

C. E. A. - C. E. N. G.

SARR/GARTHI/RAP/79-10/PC/AB

D I V I S I O N de C H I M I E

DEPARTEMENT de CHIMIE APPLIQUEE

SERVICE D'APPLICATIONS des
RADIOELEMENTS et des RAYONNEMENTS

JUIN



n° 6163

Groupe des Applications de la
Radioactivité et des Traceurs
en Hydrologie et dans l'Industrie

ESTIMATION PAR TRACAGE DU RECYCLAGE **DES**
EAUX D'EXHAURE DANS LES MINES DE FER DU
BASSIN DU TJOIGOT

Convention GR-760.836

P.COROMPT - P.MOUYON - G.BEAUDOING

H.SANTOS-COTTIN - B.VILLE

R E S U M E

Une partie des pluies qui tombent sur le massif calcaire recouvrant le gisement de minerai de fer de la région de BRIEY s'infiltré jusqu'aux galeries de mines. Après drainage, les eaux infiltrées sont rejetées dans les ruisseaux de la surface à l'aide de puissantes pompes électriques. Comme une partie des eaux parait se réinfiltrer depuis les lits des ruisseaux vers les galeries de mines, une importante quantité d'énergie électrique est dépensée en pure perte. Ce phénomène aboutit également à une surestimation des ressources en eaux lorsqu'on se réfère aux volumes exhaurés par les mines de fer.

Les spécialistes ont mis en évidence des taux d'infiltration d'eaux rejetées dans les ruisseaux atteignant 50 % et certaines manifestations hydrogéologiques : rapidité de l'augmentation de débit des venues en fond de mines après les pluies, les ont incité à penser que les temps de transfert des eaux ne dépassent pas quelques jours.

L'étude confiée au CENG avait pour objectif la détermination précise de la valeur du taux de recyclage des eaux.

Les campagnes de mesure exécutées à cet effet par le Groupe d'Applications de la Radioactivité et des Traceurs en Hydrologie et dans l'Industrie du C.E.N.G. ont comporté :

- a/ Une détermination préliminaire des Réponses Impulsionnelles des écoulements de chacun des ruisseaux, afin d'évaluer l'étalement du traceur à l'entrée de la retenue de BRIEY et contrôler son niveau de concentration dans ces eaux qui servent à l'alimentation urbaine.
- b/ Durant l'été 1977, le marquage instantané des eaux rejetées par quatre points d'exhaure et le prélèvement durant les semaines suivantes d'échantillons des eaux exhaurées en ces mêmes points. Cette première campagne a montré que dans les 8 mois qui suivent le marquage des eaux :
 - le traceur ne ressort qu'en deux points d'exhaure : **SAINT PIERREMONT** aval et amont.
 - le temps de transit dans le sous-sol du traceur et donc des eaux recyclées est de 3 à 5 mois.

Le taux de recyclage mesuré aux points d'exhaure de SAINT PIERREMONT aval et amont est voisin de 12 % seulement.

- c/ Durant l'été 1978, un nouveau marquage instantané, mais avec une quantité de traceur nettement plus élevée, des eaux rejetées par l'exhaure d'ANDERNY. Neuf mois de prélèvement d'échantillons aux quatre points d'exhaure du bassin n'ont pas permis de mettre en évidence une résurgence de l'eau marquée.
- d/ **A** l'automne 1978, une détermination du taux d'infiltration des eaux de l'exhaure d'ANDERNY dans le lit du Ruisseau de la Vallée. Sur les quatre premiers kilomètres de ce ruisseau, 20 % des eaux exhaurées s'infiltrent dans le sous-sol.

Cette étude a donc montré :

- Que les temps de transit des eaux dans le sous-sol sont nettement plus longs que les spécialistes ne le supposaient.
- Que les taux de recyclage obtenus demeurent assez faibles.

En fait, seuls deux recyclages de durées inférieures à 8 mois ont pu être mis en évidence, les autres sont probablement nuls où ne se manifestent qu'au bout de temps supérieurs à l'année.

S O M M A I R E

	<u>Pages</u>
I - INTRODUCTION	1
II - POSITION DU PROBLEME	2
11.1. Configuration du site	2
11.2. Etudes antérieures	4
11.3. Hypothèses de travail	6
III - METHODOLOGIE DES ESSAIS	8
111.1. Détermination du taux d'infiltration par recyclage d'un traceur	8
111.2. Détermination du taux d'infiltration par bilans de traceurs dans l'écoulement des ruisseaux	9
111.3. Etude de la dynamique d'écoulement des eaux d'exhaure dans les ruisseaux	9
IV - DETERMINATION DES REponses IMPULSIONNELLES DES RUISSEAUX	11
IV.1. Essais de Juillet 1977	11
IV.2. Essais de Septembre 1977	12
IV.3. Analyse des résultats	12
V - ESSAIS DE DETERMINATION DU TAUX D'INFILTRATION PAR RECYCLAGE D'UN TRACEUR	14
V.1. Conditions des essais	14
V.2. Essais sur le bassin du Woigot	16
V.3. Essais sur le bassin du Ruisseau de la Vallée	18
V.4. Prélèvements complémentaires	19
V.5. Discussion des résultats	20
VI - ESSAIS COMPLEMENTAIRES DE DETERMINATION DU TAUX D'INFILTRATION DES EAUX DE L'EXHAURE D'ANDERNY	23
VI.1. Nouvel essai de détermination du taux d'infiltration par recyclage d'un traceur	23
VI.2. Détermination directe du taux d'infiltration par bilans différentiels de traceur	26
VII - CONCLUSION	

I - INTRODUCTION

Les mines d'ANDERNY, TUCQUEGNIEUX et SAINT PIERREMONT reçoivent les infiltrations d'eaux pluviales qui traversent les massifs sédimentaires (calcaires du Dogger) recouvrant la couche ferrifère. Ces eaux sont drainées par les galeries, rassemblées dans des réservoirs tampons souterrains (albraques), puis rejetées dans les ruisseaux de la surface au moyen de puissantes pompes électriques.

En raison de la perméabilité du sous-sol karstique, présence de fissurations, il apparaît qu'une partie du débit de ces ruisseaux et donc des eaux rejetées, se réinfiltre vers les galeries de mine. Une fraction τ des eaux pompées (eaux d'exhaure) disparaît ainsi dans le sous-sol et doit être à nouveau extraite.

D'autre part, il est prévu de capter une partie de ces eaux d'exhaure pour l'alimentation des agglomérations de la vallée de la Fensch.

Il est donc important de pouvoir déterminer le véritable volume d'eau rejeté quotidiennement par les mines et réellement disponible.

Aussi à la demande de l'Agence de Bassin RHIN-MEUSE, le Groupe d'Applications de la Radioactivité et des Traceurs à l'Hydrologie et à l'Industrie (GARTHI) du Centre d'Etudes Nucléaires de GRENOBLE a entrepris une étude visant à :

- Evaluer le taux de recyclage par infiltration des eaux exhaurées.
- Déterminer les Réponses Impulsionnelles des écoulements de ces eaux d'exhaure dans les lits des ruisseaux où elles sont déversées.

II - POSITION DU PROBLEME

11.1. Configuration du site :

A/ En surface

En surface le site est drainé par deux vallées qui confluent quelques kilomètres en amont de BRIEY.

La zone Ouest du site, essentiellement constituée par le plateau d'ANOUX, est parcourue par le ruisseau le Woigot et ses affluents : Ruisseau d'Hapre, Grand Rû et Ruisseau des Froides Fontaines. Dirigée selon l'axe Nord-Ouest-Sud-Est la vallée du Woigot s'abaisse de 250 mètres à 200 mètres en une dizaine de kilomètres. Après avoir traversé BRIEY le Woigot rejoint la rivière Orne.

Trois points d'exhaure alimentent le Woigot et ses affluents. Implantés au nord du village de TUCQUEGNIEUX, près du pont de la RN 52 bis franchissant le Ruisseau d'Hapre et au niveau de l'ancienne piscine de MANCIEULLES, (voir carte figure 1), ces exhaures déversent respectivement les eaux des mines de TUCQUEGNIEUX, et de SAINT PIESREMONT (station aval et station amont). En abrégé ces trois points d'exhaure seront désignés plus bas dans le texte respectivement par les sigles : T, SAV et SAM.

La zone Est du site n'est constituée que d'une étroite vallée boisée drainée par le Ruisseau de la Vallée. Etagé entre 270 mètres et 210 mètres le Ruisseau de la Vallée se dirige d'abord vers le Sud-Est parallèlement au Woigot, puis après être heurté à la faille du Bois d'Avril, il bifurque de 90° vers le Sud-Ouest pour rejoindre le Woigot.

Le Ruisseau de la Vallée ne reçoit que les eaux de l'unique exhaure de la mine d'ANDERNY implantée au Nord de la cité d'ANDERNY CHEVILLON.

En raison des tarifs avantageux pratiqués par l'E.d.F. pour la fourniture de courant électrique, la nuit et les jours fériés, ces quatre points de rejet d'eau d'exhaure ne débitent en principe qu'entre 22 heures et 4 ou 5 heures du matin et éventuellement les dimanches.

Un barrage implanté à l'entrée Nord de BRIEY noie le cours du Woigot à l'amont de cette ville donnant naissance à un plan d'eau touristique.

L'alimentation en eau potable de la ville de BRIEY s'effectue par prélèvement dans le Woigot juste à l'amont de cette retenue.

B/ Au niveau des mines :

En profondeur, comme le montre la figure 2, les eaux infiltrées réapparaissent sur toute la surface exploitée du gisement et sont rassemblées par des réseaux de drainage vers les quatre points d'exhaure.

Les inclinaisons naturelles des couches ferrifères conditionnent les directions d'écoulement des eaux. (Voir les cotes portées sur le schéma de la figure 2). Des galeries noyées servent de réservoirs tampon (albraques) aux pompes d'épuisement qui ne fonctionnent que la nuit ou les jours fériés.

Sur la carte de la figure 2, les portions hachurées traduisent l'extension des albraques. Les zones grisées figurent les parties anciennes des exploitations actuellement dépilées.

Les deux exhaures des mines de SAINT PIERREMONT, SAM et SAV, évacuent les eaux recueillies sous les cours moyens du Woigot et du Ruisseau de la Vallée.

L'exhaure de la mine d'ANDERNY ne paraît être concernée que par le cours supérieur du Ruisseau de la Vallée.

Le réseau de drainage alimentant l'exhaure de TUCQUEGNIEUX s'étend au dessous des cours supérieurs du Woigot et du Ruisseau de la Vallée.

C/ Structure du terrain entre les couches ferrifères et la surface du sol :

Les couches de calcaire ferrugineux constituant le gisement sont recouvertes d'une épaisseur de 100 à 150 mètres de calcaire du Dogger. Trois failles parallèles orientées Nord-Est - Sud-Ouest fracturent cette couverture calcaire et viennent couper perpendiculairement les cours du Woigot et du Ruisseau de la Vallée.

Au Sud, la faille du Bois d'Avril suit le cours inférieur du Ruisseau de la Vallée après son changement de direction.

Au centre, la faille de Fontoy passe par les villages de NANCIEULLES et BETAINVILLERS.

Au Nord, la faille de Brabant frôle les points d'exhaure d'ANDERNY et TUCQUEGNIEUX.

Un sondage de reconnaissance foré en 1894 entre la cote de la Vigne et la cote de Bériban (voir carte figure 1) montre la présence :

- D'une couche de marnes micacées gris bleuâtre de 28 mètres d'épaisseur à la base des calcaires du Dogger juste au dessus du gisement de fer entre les cotes **NGF 132,4** et **104,2**.
- D'une couche de marnes bleues en roche compacte de 11 mètres d'épaisseur au sommet des calcaires du Dogger entre les cotes **NGF 229,2** et **240,4** .
- De deux autres couches de marnes de moindre épaisseur 5 mètres et 2 mètres.

Le reste du sous-sol est constitué de couches calcaires parfois crevassées.

Les eaux de surface chargées en gaz carbonique peuvent avoir creusé des cheminements dans la masse des couches calcaires et percoleraient en tout sens dans la couverture du gisement ferrifère.

Cependant dans la mesure où les deux couches de marnes pourraient être imperméables, les circulations verticales d'eau devraient s'effectuer plutôt au niveau des trois failles géographiques citées plus haut.

Mais il convient également de remarquer que le défilage des anciennes zones exploitées du gisement de minerai de fer a provoqué des effondrements de la couche de marnes micacées qui recouvre directement les calcaires ferrifères. Le transfert vertical de l'eau peut alors s'exercer en une multitude de points des zones exploitées du gisement.

11.2. Etudes antérieures :

Les exploitants des gisements miniers ont constaté depuis longtemps qu'il arrive parfois qu'une partie importante, voir la totalité du débit d'un ruisseau, s'infiltré dans le sous-sol. Ce phénomène a **été** encore récemment observé sur le cours supérieur du Ruisseau de la Vallée. Le lit de ce ruisseau a même dû être cimenté sur une longueur importante.

Afin de permettre de chiffrer l'importance de ces infiltrations, des bilans de débits d'écoulement ont été effectués au cours des années 1974-1975 sur le Woigot et le Ruisseau de la Vallée. Ces bilans ont mis en évidence d'importantes disparitions d'eaux entre l'amont et l'aval des ruisseaux. Malgré la présence certaine d'apports d'eau latéraux, dûs aux écoulement de terrain tout le long des ruisseaux, les débits d'aval étaient très souvent nettement inférieurs aux débits d'amont, d'ailleurs essentiellement constitués par les rejets d'exhaure. Il s'agissait évidemment de débits corrigés afin de tenir compte de l'intermittence des rejets d'exhaure et de la vitesse de propagation des ondes de débits de l'amont à l'aval.

Pour étudier ces infiltrations, des stations de mesure de débit, seuils jaugés équipés de limnimètres, avaient été installées en différents points des cours d'eau.

Trois stations implantées respectivement aux niveaux :

- du Moulin de la Saulx
- du village de MANCE (MANCE village)
- de l'amont de BRIEY

permettaient d'effectuer des bilans d'écoulement sur la partie amont du lit du Woigot et sur sa partie aval.

Deux autres stations implantées sur le Ruisseau de la Vallée respectivement aux niveaux :

- du village de BETAINVILLERS
- du village de MANCE (MANCE vallée)

assuraient de semblables bilans sur les cours supérieurs et aval de ce dernier.

Ces dispositifs ont permis de montrer que :

- Sur le cours supérieur du Woigot en amont de MANCE le déficit des débits atteint 15 % en hiver et 30 % en été. Les apports latéraux dûs aux ruissellements doivent toutefois compenser partiellement l'influence des infiltrations durant la saison humide d'hiver.

* par rapport aux débits exhaurés

- Sur le cours supérieur du Ruisseau de la Vallée en amont de BETAINVILLERS, ce déficit est demeuré nul en hiver et n'a pas dépassé 5 à 10 % en été. Le lit du ruisseau étant partiellement cimenté, les pertes ont sans doute été réduites.

D'autre part, les apports latéraux des ruissellements ont pu les compenser car le relief est plus accentué que dans la vallée du Woigot.
- Sur le cours inférieur du Ruisseau de la Vallée le déficit monte à 20 % en hiver et 30 % en été malgré la présence de la compensation due à la Source des Pugeaults.
- Sur le cours inférieur du Woigot, les pertes sont moins marquées, quelques pour cents seulement, bien qu'elles atteignent 27 % au moment de l'étiage prononcé d'octobre 1975.

Enfin un bilan portant sur l'ensemble des deux ruisseaux montre que 15 % en hiver et 30 % en été, du débit total des rejets d'exhaure déversés à l'amont du Woigot et de ses affluents y compris le Ruisseau de la vallée, disparaissent avant d'atteindre BRIEY. Au cours de l'étiage du mois d'octobre 1976, le volume d'eau atteignant BRIEY ne représentait même plus la moitié des rejets d'exhaure. En fait, compte tenu des apports constitués par les écoulements de terrain, les pourcentages réels des pertes doivent être encore supérieurs à ces valeurs.

11.3. Hypothèses de travail :

La réalité des pertes d'eau ne faisant aucun doute, il restait à tenter de les chiffrer plus précisément et de déterminer le devenir des eaux perdues ainsi qu'à essayer de localiser leurs points de disparition.

Les prélèvements des riverains pour l'arrosage des terrains semblant devoir rester négligeables, les pertes ne peuvent être attribuées qu'aux infiltrations vers le sous-sol. Comme les ruisseaux passent au dessus des exploitations minières, une partie au moins des infiltrations peuvent contribuer à alimenter les venues d'eau dans les galeries. Mais rien a priori n'oblige cependant à penser que la totalité de l'eau infiltrée se retrouve au fond des trois mines. D'autres mines, à la périphérie du bassin, pourraient "bénéficier" de ces apports.

Le mode d'écoulement de l'eau dans les 100 ou 150 mètres de terrain couvrant la couche ferrifère prête en effet à controverse. Certains auteurs pencheraient en faveur de la présence d'une nappe souterraine en écoulement, d'autres plus nombreux parlent d'infiltrations verticales dans un milieu pratiquement dépourvu d'eau.

Les exploitants des mines de fer ont observé des accroissements de débits des venues d'eau en fond de mine **2** ou **3** jours après chaque période pluvieuse. Il semblerait naturel d'en déduire un transit rapide de l'eau dans le sous-sol si l'on a bien à faire à un écoulement vertical dans un terrain sec.

Si par contre il y a présence d'une nappe, la corrélation entre l'accroissement des venues d'eau et les périodes pluvieuses peut être due à une simple transmission de la pression. L'augmentation des infiltrations dans le sous-sol met la nappe en charge et celle-ci débite plus dans les galeries de mines.

Dans ce dernier cas le transfert de l'eau pourrait être même assez lent. Notre laboratoire a déjà rencontré un tel phénomène.

III - METHODOLOGIE **DES** ESSAIS

Deux méthodes, basées toutes deux sur l'emploi d'un traceur, permettent de déterminer le taux d'infiltration des eaux d'exhaure : mesurer leur taux de recyclage dans les eaux pompées en fond de mine, évaluer par bilan de traceurs les pertes de débits subies par les ruisseaux qui assurent leur évacuation.

111.1. DÉtermination du taux d'infiltration par recyclage d'un traceur

Il s'agit de déterminer la fraction du volume d'eau déversé un jour donné dans les ruisseaux qui réapparaît dans les rejets des jours suivants. Il est pour cela nécessaire de pouvoir identifier en la marquant avec un traceur approprié l'eau rejetée à une date donnée, afin d'en déterminer le pourcentage qui est à nouveau exhauré les jours suivants. La méthode est basée sur le recyclage d'un traceur qui doit suivre parfaitement l'eau durant sa percolation dans le sous-sol.

Comme il est montré dans l'Annexe Technique I "Détermination du taux de recyclage des eaux exhaurées", ce procédé revient à injecter durant une nuit:une masse A de traceur dans un rejet de pompage et à mesurer la masse de traceur repassant à ce même point d'exhaure, ou à ceux des mines voisines, les jours suivants.

Si le premier recyclage est rapide et très nettement séparé des suivants, il sera possible de mesurer la masse a de traceur rejetée durant ce premier recyclage et le taux de recyclage ou d'infiltration τ des eaux sera donné par la relation

$$\tau = \frac{a}{A}$$

Si les recyclages se superposent, il faudra déterminer la masse totale S de traceur recyclé. Le taux de recyclage ou d'infiltration des eaux sera donné par la relation

$$\tau = 1 - \frac{A}{S}$$

Il convient de remarquer que dans les deux cas, ne sont considérées que les masses de traceur, donc les volumes d'eau, qui sont recyclées et non celles qui se sont infiltrées. Si une partie de l'eau infiltrée se dirige ailleurs que vers les galeries de mines, elle n'apparaît pas dans ces bilans.

L'erreur relative $\frac{\Delta T}{T}$ étant donnée par la relation

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta a}{a} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta S}{S}$$

la précision sur **T** est directement liée à la précision des mesures des quantités **a** ou **S**.

111.2. Détermination du taux d'infiltration par bilans de traceurs dans l'écoulement des ruisseaux :

Le procédé permet de déterminer avec précision le pourcentage d'un rejet d'exhaure qui s'infiltré dans le lit d'un ruisseau sur les différents intervalles de son parcours. Il repose également sur le marquage des eaux d'exhaure par un traceur, mais les mesures portent sur la fraction d'eau marquée qui s'écoule jusqu'à l'aval du ruisseau, les infiltrations étant obtenues par différence.

Comme il apparaît dans l'Annexe Technique **II** "Détermination des infiltrations d'un cours d'eau", le procédé permet de mesurer le pourcentage des eaux rejetées durant une nuit qui s'infiltré dans le lit du ruisseau entre différents points de mesure, mais sans permettre de montrer que ces eaux atteignent bien le fond des mines.

111.3. Etude de la dynamique d'écoulement des eaux d'exhaure dans les ruisseaux :

Les eaux d'exhaure servant à l'alimentation urbaine, il n'est pas possible d'introduire n'importe quelle quantité de traceur dans ces eaux. Et bien que le lac formé par la retenue du barrage de **BRIEY** constitue un réservoir tampon facilitant l'homogénéisation du traceur avec un grand volume d'eau, il est nécessaire de déterminer le degré d'étalement d'une vague de traceur au cours de son transfert dans les ruisseaux. Un étalement très marqué provoque le

Il convient de remarquer que dans les deux cas, ne sont considérées que les masses de traceur, donc les volumes d'eau, qui sont recyclées et non celles qui se sont infiltrées. Si une partie de l'eau infiltrée se dirige ailleurs que vers les galeries de mines, elle n'apparaît pas dans ces bilans.

L'erreur relative $\frac{\Delta\tau}{\tau}$ étant donnée par la relation

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{\Delta a}{a} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{\Delta S}{S}$$

la précision sur τ est directement liée à la précision des mesures des quantités a ou S .

111.2. Détermination du taux d'infiltration par bilans de traceurs dans l'écoulement des ruisseaux :

Le procédé permet de déterminer avec précision le pourcentage d'un rejet d'exhaure qui s'infiltré dans le lit d'un ruisseau sur les différents intervalles de son parcours. Il repose également sur le marquage des eaux d'exhaure par un traceur, mais les mesures portent sur la fraction d'eau marquée qui s'écoule jusqu'à l'aval du ruisseau, les infiltrations étant obtenues par différence.

Comme il apparaît dans l'Annexe Technique 11 "Détermination des infiltrations d'un cours d'eau", le procédé permet de mesurer le pourcentage des eaux rejetées durant une nuit qui s'infiltré dans le lit du ruisseau entre différents points de mesure, mais sans permettre de montrer que ces eaux atteignent bien le fond des mines.

111.3. Etude de la dynamique d'écoulement des eaux d'exhaure dans les ruisseaux :

Les eaux d'exhaure servant à l'alimentation urbaine, il n'est pas possible d'introduire n'importe quelle quantité de traceur dans ces eaux. Et bien que le lac formé par la retenue du barrage de BRIEY constitue un réservoir tampon facilitant l'homogénéisation du traceur avec un grand volume d'eau, il est nécessaire de déterminer le degré d'étalement d'une vague de traceur au cours de son transfert dans les ruisseaux. Un étalement très marqué provoque le

mélange du traceur avec une grande masse d'eau et permet d'utiliser de plus fortes concentrations en traceur au niveau de l'injection. La précision des mesures du taux de recyclage en est alors directement accrue.

De plus, pour déterminer les périodes favorables aux mesures de débits par moulinets ou traceur intervenant lors des localisations ultérieures des zones d'infiltration, atteinte des débits permanents ou quasi permanents, il est nécessaire de connaître les temps de propagation des eaux dans les ruisseaux.

Ces deux informations : étalement des vagues de traceur, temps de transfert de l'eau, sont directement données par les Réponses Impulsionnelles en masse des écoulements des ruisseaux. Il a donc été procédé aux déterminations des Réponses Impulsionnelles des écoulements entre chaque point d'exhaure et différentes sections de mesures convenablement réparties vers l'aval. Ces Réponses Impulsionnelles ont été obtenues en marquant d'une manière instantanée une tranche d'eau au niveau d'un point d'exhaure et en suivant son étalement aux niveaux des différentes sections de mesures.

IV - DETERMINATION DES REPNSES IMPULSIONNELLES DES RUISSEAUX

La mesure du taux de recyclage des eaux exhaurées nécessitant, comme il est montré au paragraphe 111.3, une connaissance préalable de la dynamique d'écoulement des ruisseaux, leurs Réponses Impulsionnelles ont été déterminées aux cours d'essais préliminaires.

Chaque Réponse Impulsionnelle a été déterminée en injectant d'une manière instantanée un petit volume de traceur fluorescent en solution dans un peu d'eau au niveau de l'exhaure concernée. Cette injection a été effectuée environ 30 minutes après le début du rejet d'exhaure de façon à ce que le régime d'écoulement ait atteint son niveau permanent sur une bonne distance en aval de l'injection.

Des dispositifs de mesure de concentration en traceur et de prélèvement d'échantillons implantés le long des ruisseaux parcourus par la vague de traceur permettent d'enregistrer son passage et de déterminer la Réponse Impulsionnelle de l'écoulement à chacun de ces niveaux. Voir figure 1 l'implantation des sections de mesures.

IV.1. Essais de Juillet 1977 :

A/ En absence de débits d'exhaure :

Certains ruisseaux conservent un faible débit résiduel en absence d'exhaure durant la journée. Il était intéressant d'essayer de déterminer les Réponses Impulsionnelles (en abrégé R.I.) de ces écoulements.

Des injections instantanées de Rhodamine Wt à TUCQUEGNIEUX et d'Uranine à SAINT PIERREMONT amont et à SAINT PIERREMONT aval ont rapidement montré l'impossibilité de déterminer les Réponses Impulsionnelles du Woigot en absence d'exhaure.

Les traceurs ne parcouraient même pas deux kilomètres en une dizaine d'heures. La partie amont du Ruisseau de la Vallée était totalement à sec durant la journée et ne convenait donc pas à ces essais.

B/ Durant les rejets d'exhaure :

Une injection instantanée de Rhodamine Wt au niveau de l'exhaure de TUCQUEGNIEUX et une injection instantanée d'Uranine au niveau de SAINT PIERREMONT amont ont permis de déterminer les Réponses Impulsionnelles du Woigot entre ces points d'injection et les sections de mesure A, C et G répartis comme l'indique la carte de la figure 1.

Les tableaux I et II résument les conditions de ces essais et les résultats obtenus qui sont également présentés sur les figures 4 et 5. Les figures 9 et 10 présentent les Réponses Impulsionnelles obtenues. La figure 8 permet de comparer les évolutions des écarts-types de ces Réponses Impulsionnelles.

IV.2. Essais de Septembre 1977 :

Deux injections de Rhodamine Wt effectuées à 24 heures d'intervalle aux points d'exhaure de SAINT PIERREMONT aval et d'ANDERNY ont permis de déterminer respectivement les Réponses Impulsionnelles du Ruisseau d'Hapre et du Woigot d'une part et du Ruisseau de la Vallée d'autre part entre ces points de rejets et les sections de mesure afférentes, voir carte figure 1.

Les tableaux III et IV résument les conditions de ces essais et les résultats obtenus qui sont également présentés sur les figures 6 et 7.

Les figures 11 et 12 présentent les Réponses Impulsionnelles obtenues. Les écarts-types de ces Réponses Impulsionnelles apparaissent sur la figure 8.

IV.3. Analyse des résultats :

Sur chacune des figures 4, 5, 6 et 7 représentant en fonction du temps, le déplacement le long des ruisseaux des Centres de Gravité des Réponses Impulsionnelles ont été également portés les profils de ces cours d'eau. Les altitudes des différents points des écoulements ont été établies à partir des relevés effectués sur la carte I.G.N. au 1/25000ème, édition 1956 BRIEY 5-6. Il en est de même des distances entre ces points, mesurées au curvimètre le long des tracés des ruisseaux sur la même carte. Les altitudes sont définies au mètre près. L'erreur sur l'appréciation des distances ne doit pas dépasser 2 % en valeur relative, soit 20 mètres sur 1 kilomètre.

La vitesse moyenne des écoulements est de l'ordre du kilomètre par heure. Cette vitesse dépasse cependant 2 km/heure sur le cours supérieur du Ruisseau de la Vallée et les approche sur le Grand Rû. Elle tombe par contre à 0,6 km/heure environ sur le cours inférieur du Woigot entre son confluent avec le Ruisseau de la Vallée et BRIEY.

Comme le montre la figura **8**, une bonne partie de la dispersion, ou étalement, des vagues de traceur s'effectue durant le trajet sur le cours inférieur du Woigot. Ce phénomène explique que les écarts-types des vagues dues aux injections de SAINT PIERREMONT aval et de SAINT PIERREMONT amont demeurent très voisins malgré la différence des trajets parcourus.

Il convient enfin de constater qu'une injection instantanée de traceur en l'un des quatre points d'exhaure donne naissance à une vague étalée en moyenne sur plus de 2 heures à son arrivée à BRIEY. Une injection continue de traceur durant 4 heures en l'un des points d'exhaure provoquera une vague dont le passage au niveau de BRIEY s'étendra sur plus de **6** heures, ce qui facilitera d'autant sa dilution dans la retenue.

V - ESSAIS DE DETERMINATION DU TAUX D'INFILTRATION PAR RECYCLAGE D'UN TRACEUR

V.1. Condition des essais :

A/ Fractionnement des essais en deux campagnes :

Comme semblent l'indiquer les directions des drainages des exploitations minières représentées sur la carte de la figure 2, il se peut que les eaux exhaurées à TUCQUEGNIEUX se réinfiltrent dans la mine de SAINT PIERREMONT. Par contre elles ne risquent guère d'atteindre celles d'ANDERNY. A l'inverse, les eaux exhaurées à ANDERNY et rejetées dans le Ruisseau de la Vallée peuvent se répandre à la fois dans les mines de TUCQUEGNIEUX et de SAINT PIERREMONT.

Afin de pouvoir contrôler le bien fondé de ces hypothèses et simultanément limiter la masse de traceur à mettre en jeu à chaque opération, il a semblé préférable d'exécuter l'étude en deux campagnes.

Durant la première campagne, le traceur est introduit dans les eaux exhaurées à TUCQUEGNIEUX et à SAINT PIERREMONT aval et SAINT PIERREMONT amont. Des prélèvements effectués à intervalles constants aux quatre points d'exhaure (T, SAM, SAV, A) permettent de déterminer le débit du traceur recyclé et rejeté les jours suivants.

Lors de la seconde campagne, le traceur n'est injecté qu'à l'exhaure d'ANDERNY. Des prélèvements analogues aux précédents sont effectués aux quatre mêmes points d'exhaure.

Les deux campagnes devant être exécutées à la période de basses eaux, la première fût programmée pour le 20 Juillet, la seconde pour le 20 Septembre. Un délai de 2 mois paraissait suffisant pour que le traceur introduit dans le sous-sol en Juillet soit complètement ressorti fin Septembre, puisque c'est l'hypothèse d'un trajet rapide dans un milieu dépourvu de nappe souterraine qui avait été retenue.

B/ Choix du traceur :

Le choix s'est porté sur l'Iodure de Sodium, traceur qui est le plus à même de marquer parfaitement de l'eau en milieu souterrain. Il est utilisé fréquemment dans des milieux sablo-argileux ou marneux. Il a toujours présenté des temps de transit compatibles avec ceux établis à partir des

caractéristiques hydrogéologiques des sites. Son coefficient de récupération après un trajet souterrain est identique à celui de l'eau tritiée, traceur idéal des eaux souterraines.

Ce traceur convient donc très bien à cette étude où les circulations de type karstique devraient prédominer en raison de la nature du sous-sol et des fracturations et fissurations qu'il a certainement subi dans les zones défilées de l'exploitation minière et au voisinage des failles.

La masse de traceur à injecter a été déterminée en fonction du volume d'eau exhaure durant chaque nuit, de l'étalement des Réponses Impulsionnelles et du débit du Woigot à l'amont de BRIEY.

Les exhaures quotidiennes atteignant 60.000 m³ et une injection instantanée s'étalant sur 4 à 5 heures à l'arrivée à BRIEY, il était possible d'injecter 10 kg d'Iode sans dépasser des teneurs de plus de 200 ppb au niveau de l'arrivée des eaux dans la retenue à condition que l'injection de la solution d'Iodure de Sodium s'étende sur toute la durée des exhaures.

La station de captage qui alimente le réseau urbain de BRIEY prélève de l'eau dans le Woigot un peu avant qu'il ne pénètre dans la retenue. Mais en raison de l'arrivée continue des eaux, la vague d'Iodure de Sodium ne séjourne probablement pas plus d'une demie journée au niveau de cette station de captage. Les quantités d'Iode absorbées par les consommateurs d'eau demeureront donc toujours très limitées.

Il ne semble d'ailleurs pas exister de normes françaises ou internationales concernant les teneurs en Iode des eaux de boisson. La seule réglementation parvenue à notre connaissance est une recommandation hollandaise demandant que la teneur permanente en Iode des eaux de boisson ne dépasse pas 80 ppb soit 0,08 mg/litre.

C/ Les prélèvements d'échantillons aux points d'exhaure :

Les prélèvements d'échantillons aux points d'exhaure ont été assurés par les spécialistes de l'Agence Financière de Bassin. Chaque point d'exhaure était équipé d'un préleveur automatique. Les cadences de prélèvement initialement prévues étaient d'un échantillon par heure durant les temps d'exhaure.

Il était prévu d'effectuer quelques prélèvements la veille de l'injection afin de permettre une évaluation des teneurs naturelles en Iode des eaux.

Les prélèvements devaient se poursuivre une dizaine de jours, ce qui dans l'hypothèse d'une circulation rapide du traceur, devait être largement suffisant pour permettre de recueillir la vague d'Iode au premier recyclage du traceur.

Les cadences de prélèvement ont été abaissées lors de la deuxième campagne d'essais au niveau d'un prélèvement de deux échantillons identiques par nuit. Ces deux échantillons obtenus à partir d'un volume d'eau prélevé durant tout le rejet et convenablement homogénéisé permettent de déterminer la teneur moyenne en Iode des eaux exhaurées durant une nuit.

D/ Les débits d'exhaure :

Ils ont été fournis par les Mines de Fer : heure par heure pour la première campagne, par période de 5 à 10 jours pour la seconde campagne.

La pondération des teneurs en Iode des échantillons par ces débits permet d'obtenir le débit quotidien moyen d'Iode rejeté par chaque exhaure.

V.2. Essais sur le bassin du Woiaot

A/ Injection

Il avait été prévu de marquer **simultanément** les eaux sortant des trois exhaures : TUCQUEGNIEUX, SAINT PIERREMONT aval et SAINT PIERREMONT amont (T, SAV et SAM) à des concentrations analogues et de l'ordre de 1.000 ppb dans la nuit du 20 au 21 Juillet 1977. En fait, l'exhaure de SAINT PIERREMONT aval ne rejeta pas d'eau cette nuit là. Il a fallu reporter le marquage des eaux de cette exhaure à la nuit suivante.

Cet incident ne pouvait cependant pas perturber les résultats des essais puisque les temps de transit de l'eau entre le lit du Woigot et les galeries des mines devaient être de l'ordre de plusieurs jours.

Un total de 10,2 kg d'Iode a donc été rejeté en moins de trente heures dans le lit du Woigot et de son affluent, le ruisseau d'Hapre, sous forme d'Iodure de Sodium.

Le tableau V rappelle les conditions de ces injections.

B/ Résultats des prélèvements :

Les tableaux VI, \II, VIII et IX présentent les résultats des analyses des échantillons prélevés respectivement aux exhaures de :

- SAINT PIERREMONT aval
- SAINT PIERREMONT amont
- TUCQUEGNIEUX
- ANDERNY

Il convient de remarquer tout d'abord que certains échantillons présentent de très fortes teneurs en Iode. Il s'agit essentiellement de ceux prélevés aux exhaures de SAINT PIERREMONT aval, SAINT PIERRENONT amont et pour quelques-uns de TUCQUEGNIEUX. Mais ces teneurs ne peuvent être en aucun cas dûs aux recyclages du traceur car :

- a) Certaines des teneurs en Iode atteignent 6.000 ppb alors que dans les ruisseaux, à la sortie des exhaures, la teneur en Iode n'a jamais dépassé 1.300 ou 1.500 ppb. Voir le tableau V.
- b) De plus ces teneurs en Iode subissent de très fortes variations en une heure. C'est notamment le cas des échantillons de TUCQUEGNIEUX, saut brusque de 2 ppb à 1.100 ppb le 21 Juillet, puis redescente de 1.080 ppb à 11,6 ppb entre 0 heure et 1 heure le 22 Juillet.
- c) Par contre, ces teneurs pourraient parfaitement s'expliquer par des contaminations accidentelles durant les prélèvements. Les opérateurs de l'Agence Financière de Bassin ayant bien voulu procéder à l'injection de la nuit du 21 au 22 Juillet à SAINT PIERREMONT aval et au démontage de la cuve d'injection qui avait contenu la solution d'Iodure de Sodium concentrée à quelques dizaines de millions de ppb ont pu contaminer leur véhicule et les boites contenant les flacons vides destinés aux prélèvements des échantillons.

Le remplissage des flacons d'échantillonnage s'effectue de nuit sur le site de prélèvement. Il suffit alors que l'opérateur se contamine les doigts en manipulant une des boites contenant les flacons vides et que lorsqu'il remplit un flacon l'eau lui ruisselle sur les doigts avant de pénétrer dans le flacon pour que le contenu de ce dernier manifeste ensuite une importante teneur en Iode.

Cette thèse paraît d'autant plus certaine que les teneurs les plus importantes correspondent aux échantillons prélevés à l'exhaure de SAINT PIER-REMONT aval dans la nuit du 21 au 22 Juillet, jour où les opérateurs de l'Agence ont réalisé l'injection. D'autre part, les teneurs en Iode s'atténuent rapidement les jours suivants.

En conclusion, il n'y a pas eu lors de cette première campagne d'essais réapparition du traceur injecté dans les ruisseaux. A titre indicatif, rappelons qu'un taux de recyclage de 30 % s'effectuant en 4 ou 5 jours aurait provoqué une répartition des 3 kg d'Iode infiltrés dans 150.000 m³ d'eau au maximum puisque l'exhaure d'ANDERNY n'aurait été que peu ou pas concernée.

Il fallait donc s'attendre à voir ressortir des eaux contenant de 20 à 30 ppb d'Iode au moins avec peut être des maximum atteignant 100 ppb. Etant donné le faible niveau des teneurs naturelles, 1 à 2 ppb, ces résultats auraient été très aisément exploitables.

Les services de la Mine de TUCQUEGNIEUX ont bien voulu recueillir des échantillons d'eau au fond dans une galerie par où transitent des eaux du secteur sud de l'exploitation. Les échantillons prélevés entre le 20 Juillet 1977 à 18 heures et le 29 Juillet 1977 à 13 heures sur le canal Majeur aval, voir carte figure 2, n'ont jamais présenté des teneurs en Iode supérieures à 1 ppb. Ce résultat confirme ceux obtenus avec les eaux recueillies aux points d'exhaure : l'eau infiltrée depuis la surface n'a pas atteint les galeries de mines au cours du mois de Juillet 1977.

V.3. Essais sur le bassin du Ruisseau de la Vallée :

A/ Injection :

Les essais de Juillet 1977 n'ayant pas fait apparaître d'Iode dans les eaux exhaurées et les taux d'infiltration sur le Ruisseau de la Vallée devant être de l'ordre de 50 %, il fût décidé d'injecter 12,7 kg d'Iode à l'exhaure d'ANDERNY.

Le tableau V présenté au paragraphe V.2.A rappelle les conditions de cette injection réalisée dans la nuit du 21 au 22 Septembre 1977. La teneur en Iode de l'eau du ruisseau est un peu inférieure à 1.000 ppb au niveau de l'injection.

B/ Résultats des prélèvements :

Comme il est signalé au paragraphe V.1.C, deux échantillons identiques seulement ont été prélevés chaque nuit ou jour férié en chacun des quatre points d'exhaure. Ces deux échantillons étaient prélevés sur le volume d'eau recueilli pendant toute la durée de l'exhaure après que ce volume ait été soigneusement homogénéisé. C'est donc bien la teneur moyenne en Iode des eaux rejetées chaque nuit qui a pu être mesurée à partir de ces échantillons.

Les tableaux X, XI, XII et XIII présentent les résultats d'analyse des échantillons respectivement recueillis aux points d'exhaure de :

- SAINT PIERREMONT aval
- SAINT PIERREMONT amont
- TUCQUEGNIEUX
- ANDERNY

Les teneurs en Iode se sont rigoureusement maintenues au niveau du bruit de fond naturel pendant toute la durée de ces prélèvements qui se sont étendus sur plus de quinze jours **après** l'injection.

V.4. Prélèvements complémentaires :

Ainsi que le montrent les figures 13, 14, 15 et 16 présentant l'évolution des teneurs en Iode des eaux d'exhaure rejetées respectivement à :

- SAINT PIERREMONT aval
- SAINT PIERREMONT amont:
- TUCQUEGNIEUX
- ANDERNY

les prélèvements réalisés en Septembre 1977 comme ceux recueillis en Juillet 1978 ne montrent aucune arrivée d'Iode. Il a donc été décidé de recommencer à exécuter des prélèvements. Au cas où le transfert de l'eau aurait été beaucoup plus lent que prévu, il convenait de tenter de localiser le passage de la vague d'Iode durant l'hiver 1977-1978.

Comme la durée du passage d'une vague de traceur est généralement du même ordre de grandeur que son temps d'arrivée, il n'était pas nécessaire d'effectuer des prélèvements très rapprochés pour obtenir une information valable. C'est pourquoi les cadences de prélèvement ont pu être abaissées au

niveau d'un prélèvement par semaine durant l'automne 1977 et l'hiver 1977-1978. Exécutés sur le canal amenant les eaux de chaque point d'exhaure vers le ruisseau voisin, ces prélèvements ne portent que sur les restes du déversement de la nuit précédente, mais semblent suffisamment représentatifs des teneurs de la semaine en raison de l'étalement de la vague de traceur.

Les tableaux XIV, XV, XVI, XVII présentent les résultats des analyses des échantillons recueillis entre Octobre 1977 et Mars 1978 aux exhaures de :

- SAINT PIERREMONT aval
- SAINT PIERREMONT amont
- TUCQUEGNIEUX
- ANDERNY

Trois échantillons identiques étaient prélevés chaque fois sur chaque site. Deux furent analysés rapidement. Ils donnent des résultats généralement très comparables. Le troisième échantillon fut stocké par les soins de l'Agence et il ne fut analysé qu'en Avril 1978. Comme l'Iode se dépose lentement sur le verre ou qu'il entre parfois dans le cycle biologique d'algues microscopiques, les résultats des analyses de ces troisièmes échantillons correspondent tous à des teneurs en Iode beaucoup plus faibles que les deux précédentes.

Ce sont donc uniquement les résultats correspondants aux deux premiers échantillons qui ont servi à établir les figures 13, 14, 15 et 16 présentant l'évolution des teneurs en Iode des eaux des quatre points d'exhaure.

A titre comparatif, des prélèvements d'eau ont été exécutés aux exhaures de deux autres mines de fer : MURVILLE et MOYEWRE. Les tableaux XVIII et XIX rappellent les résultats des analyses des échantillons recueillis respectivement à leurs exhaures.

V.5. Discussion des résultats :

Ainsi que le montrent les figures 13 et 14 déjà citées, les eaux rejetées en Novembre et Décembre 1977 aux exhaures de :

- SAINT PIERREMONT amont
- SAINT PIERREMONT aval

présentent des teneurs en Iode nettement supérieures aux concentrations naturelles rencontrées en Juillet et Septembre 1977 ou à partir de Février 1978 dans ces mêmes eaux. Il est donc possible de penser qu'une partie de l'Iodure de Sodium injectée vers le 20 Juillet 1977 à SAINT PIERREMONT amont et aval et à TUCQUEGNIEUX ressort 3 à 5 mois plus tard.

Réapparaissant 3 à 5 mois plus tard, le traceur se trouve fortement dilué. Les vagues de traceur s'étalent sur plus de **60** jours et les mesures de teneurs en Iode des échantillons sont très imprécises.

Comme il est spécifié aux paragraphes 11.3 et V.2.B les essais avaient été programmés pour des durées de transferts souterrains de quelques jours. Les quantités d'Iode injectées se seraient alors manifestées par des concentrations de 30 à 50 ppb dans les eaux exhaurées.

Des temps de transfert de plusieurs mois ont provoqué un mélange du traceur avec des volumes d'eau 20 à 30 fois plus grands. Les concentrations se sont abaissées à 2 ou 5 ppb, c'est-à-dire à seulement 2 fois le niveau des teneurs naturelles en Iode. Dans ces conditions l'évaluation des masses d'Iode exhaurées est extrêmement imprécise.

Le tableau XX résume l'interprétation des courbes 13 à 16. A peu près 1,2 kg d'Iode sur les 10,2 injectés à SAINT PIERREMONT et TUCQUEGNIEUX en Juillet 1977 paraissent ressortir d'octobre à Janvier.

Les vagues de traceur paraissent assez nettement délimitées dans le temps. Elles ne se chevauchent pas avec les résurgences suivantes. C'est donc la relation $\tau = \frac{a}{A}$ présentée dans l'Annexe Technique 1 et utilisable dans le cas où le recyclage du traceur donne lieu à des vagues successives nettement séparées qui peut être appliquée pour déterminer le taux de recirculation des eaux. Dans le cas présent $\tau = \frac{1,2}{4,32 + 1,69 + 4,23} = 0,12$

Cette valeur demeure très peu précise, la confrontation des résultats présentés sur le tableau XX, ou les figures 13,14,17 et 18 inclineraient à penser que ce taux de recyclage est en fait compris entre 5 % et 20 %, 12 % ne constituent qu'un résultat expérimental moyen.

Ces considérations permettent d'estimer qu'approximativement 12 % des eaux rejetées dans le Woigot et ses affluents réapparaissent 3 à 5 mois plus tard à SAINT PIERREMONT amont et aval après un périple souterrain qui provoque leur dilution dans plus d'un million de m³ d'eau.

L'examen des figures 15 et 16 permet de penser que le traceur ne ressort pas en quantités appréciables aux exhaures de :

- TUCQUEGNIEUX
- ANDERNY

Cependant des augmentations de concentration en Iode de l'ordre de 0,5 à 1 ppb semblent à la rigueur pouvoir être décelées dans les eaux rejetées à ANDERNY en Novembre 1977. Ces augmentations demeurent cependant trop faibles vis à vis des fluctuations de concentration constatées sur les teneurs naturelles des eaux pour pouvoir être prises en considération. Il convient donc de conclure que les essais de 1977 n'ont pas montré de recyclage des eaux exhaurées à TUCQUEGNIEUX et ANDERNY.

VI - ESSAIS COMPLEMENTAIRES DE DETERMINATION DU TAUX D'INFILTRATION DES
EAUX DE L'EXHAURE D'ANDERNY

Les quantités d'Iodure de Sodium injectées lors des essais de Juillet et Septembre 1977 n'ayant pas permis de mettre en évidence le recyclage des eaux du Woigot et du Ruisseau de la Vallée dans le rejet d'exhaure d'ANDERNY, deux essais complémentaires ont été réalisés en 1978.

Le premier a consisté à répéter le marquage durant une nuit des eaux rejetées par l'exhaure d'ANDERNY, mais en utilisant une quantité d'Iodure de Sodium beaucoup plus importante de façon à ce que la résurgence de l'Iode apparaisse nettement et que son taux de recyclage puisse être mesuré avec précision.

Le second essai a porté sur la mesure directe du taux d'infiltration dans le sous-sol des eaux déversées à ANDERNY dans le Ruisseau de la Vallée. Pour pallier les apports latéraux dûs au ruissellement des collines environnantes, ce taux d'infiltration a été déterminé en effectuant en différentes sections de ce ruisseau des bilans de masse d'un traceur incorporé à l'écoulement au niveau de l'exhaure.

VI.1. Nouvel essai de détermination du taux d'infiltration par recyclage d'un traceur:

A/ Conditions du nouvel essai :

Le débit de l'exhaure d'ANDERNY est le plus important de ceux des quatre points de rejet étudiés avec un débit journalier allant de 20.000 m³ à 60.000 m³. Le Ruisseau de la Vallée qui reçoit les eaux de cette exhaure traverse la zone de terrain la plus fracturée de la région. A certaines époques il est arrivé, à la suite de mouvements de terrains, que la totalité du ruisseau disparaisse dans une faille et ressorte dans les galeries de mine.

L'exhaure d'ANDERNY constitue donc le site qui doit apporter le maximum de chances de succès à une mesure de taux de recyclage et c'est le taux de recyclage de ce ruisseau qui présente le plus d'intérêt économique. C'est pourquoi les deux essais complémentaires ont été réalisés sur le Ruisseau de la Vallée.

15 kg d'Iodure de Sodium avaient été utilisés le 21 Septembre 1977 pour marquer l'exhaure d'ANDERNY. 300 Kg ont été injectés en Juin 1978 pour le deuxième essai de marquage.

Dans la mesure où les 15 kg ,injectés en Septembre 1977 auraient pu faire apparaître des accroissements de concentration de 0,5 à 1 ppb de l'iode dans les rejets de certaines exhaures durant l'hiver 1977-1978, l'injection de 300 kg d'Iodure de Sodium devrait provoquer l'apparition de teneurs d'au moins 10 à 20 ppb dans les mêmes eaux.

En étalant l'injection des 300 kg d'Iodure de Sodium sur 6 heures, compte tenu de la largeur de la Réponse Impulsionnelle de l'écoulement au niveau de BRIEY, supérieure à 2 heures et des débits conjugués du Woigot et du Ruisseau de la Vallée, plus de 1.500 litres par seconde, le traceur doit être dilué dans 50.000 mètres cubes d'eau. La concentration en Iode dans les eaux au niveau de la station de pompage ne pourra alors dépasser 5.000 ppb, soit 5 mg/par litre.

Mais les eaux ayant une telle concentration ne se maintiendront certainement pas plus d'une demie journée au niveau de la station de captage en raison de l'arrivée quotidienne de 60.000 m³ à 80.000 m³ d'eau à l'entrée de la retenue. Une personne qui consommerait 2 litres de cette eau chargée d'Iode absorberait environ 10 mg d'Iode. Après discussion avec les représentants de l'Agence de Bassin RHIN-MEUSE, il fût admis que cette opération de marquage ne pouvait entraîner de risques biologiques. (voir paragraphe V.1 .B) .

B/ Injection du traceur et prélèvement des échantillons :

Les 300 kg d'Iodure de Sodium ont été injectés en 6 heures durant la nuit du 28 au 29 Juin 1978 à l'exhaure d'ANDERNY.

En supposant que le taux d'infiltration des eaux du Ruisseau de la Vallée atteigne seulement 20 %, ce sont 60 Kg d'Iodure de Sodium contenant environ 51 kg d'Iode qui ont pénétré dans le **sous-sol**. La teneur moyenne naturelle en Iode des eaux exhaurées par les mines est de l'ordre de 1 à 3 ppb. Les 51 kg d'Iode infiltrés suffiraient à porter à 10 ou 12 ppb la teneur d'une réserve souterraine de 5 millions de mètres cubes, ce qui permettrait d'identifier aisément les eaux recyclées aux points d'exhaure.

A la suite de cette injection, des échantillons des eaux d'exhaure des mines d'ANDERNY, TUCQUEGNIEUX et SAINT PIERREMONT ont été recueillis chaque semaine par les soins de l'Agence Financière de Bassin RHIN-MEUSE et expédiés au C.E.N.G. où leurs teneurs en Iode ont été déterminées.

Les tableaux XXI, XXII, XXIII et XXIV rappellent les dates de prélèvement de ces échantillons et les teneurs en Iode observées, exprimées en ppb ou microgrammes par litre.

C/ Discussion des résultats :

Comme le montrent les tableaux XXI, **XXII**, XXIII et XXIV et les figures 21 et 22, 9 mois après l'injection de Juin 1978 aucune trace d'Iode ne semble être reparue aux quatre points d'exhaure. Les légers accroissements des teneurs en Iode qui avaient été observés aux exhaures de SAINT PIERREMONT amont et aval à la fin de l'automne 1977 ne se sont pas remanifestés.

Quelques prélèvements effectués à la sortie du réservoir de VALLEROY en Janvier 1979, soit 6 mois après l'injection, se sont également montrés négatifs. Les teneurs en Iode n'y dépassent pas le niveau de concentration naturelle 1,5 ppb.

Il faut donc en conclure :

- soit que les infiltrations issues du Ruisseau de la Vallée n'arrivent pas jusqu'aux galeries de mines ou que seule une proportion infime de ces infiltrations les atteigne. Ce qui pourrait être le cas si une nappe intermédiaire en écoulement entraînait les eaux infiltrées vers l'aval. (vers Valleroy et la mine d'Auboué ?).
- soit que le temps de transit des eaux infiltrées est supérieur à 18 mois. Les accroissements de venues d'eaux dans les galeries de mines qui accompagnent avec 2 ou **3** jours de décalage les chutes de pluie en surface seraient alors uniquement dûs aux transmissions hydrostatiques de pression.
- soit que les eaux infiltrées se mélangent à de très grosses quantités d'eaux souterraines. Mais il faudrait une nappe d'au moins 50 millions de mètres cubes pour diluer au niveau du microgramme par litre, les 50 kg d'Iode, et encore les mélanges n'étant jamais parfaits, des variations de concentrations en Iode seraient apparues dans les rejets.

Il se pourrait donc que la première des trois hypothèses soit la plus vraisemblable et que l'Iode injecté ait été balayé vers l'aval du bassin du Woigot.

VI.2. Détermination directe du taux d'infiltration par bilans différentiels de traceur :

Au cours des années précédentes, les stations de jaugeage limnimétriques installées sur le cours supérieur du Ruisseau de la Vallée ont permis de mettre en évidence un taux de disparition de 5 % à 10 % des eaux exhaurées à ANDERNY.

Ces mesures ayant pu être perturbées par des arrivées latérales d'eaux d'écoulement, il était important de redéterminer ces taux d'infiltration par la méthode des bilans de traceur présentée dans l'Annexe Technique II "Détermination des infiltrations d'un cours d'eau".

A/ Implantation des stations d'injection et de mesures :

Pour la réalisation de ces bilans de traceur ont été implantées :

- a) Au niveau de l'exhaure d'ANDERNY, une section d'injection permettant de déverser à débit constant et déterminé $m_0 = \frac{M_0}{\theta}$ le traceur principal, de l'Iodure de Sodium. Dans cette expression M_0 représente la masse d'Iode qui sera finalement injectée et θ la durée de l'injection.
- b) Echelonnées sur le cours supérieur du Ruisseau de la Vallée trois stations de mesure de débit. Voir figure 23.

Chaque station de mesure de débit comportait :

- a) Une section d'injection assurant le déversement à débit constant et déterminé q de la solution de traceur auxillaire. Cette solution présente une concentration permanente et connue C_0 en traceur auxillaire, de la Rhodamine Wt.
- b) Une section de prélèvement d'échantillon d'eau, implantée quelques centaines de mètres en aval de la section d'injection, de façon que le traceur auxillaire puisse se mélanger entièrement avec l'écoulement avant de l'atteindre.

Prélevés à intervalles de temps constants et ramenés au laboratoire pour y être analysés, ces échantillons permettent d'établir l'évolution durant le passage des eaux d'exhaure :

- a) De la concentration en traceur auxillaire $c(t)$, ce qui permet de déterminer l'évolution du débit du ruisseau au niveau de la section de prélèvement selon la relation :

$$Q(t) = q \cdot \frac{C_0}{c(t)}$$

- b) De la concentration $C(t)$ en traceur principal, ce qui permet de déterminer le débit $m(t)$ de ce traceur traversant la section de prélèvement

$$m(t) = C(t) \cdot Q(t)$$

Le bilan de traceur principal à cette section de prélèvement d'échantillons est alors donné par la relation

$$M = \int_0^T m(t) dt = \int_0^T C(t) \cdot q \cdot \frac{C_0}{c(t)} dt$$

Dans cette expression, T représente le temps au bout duquel le débit de traceur principal est redevenu nul.

Le taux d'infiltration α du traceur entre le point d'exhaure et la section de prélèvement d'échantillon considérés est alors donné par la relation

$$a = \frac{M_0 - M}{M}$$

Les sections d'injection et de prélèvement ont été choisies en raison de leur facilité d'accès, présence d'un chemin permettant d'amener le matériel auprès du Ruisseau de la Vallée dont le parcours est assez accidenté. Voir figure **23**.

B/ Réalisation des essais :

Les essais se sont étendus sur deux nuits consécutives d'octobre 1978.

a) Mesures de la nuit du 17 au 18 Octobre 1978 :

Le rejet d'exhaure a débuté à 22 h 10 le 17 Octobre, il s'est terminé à 4 h 50 le 18. Deux kilogrammes d'Iodure de Sodium en solution contenant 1.693 grammes d'Iode ont été injectés entre 23 h 10 le 17 Octobre et 1 h 15 le 18.

Une mesure de débit a été effectuée au niveau du Bois de Forté (voir figure 23), entre 0 h et 8 h 40 le 18 Octobre. La section d'injection du traceur auxillaire, de la Rhodamine Wt, était installée au point a. La masse d'Iode passée à la section de mesure **A** durant la nuit a atteint 1.583 grames ; la quantité d'Iode représentant la teneur naturelle des eaux d'exhaure ayant été préalablement soustraite.

La seconde mesure de débit a été effectuée au niveau du Bois d'Avril entre 1 h 30 et 7 h 50 le 18 Octobre. La section d'injection du traceur auxillaire était implantée au point d. La section de prélèvement était installée au point D. La masse d'Iode passée à la section de prélèvement D durant la nuit a atteint 1.340 grammes; la quantité d'Iode représentant la teneur naturelle des eaux ayant été préalablement soustraite.

Le traceur auxillaire utilisé pour cette seconde mesure de débit, menée simultanément avec celle de la section **A** était encore de la Rhodamine Wt, qui convient très bien à ces opérations, mais on utilisait des concentrations 30 fois plus élevées de façon à ce que la mesure de débit en D ne soit pas perturbée par la mesure amont. Cette mesure de débit aval a d'ailleurs provoqué une légère et temporaire coloration des eaux du Ruisseau de la Vallée.

b) Mesures de la nuit du 18 au 19 Octobre 1978 :

Le rejet d'exhaure a débuté à 22 h 10 le 18 Octobre et s'est terminé à 4 h 50 le 19. Deux kilogrammes d'Iodure de Sodium en solution contenant 1.693 grammes d'Iode ont été injectés entre 23 h le 18 Octobre et 1 h le 19.

Une mesure de débit a été effectuée au niveau du Bois de la Ramée (voir figure 23) entre 0 h et 7 h 30 le 19 Octobre. La section d'injection de Rhodamine Wt était installée au point b. La section de prélèvement était installée au point **B**. La masse d'Iode passée à la section de mesure B durant la nuit a atteint 1.355 grammes; la quantité d'Iode due à la teneur naturelle des eaux d'exhaure ayant été préalablement soustraite.

C/ Discussion des résultats :

Ainsi que le montre le tableau XXV :

- De 70 grammes à 150 grammes d'Iode, soit de 4,1 % à 8,9 % de la masse injectée, se sont infiltrés entre le point d'exhaure et la section de mesure **A**.
- De 303 grammes à 373 grammes d'Iode, soit de 18 % à 20 % de la masse injectée, se sont infiltrés entre le point d'exhaure et la section de mesure **B**.
- De 318 grammes à 388 grammes d'Iode, soit de 18,8 % à 22,9 % de la masse injectée, se sont infiltrés entre le point d'exhaure et la section de mesure **D**.

Le traceur se comportant comme l'eau du ruisseau il faut donc considérer que sur un volume donné d'eau exhauré à ANDERNY il s'en perd environ :

- De 4 % à 9 %, valeur moyenne 6,5 %, entre ANDERNY et la section A
- De 18 % à 22 %, valeur moyenne 20 %, entre ANDERNY et la section B
- de 19 % à 23 %, valeur moyenne 21 %, entre ANDERNY et la section D

Soit encore :

- De 9 % à 18 %, valeur moyenne 13,5 %, entre les sections A et B
- De 10 % à 19 %, valeur moyenne 14,5 %, entre les sections **A** et D
- De zéro à 5 %, valeur moyenne 2 %, entre les sections B et D

Il existe donc un très fort taux d'infiltration, 13 à 14 %, entre les points **A** et **B** distants de 1.200 mètres environ.

Sur le cours supérieur du Ruisseau de la Vallée, le taux d'infiltration des eaux exhaurées à ANDERNY donné par ce procédé est donc nettement supérieur, 20 % au lieu de 5 à 10 %, à celui obtenu à partir des bilans de débits exécutés durant les années 1974-1975.

La méthode présentement utilisée permet en effet de s'affranchir des apports latéraux d'écoulement qui faussaient vraisemblablement les bilans de débits réalisés en 1974 et 1975.

VII - CONCLUSION

Il s'agissait de déterminer le taux de recyclage dans les mines de fer, des eaux rejetées dans les ruisseaux du bassin du Woigot par 4 puits de pompage. Les informations qui nous avaient été communiquées faisaient état :

- de la brièveté des temps de transfert des eaux entre leur infiltration dans les lits des ruisseaux et leur résurgence au niveau des galeries de mines. Les observateurs constataient que les chutes de pluie ne précèdent en général que de quelques jours les accroissements de débit des venues d'eaux en fond de mines.
- de l'importance des infiltrations des eaux rejetées à certaines exhaures. Les années précédentes des bilans de débit avaient fait apparaître des taux d'infiltration voisins de 50 %.

Les injections d'Iodure de Sodium, réalisées durant l'été 1977 aux quatre points d'exhaure concernées, ont montré :

- Que le temps de transit des eaux exhaurées du Woigot vers SAINT PIERREMONT aval et amont atteint de 3 à 5 mois.
- Que le taux de recyclage des eaux rejetées par les mines de SAINT PIERREMONT et TUCQUEGNIEUX est compris entre 5 % et 20 %, ce recyclage aboutissait à la seule exhaure de SAINT PIERREMONT.
- Que le traceur injecté à ANDERNY n'était pas encore réapparu 6 mois plus tard.

Les essais complémentaires réalisés sur l'exhaure d'ANDERNY ont montré :

- Que 20 % de l'eau rejetée par ce point d'exhaure dans le Ruisseau de la Vallée s'infiltrèrent dans le sous-sol sur les quatre premiers kilomètres du ruisseau.
- Que 9 mois après l'injection complémentaire, en Juin 1978, d'une importante quantité d'Iodure de Sodium dans le rejet d'ANDERNY, aucune réapparition de ce traceur ne s'est encore manifestée, ni dans les eaux d'exhaure d'ANDERNY, ni dans celles des trois autres points de rejet du bassin du Woigot.

Sans prétendre à une interprétation hydrogéologique de ces résultats, il paraît possible de conclure qu'un écoulement d'eau intermédiaire provoque l'entraînement des eaux infiltrées et du traceur vers l'aval du bassin, ou que les temps de transit dans le **sous-sol** demeurent supérieurs à la durée des essais, tandis que le traceur se mélangerait à d'importantes masses d'eau souterraines.

ANNEXE TECHNIQUE - I -

DETERMINATION DU TAUX DE RECYCLAGE DES EAUX EXHAUREES

A/ PRINCIPES :

Il s'agit de déterminer le pourcentage des eaux qui, ayant transité une première fois par un point d'exhaure, se retrouvent à nouveau déversées par ce même point de rejet ou par ceux des mines voisines après s'être infiltrées jusqu'au niveau du gisement ferrifère.

Cette condition de travail, spécifiée dans la Convention GR-760.836 établie entre l'Agence Financière de Bassin et le CEA/CENG, permet de limiter l'étude à l'exécution du bilan de recyclage d'un traceur qui, injecté une première fois dans les eaux d'exhaure, va s'infiltrer et réapparaître dans les rejets des jours suivants. Elle conduit à négliger les infiltrations qui pourraient s'écouler hors des zones exploitées des gisements. Mais elle est en bon accord avec l'hypothèse de travail, retenue plus haut, d'une circulation verticale et rapide des infiltrations.

B/ METHODOLOGIE :

Dans ce procédé, si un volume V d'eau est exhauré à une certaine date et si une fraction v de ce volume s'infiltré dans le sous-sol, elle est supposée devoir être rejetée à nouveau les jours suivants et la détermination du taux d'infiltration τ des eaux d'exhaure revient à réaliser le quotient

$$\tau = \frac{v}{V}$$

En fait, le volume v d'eau recyclé est mélangé à des eaux d'autres origines dont il est indiscernable. Le marquage du volume exhauré initialement V , à l'aide d'une masse A d'un traceur approprié revient à charger les eaux rejetées au ruisseau d'une concentration en traceur

$$C_1 = \frac{A}{V}$$

La masse de traceur infiltrée est alors

$$a = v.C_1$$

A la suite de l'apport d'un volume R d'eau étrangère la concentration de l'eau rejetée après recyclage devient :

$$C_2 = \frac{v C_1}{R + v}$$

Mais la masse de traceur rejetée est toujours

$$C_2 \cdot (R + v) = v \cdot C_1 = a$$

Le taux de recyclage s'écrit alors

$$\tau = \frac{v}{V} = \frac{C_2(R + v)}{C_1} \cdot \frac{C_1}{A} = \frac{C_2(R + v)}{A} = \frac{a}{A}$$

Dans le cas où le traceur serait injecté en quelques instants au lieu d'être réparti sur toute la durée de l'exhaure, les concentrations C_1 et C_2 varieraient avec le temps. Mais il suffirait de poser

$$A = \frac{V}{T} \cdot \int_0^T C_1(t) dt \text{ avec } T \text{ durée de l'exhaure considérée}$$

$$a = \frac{v}{T} \cdot \int_0^T C_1(t) \cdot dt = \frac{R+v}{\theta} \cdot \int_0^\theta C_2(t) \cdot dt \text{ avec } \theta \text{ durée du rejet du traceur recyclé}$$

pour pouvoir également écrire :

$$\tau = \frac{v}{V} = (R+v) \cdot \frac{T}{\theta} \cdot \frac{\int_0^\theta C_2(t) \cdot dt}{\int_0^T C_1(t) dt} = \frac{R+v}{A} \cdot \frac{\int_0^\theta C_2(t) \cdot dt}{T} = \frac{R+v}{A} \cdot \frac{\int_0^\theta C_2(t) \cdot dt}{A \cdot T} = \frac{R+v}{A} \cdot \frac{\int_0^\theta C_2(t) \cdot dt}{A \cdot T}$$

$$\tau = \frac{v}{V} = \frac{a}{A}$$

La mesure du taux de recyclage des eaux se borne à la détermination du rapport $\frac{a}{A}$.

C/ MESURES PRATIQUES :

Selon le type de circulation du traceur dans le sous-sol deux techniques peuvent être appliquées à la détermination de τ :

a) La circulation dans le sous-sol s'effectue sans provoquer l'étalement de la vague de traceur

La masse τA de traceur infiltrée reste bien groupée, elle va ressortir en quelques jours. La fraction de traceur réinjectée lors du deuxième transit du traceur dans le lit du ruisseau et forcément égale à $\tau^2 A$ ne commence à ressortir qu'après l'achèvement du passage de la vague due au premier transit. Il n'y a donc pas ou peu de chevauchement des deux premières vagues de traceur qui ressortent de l'exhaure.

C'est le cas présenté sur la figure 3A. La surface de la première vague donne directement $a = \tau A$.

b) L'écoulement dans le sous-sol s'effectue parallèlement par plusieurs trajets

Tout le traceur apporté par la première infiltration n'est pas encore ressorti que les vagues dues aux deuxième et troisième recyclage apparaissent déjà. C'est le cas présenté sur la figure 3B. Il n'est pas possible de déterminer a directement.

Cependant, les quantités de traceur exhaurées au cours des différents cycles suivent une progression géométrique dont le premier terme est A , le rapport τ et le nombre de termes infini. La masse totale de traceur exhauré S est alors égale à la somme de cette progression géométrique

$$S = \frac{A}{1-\tau} \quad \text{donc} \quad \tau = 1 - \frac{A}{S}$$

Comme τ est certainement nettement inférieur à 1 les termes de la progression décroissent très vite et il n'est pas nécessaire de mesurer les concentrations en traceur au point d'exhaure durant plus de 3 à 4 cycles.

Que la circulation souterraine s'effectue selon l'un ou l'autre type il semble possible de déterminer τ avec une précision relative de l'ordre de 4 à 6 %, les erreurs ne provenant que de la détermination des masses A et a ou S . L'erreur commise sur A étant négligeable, l'erreur relative sur τ est donnée par la relation :

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{\Delta a}{a} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta S}{S}$$

Si la valeur réelle de τ est 0,1, les résultats de mesure donneront une valeur de τ vraisemblablement comprise entre 0,094 et 0,106.

Ce qui est assez précis, de plus la détermination du taux d'infiltration par recyclage d'un traceur offre la possibilité de repérer les lieux d'arrivée du traceur au fond de la mine. Par contre, la nécessité d'effectuer des prélèvements d'exhaure jusqu'à l'achèvement du passage de la première vague de recyclage au moins grève lourdement le procédé si le temps de transfert dans le sous-sol est long.

ANNEXE TECHNIQUE - II -

DETERMINATION DES INFILTRATIONS D'UN COURS D'EAU

L'évaluation des infiltrations d'un cours d'eau à partir de bilans hydrauliques établis en deux points de son parcours, peut être faussée par des apports latéraux d'écoulement dont l'importance est souvent difficilement appréciable. Mais si ces bilans portent sur une masse de traceur ajoutée à l'écoulement suffisamment en amont du premier point de mesure pour que le traceur se soit entièrement mélangé avec l'eau avant de l'atteindre, la difficulté est supprimée. Les apports parasites ne perturbent en rien les bilans de traceur et le procédé présente les trois avantages suivants :

A/ Le taux d'infiltration du traceur est le même que celui de l'eau :

Si un traceur est injecté au niveau d'un point d'exhaure avec un débit constant q dans un débit de rejet également constant Q la concentration de l'eau en traceur sera

$$C_1 = \frac{q}{Q}$$

Si une fraction rQ de l'écoulement s'infiltré dans le lit du ruisseau un débit proportionnel de traceur

$$C_1 \cdot rQ = rq$$

disparaîtra avec l'eau.

B/ Le taux d'infiltration du traceur n'est pas perturbé par un apport d'eau parasite

Si un apport de débit d'eau parasite R s'ajoute sur le cours du ruisseau la concentration en traceur deviendra

$$C_2 = \frac{q}{Q + R}$$

Une fraction $T (Q + R)$ du débit d'eau s'infiltrera entraînant toujours la fraction

$$C_2 T (Q + R) = Tq$$

du débit de traceur.

C/ La fraction de débit de traceur infiltrée entre deux sections de mesure est aisément mesurable

Soient :

- Q_1 le débit du ruisseau à travers la section de mesure amont et C_1 la concentration de l'eau en traceur.
- Q_2 le débit du ruisseau à travers la section de mesure aval et C_2 la concentration de l'eau en traceur à ce niveau.

Les débits q_1 et q_2 de traceur traversant respectivement les mêmes sections amont et aval sont alors donnés par les relations

$$q_1 = C_1 \cdot Q_1 \quad \text{et} \quad q_2 = C_2 \cdot Q_2$$

Le taux d'infiltration $\tau_{1,2}$ relatif à ce segment de ruisseau est alors donné par la relation

$$\tau_{1,2} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{C_1 \cdot Q_1 - C_2 \cdot Q_2}{C_1 \cdot Q_1}$$

En principe pour déterminer $\tau_{1,2}$ il suffit de mesurer C_1 , C_2 , Q_1 et Q_2 .

En fait, dans le cas présent comme le rejet d'exhaure dure peu, les régimes de débits permanents n'ont guère le temps de s'établir et les produits $Q_1 C_1$ et $Q_2 C_2$ peuvent différer à un instant donné sans qu'il y ait infiltration entre les deux sections de mesure. Aussi convient-il de travailler sur toute la masse de traceur qui traversera les deux sections de mesure en intégrant la relation précédente

$$\tau_{1,2} = \frac{\int_0^{T_1} C_1(t) \cdot Q_1(t) dt - \int_0^{T_2} C_2(t) \cdot Q_2(t) dt}{\int_0^{T_1} C_1(t) \cdot Q_1(t) dt}$$

Les temps T_1 et T_2 sont supérieurs aux temps de passage de la vague de traceur.

Ce procédé est plus complexe à mettre en oeuvre que la méthode basée sur le recyclage d'un traceur, car il faut effectuer en permanence durant toute une nuit des mesures de débit et de concentration en traceur à l'entrée et à la sortie de chaque segment de ruisseau étudié.

Il offre cependant deux avantages :

- Il fournit directement une localisation des zones d'infiltration des ruisseaux.
- Il ne tient compte que de l'infiltration du traceur et peu importe le mode de circulation des eaux souterraines et leur temps de transit.

La précision relative du taux d'infiltration des eaux d'exhaure donnée par ce dernier procédé est généralement inférieure à celle obtenue avec la méthode basée sur le recyclage d'un traceur

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\tau}{\tau} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta(q_1 - q_2)}{q_1 - q_2} + \frac{\Delta q_1}{q_1}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(2 \cdot \frac{\Delta(C_1 Q_1)}{Q_1 C_1 - Q_2 C_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(C_1 Q_1)}{C_1 Q_1}\right)^2} \end{aligned}$$

La précision relative des mesures de débit avoisine 1 %.

L'erreur relative $\frac{\Delta(C_1 Q_1)}{C_1 Q_1} \# \frac{\Delta(C_2 Q_2)}{C_2 Q_2}$ peut être évaluée à 2,5 % compte tenu de l'erreur $\frac{\Delta C_1}{C_1}$ généralement voisine de 2 %. Si la perte de traceur **est** de l'ordre de 10 % entre les sections aval et amont il vient :

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = \sqrt{0,0006 + 4 \cdot \left(\frac{0,025 \cdot C_1 Q_1}{0,1 \cdot C_1 Q_1}\right)^2} = \sqrt{0,25} = 0,50$$

Si la valeur réelle de τ est 0,1 les résultats de mesure indiqueront seulement que la valeur de τ est comprise entre 0,05 et 0,15.
