

**Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique
et des Ressources Halieutiques**

*Direction Régionale de l'Agriculture, de
l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques des
Hauts Bassins*

**Appui à la gestion et à la protection des ressources en eau
souterraine exploitées dans la région de Bobo-Dioulasso**

Préparatifs d'un essai de traçage par dilution chimique sur la rivière Kou de
l'aval des sources de Nasso au pont de Dinderesso (Burkina Faso)

Elie SAURET - Avril 2011



Direction Générale de la
Coopération au Développement



Association pour la Promotion
de l'Education et de la
Formation à l'Etranger



Wallonie-Bruxelles International



Université de Liège – Secteur
"Hydrogéologie et Géologie de
l'Environnement"



Aquapôle



Service Public de Wallonie –
Direction Générale
opérationnelle de l'Agriculture,
des Ressources Naturelles et de
l'Environnement



Office National de l'Eau et de
l'Assainissement



Ville de Bobo-Dioulasso – Service
"Environnement"



Association Eau, Développement
et Environnement



Observatoire de l'Eau des Bassins
versants du Mouhoun, de la
Comoé et du Banifing



Institut International d'Ingénierie
de l'Eau et de l'Environnement

Table des matières

I.	Objectifs de l'étude	4
II.	Généralités sur les mesures de débits	4
III.	Les méthodes physico-chimiques : Jaugeage par dilution chimique	5
III.1.	Aperçu.....	5
III.2.	Mise en œuvre de la méthode d'injection à débit constant sur la rivière Kou.....	5
3.2.1.	<i>Théorie</i>	5
3.2.2.	<i>Emploi de la fluorescéine (uranine)</i>	6
3.2.3.	<i>Point d'injection</i>	6
3.2.4.	<i>Echantillonnage</i>	11
IV.	Préparatifs d'avant essai	13
V.	Références bibliographiques	14

Liste des figures

Figure 1. Bilan traceur entre deux sections de jaugeage chimique	6
Figure 2 : Sites favorables à une injection du traceur et points d'échantillonnage choisis.....	7
Figure 3 : Profil topographique du fond du Kou à la section d'injection (aval des sources ONEA)	9

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques comparés des deux sites d'injection possibles de traceur.....	7
Tableau 2 : Temps d'injection estimé en fonction du dispositif d'injection choisi.....	10
Tableau 4 : distance entre points d'échantillonnage	11
Tableau 5 : temps estimatif de première arrivée du traceur.....	12

I. Objectifs de l'étude

L'objectif de la mise en œuvre d'essais de traçage par dilution chimique sur le Kou est :

- d'évaluer de manière globale ou par tronçons, le débit de base des eaux souterraines par jaugeages successifs du débit de la rivière Kou (la rivière constitue l'exutoire naturelle des eaux souterraines au niveau des sources de Nasso/guinguette),
- suivre l'évolution de ces débits sur plusieurs tronçons de la rivière pendant la contre-saison afin de si une diminution progressive du débit est observée, ce qui refléterait un tarissement des réserves en eau souterraine dans les formations du sédimentaire ou de la plaine alluviale au cours du temps.

II. Généralités sur les mesures de débits

Dans la littérature scientifique, il existe quatre grandes catégories de méthodes pour la mesure du débit d'écoulement naturel d'un cours d'eau, d'une rivière, d'un canal.... Ce sont :

- les méthodes d'exploration du champ de vitesse : basées sur la détermination du débit à partir de la vitesse d'écoulement de l'eau dans une section transversale du cours d'eau,
- les méthodes capacitatives : basées sur une détermination directe du débit à partir du temps nécessaire pour le remplissage d'un récipient d'une contenance déterminée,
- les méthodes hydrauliques : basées sur la construction de canaux jaugeurs ou de déversoirs calibrés permettant l'établissement d'une relation « hauteur d'eau – débit » et ;
- les méthodes physico-chimiques : basées sur l'injection dans le cours d'eau d'un traceur et le suivi de sa variation dans le temps.

Pour la présente étude, les méthodes basées sur l'injection d'un traceur dans le cours d'eau sont testées, la première méthode étant testée le début de la contre saison sur des tronçons du Kou, d'amont en aval.

III. Les méthodes physico-chimiques : Jaugeage par dilution chimique

III.1. Aperçu

Le jaugeage par dilution chimique consiste à injecter dans le cours d'eau, un traceur à une concentration connue et déterminer par prélèvements d'échantillons d'eau à l'aval du point d'injection la dilution de la solution traçante injectée fonction du débit du cours d'eau. Il existe deux types de jaugeage par dilution chimique : la méthode d'injection à débit constant et la méthode par intégration (injection globale ou instantanée).

III.2. Mise en œuvre de la méthode d'injection à débit constant sur la rivière Kou

3.2.1. Théorie

Elle consistera à injecter dans la rivière une solution de traceur de concentration connue à débit constant et de manière continue (pendant un temps déterminé relativement long). A une certaine distance (suffisante pour obtenir un mélange homogène de la solution traçante dans le cours d'eau) en aval du point d'injection, la concentration du traceur est mesurée (point d'échantillonnage). Entre deux sections n et $n+1$ de jaugeage chimique (Figure 1), on a :

Conservation de la quantité d'eau :

$$Q_K(n+1) = Q_K(n) + Q_{PA}(n+1) - Q(n+1) \quad (1)$$

Conservation de la quantité de traceur :

$$C_K(n+1) \times Q_K(n+1) = C_K(n) \times Q_K(n) + Q_{PA}(n+1) \times 0 - C_K(n+1) \times Q(n+1) \quad (2)$$

$$C_K(n+1) \times [Q_K(n+1) + Q(n+1)] = C_K(n) \times Q_K(n)$$

D'après l'équation (1), $Q(n+1) = Q_K(n+1) - Q_K(n) - Q_{PA}(n+1)$

On obtient après regroupement des équations :

$$C_K(n+1) = C_K(n) \times \frac{Q_K(n)}{Q_K(n+1)} = C_K(n) \times \frac{Q_K(n)}{Q_K(n) + Q_{PA}(n+1)} \quad (3)$$

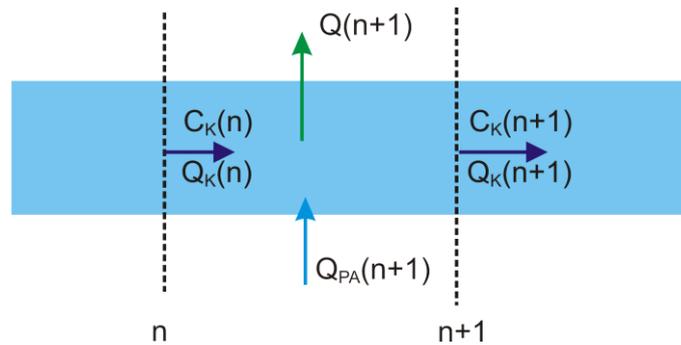


Figure 1. Bilan traceur entre deux sections de jaugeage chimique

3.2.2. Emploi de la fluorescéine (uranine)

C'est l'un des traceurs les plus utilisés et qui possède une grande sensibilité de détection. Dans la zone d'étude, en saison sèche, les eaux de la rivière Kou sont claires, ce qui diminue la limite de détection du traceur qui peut descendre à 0.001 µg/l. La fluorescéine présente l'intérêt d'être en très petite quantité dans l'environnement (bruit de fond négligeable), elle peut être dosée avec plus de précision même si la concentration n'est pas élevée. Le problème rencontré avec la fluorescéine est sa sensibilité à la lumière de l'ordre de 1/2 vie en quelques heures. En outre, la fluorescence diminue dans des eaux acides (fluor +/- divisée par 2 à pH=5).

3.2.3. Point d'injection

Deux points d'injection sont envisageables à l'aval des sources de Nasso (figure 2, tableau 1) : la confluence « Kou-Guinguette » située à environ 200 m au nord des sources de Nasso ou le site de Kapkodougou situé environ 850 m à l'aval des zones de sources de Nasso/guinguette.

- Site du côté du « mur de protection » des sources de Nasso/guinguette

Avantages : pour une évaluation efficace et réelle du débit des eaux souterraines, une injection à l'aval immédiat de la confluence « Kou – Guinguette » serait intéressante. Le site proposé présente. Les eaux sont claires (turbidité faible) et la rivière est large d'environ 9.5 m avec une lame d'eau d'une trentaine de centimètres, pour un débit d'écoulement de 1.6 m³/s (tableau1). Ceci constitue un avantage pour un parfait mélange et brassage du traceur.

Inconvénients : NEANT

- Site de Kapkodougou.

Avantages : Les eaux de la rivière y sont aussi claires (turbidité faible) (tableau 1).

Inconvénients : Comparé au site précédent, il est moins accessible aux gros engins que ce soit en rive gauche ou droite. Le site du « mur de protection » des sources de Nasso est donc plus favorable pour un premier essai de traçage par dilution chimique.

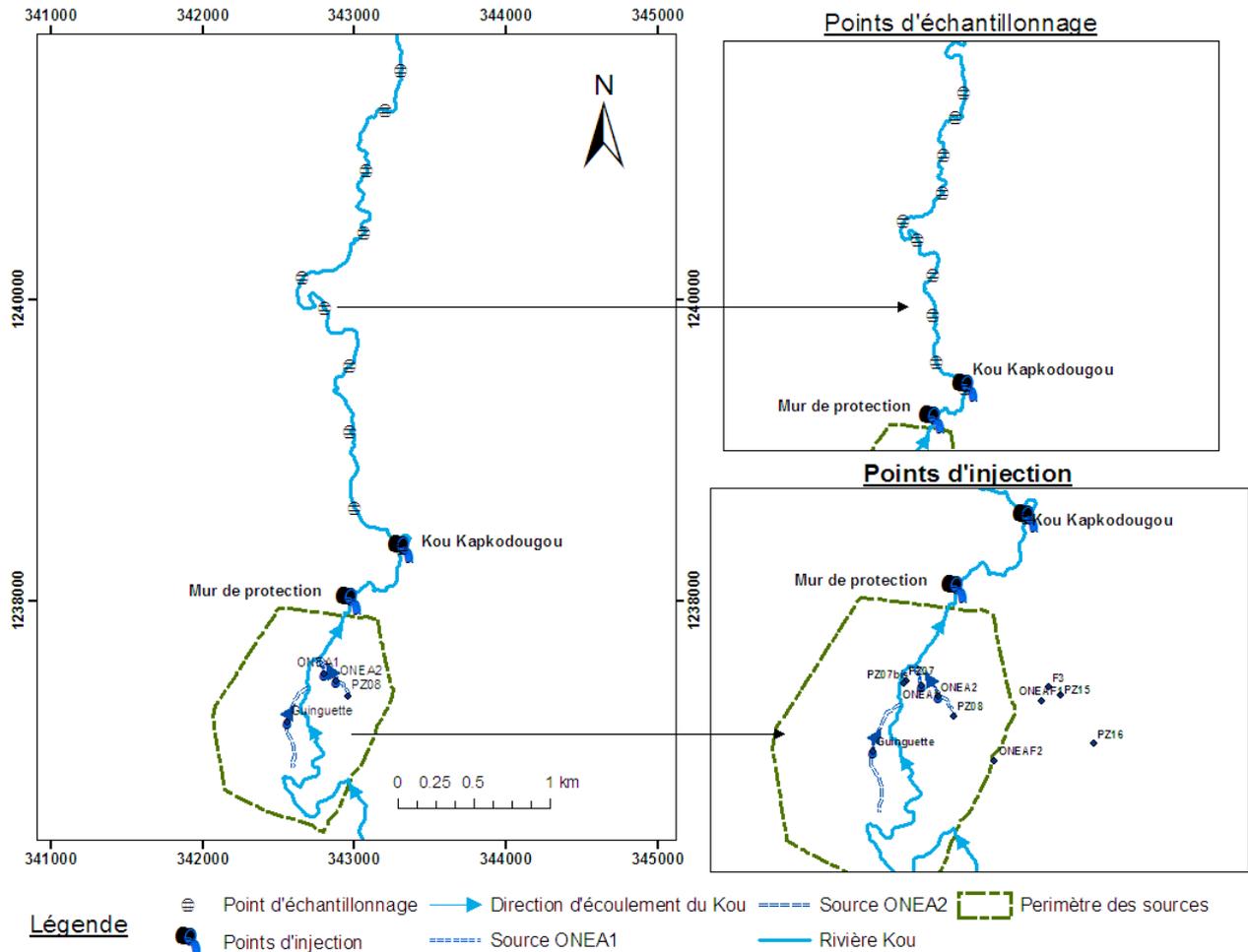


Figure 2 : Sites favorables à une injection du traceur et points d'échantillonnage choisis

Tableau 1 : Caractéristiques comparés des deux sites d'injection possibles de traceur

Sites	Débit (l/s)	C°(us/cm)	pH	T°C	clarté de l'eau	Largeur Kou	lame d'eau	Niveau de l'eau p/r au sol	Accessibilité
Mur de protection	1621	80	5.98	30	Assez claire	9.55m	27cm	2.3m	oui
Kou_Kapkodougou	1708.5	80	6.03	30.03	assez claire	12m	39.1cm	1.85m	oui

3.2.3.1. Dispositif d'injection

Dans la pratique l'injection pourra se faire :

- **à partir de l'hydro cureur** du service d'assainissement de l'ONEA. Il est muni d'une cuve à eau d'une contenance de 2000 l et d'une cuve à boue de 4000 l de volume.

L'hydrocureur possède une réglette de pression qui permet de moduler la pression injection de l'eau de 0 à 160 bars. Une pression maximale de 160 bars correspond à un débit de 100 l/min.

L'eau est injectée dans la canalisation (rivière dans le cas présent) par l'entremise d'un flexible. La possibilité de choix de diamètre de flexible et la manœuvre de la réglette de pression permettent de contrôler aisément la pression d'injection et d'injecter à un débit souhaité.

- **à partir d'un camion citerne de 6000, 8000 ou 10000 l** muni d'un flexible d'injection.

Pour cela il faudrait pomper l'eau de la citerne et l'injecter dans le cours d'eau. Le projet dispose d'un groupe électrogène d'un débit actuel de l'ordre de 400 l/min suffisant pour pomper la solution diluée de la citerne et l'injecter dans le cours d'eau.

- **à partir d'une vase Mariotte conçu** à cet effet.

3.2.3.2. Estimation de la distance de mixage du traceur dans la rivière

D'après Schudel et al. (2002) dans le cas de rivières alluviales, la distance idéale de mélange du traceur est donnée par :

$$L = \frac{\bar{v} \times k \times \bar{b}^2}{0.63 \times S^{1/2} \times d^{\frac{3}{2}}}$$

Avec k un coefficient de mixage, \bar{b} la largeur moyenne du cours d'eau, \bar{v} la vitesse moyenne d'écoulement de l'eau, S la pente du fond du cours d'eau et d la profondeur moyenne des eaux entre le point d'injection et le point d'échantillonnage.

Les mesures au moulinet réalisées pendant la contre saison actuelle indiquent une valeur de vitesse moyenne d'écoulement des eaux au voisinage du site du mur de protection de l'ordre de 0.55 m/s. Le profil du fond topographique de la rivière (figure 3) indique une profondeur moyenne des eaux de 0.27 m pour une pente d'environ 0.1%. En admettant un

mélange parfait du traceur dans le cours d'eau et une injection au centre de la section transversale la valeur de k est de 0.1 (normée ISO 9555-1). Ces données permettent d'estimer une la distance de mixage à environ **35 m** du point d'injection.

Cette valeur correspond à la distance nécessaire pour un mélange parfait et homogène du traceur dans la rivière. Il orientera l'opérateur pour le choix idéal du premier point d'échantillonnage. A priori donc, les mesures pourront commencer à une cinquantaine de mètres à l'aval du point d'injection. Des mesures répétées suivant la largeur seront réalisées sur les premiers points en vue de vérifier l'efficacité du mixage.

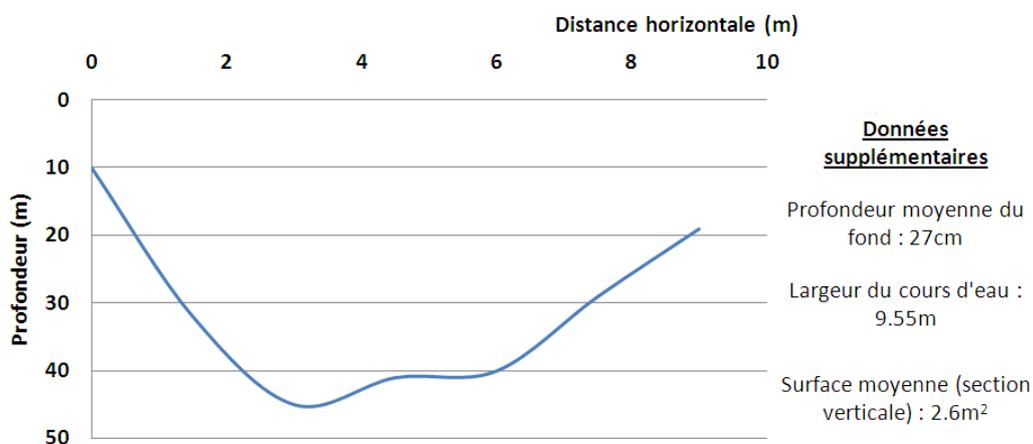


Figure 3 : Profil topographique du fond du Kou à la section d'injection (aval des sources ONEA)

3.2.3.3. Durée d'injection

Elle dépend de la turbidité des eaux du cours d'eau, de la distance d'échantillonnage, de la vitesse d'écoulement de l'eau. Il est généralement déterminé à partir d'expériences au laboratoire basées sur les temps d'observation visuelle ou au fluorimètre du nuage de traceur à des différentes sections d'échantillonnage prédéfinis. Il faut que le traceur ait au minimum parcouru un trajet égal à la longueur du tronçon jaugé augmenté de la distance de mixage. Le temps nécessaire est égal à la section moyenne d'écoulement divisée par le débit du cours d'eau et multipliée par (longueur du tronçon jaugé + distance de mixage).

Grosso-modo (pour 1 km de rivière jaugée) :

$$T_{\min, inj} = S_{kou} / Q_{kou} \times D_{jaugée} = (10 \times 0,25) / 1,6 \times 1000 \approx 1600 \text{ s} \approx 30 \text{ min}$$

Il faut donc envisager d'injecter de manière continue pendant au moins une heure, histoire d'avoir le temps de faire les prélèvements et/ou mesures au fluorimètre le long de la section jaugée.

Tableau 2 : Temps d'injection estimé en fonction du dispositif d'injection choisi

Dispositif d'injection	Volume	Débit maximal (groupe électrogène Grundfolds)*	Temps estimé
Camion citerne	6000l	400l/mm	15min
	8000l	400l/mm	20min
	10000l	400l/mm	25 min
hydrocureur	2000l	Variable	Variable

*Le débit actuel du groupe n'excède pas 400l/s

Si on part sur la base de l'utilisation de l'hydrocureur et d'une durée d'injection d'une heure, on arrive à un débit d'injection $Q_{inj} = 2\text{m}^3/\text{h} (=2/3600 \text{ m}^3/\text{s})$.

3.2.3.4. Quantité de traceur à injecter

Le choix des quantités exactes à injecter s'avère très important. Une quantité faible mettra en péril le succès de l'opération tandis que des quantités trop élevées apportent des charges inutiles aux eaux, ce qui pourrait les contaminer par la suite.

Pour obtenir une bonne réponse de fluorescence, il faut travailler à une gamme de concentration entre 1 et 10 ppb ($\mu\text{g}/\text{kg} = \text{mg}/\text{m}^3$). Si on considère une concentration de 10 ppb, on peut évaluer la concentration à l'injection C_{inj} comme suit :

$$C_{inj} = C_{kou} \times Q_{kou} / Q_{inj} \approx 10 \times 1,6 / (2/3600) \approx 30000 \text{ ppb} (\text{mg}/\text{m}^3)$$

Pour les 2 m^3 de fluide traceur à injecter, il faut donc dissoudre 60g de traceur.

Sur base des recommandations de la norme ISO 9555-1, la quantité de traceur à injecter dans le cas d'une injection à débit constant est donnée par :

$$M = Q \times T \times C_2$$

Avec : M : la masse en gramme injectée ; T : la durée de l'injection (s), Q : débit estimatif du cours d'eau (m^3/s); et C_2 : la concentration attendue au point d'échantillonnage (g/m^3).

A titre indicatif, en considérant un temps d'injection compris entre 30mn et 1h00mn environ et un débit moyen du cours d'eau estimé à l'actuel à $1.55 \text{ m}^3/\text{s}$, **la masse à injecter est compris entre $2.8\text{kg} \times C_2$ et $5.6 \text{ kg} \times C_2$.**

3.2.4. Echantillonnage

3.2.4.1. Principes

Pour un échantillonnage complet il serait indiqué :

- **avant l'injection du traceur dans le cours d'eau :**
 - de prélever, 3 échantillons au point d'injection et 1 aux différentes sections retenues pour avoir une idée du « bruit de fond »,
 - de prélever deux (2) échantillons de la solution de traceur diluée
- **après injection du traceur**
 - prélever à la section d'injection trois (03) échantillons d'eau, un (01) en rive gauche, un (01) en rive droite et un (01) au milieu du lit du cours d'eau pour s'assurer que le mélange de la solution traçante dans l'eau est parfaite et totale
 - prélever de façon continue ou discrète à des intervalles de temps définis ou indéfinis des échantillons d'eau aux différents points de prélèvements.

3.2.4.2. Points et sections d'échantillonnage

La distance entre le point d'injection et le dernier point d'échantillonnage a été considéré à environ 6 km. En tenant compte de l'accessibilité du cours d'eau, 11 points d'échantillonnages (y compris le point d'injection) ont été défini sur le tronçon de la rivière, espacés les uns des autres de 600 m environ exceptés les distances entre les 02 premiers points et les 02 derniers points. Les distances exactes entre ces points et leur localisation sont mentionnées dans le tableau 4 et la figure 3 ci dessus.

Tableau 4 : distance entre points d'échantillonnage

Points	Echt2	Echt3	Echt4	Echt5	Echt6	Echt7	Echt8	Echt9	Echt10	Echt11
Point d'injection	690	1290	1890	2490	3090	3690	4290	4890	5490	5835
Echt2		600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5145
Echt3			600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4545
Echt4				600	1200	1800	2400	3000	3600	3945
Echt5					600	1200	1800	2400	3000	3345
Echt6						600	1200	1800	2400	2745
Echt7							600	1200	1800	2145
Echt8								600	1200	1545
Echt9									600	945
Echt10										345
Echt11										

*Echt2 Correspond au site de Kou à Kapkodougou

3.2.4.3. Temps estimatif de première arrivée du traceur

En considérant les distances entre points d'échantillonnage et d'injection et en prenant en compte la vitesse actuelle d'écoulement des eaux (0.55 m/s), les temps estimatifs de première arrivée du traceur par point sont répertoriés dans le tableau 05 ci-dessous.

Tableau 5 : temps estimatif de première arrivée du traceur

Points	Echt2	Echt3	Echt4	Echt5	Echt6	Echt7	Echt8	Echt9	Echt10	Echt11
distance par rapport au point d'injection	690	1290	1890	2490	3090	3690	4290	4890	5490	5835
Temps estimé	25mn	48mn	1h10mn	1h32mn	1h54mn	2h16mn	2h38mn	3h01mn	3h23mn	2h36mn

Ce temps reste purement indicatif et il serait conseillé de démarrer le prélèvement à un temps plus inférieur.

3.2.4.4. Protocole et intervalles de temps d'échantillonnage

Le projet a déjà une sonde YSI MPS 556 qui permet d'enregistrer en continue pour des intervalles de temps définis à souhait, la température, la conductivité et l'oxygène dissous. Un intervalle de temps d'échantillonnage plus court serait raisonnable : **15 ou 30 mn par point**. Le nombre d'échantillon total à prendre par point dépendra du temps nécessaire pour que la concentration du nuage du traceur se stabilise dans le cours d'eau tout en étant perceptible à l'œil humain.

3.2.4.5. Dispositif d'échantillonnage

Le dispositif d'échantillonnage est constitué de :

- de 10 préleveurs repartis sur les 10 points d'échantillonnage,
- une équipe motorisée (véhicule apefe) avec chauffeur + manipulateur fluorimètre. Remontant le tronçon jaugé d'aval -> amont pour faire des mesures de fluorescence de l'eau tout au long du cours. Avec GPS pour repositionner + flacons pour prélever des échantillons de contrôle+
- des pissettes manuelles pour la « prise de l'eau dans le cours d'eau »,
- d'un minimum de 150 flacons de 50 ml dont 15 par préleveur,
- des pipettes ou seringues pour aspirer et évacuer la solution dans les flacons,

- de gants pour éviter tout contact avec la solution prélevée,
- une boîte solide et opaque pour stockage immédiat des échantillons à l'abri de la lumière
- d''étiquettes de marquage des échantillons comprenant les informations suivante : date et heure de l'échantillonnage, n° de l'échantillon, nom de la localité, distance par rapport au lieu d'injection.

3.2.4.6. Exemple de fiche d'échantillonnage

Tronçon de la rivière testé :

Localité :

Identité du préleveur :

Echantillon N° :

Distance par rapport au lieu d'injection :

Avant injection

Concentration : pH : T° de l'eau :

Après injection

Heure d'échantillonnage					
-------------------------	--	--	--	--	--

IV. Préparatifs d'avant essai

Tâches à faire
Tester le fluorimètre
ré-calibrer la sonde YSI
Préparer les sondes piézométriques et multiparamètres
Récupérer les flacons auprès de VREO ou les acheter sur place
Contacter les préleveurs
Préparer les puisettes
préparer le dispositif d'injection

V. Références bibliographiques

Schudel, B. et al., 2002. Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie. Guide pratique.
Rapp. OFEG, Sér. Géol. 3, Berne (Switzerland).