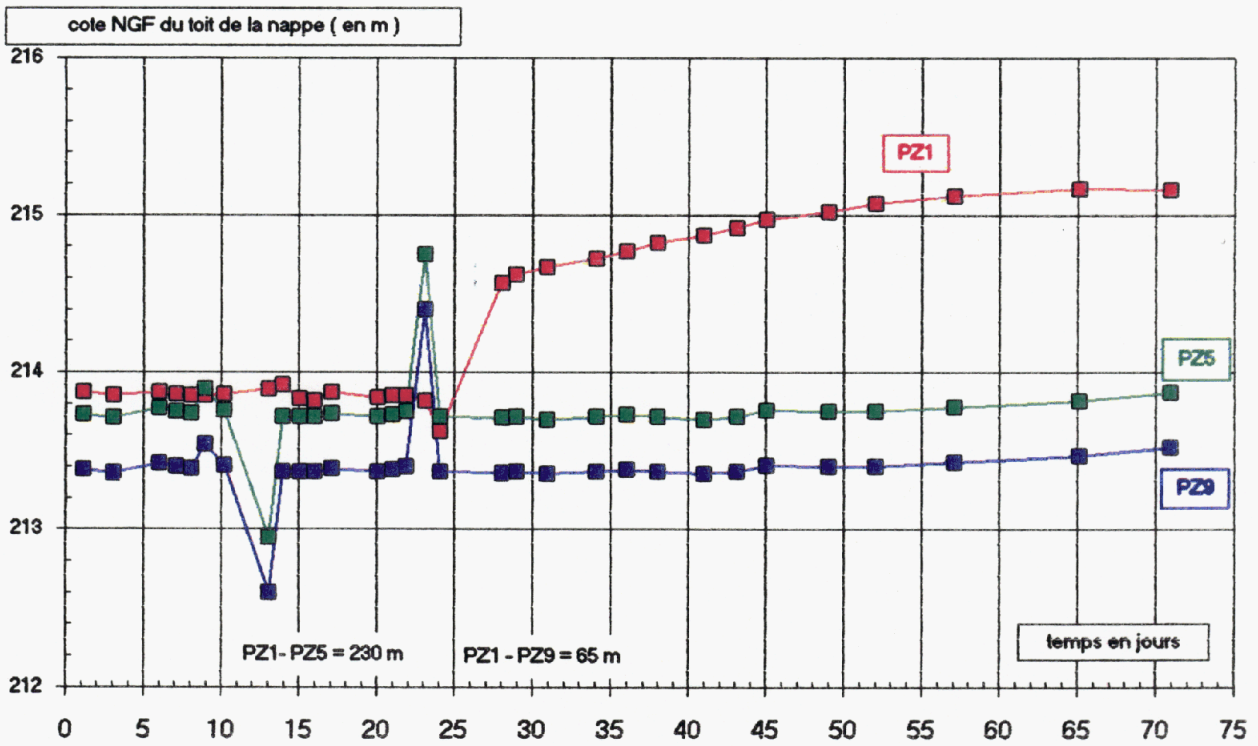


Figure 19 EVOLUTION DU GRADIENT DE LA NAPPE DU SITE 1 APRES L'INJECTION DU 16-08-93

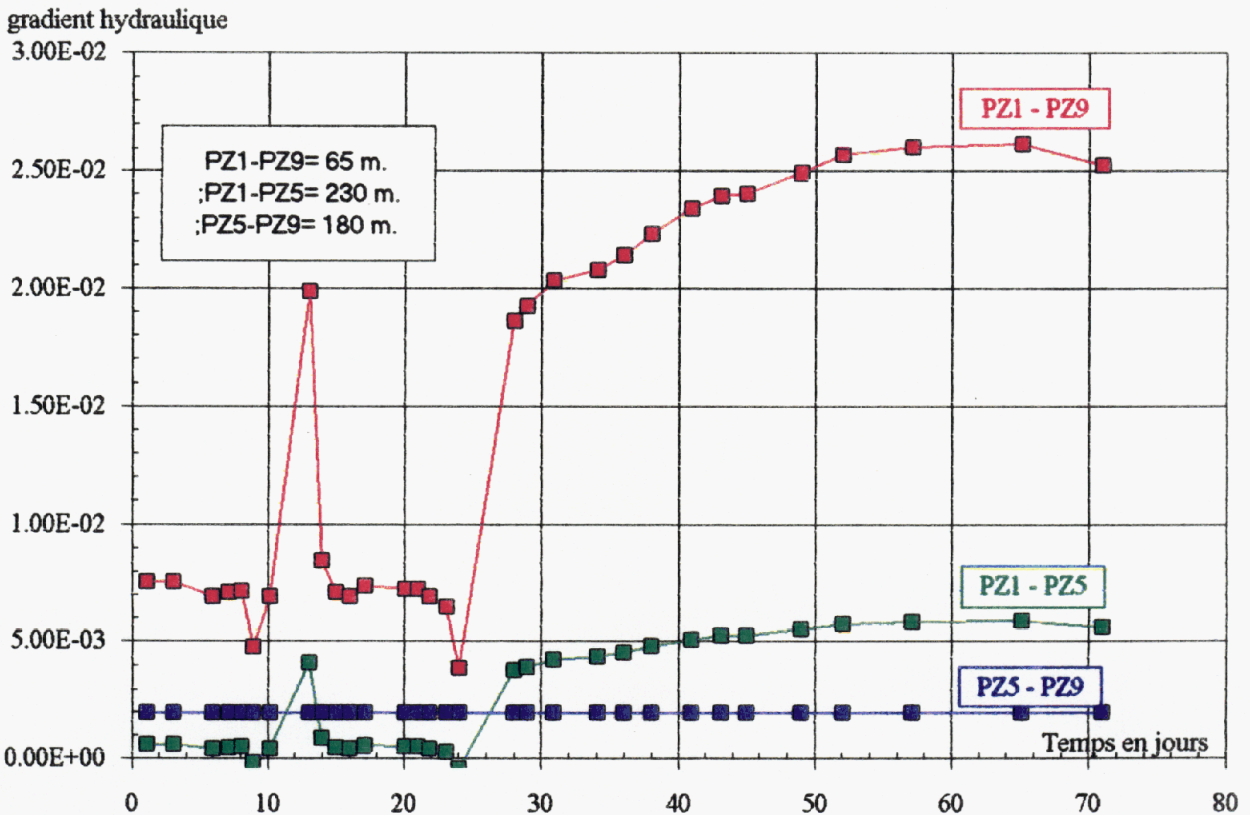


Figure 20 EVOLUTION DU TOIT DE LA NAPPE DU SITE 2 APRES L'INJECTION DU 17-08-93

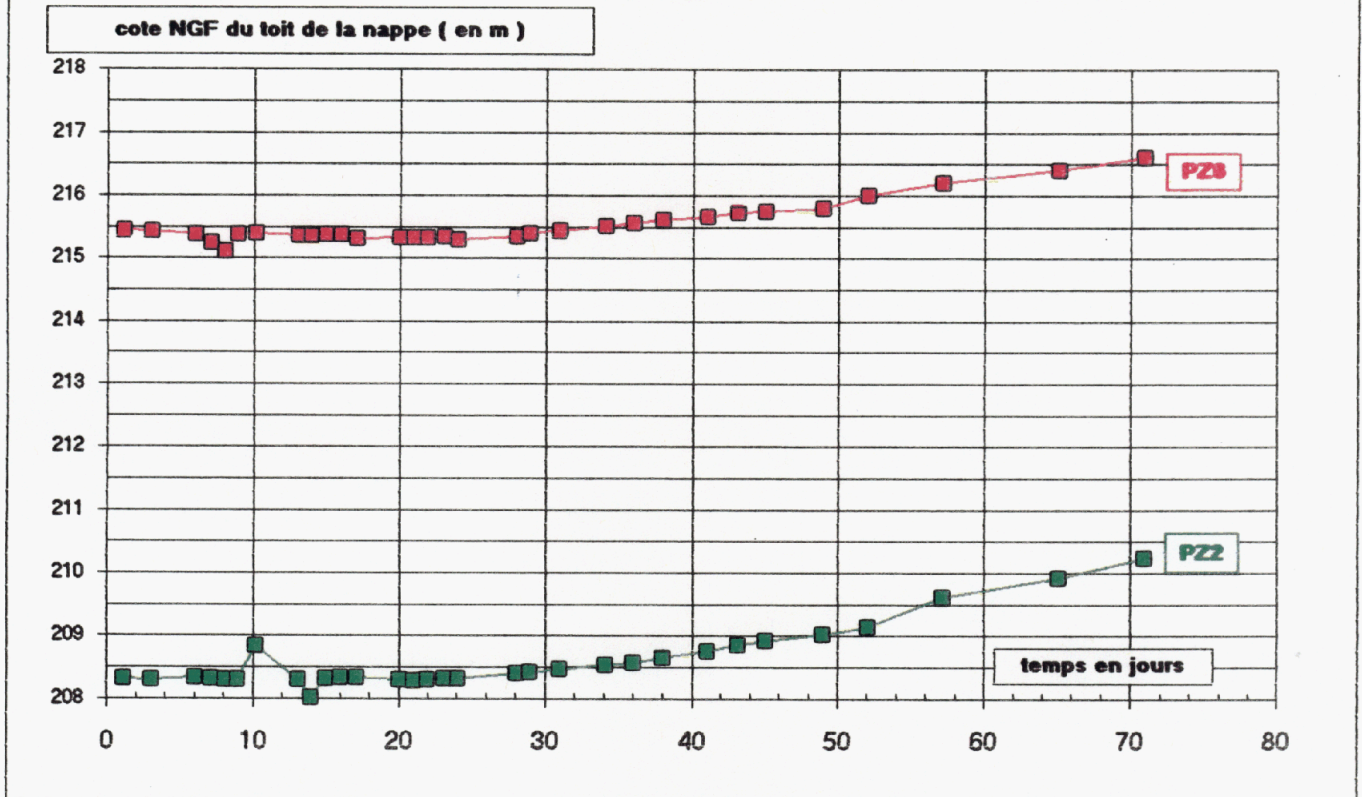


Figure 21 EVOLUTION DU GRADIENT DE LA NAPPE DU SITE 2 APRES L'INJECTION DU 17-08-93

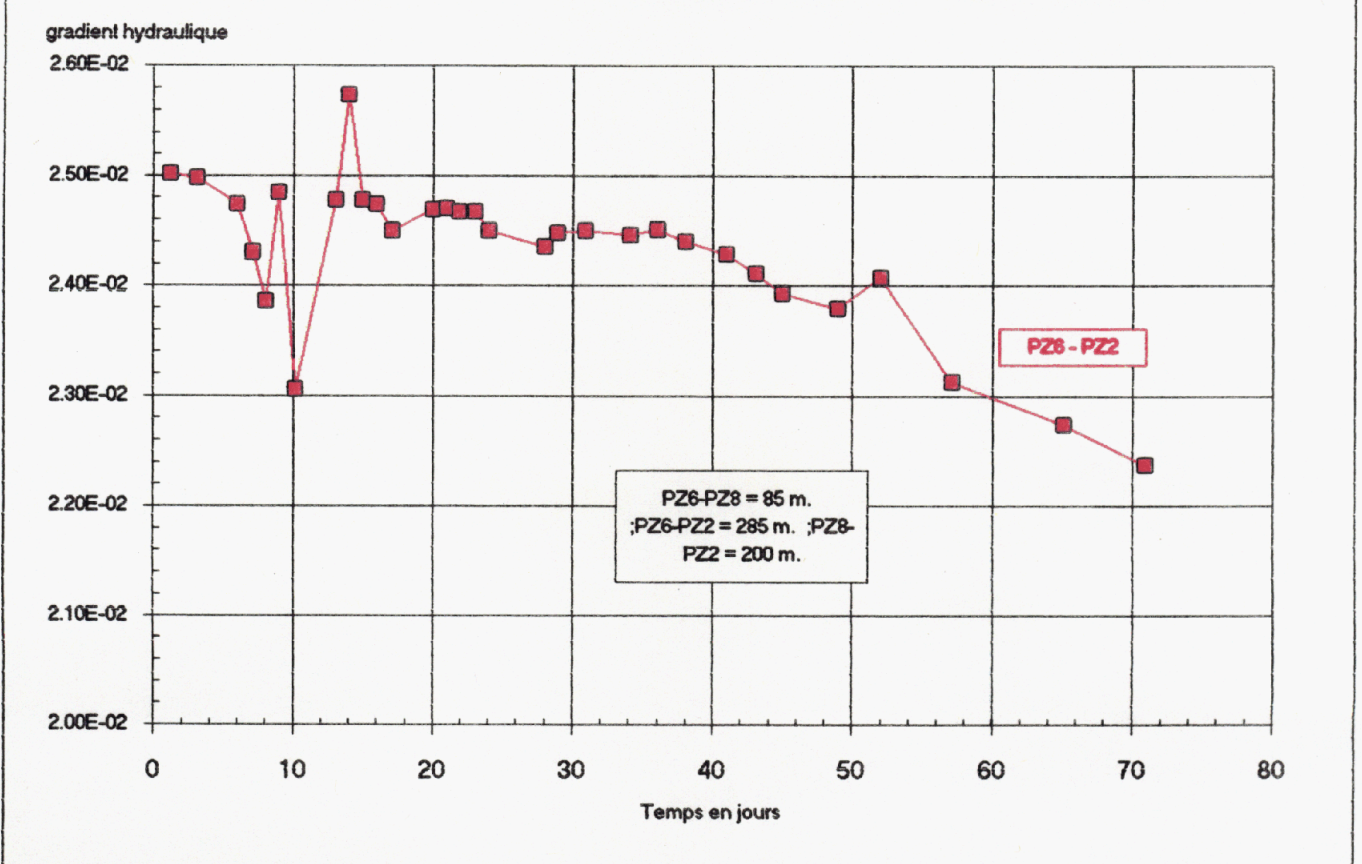


Figure 22 Evolution de la concentration en traceur dans le forage d'injection PZ1 : fonction d'entrée dans les systèmes PZ1-PZ5 et PZ1-PZ9

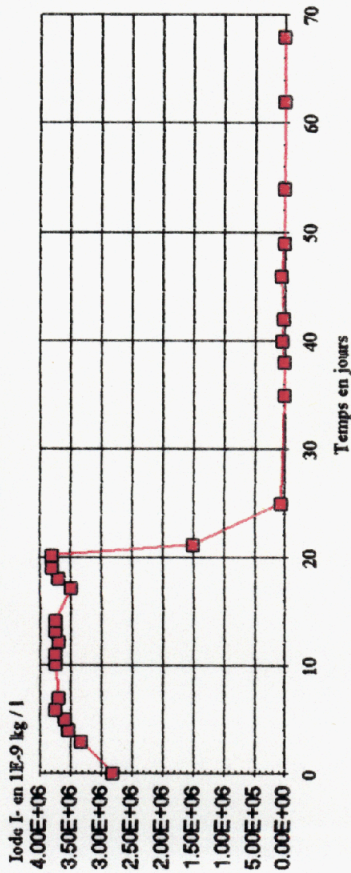


Figure 25 Evolution de la concentration en traceur dans le forage d'injection PZ6 : fonction d'entrée dans les systèmes PZ6-PZ8 et PZ6-PZ2

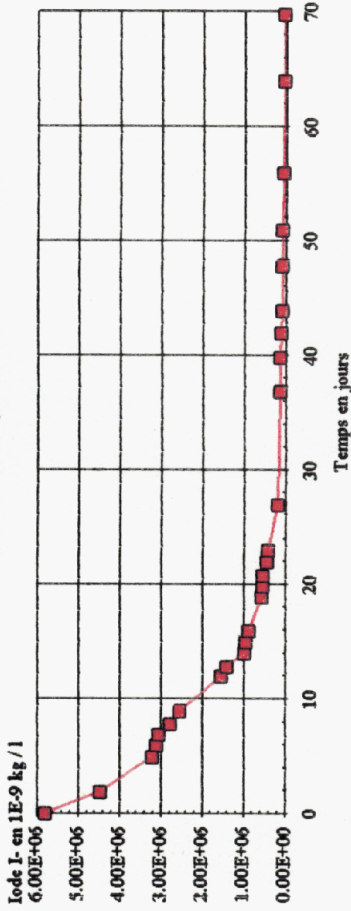


Figure 23 Restitution en PZ9 de l'Iode injectée en PZ1; sans bruit de fond

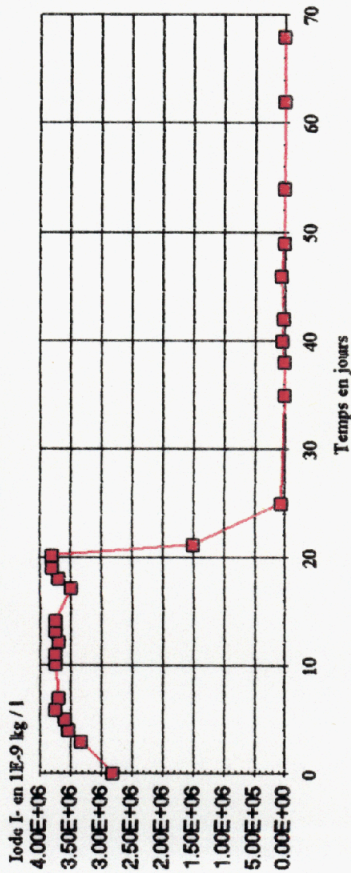


Figure 24 Restitution en PZ5 de l'Iode injectée en PZ1; sans bruit de fond

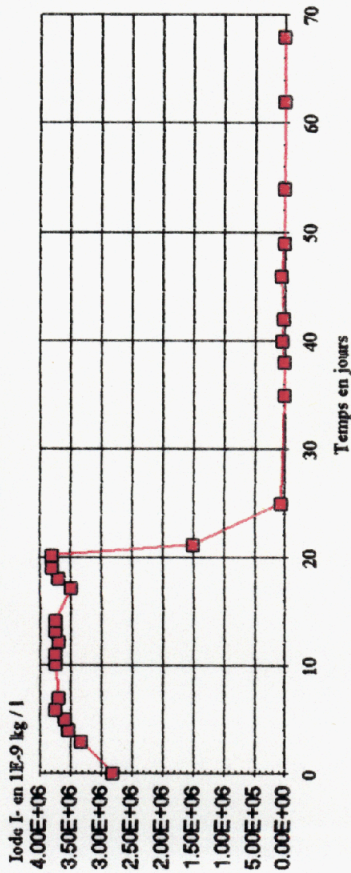


Figure 26 Restitution en PZ8 de l'Iode injectée en PZ6

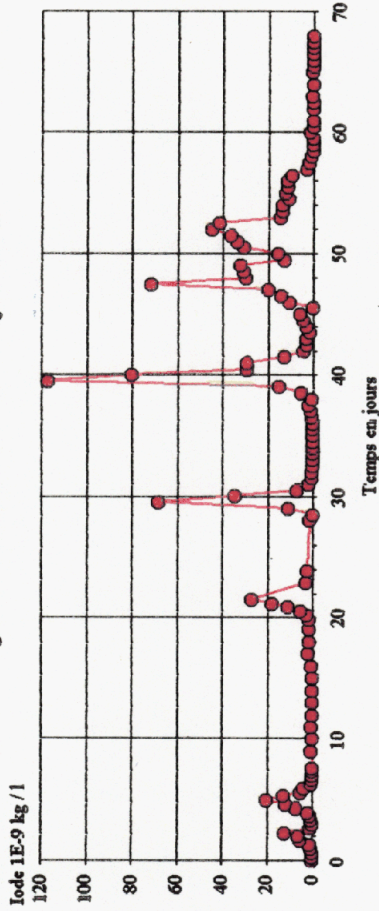


Figure 27 Restitution en PZ2 de l'Iode injectée en PZ6; sans bruit de fond

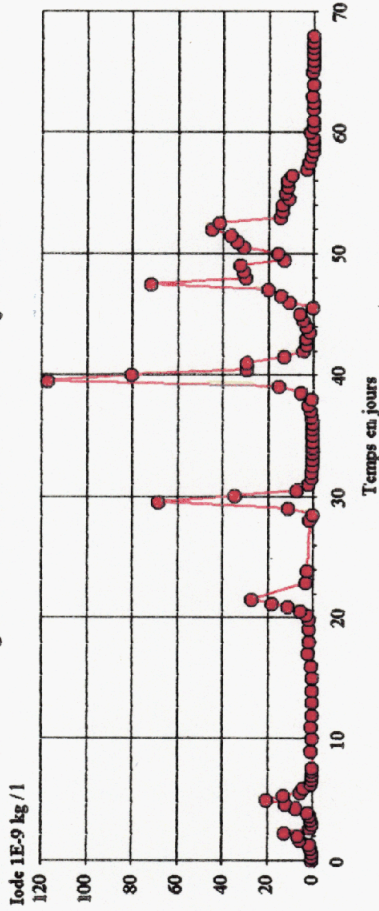
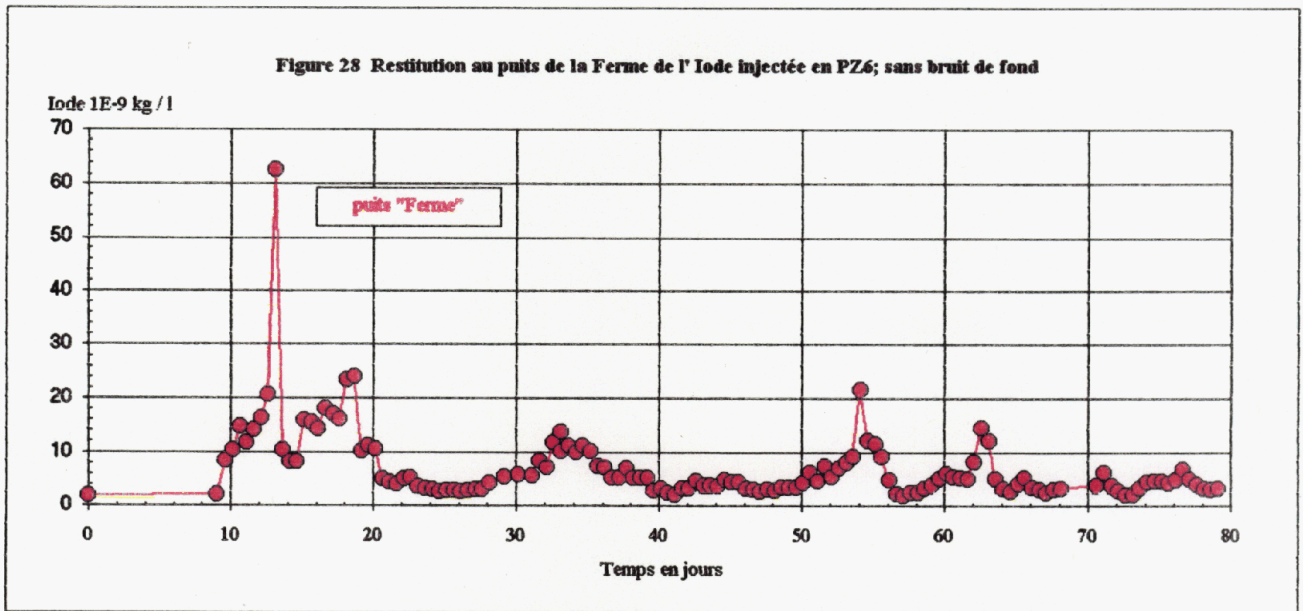


Figure 28 Restitution au puits de la Ferme de l' Iode injectée en PZ6; sans bruit de fond



pdisper41(9.45669, 150, 229.762)
 pdisper42(3.60011, 0.728995, 15.4926) pdisper43(5.03045, 4.00063, 3.02137)
 pdisper44(1.87906, 0.30765, 31.5041) pdisper45(1.18661, 0.57421, 325.317)
 No Background X2=80.015225 r2=0.90905935

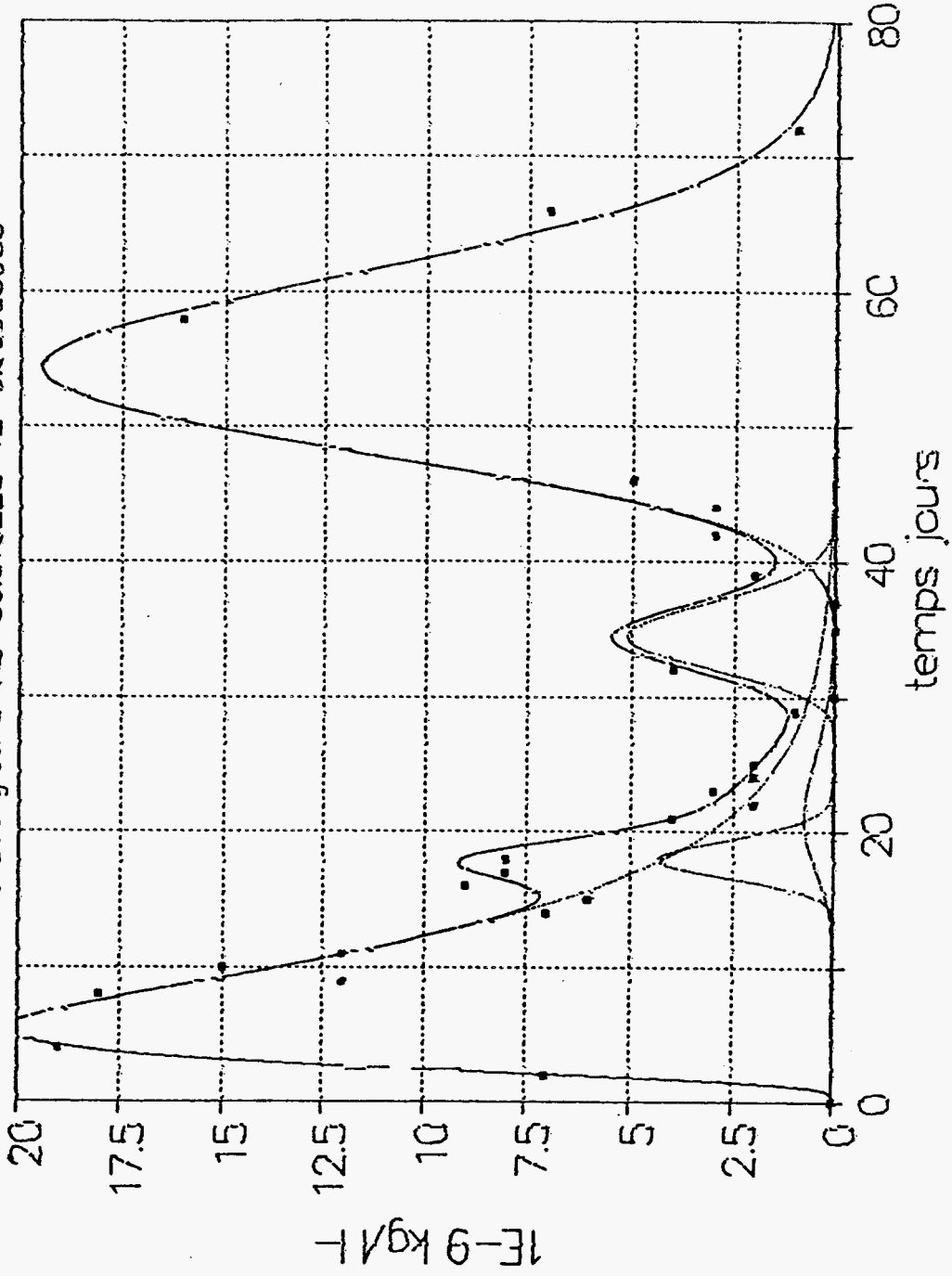


Figure 29 : Représentation analytique de la D.T.S. en PZ9 du système PZ1-PZ9.

pdisper21(19.65, 150, 217) pdisper22(13.912, 29, 186.7)
 pdisper23(10.1, 7.8, 70) pdisper24(7.4, 50, 550)
 pdisper25(5.21, 4, 200) pdisper25(4.25, 4.05, 105)
 No Background X2=150.91211 r2=0.97213528

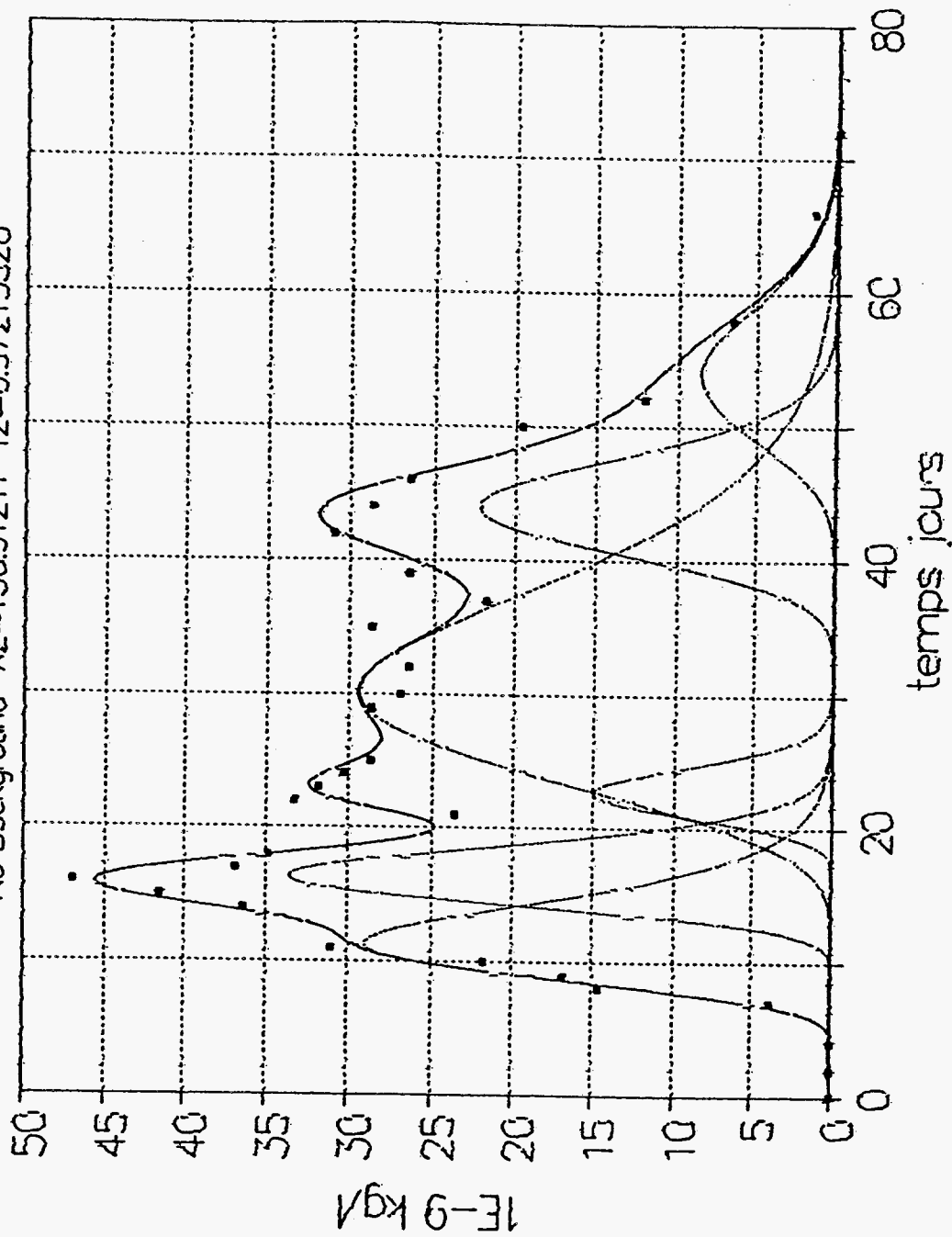


Figure 30 : Représentation analytique de la D.T.S. en PZ5 du système PZ1-PZ5.

pdisper3(3.9117, 0.138108, 44.6145) pdisper34(2.89473, 0.0344942, 81.1012) pdisper35(21.3974, 0.02, 172.414)
 pdisper36(1.75759, 0.0256217, 135.277) pdisper37(1.34985, 3.0271279, 110.229)
 pdisper38(1.54115, 0.0506399, 49.5464) No Background X2=2952.1035 r2=0.76265754

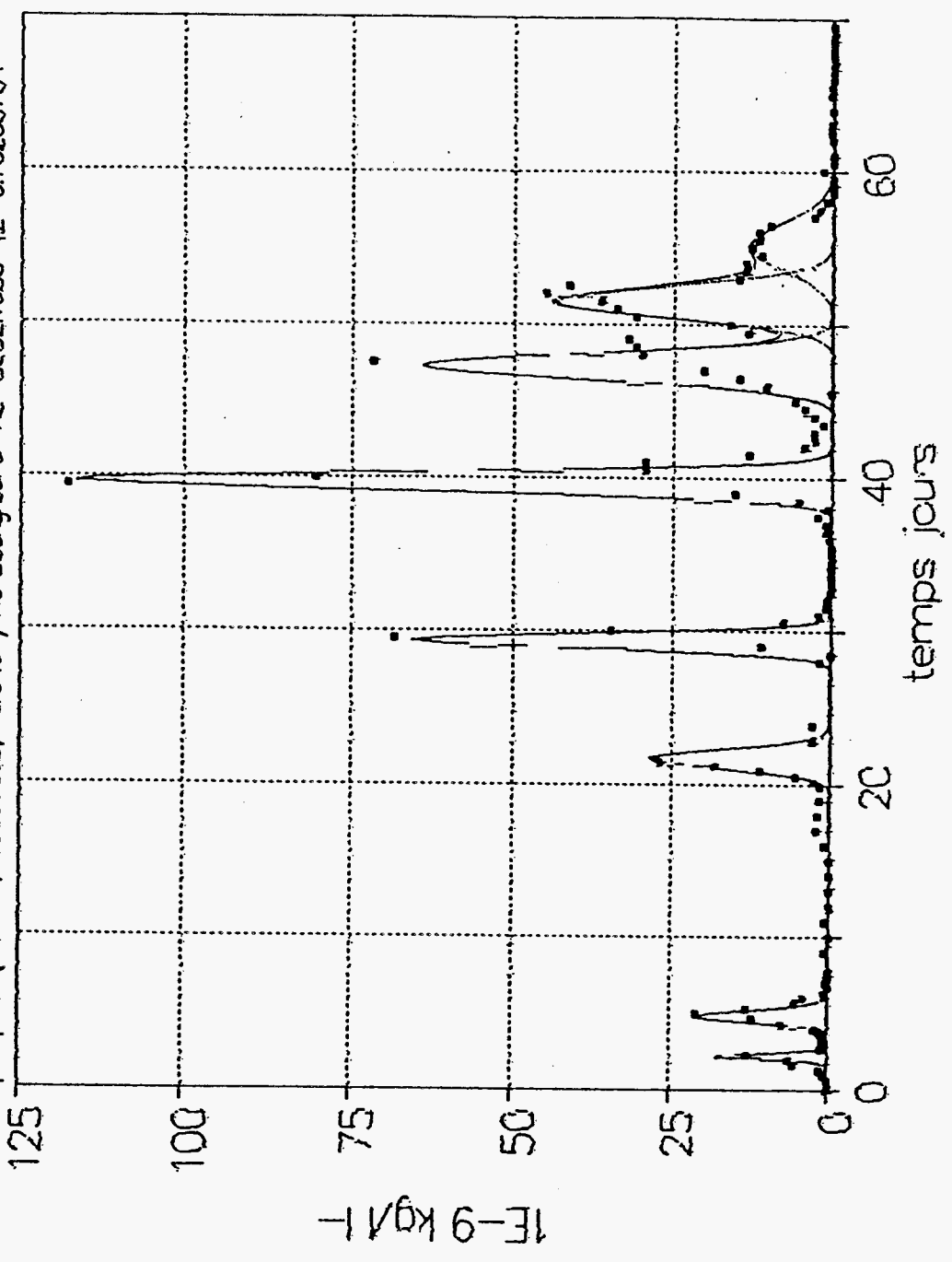


Figure 31 : Représentation analytique de la D.T.S. en PZ8 du système PZ6-PZ8.

pdisper1(41.51, 150, 57) pdisper2(18, 42, 41.5)
 pdisper3(12.82, 3.6, 26.4) pdisper4(8.8, 8.9, 210)
 pdisper5(6.65, 2.6, 83) pdisper6(5.18, 2.65, 245)
 No Background X2=421.07547 r2=0.79245916

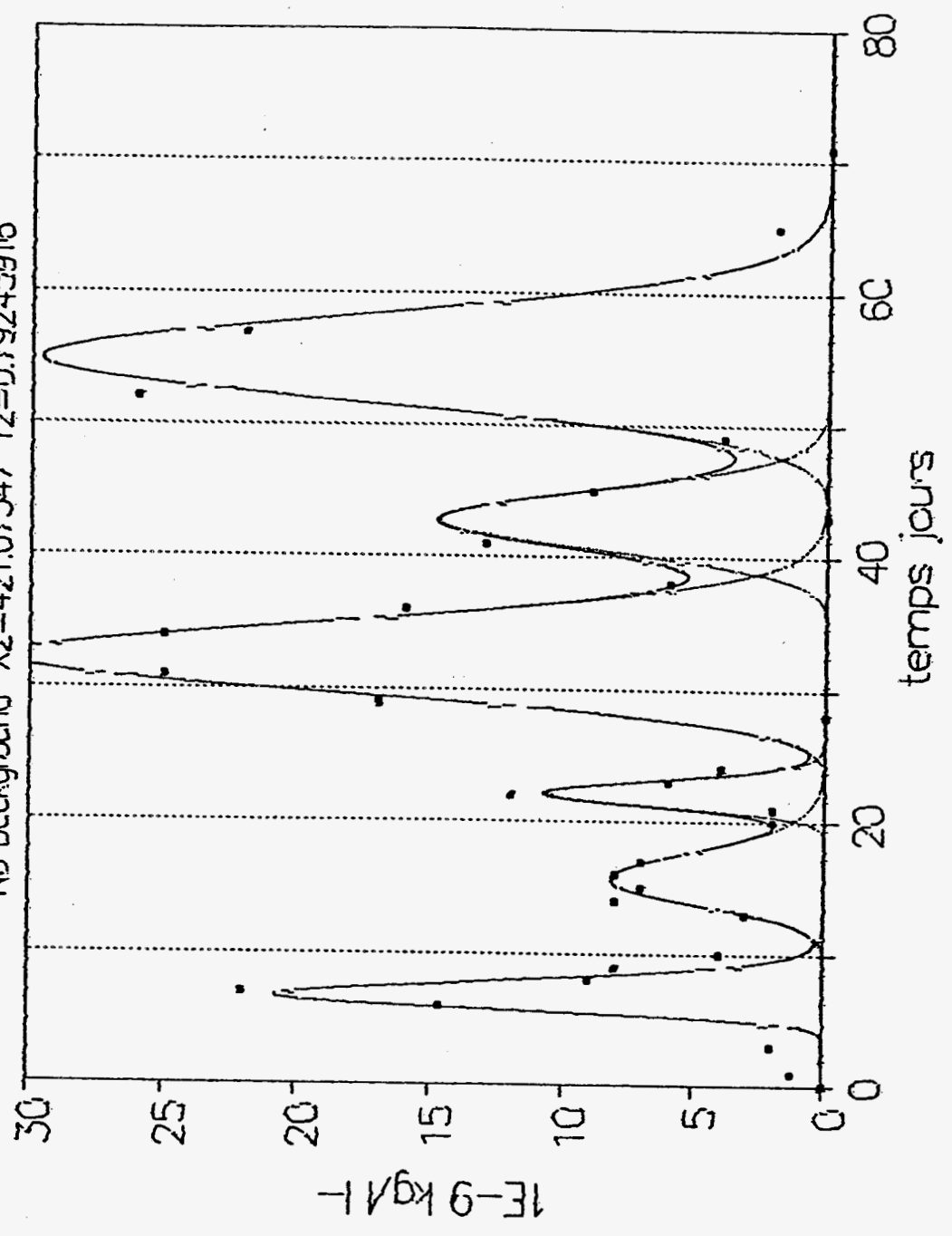


Figure 32 : Représentation analytique de la D.T.S. en PZ2 du système PZ6-PZ2.

pdisper61(72.4524, 147.857, 23.4841) pdisper62(60.995, 17.7156, 50.9351)
 pdisper63(45.6189, 150, 68.921) pdisper64(24.1802, 51.6858, 48.8111)
 pdisper65(15.0629, 6.00339, 28.3814) pdisper66(15.0098, 0.0811174, 7.56073)
 pdisper67(12.9953, 0.392173, 16.0751) No Background X2=694.19669 r2=0.88671725

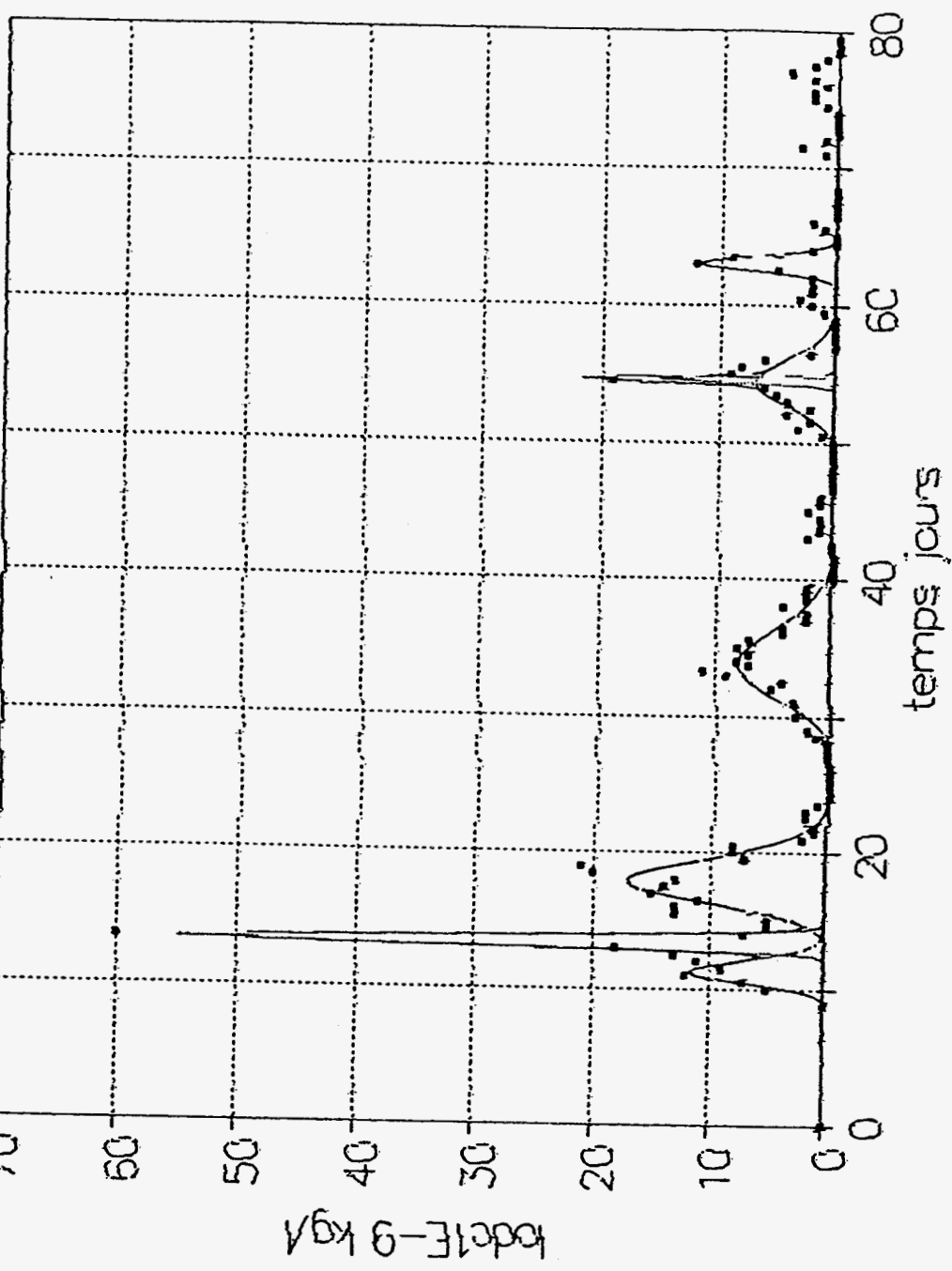


Figure 33 : Représentation analytique de la D.T.S. au puits La Ferme du système PZ6-puits
 La Ferme.

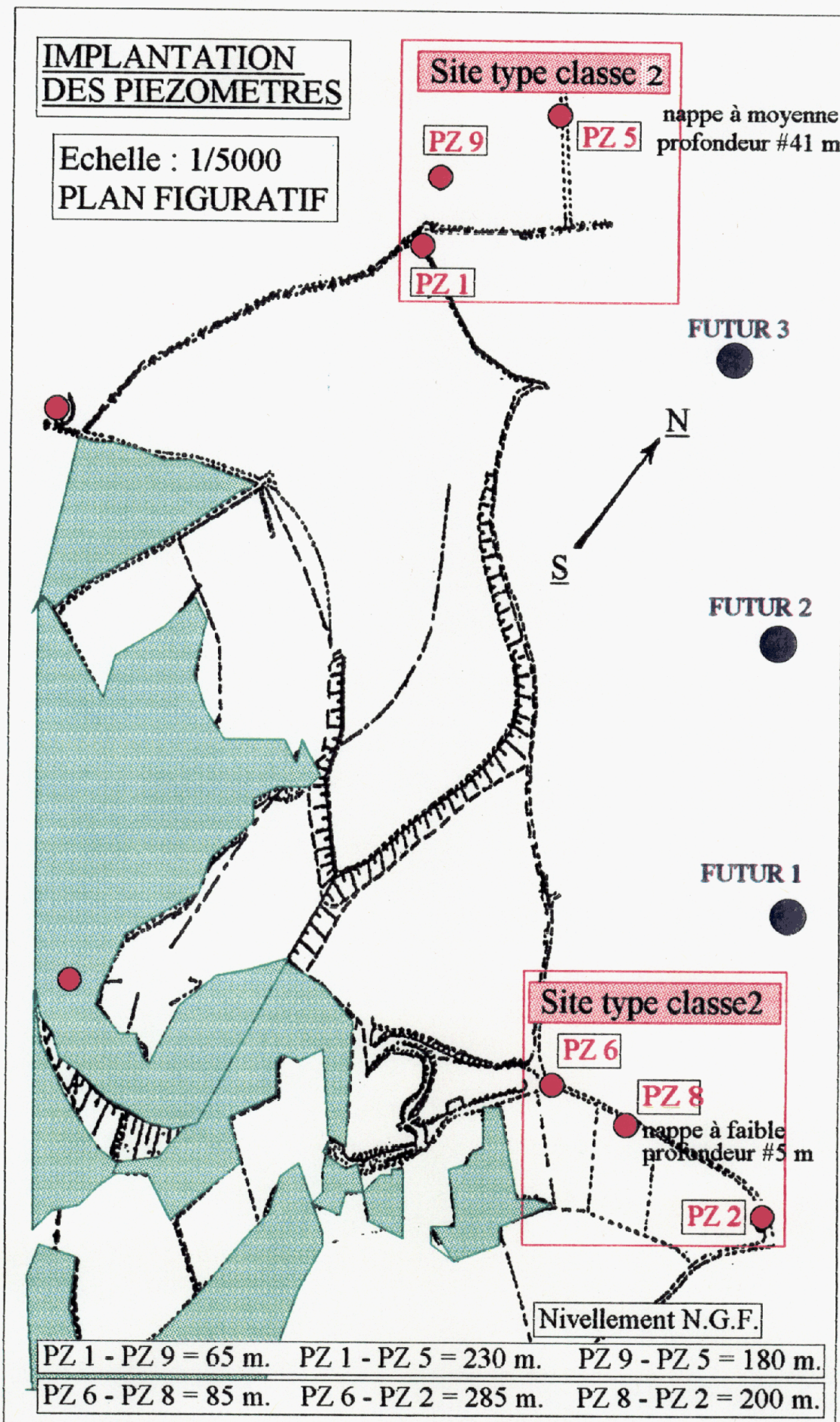


Figure 34 : Prospective d'implantations futures de piézomètres d'observation de la qualité des eaux souterraines

PHOTOGRAPHIES

**LOCALISATION ET
CARACTERISATION DES SITES
D'OBSERVATION SM1 ET SM2**

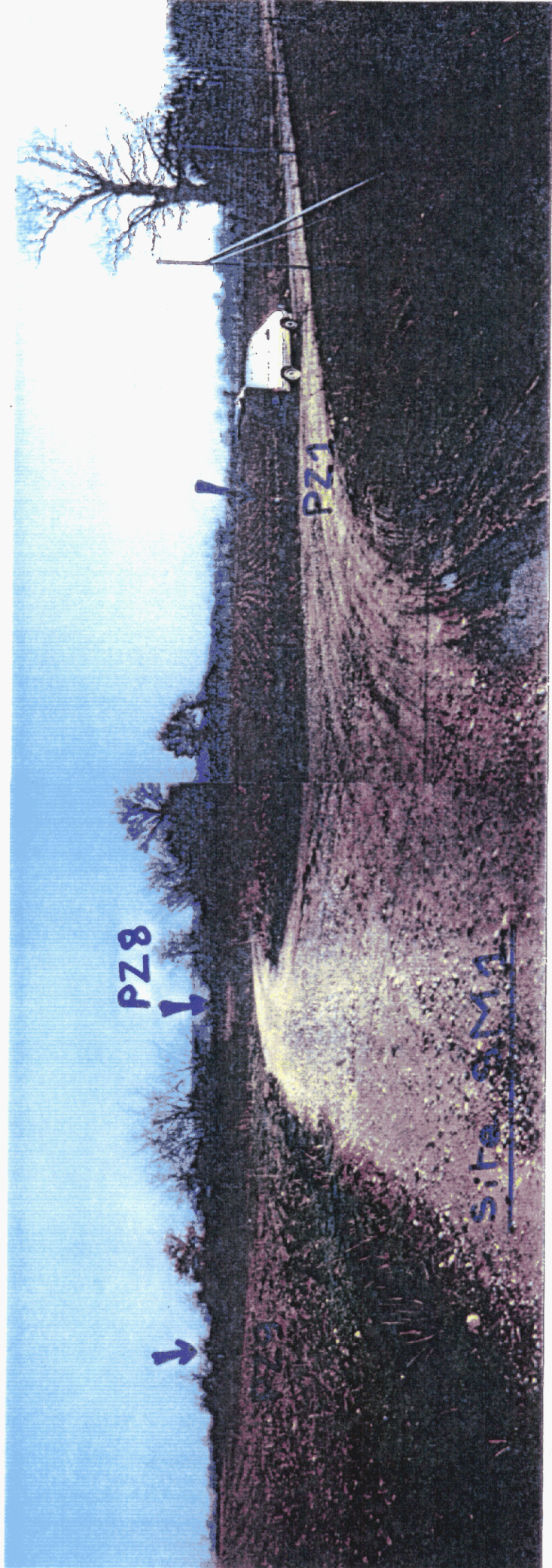


Photo 1 Vue sur le site piézométrique SM1



Photo 2 Localisation des piézomètres du site SM2



Photo 3 Piézomètre d'injection du site SM2



Photo 4 Situation géographique du piézomètre PZ6
par rapport au talus du C.E.T. de " X "

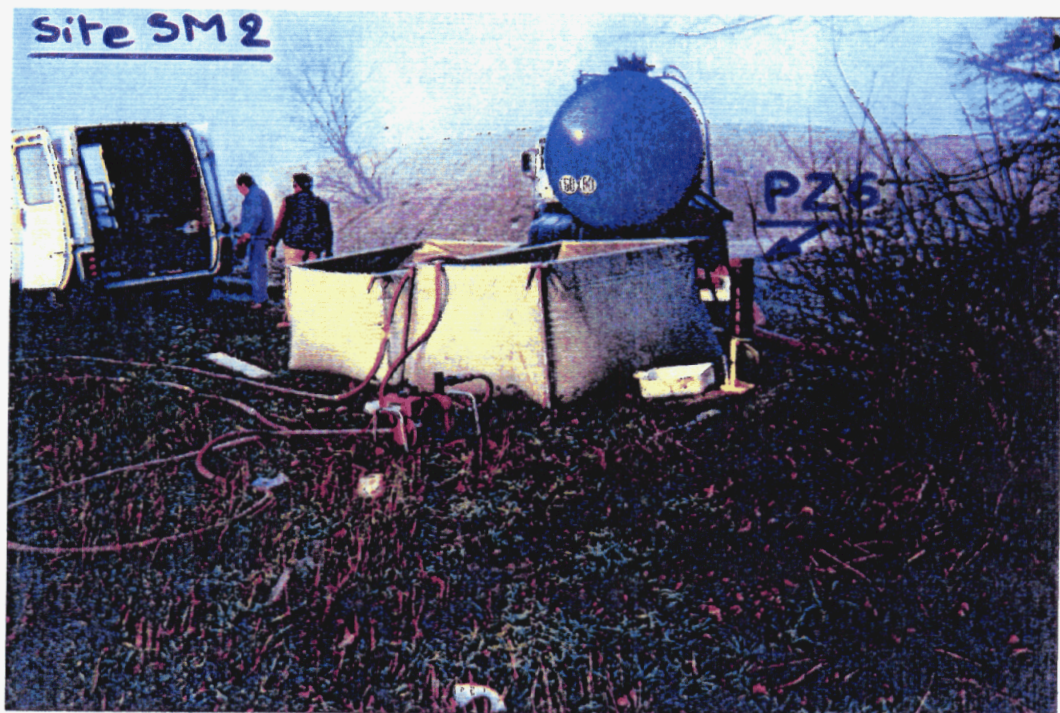


Photo 5 Injection du traceur I-Na dans le piézomètre PZ6 du site SM2



Photo 6 Piscines d'injection du traceur et de rinçage utilisées sur le site SM2 au piézomètre PZ6

ANNEXE

METHODOLOGIE GENERALE DES TRACEURS

Les traceurs

On appelle traceur d'une population dont on étudie l'évolution, tout élément ayant, dans les conditions de mise en oeuvre, un comportement en tout point identique à celle-ci et possédant un caractère spécifique permettant son identification. Cet élément peut être naturellement présent dans la population ou ajouté à celle-ci.

La Section d'Application des Traceurs a développé de nombreuses méthodologies originales et acquies depuis 30 ans l'expérience des techniques de marquage par traceurs radioactifs, chimiques ou fluorescents de matériaux très divers (eau, sable, vases, sève, déchets, catalyseur, ciments, gaz, polluants chimiques ou radiochimiques, etc...) et intervient dans les domaines de l'hydrologie, du génie des procédés et de l'environnement.



Etude des relations cours d'eau-nappe. Echantillonnage automatique dans les puits d'observation implantés dans la berge.

Les traceurs de l'eau

Le traceur idéal de l'eau est un de ses isotopes (^2H , ^3H , ^{17}O , ^{18}O). Si cela n'est pas réalisable pour des questions de coût, de disponibilité, de facilité de mesure, on sélectionne une substance dont le comportement dynamique, chimique et physico-chimique est identique à celui de l'eau dans les conditions d'application données.

Le choix définitif du traceur reste cependant soumis à d'autres critères dont les plus importants sont :

- toxicité nulle, au moins à partir des points de prélèvement,
- présence naturelle aussi faible que possible et détection de grande sensibilité permettant la mise en oeuvre de faibles quantités,
- mesure précise et simple donc peu coûteuse,
- faible prix de revient et approvisionnement aisé.

Résultant de ce compromis, les traceurs les plus couramment utilisés en hydrogéologie se répartissent selon trois familles :

Les traceurs radioactifs

. Le Tritium ^3H , isotope de l'hydrogène, marqueur des noyaux constitutifs de la molécule, émetteur de rayonnement β de faible énergie (18 Kev maximum) mesurable en laboratoire par scintillation liquide jusqu'à une concentration minimale de 5 U.T. (Unité Tritium) : 1 U.T. = 118 Bq.m^{-3} ,

. Les anions, qui n'interagissent pas ou très peu avec les sols eux mêmes anioniques, ^{131}I , ^{82}Br , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, émetteurs de rayonnement γ , de périodes radioactives respectivement 8 jours, 35 heures et 6 heures et mesurables "in situ" à l'aide d'un détecteur à scintillation jusqu'à une concentration minimale de 400 à 4000 Bq.m^{-3} .

Des contraintes réglementaires et psychologiques restreignent l'utilisation de ces traceurs aux applications limitées dans l'espace et le temps sur des sites éloignés des points de prélèvement d'eau.

Les traceurs chimiques

. Les anions I^- , (NaI), Br^- (NH_4Br), Cl^- (NaCl), ... mesurables en laboratoire par colorimétrie jusqu'à une concentration minimale de 10^{-8} à $10^{-9} \text{ kg.l}^{-1}$;

. Les complexes stables du Zn, Cr, Co, Ni avec des acides polyaminocarboxyliques (EDTA par exemple), mesurables en laboratoire par spectrophotométrie d'absorption atomique jusqu'à une concentration minimale de l'ordre de $10^{-8} \text{ kg.l}^{-1}$.

Les traceurs fluorescents

Les colorants xanthéniques, fluorescents en solution fortement diluée (au moins 10^5), tels Amino G acide, fluorescéine, Rhodamine B et WT, mesurables "in situ" jusqu'à des concentrations minimales de l'ordre respectivement de 10^{-9} à $10^{-11} \text{ kg.l}^{-1}$.

Les substances fluorescentes sont des molécules généralement de grande dimension, plus ou moins ionisées, qui sont susceptibles de subir des interactions avec les éléments constitutifs des sols si bien qu'en pratique, leur usage est limité au marquage des eaux superficielles ou des écoulements souterrains en milieu fissuré ou karstifié.

Le choix d'un bon traceur de l'eau dans les conditions d'applications données, résulte ainsi de l'étude du cas (échelle, nature et environnement des phénomènes à étudier) et de l'optimisation des critères de sélection du traceur.

Le marquage devant être représentatif de la population étudiée, l'injection "idéale" est obtenue par introduction du traceur de telle façon qu'il soit réparti de manière homogène en concentration dans cette population.

La détection peut s'effectuer "in situ" (traceurs radioactifs ou fluorescents) ou en différé (traceurs chimiques) après prélèvement d'échantillons.

APPROCHE SYSTEME APPLIQUEE A L'ETUDE DES TRANSFERTS DE FLUIDES

L'étude des transferts de fluides, aussi bien dans les écoulements superficiels que souterrains dans les aquifères des milieux poreux, fissurés ou karstifiés peut être abordée de deux manières :

- on peut tenter d'en obtenir une description exhaustive, à partir d'analyses rigoureuses sur des pas élémentaires, ce qui constitue le plus souvent une tâche insurmontable en raison de la complexité et du nombre d'informations à recueillir,

- on peut considérer le système comme une boîte noire et fonder la description de l'ensemble complexe sur son comportement, et sur la nature des relations qui existent entre les paramètres caractéristiques de son état et des perturbations qui s'exercent sur lui. On ne s'intéresse dès lors qu'aux relations existant entre les paramètres d'entrée et de sortie [*Rosnay, J. de*].

Selon *Lifermann*, doivent alors être précisés :

L'état des systèmes

Un système sera dit :

- . **univariable ou scalaire**, si à une seule grandeur d'entrée $E(t)$ correspond une seule grandeur de sortie $S(t)$,

- . **multivariable ou vectoriel**, si à plusieurs grandeurs d'entrée $E_i(t)$ correspondent plusieurs grandeurs de sortie $S_i(t)$.

Les propriétés des systèmes

Un système sera de plus :

- . **linéaire**, si à une combinaison linéaire de grandeurs d'entrée $E_1(t), E_2(t), \dots, E_n(t)$ agissant séparément, correspond une même combinaison linéaire de grandeurs de sortie $S_1(t), S_2(t), \dots, S_n(t)$,

- . **invariant**, si à une grandeur d'entrée $E(t)$ agissant au temps t correspond une grandeur de sortie $S(t)$, l'action de cette même grandeur d'entrée agissant au temps $t + \tau$ entraîne une grandeur de sortie $S(t + \tau)$.

La notion de Distribution de Temps de Séjour D.T.S.

Soit, une tranche élémentaire d'un fluide, que l'on peut par exemple matérialiser à l'aide d'un traceur, à l'entrée d'un système, dans des conditions d'écoulement permanent. Les modalités de restitution de cette tranche, sous l'effet des phénomènes dispersifs, traduisent à la sortie du système une fonction de restitution présentant un étalement dans le temps. Cette fonction est appelée Distribution des Temps de Séjour (D.T.S.) car elle peut être facilement ramenée (par normation en surface) à une distribution fréquentielle de passage, à la sortie du système entre $t = 0$ et $t = 0 + \Delta t$ des éléments de fluide de la tranche élémentaire entrés dans le système à l'instant $t = 0$. Cette D.T.S. est l'information la plus complète que l'on puisse fournir sur les modalités de transfert d'un fluide dans n'importe quel système considéré.

On caractérise ainsi un système, non pas par sa structure interne, mais par son action pour transformer une grandeur d'entrée $E(t)$ en une grandeur de sortie $S(t)$.

Si la grandeur d'entrée est une stimulation unitaire, du type **impulsion de Dirac** $\delta(t)$, la grandeur de sortie correspondante est la réponse impulsionnelle de ce système, notée $h(t)$, soit exactement la D.T.S. du fluide dans ce système :

$$E(t) = \delta(t) \quad \Rightarrow \quad S(t) = h(t) \quad (1)$$

Pour les **systèmes scalaires invariants**, la grandeur d'entrée $E(t)$ quelconque est liée à la grandeur de sortie $S(t)$ par :

$$S(t) = \int_{-\infty}^t E(u) * (t - u) du \quad (2)$$

Cette **intégrale, dite de convolution** est notée symboliquement :

$$S(t) = E(t) * h(t) \quad (3)$$

Son écriture signifie que toute grandeur peut être considérée comme la superposition de réponses liées à une infinité d'impulsions de Dirac appliquées à l'entrée.

Ainsi, relativement à une grandeur de sortie $S(t)$ résultant d'une grandeur d'entrée $E(t)$ quelconque, l'opération numérique de **déconvolution** permet de déterminer $h(t)$, la D.T.S. du système considéré :

$$h(t) = S(t) ** E(t) \quad (4)$$

Pour les **systèmes vectoriels invariants**, la relation de convolution précédente se généralise selon :

$$S(t) = E(t) * [h(t)] \quad (5)$$

(la D.T.S. du système $[h(t)]$ est une matrice).

Dans le cas le plus général des **systèmes vectoriels variants**, les D.T.S. varient en fonction du temps :

$$S(t) = E(t) * h [t, \tau] \quad (6)$$

(t se rapporte à une échelle de temps relatif, τ à une échelle de temps absolu).

Détermination de la D.T.S. par la méthode des traceurs

Si l'on considère la **fonction concentration-temps $C(t)$** traduisant, à la sortie d'un système, le passage d'un traceur préalablement introduit à l'entrée de façon instantanée et en concentration homogène dans le fluide à l'instant $t = 0$, la D.T.S. s'obtient aisément :

$$h(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad (7)$$

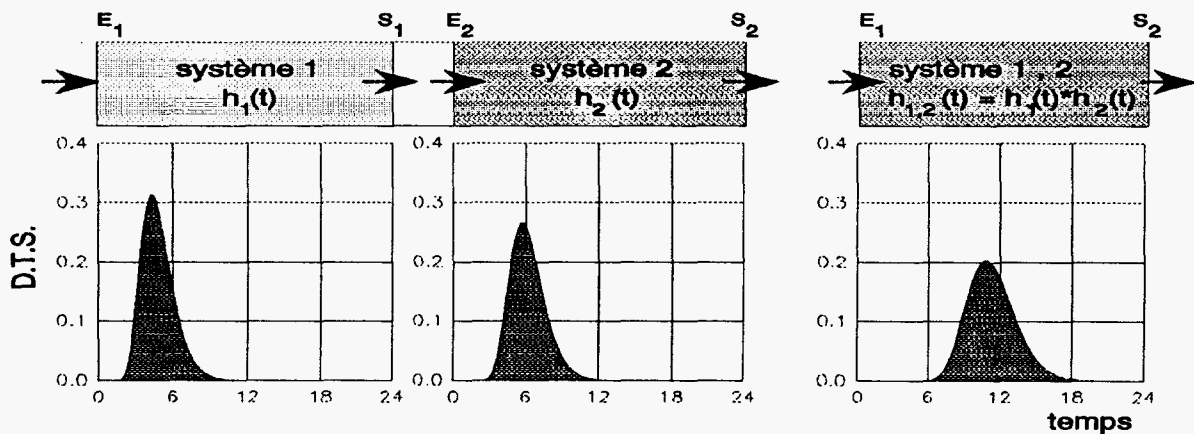
Cette formulation montre bien le sens physique de la D.T.S. qui décrit les propriétés d'un système par la distribution, en fonction du temps, des probabilités de passage à la sortie, d'un élément représentatif d'une population, introduit à l'entrée à l'instant $t = 0$.

Si le traceur peut être considéré comme un bon traceur du fluide, le rapport nombre de particules de traceur / nombre de particules du fluide est constant dans tout élément constitutif du système et la D.T.S. obtenue en traceur est identique à celle du fluide considéré.

Dans le cas des systèmes linéaires, il a été montré que l'une des propriétés fondamentales de la D.T.S. est d'être liée aux fonctions d'entrées $C_E(t)$ et de sortie $C_S(t)$ par la relation de convolution :

$$C_S(t) = C_E(t) * h(t) \quad (8)$$

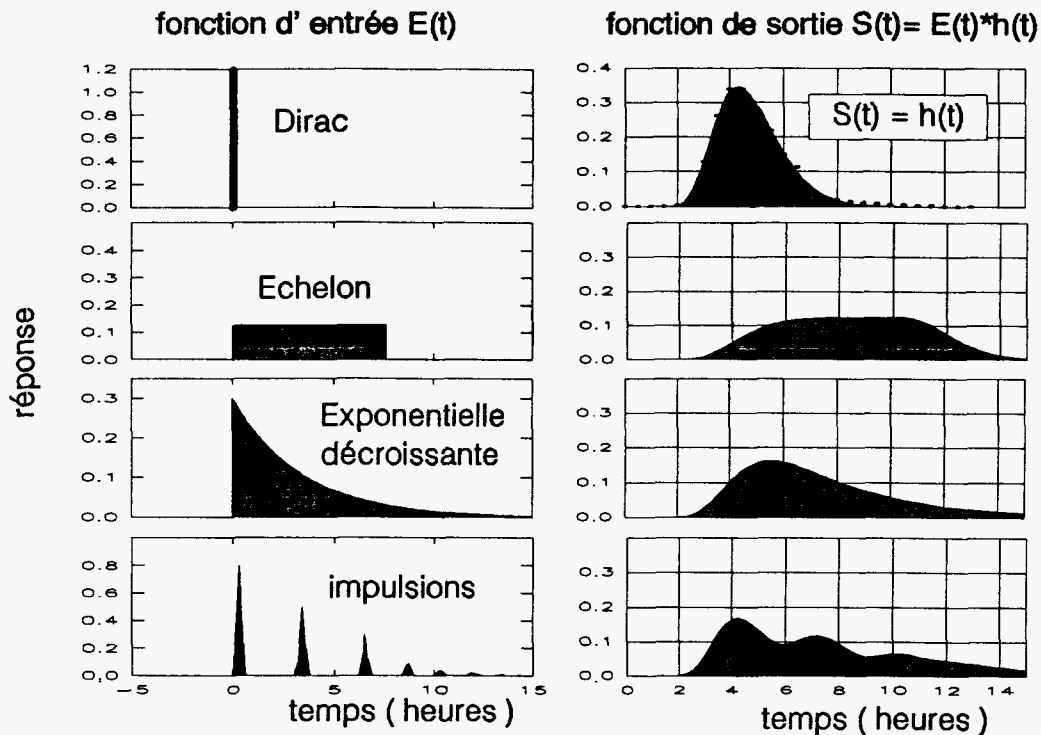
Le produit de convolution étant associatif et commutatif, cette relation générale permet d'obtenir la D.T.S. globale d'un ensemble dont on connaît les D.T.S. des systèmes élémentaires.



$$h_{1,2}(t) = h_1(t) * h_2(t) \quad (9)$$

Cette situation se rencontre en pratique lorsque, pour réduire la durée expérimentale et s'affranchir des risques de variation des conditions d'écoulement, pour réduire la concentration initiale du traceur et minimiser une éventuelle nuisance physique voire une toxicité, et également pour pallier l'imprécision des mesures à très faible concentration pour la définition des fins de courbes très étalées, on détermine la D.T.S. d'un système de grande longueur (ou encore de D.T.S. de grande durée) à partir des D.T.S. mesurées sur chacun des tronçons en série qui scindent arbitrairement le système.

De plus, relativement à une fonction de sortie $C_S(t)$ résultant d'une fonction d'entrée $C_E(t)$ quelconque, l'opération numérique de **déconvolution** permet de déterminer $h(t)$, la D.T.S. du système considéré.



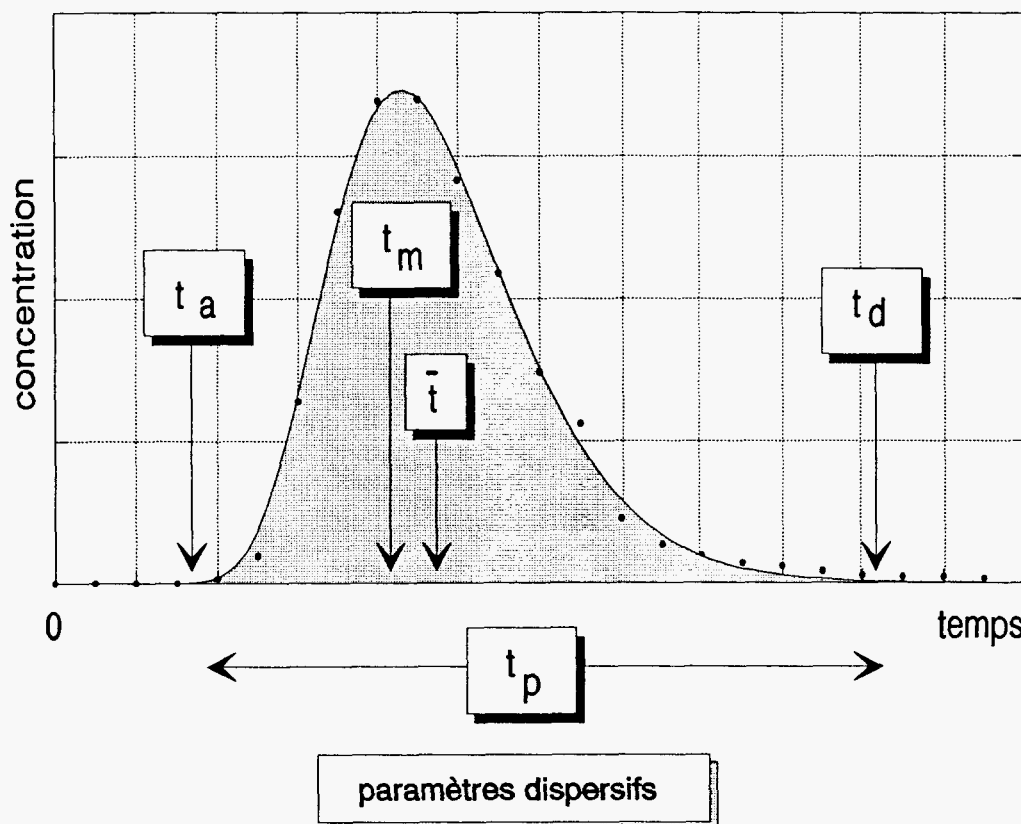
$$h(t) = C_S(t) ** C_E(t) \quad (10)$$

Exploitation des D.T.S.

paramètres temporels caractéristiques

Les premières informations fournies par une D.T.S. sont les paramètres temporels caractéristiques de transfert, à savoir :

- t_a = **temps d'apparition**, temps minimal de transfert,
- t_m = **temps modal**, correspondant à la date de fréquence maximale de passage,
- \bar{t} = **temps moyen** de séjour dans le système, abscisse du moment d'ordre 1, centre de gravité de la D.T.S.,
- t_d = **temps de disparition**, fin de passage, temps maximal de transfert,
- $t_p = t_d - t_a$, durée de passage à la sortie du système.



Suivant le type d'écoulement et la structure du milieu constitutif, les systèmes vont présenter des D.T.S. différentes. Celles-ci peuvent, dans de nombreux cas, être comparées à celles que fournissent des modèles représentatifs des modalités de dispersion dans les systèmes considérés. *Levenspiel* et *Smith* ont, par exemple, développé des méthodes pour déterminer le coefficient de dispersion axiale à partir des résultats fournis par les expériences de traceurs.

En hydrogéologie, on peut avoir recours à des modèles numériques sophistiqués mettant en oeuvre les techniques dites des éléments ou des différences finis. Dans la plupart des cas, on peut néanmoins avoir recours à des modèles simples qui, après optimisation par ajustement numérique aux données expérimentales, fournissent des valeurs réalistes des paramètres dispersifs des systèmes considérés.

Les modèles d'application courante sont :

Le modèle piston

Ce modèle postule que le fluide avance en bloc (comme un piston dans un cylindre) en tranches parallèles sans échange de matière entre elles. La D.T.S. de tels systèmes est :

$$h(t) = \delta(t - \tau) \quad (11)$$

dans laquelle :

δ = distribution de DIRAC,

V = volume du système,

t = temps réel,

Q = débit qui traverse le système.

τ = temps moyen réel (V / Q),

En toute rigueur, ce type de transferts sans aucune dispersion se rencontre rarement dans les systèmes hydrogéologiques.

Le modèle piston-dispersion

Ce modèle très simple rend compte des phénomènes dispersifs dans l'axe de l'écoulement. Il donne, pour un coefficient de **dispersion longitudinale** D_L une fonction de sortie qui est solution de l'équation générale de la dispersion :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{u} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (12)$$

dans laquelle : \bar{u} = vitesse moyenne réelle, x = distance entrée-sortie.

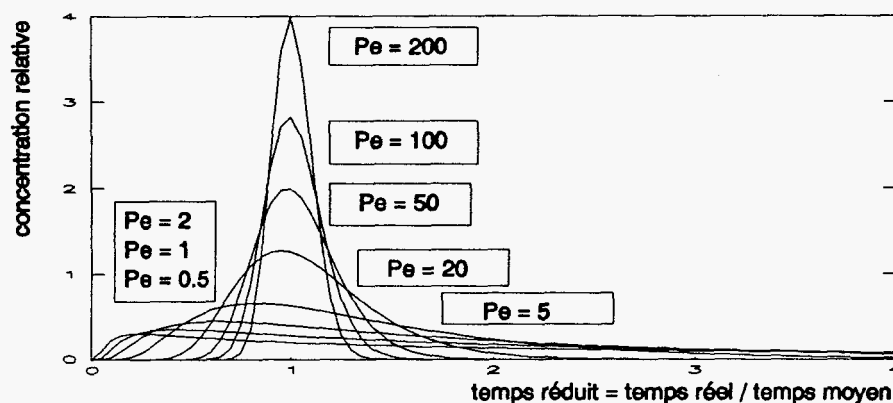
Si m représente la masse de traceur injecté dans un écoulement unidirectionnel, latéralement confiné, et de section S , mais ouvert à la dispersion à l'entrée et à la sortie, la solution de l'équation précédente est alors :

$$C(x, t) = \frac{m}{S\sqrt{4\pi D_L t}} \exp - \frac{(x - \bar{u}t)^2}{4D_L t} \quad (13)$$

dans laquelle D_L a les dimensions $L^2.T^{-1}$.

On remarque que si D_L diminue, $C(x, t)$ tend vers une distribution normale (Gaussienne).

Le nombre de Peclet, $Pe = \bar{u}L/D_L$ est un indicateur de l'intensité de la dispersion dans un système de longueur L : un nombre de Peclet infini représente un écoulement de type purement piston, sans dispersion, alors qu'un nombre de Peclet faible traduit un écoulement très dispersif.



Ce modèle est d'emploi courant en hydrogéologie et représente généralement bien les transferts dans les systèmes élémentaires pour des valeurs du nombre de Peclet supérieures à 3.

Le coefficient de dispersion longitudinale D_L étant fonction de la vitesse moyenne \bar{u} , on lui préfère souvent le **coefficient intrinsèque de dispersion** α_L , encore appelé dispersivité, $\alpha_L = D_L / \bar{u}$.

La relation (13) s'écrit alors :

$$C(x, t) = \frac{m}{S \sqrt{4 \pi \alpha_L \bar{u} t}} \exp \left[-\frac{(x - \bar{u}t)^2}{4 \alpha_L \bar{u} t} \right] \quad (14)$$

Le modèle se généralise aisément au traitement des cas en deux dimensions (les puits ou les points de mesure sont dans un plan xy , l'axe des x étant dans la direction de l'écoulement) :

$$C(x, y, t) = \frac{m}{S \sqrt{4 \pi \alpha_L \alpha_T \bar{u} t}} \exp \left[-\frac{(x - \bar{u}t)^2}{4 \alpha_L \bar{u} t} - \frac{y^2}{4 \alpha_T \bar{u} t} \right] \quad (15)$$

où $\alpha_T = D_T / \bar{u}$ est la dispersivité transversale.

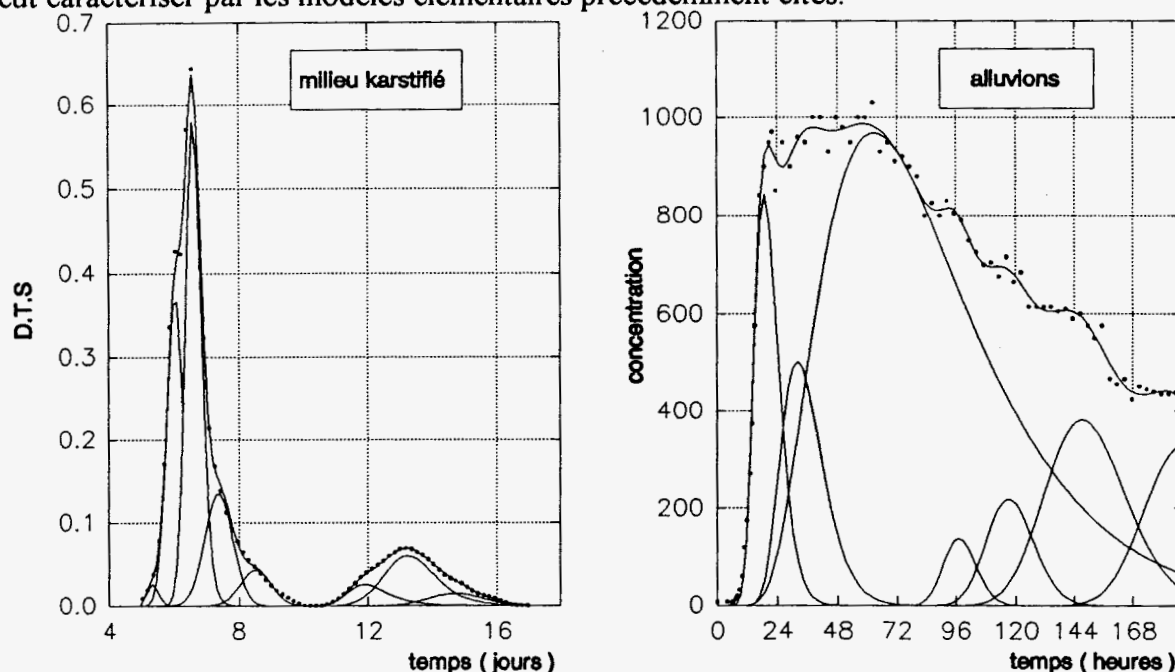
Dans ce modèle, α_L et α_T sont généralement tenus constants. On peut également quantifier leur évolution en fonction du temps ou de la distance, par des lois empiriques du type :

$$\alpha_T = \alpha_\infty \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{T} \right) \right] \quad (16)$$

qui traduisent un accroissement jusqu'à une valeur asymptotique α_∞ constante.

Les modèles composites

Les D.T.S. présentent parfois des formes complexes qu'il est possible de comparer à celles résultant d'associations, en série ou en parallèle, de différentes composantes que l'on peut caractériser par les modèles élémentaires précédemment cités.



Cette situation se rencontre souvent dans la pratique lorsque l'aquifère présente des chemins de circulation préférentiels ou lorsqu'il est constitué d'une superposition de strates de différentes perméabilités.

Le modèle mélangeur parfait

Ce modèle postule que tous les éléments entrant dans le système se mélangent instantanément de manière homogène dans tout le volume du système. Il en résulte alors, qu'à chaque instant, quel que soit le point considéré à l'intérieur du système ou à la sortie de celui-ci, les concentrations sont égales. $C(t)$ peut ainsi être déterminée par une mesure de concentration en un point quelconque à l'intérieur ou à la sortie du système.

$$C(t) = C_0 \exp - \frac{Q}{V} t \quad (17)$$

La D.T.S. d'un système mélangeur parfait est une fonction exponentielle.

Un exemple d'application type est le comportement d'un puits d'injection dans lequel, après injection du traceur, la concentration est maintenue homogène sur toute la hauteur du volume d'eau libre par l'intermédiaire d'un pompage en recirculation.

Les modèles empiriques

Dans certains cas, on peut avoir recours à des fonctions souvent utilisées en chromatographie pour caractériser des phénomènes dispersifs. Leur intérêt est qu'elles ont une forme analytique bien étudiée et qu'elles se prêtent facilement aux compositions et aux ajustements numériques. A titre d'exemple, on peut citer (les paramètres a_i étant les paramètres ajustables) :

la fonction gaussienne normée

$$y = \frac{a_0}{2\pi\sqrt{a_2}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - a_1}{a_2} \right)^2 \right] \quad (18)$$

$a_0 = \text{aire de la fonction}, \quad a_1 = \text{centre}, \quad a_2 = \text{largeur}.$

la fonction gaussienne modifiée exponentielle (convolution d'une gaussienne par une exponentielle).

$$y = \frac{a_0}{2a_3} \exp \left[\frac{\frac{a_2^2}{2a_2^2} + \frac{a_1 - x}{a_3}}{\right] \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x - a_1}{\sqrt{2a_2}} - \frac{a_2}{\sqrt{2a_3}} \right) + 1 \right] \quad (19)$$

avec $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$ $a_3 = \text{constante de décroissance exponentielle}.$

la fonction de Giddings

$$y = \frac{a_0}{a_2} \sqrt{\frac{a_1}{x}} I_1 \left(2 \frac{\sqrt{a_1 x}}{a_2} \right) \exp \left(-\frac{x - a_1}{a_2} \right) \quad (20)$$

$I_1 = \text{fonction de Bessel modifiée d'ordre 1}.$

Lorsque le phénomène physique considéré est bien caractérisé (échange entre un flux et un volume mort par exemple), on peut bâtir un **modèle spécifique** mettant en oeuvre une solution analytique ou numérique propre au problème.

ETUDE DES TRANSFERTS DE L'EAU OU DE SUBSTANCES TOXIQUES ENTRE UNE ZONE D'INFILTRATION DANS UN COURS D'EAU ET UN CAPTAGE

Etude directe

La détermination, lors d'une seule opération de traçage, des paramètres de transfert de l'eau entre une zone d'infiltration dans un cours d'eau et un ou plusieurs captages est possible chaque fois que :

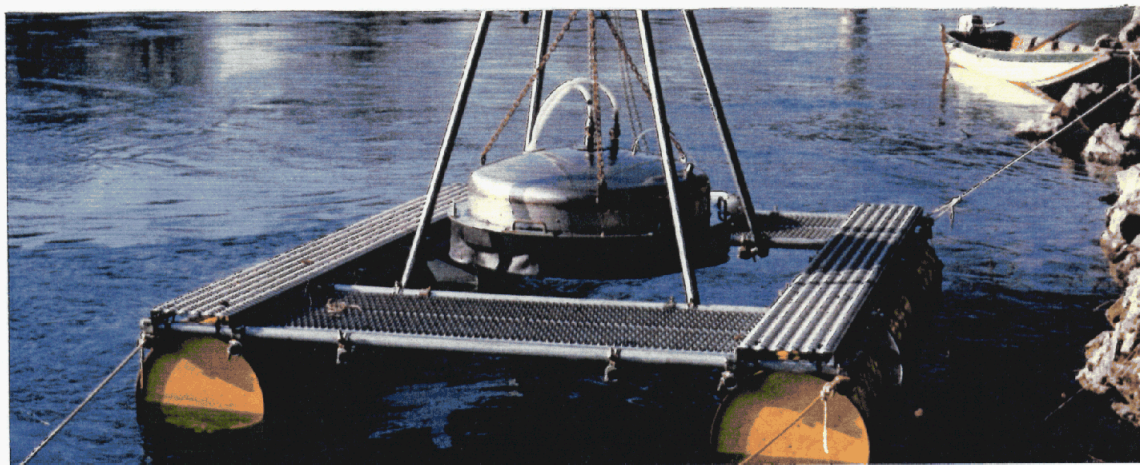
- les temps de transfert estimés n'impliquent pas une durée expérimentale trop importante,
- la dilution dans l'aquifère est modeste et ne conduit pas à la mise en oeuvre d'une quantité trop importante de traceur pour en permettre la détection dans le ou les captages concernés.

Modalité d'injection du traceur

L'injection du traceur directement dans le cours d'eau ne serait pas la procédure adaptée à cette étude car elle nécessiterait la mise en oeuvre d'une très importante masse de traceur. Il faudrait en effet, dans ces conditions, que le marquage de l'écoulement soit homogène au droit de la plage d'infiltration pour que la loi d'entrée du traceur dans l'aquifère soit connue et surtout que la fraction infiltrée soit suffisante pour permettre, après dilution dans la nappe, la détection du traceur dans le ou les captages.

Cette procédure conduirait de plus à ce que l'entrée du traceur dans l'aquifère s'effectue au travers de toute la surface d'infiltration dans le cours d'eau, ne permettant pas, dans ces conditions, de définir la géométrie du système étudié, en particulier la surface d'entrée.

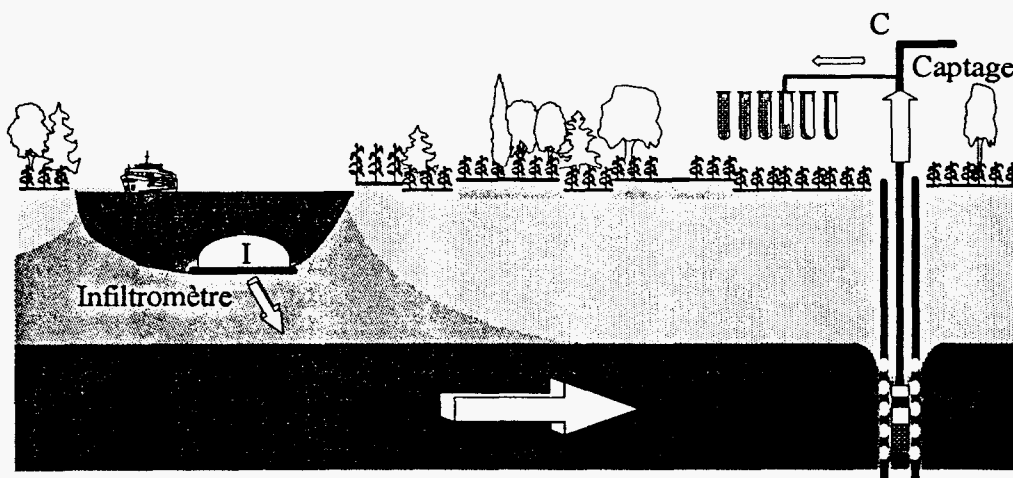
L'appareil "infiltromètre" réalisé par la SAT permet le confinement, au contact de la zone d'infiltration choisie, d'un volume d'eau en équilibre hydrostatique avec l'eau environnante dans le cours d'eau. Ce confinement est réalisé par une embase métallique semi-lenticulaire délimitant une emprise au sol de un mètre carré. L'étanchéité de confinement est assurée par des jupes verticales concentriques en caoutchouc disposées sous une couronne périphérique débordant la partie cylindrique de l'embase de manière à assurer un contact continu avec le sol, même sur fonds irréguliers ou tapissés de galets.



C'est dans ce volume confiné qu'est effectuée l'injection de traceur, sans perte par entraînement dans l'écoulement superficiel, autorisant ainsi la mise en oeuvre d'une quantité modeste pour le marquage significatif du flux d'infiltration sur une surface limitée connue.

Ensemble étudié entre la plage d'infiltration et le captage

L'ensemble étudié est constitué de trois systèmes en série :



- le volume d'eau confiné sous l'infiltromètre I,
- le volume aquifère des circulations entre l'infiltromètre I et le captage C,
- le volume d'eau libre dans le captage C.

L'objectif étant de déterminer la D.T.S. $h_A(t)$ dans le système aquifère entre I et C, l'application de la méthode de traceur développée par *Gaillard* doit tenir compte de ces trois systèmes en série.



Pour que le marquage de l'eau à l'entrée dans le système aquifère soit convenable, c'est-à-dire en tout point de l'entrée, homogène en concentration, les quantités a_i de traceur, introduites au travers de chaque élément s_i de la surface d'infiltration doivent être proportionnelles aux débits q_i respectifs dans chacune d'elles. Il est montré qu'une homogénéisation du volume confiné sous l'infiltromètre, par exemple par pompage en circuit fermé pendant un temps au moins égal à sa D.T.S. réalise cette condition.

Les quantités de traceur a_i introduites au travers de chaque élément s_i de la surface d'infiltration sont :

$$a_i = C(t).q_i \quad (22)$$

c'est-à-dire proportionnelles aux débits dans chaque élément de la surface d'infiltration.

Le volume d'eau confiné sous l'infiltromètre I peut alors être considéré comme un système mélangeur parfait dans lequel la fonction de disparition du traceur est identique à la fonction d'entrée dans l'aquifère et est d'allure exponentielle. La D.T.S. dans ce système est :

$$h_i(t) = \frac{C_0 \exp\left(-\frac{Q}{V}t\right)}{\int_0^\infty C(t)dt} \quad (23)$$

avec C_0 = concentration en traceur au temps $t = 0$,
 Q = débit d'infiltration au travers de la surface de confinement,
 V = volume confiné sous l'appareil.

Ainsi, entre l'entrée du traceur dans l'infiltromètre I et sa sortie dans le captage C, la D.T.S. $h_{I,C}(t)$ est la réponse globale (produit de convolution) des D.T.S. de chaque système en série.

$$h_{I,C}(t) = h_I(t) * h_A(t) * h_C(t) \quad (25)$$

C'est donc par une double opération de déconvolution que l'on peut, en toute rigueur, déterminer la D.T.S. $h_A(t)$ du système aquifère.

$$h_A(t) = h_{I,C}(t) ** h_I(t) ** h_C(t) \quad (25)$$

En pratique, cette opération n'est nécessaire que lorsque les D.T.S. $h_I(t)$ et $h_C(t)$ ont des durées notables par rapport à $h_{I,C}(t)$. Si tel n'est pas le cas, $h_{I,C}(t)$ sera considérée égale à $h_A(t)$, D.T.S. recherchée de l'aquifère.

Obtention et interprétation des D.T.S.

Dans le volume confiné sous l'infiltromètre

Suite à l'injection du traceur dans le volume confiné, l'enregistrement de la variation de concentration dans ce volume, ou, plus simplement sur le circuit d'homogénéisation de celui-ci, permet d'obtenir la D.T.S. dans ce système, fonction d'entrée du traceur dans l'aquifère. Son allure exponentielle, permet de déterminer le débit spécifique d'infiltration q_i au travers de la surface S de confinement, selon la relation :

$$q_i = \frac{V}{S \cdot \Delta t} \cdot \text{Log} \frac{C_0}{C}$$

avec V = volume confiné au contact du sol,
 Δt = temps d'observation ($t - t_0$),
 C_0, C = concentration respectivement au temps t_0 et t .

En considérant la durée $T_{1/2}$, période de décroissance d'un facteur 2 de la concentration dans le volume confiné pour laquelle $\text{Log} \frac{C_0}{C} = 0,693$ il vient :

$$q_i = \frac{V}{S \cdot T_{1/2}} \cdot 0,693$$

Dans le captage d'observation

L'observation dans le captage C du passage du traceur injecté dans le volume confiné sous l'infiltromètre I est la réponse globale entre l'entrée du traceur dans I et sa sortie dans C. Si comme indiqué précédemment, les D.T.S. $h_i(t)$ et $h_C(t)$ sont négligeables devant la D.T.S. globale, cette dernière sera considérée être la D.T.S. $h_A(t)$ de l'aquifère.

Cette fonction permet de définir directement les valeurs des paramètres temporels caractéristiques de transfert de l'eau dans l'aquifère.

L'ajustement numérique de cette fonction $h_A(t)$ au modèle "piston-dispersion" permet alors de déterminer les valeurs des paramètres dispersifs du transfert considéré : \bar{u} , α_L .

Estimation de la fraction restituée à différents captages

A partir d'une même entrée sur la plage d'infiltration dans un cours d'eau, les circulations dans l'aquifère, sous l'effet des phénomènes dispersifs, peuvent intéresser plusieurs captages.

Si l'on dispose de l'enregistrement du débit de pompage Q_i dans chaque captage pendant le passage du traceur, la pondération de la fonction $C_i(t)$ observée en traceur par la loi de débit correspondante permet de déterminer la masse de traceur m_i restituée.

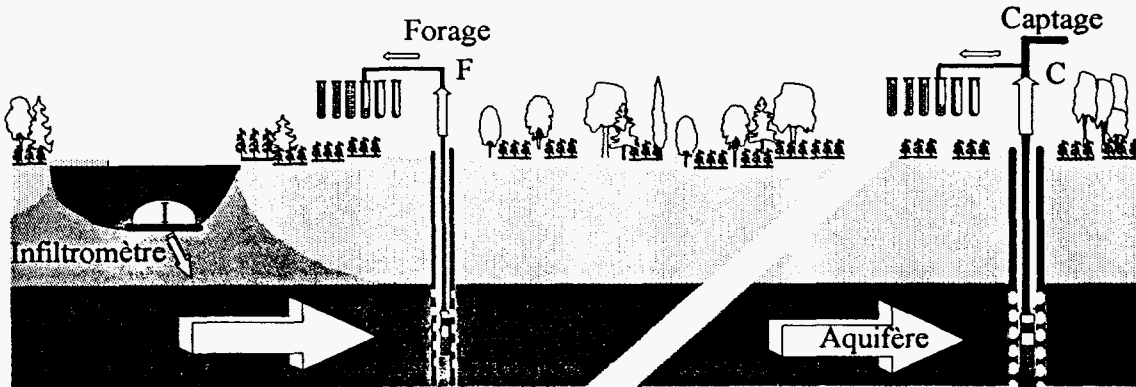
$$m_i = \int_0^{\infty} C_i(t) Q_i(t) dt$$

Le rapport de la ou des masses restituées en traceur à la masse injectée est dans le rapport des apports en eau depuis l'entrée considérée sur la plage d'infiltration. Si le bilan de traceur sur l'ensemble des captages n'est pas de 1, le déficit traduit la part de l'alimentation non interceptée.

Transfert dans la zone d'infiltration

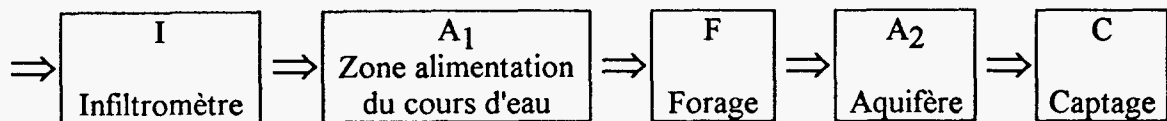
Si l'on dispose d'un ou plusieurs forages crépinés implantés dans la berge en bordure du cours d'eau au droit de la surface d'injection du traceur sur la plage d'infiltration, l'observation du passage du traceur dans ceux-ci permet de déterminer les modalités de transfert de l'eau dans cette zone aquifère généralement caractérisée par un fort gradient hydraulique et une plus grande variabilité de celui-ci que dans la zone plus éloignée du cours d'eau.

L'ensemble considéré est dans ce cas constitué de quatre systèmes en série :



- le volume confiné sous l'infiltromètre I,
- le volume aquifère A_1 des circulations entre l'infiltromètre I et le forage F dans la zone à fort gradient hydraulique,
- le volume aquifère A_2 des circulations entre le forage F et le captage C,
- le volume d'eau libre dans le captage C.

Comme précédemment, c'est par une double opération de déconvolution que l'on peut déterminer les D.T.S. élémentaires :



- $h_{A_1}(t)$ dans la zone d'alimentation proche du cours d'eau,

$$h_{A_1}(t) = h_{I,F}(t) ** h_I(t) ** h_F(t)$$

- $h_{A_2}(t)$ dans l'aquifère influencé par le captage,

$$h_{A_2}(t) = h_{F,C}(t) ** h_F(t) ** h_C(t)$$

et la D.T.S. de l'ensemble aquifère $h_A(t)$ entre la plage d'infiltration et le captage,

$$h_A(t) = h_{I,C}(t) ** h_I(t) ** h_C(t)$$

L'ajustement de ces D.T.S. au modèle "piston-dispersion" permet alors d'obtenir les paramètres temporels caractéristiques et les paramètres dispersifs de chacun des deux systèmes aquifères en série et de l'ensemble entre plage d'infiltration et captage.

Méthode d'extrapolation

Telle qu'obtenue, la D.T.S. de l'ensemble aquifère $h_A(t)$ est relative à des conditions hydrodynamiques précises (charge d'alimentation de la nappe à partir du cours d'eau et débit de pompage). Il n'est pas nécessaire, pour déterminer cette D.T.S. dans différentes conditions hydrodynamiques possibles, de procéder à de nouveaux traçages.

Différents types de modèles mathématiques convectifs de simulation d'écoulement ont été développés. Ils permettent par exemple d'obtenir, après calage, la répartition spatiale des vitesses et lignes de courant.

Les résultats des traçages permettent alors à partir du paramètre α_L de greffer au modèle convectif un modèle dispersif représentant l'effet des variations aléatoires des vitesses le long de chaque ligne de courant. Cette composition donne alors les éléments essentiels qui permettent de déterminer les paramètres de transfert entre tous points de l'espace considéré (isotemps de transfert ou isoconcentrations à différentes dates).

Bibliographie

- *Gaillard, B.* Méthode de traceur 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 Université GRENOBLE, juin 1976.
- *Klotz, D.* Gesellschaft für strahlen und Umweltforschung m b h Institut für Radiohydrometric - mai 1978 - GSF - Bericht R 176.
- *Levenspiel, O ; Smith, D.* Chemical reaction Engineering - John Wiley and Sons - Inc London (1976).
- *Lifermann, J.* Systèmes linéaires variables d'états - Masson et Cie - PARIS (1972).
- *Ogilvi, N.A.* Electroliceskil metod opredelenija skorostej filtracii - Bjull. O.N.T.I. 4, Gosgeoltehzdat (1958).
- *Rosnay, J. de.* Le macroscope - ed Seuil (1966).