

Outils innovants pour la caractérisation haute résolution des sites pollués : Flux et concentrations

Fiches pour une caractérisation multiniveau des concentrations.

- Echantillonneur passif iFLUX
- Préleveur ciblé
- Pompe entre packers
- GINGER Multi-Level System
- Pompe pneumatique bas débit entre obturateurs
- Préleveur commandé sous pression

Fiches pour des mesures de flux hydriques multiniveau

- Colloidal borescope ou vélocimètre
- Flowmètre (Heat Pulse Flowmeter)
- Echantillonneur passif iFLUX
- Direct Velocity Tool

Fiche pour des mesures de flux massique multiniveau

- Echantillonneur passif iFLUX

FICHE TECHNIQUE

Concentrations multiniveaux
des polluants

Outils pour la caractérisation
haute résolution des sites et
sols pollués

Echantillonneur passif iFLUX

METHODE PASSIVE

Prélèvements multiniveaux

Hauteur d'une cartouche : 16 cm

Diamètre de forage : adaptable, construit sur mesure

Profondeur : pas de limite

Durée d'exposition fonction des concentrations attendues dans les eaux souterraines



Principe

Les échantillonneurs iFLUX permettent de calculer la **concentration moyenne en polluants** dans les eaux souterraines pendant leur période d'exposition en installant deux cartouches simultanément :

- une cartouche permettant la mesure du flux d'eau (vitesse de Darcy d'écoulement des eaux souterraines). Elle contient un mélange de 5 alcools traceurs dont les facteurs de retard sont contrastés, afin de pouvoir mesurer différents ordres de grandeur de flux d'eau. La quantité de traceur restante est mesurée après exposition et permet de calculer la vitesse d'écoulement des eaux souterraines,
- une cartouche permettant la mesure du flux massique de polluants. Les polluants s'adsorbent sur l'adsorbant contenu à l'intérieur de l'échantillonneur passif pendant toute sa durée d'exposition.

Matériel nécessaire

Le matériel nécessaire est fourni par la société iFLUX, selon un plan d'installation préalablement défini avec l'utilisateur. Il comprend :

- les cartouches, une pour le flux d'eau et les autres pour les polluants,
- les tiges filetées, les écrous et les connecteurs en inox permettant d'assembler les cartouches aux profondeurs définies.

Des exemples de configuration sont présentés Figure 1.

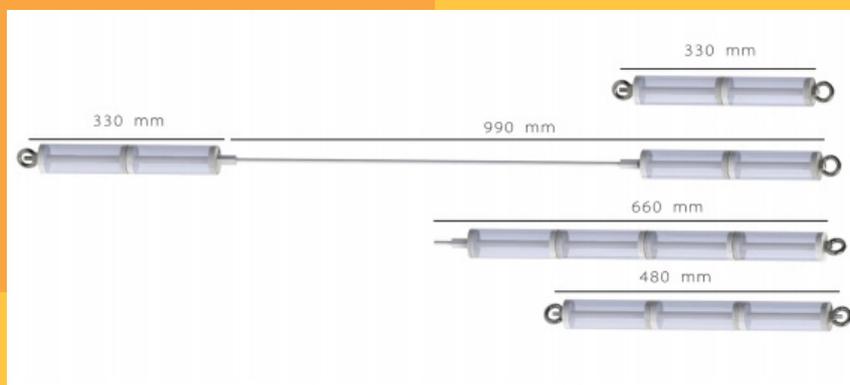


Figure 1 : Mise en œuvre des échantillonneurs iFLUX (de gauche à droite : 1 concentration à 1 profondeur ; 1 concentration à 2 profondeurs ; 3 concentrations à 1 profondeur ; 2 concentrations à 1 profondeur)

Données préalables nécessaires

Définition de la **durée d'exposition** des échantillonneurs iFLUX, : estimée à partir de **l'ordre de grandeur des vitesses d'écoulement** des eaux souterraines sur le site et de la **gamme de concentrations** des composés d'intérêt.

Calcul de la vitesse d'écoulement dans la nappe : perméabilités à proximité immédiate des échantillonneurs iFLUX **déduite de la taille des fentes des crépines**, du **type de massif filtrant** et de la géologie au droit du forage à équiper. Ces éléments supposent un flux majoritairement horizontal, ce qui est le cas avec ces échantillonneurs qui permettent de bloquer les flux verticaux naturels éventuels.

Détermination **des horizons productifs** en pompage conseillée au préalable afin de pouvoir :

- définir les profondeurs d'installation des échantillonneurs passifs de flux dans des piézomètres,
- comprendre et interpréter les données obtenues, puisque les flux massiques les plus forts ne sont pas nécessairement associés aux horizons les plus productifs en pompage (voir fiches de mesure des flux hydriques).

Mise en œuvre

Les échantillonneurs iFLUX sont insérés dans les tiges filetées fournies par la société iFLUX. Le nombre de tiges filetées à mettre en place entre chaque échantillonneur et de connecteurs à insérer entre les tiges filetées est donné par le plan d'installation fourni par la société iFLUX en fonction des profondeurs d'exposition définies par l'utilisateur. Cet assemblage se fait directement au niveau de la tête de forage (voir Figure 2) et les échantillonneurs sont descendus dans le forage lentement et au fur et à mesure de l'assemblage. Un câble en inox est également fourni pour attacher l'ensemble à la tête du forage. Pour le retrait, les échantillonneurs sont sortis du forage un par un et les tiges filetées ainsi que les connecteurs démontés au fur et à mesure.



Figure 2 : Mise en place des échantillonneurs iFLUX

Interprétation de l'essai

Les valeurs de concentrations en polluants aux profondeurs d'exposition sont calculées et fournies par la société iFLUX.

Avantages, inconvénients et limites d'application de la technique

Avantages :

- Mesure simultanée des flux d'eau, des concentrations et des flux massiques de polluants,
- Intégration des variations dans le temps,
- Possibilité de mesures multi-niveaux (si déploiement de plusieurs cartouches « chimiques » et « flux » simultanément).

Inconvénients :

- Nécessité de venir 2 fois sur le terrain : pose et dépose,
- Si la vitesse de nappe est rapide et les concentrations faibles, les temps d'exposition des cartouches de flux d'eau et de polluants peuvent être différents,
- Pour les faibles concentrations, les durées d'exposition sont longues, le forage retenu ne pourra pas faire l'objet d'un suivi traditionnel par pompage pendant l'exposition.

Limites :

- Pour des expositions longues, une dégradation des composés fixés est possible, ainsi que le dépôt de films (bactérien, phase pure) limitant la diffusion au sein de la cartouche,
- Problème d'interprétation des résultats si changement de direction d'écoulement des eaux souterraines pendant la durée d'exposition,
- Sorption compétitive ou limitée par la diffusion peut limiter la capacité des échantillonneurs passifs à retenir certains polluants,
- Cartouches non interprétables si les traceurs ont complètement disparu pour la cartouche hydrique ou si l'adsorbant est saturé (temps d'exposition trop long/concentrations plus importantes que prévues).

Disponibilité et coûts

Des éléments de coûts et de temps passé pour une caractérisation de la qualité des eaux souterraines au moyen d'échantillonneurs iFLUX sont résumés dans le Tableau 1.

Prestation extérieure	Prix unitaire (€)
Fourniture de deux cartouches (flux d'eau et flux massique de polluant), analyse, interprétation et rendu des résultats (société iFLUX)	Se rapprocher de la société iFLUX
Temps	En heure
Pose des échantillonneurs iFLUX	0,25 (1 technicien)*
Retrait des échantillonneurs iFLUX	0,25 (1 technicien)

Tableau 1 : Estimation du budget d'un prélèvement (1 polluant à une profondeur)

Complément d'information

[1] Site internet du fabricant iFLUX : <https://www.ifluxsampling.com>

[2] Résultats du projet HRSC

Film : <https://www.youtube.com/watch?v=lyOD2p61m74>

Rédacteur

J. Michel (Ineris)

FICHE TECHNIQUE

Concentrations multiniveaux
des polluants

Outils pour la caractérisation
haute résolution des sites et
sols pollués

Préleveur ciblé

METHODE ACTIVE

Fenêtre de prélèvements de 30, 50 ou 80 cm

Diamètre du forage : de 50 à 120 mm

Profondeur < 50 m

Débit de purge : 0,5 à 6 L/min



Principe

Le préleveur ciblé permet de prélever des échantillons d'eau de nappe à une **profondeur donnée en dynamique à l'aide d'une pompe immergée 12 V située entre 2 obturateurs.**

Matériel nécessaire

Le préleveur ciblé est constitué d'un bloc de prélèvement (pompe 12 V et obturateurs), d'un boîtier de commande et d'un enrouleur de tube (Figure 1).

Un matériel relativement classique est nécessaire pour réaliser un prélèvement :

- le bloc de prélèvement avec la fenêtre de prélèvement (espace entre les 2 obturateurs) de la taille désirée (30, 50 ou 80 cm) ;
- l'enrouleur avec son câble multibrins ; composé du câble d'alimentation électrique de la pompe 12 V, du tubage d'amené d'air permettant le gonflage des obturateurs et d'un filin de suspension ;
- un boîtier de commande composé du système de mise en marche et d'arrêt de la pompe immergée 12 V, d'un compresseur, d'un manomètre et des commandes de gonflage et de dégonflage des obturateurs ;
- un tuyau de refoulement en eau à connecter à la sortie de la pompe immergée 12V ;
- une batterie 12 V.



Données préalables nécessaires

La position des crépines doit être connue, l'outil ne devant être positionné que devant des zones crépinées.

La connaissance de la coupe lithologique est un plus pour choisir la position de la fenêtre de mesure.

Mise en œuvre

Une fois le forage identifié des mesures préliminaires sont réalisées (diamètre intérieur du forage, niveau statique, profondeur du forage). Ensuite le matériel est déployé :

- réglage de la distance entre les obturateurs (30, 50 ou 80 cm) selon les besoins de l'étude ;
- connexion du câble d'alimentation électrique du préleveur ciblé au boîtier de commande ;
- connexion du boîtier de commande à la batterie ;
- connexion du tuyau d'alimentation en air comprimé du préleveur ciblé au boîtier de commande ;
- connexion du tuyau de refoulement au préleveur ciblé ;
- connexion du tuyau de refoulement à la cellule à flux continu pour la mesure des paramètres physico-chimiques.

Le préleveur ciblé est descendu dans le forage à la profondeur désirée puis les obturateurs sont gonflés jusqu'à une pression d'environ 2 bars augmentée de 1 bar tous les 10 m de profondeur.

Une purge par pompage dynamique à débit moyen (< 2 L/min) est réalisée jusqu'à la stabilisation des paramètres physico-chimiques. La purge est généralement de courte durée (entre 5 et 10 min) car le volume d'eau dans l'espace de prélèvement est relativement faible. La réalisation d'une mesure de débit en début et en fin de purge est recommandée. Après la purge, le prélèvement d'un échantillon d'eau en sortie du tuyau de refoulement est réalisé. Lorsque l'échantillonnage des eaux souterraines est terminé, le système de gonflage des obturateurs est purgé et le préleveur ciblé peut être déplacé vers une autre profondeur de prélèvement si nécessaire et si la taille de fenêtre de mesure est identique.

Avantages, inconvénients et limites d'application de la technique

Avantages :

- Faible encombrement et une facilité de mise en œuvre par une personne seule , dans un temps limité et adapté aux contraintes opérationnelles ;
- La présence du massif filtrant dans des forages entièrement crépinés peut altérer l'isolement de l'espace de prélèvement entre les deux obturateurs. Néanmoins, le dispositif dispose de sondes de pression déployées pendant le prélèvement qui permettent de vérifier l'absence de sollicitation des couches d'eau situées au-dessus et au-dessous des obturateurs

Inconvénients :

- L'obtention d'un profil demande de déployer l'outil successivement à plusieurs profondeurs.

Limites :

- Risques de contaminations existent en cas de déploiement à plusieurs niveaux.

Disponibilité et coûts

Le préleveur ciblé est disponible à la prestation en France. Les coûts d'une prestation sont disponibles sur devis.

Des éléments de temps nécessaire pour la réalisation d'un prélèvement sont résumés dans le Tableau 1 suivant.

Temps	En heure
Adaptation de la fenêtre de mesures	0.1
Déploiement du matériel sur 1 forage	0.3 (1 technicien)
Une mesure à une profondeur (purge + prélèvement)	0.25 (1 technicien)

Tableau 1 : Estimation du temps d'un prélèvement à une profondeur

Complément d'information

[1] Site du prestataire PoCible :

Description : <https://www.pocible.fr/metro/pc>

Fiche technique : https://www.pocible.fr/wp-content/uploads/2019/10/Preleveur_cible.pdf

[2] Résultats du projet HRSC

Film : <https://www.youtube.com/watch?v=lyOD2p61m74>

Rédacteur

E. Verardo (PoCible)

FICHE TECHNIQUE

Concentrations multiniveaux
des polluants

Outils pour la caractérisation
haute résolution des sites et
sols pollués

Pompe entre Packers (PeP)

METHODE ACTIVE

Distance minimale entre 2 prélèvements : 20 cm

Diamètre du forage : 50 à 90 mm

Profondeur : < 20 m

Débit de purge : 1 à 4 L/min (fonction du type de pompe)



Principe

Ce dispositif, qui comprend **une pompe immergée entre deux obturateurs**, permet de **prélever des échantillons d'eau de nappe à une profondeur donnée en régime dynamique**.

Matériel nécessaire

Le matériel nécessaire comprend :

- une pompe immergée 12 V
- deux obturateurs
- un câble d'alimentation électrique pour la pompe
- un tube d'amenée d'air permettant le gonflage des 2 obturateurs
- une pompe à main
- un manomètre
- un tuyau de refoulement d'eau à connecter à la sortie de la pompe
- une batterie 12 V.

Données préalables nécessaires

Les données préalables sont les suivantes :

- diamètre et profondeur du forage, niveau de nappe
- position des crépines du forage, le dispositif de prélèvement devant être positionné devant une zone crépinée
- lithologie de l'aquifère et présence éventuelle d'hétérogénéités verticales des perméabilités afin de préciser la/les profondeur(s) à laquelle/auxquelles positionner le dispositif de prélèvement.

Mise en œuvre

Après réalisation de mesures préliminaires (niveau statique, profondeur du forage, présence éventuelle de NAPL, ...), le dispositif est déployé :

- réglage de la distance entre les obturateurs selon les besoins de l'étude
- connexion du câble d'alimentation électrique au variateur de tension et à la batterie
- connexion du tuyau d'alimentation en air comprimé au premier obturateur
- connexion du tuyau de refoulement à la pompe
- connexion du tuyau de refoulement à une cellule à flux continu pour la mesure des paramètres physico-chimiques (optionnel)
- descente de la pompe dans le forage à la profondeur désirée puis les obturateurs sont gonflés à l'aide d'une pompe à main
- purge par pompage à faible débit jusqu'à stabilisation des paramètres physico-chimiques
- prélèvement d'un échantillon d'eau en sortie du tuyau de refoulement
- libération des obturateurs
- remontée du dispositif

En cas de prélèvement à une autre profondeur, dégonflage des obturateurs, déplacement du dispositif (du haut vers le bas), puis purge par pompage et prélèvement d'un échantillon d'eau. Et ainsi de suite en fonction du nombre de prélèvements à effectuer.

Avantages, inconvénients et limites d'application de la technique

Avantages :

- Facilité de mise en œuvre par une personne seule
- Budget temps limité

Inconvénients :

- Obtention d'un profil si l'outil est successivement déployé à plusieurs profondeurs.

Limites :

- Méthode dynamique, qui peut induire des biais liés à la circulation verticale d'eau dans le massif filtrant (dans l'hypothèse d'un forage crépiné sur toute hauteur)
- Risques de contamination croisée du fait de l'utilisation d'une pompe unique et d'un tuyau de refoulement unique pour prélever différents échantillons d'eau

Disponibilité et coûts

Ce dispositif est disponible sous forme de prestation de services.
Le Tableau 1 décrit les budgets temps nécessaires.

Tâche	En heure
Déploiement du matériel dans 1 forage	2 h (1 technicien)
Réalisation d'une mesure à une profondeur (purge + prélèvement)	0,25 à 0,5 h (1 technicien)
Interprétation : graphique des profils de concentrations, éventuellement calcul des flux massiques	1 h (1 technicien ou ingénieur)

Tableau 1 - Estimation du budget temps pour un prélèvement

Complément d'information

[1] Site web BURGEAP : www.burgeap.fr

[2] Résultats du projet HRSC

Film : <https://www.youtube.com/watch?v=lyOD2p61m74>

Rédacteur

David ESRAEL et Jean-Marie CÔME (BURGEAP, groupe GINGER)



FICHE TECHNIQUE

Concentrations multiniveaux des polluants

Outils pour la caractérisation
haute résolution des sites et
sols pollués

GINGER Multi-Level System (G-MLS)

METHODE PASSIVE

Prélèvements multi-niveaux : 1 à 20 niveaux

Distance minimale entre 2 prélèvements : 55 cm

Diamètre du forage : entre 50 à 90 mm

Profondeur : pas de limite

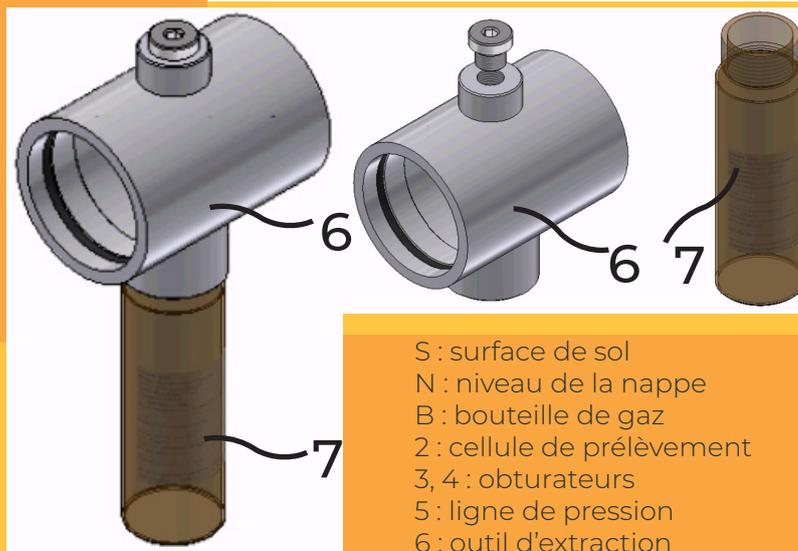
Epaisseur de la nappe : 50 m

Volume prélevé pour chaque module : 90 mL

Temps d'équilibre du système : quelques jours



GINGER Multi-Level System (G-MLS)



S : surface de sol
N : niveau de la nappe
B : bouteille de gaz
2 : cellule de prélèvement
3, 4 : obturateurs
5 : ligne de pression
6 : outil d'extraction
7 : flaconnage

Principe

Le préleveur G-MLS permet de prélever des échantillons d'eau de nappe dans des **conditions statiques** (sans pompage) et de façon simultanée à plusieurs profondeurs. Après sa mise en place dans le forage, le G-MLS est laissé un certain temps (généralement quelques jours) pour retrouver des conditions d'équilibre, avant d'être déposé pour récupérer les échantillons d'eau.

Matériel nécessaire

Le système est constitué de plusieurs **cellules isolées par des obturateurs**, d'une bouteille de gaz, d'une ligne de pression et d'un dispositif d'extraction de l'eau et de mise en flaconnage. Deux configurations sont disponibles :

- Un pack comprenant une cellule de prélèvement et deux obturateurs,
- des cellules de prélèvement et des obturateurs séparés.

Ce qui permet de réaliser des **prélèvements tous les 55 cm ou avec une distance plus importante**.

Données préalables nécessaires

Les données préalables sont les suivantes :

- diamètre et profondeur du forage, niveau de nappe
- position des crépines du forage, les cellules de prélèvement devant être positionnées devant des zones crépinées
- lithologie de l'aquifère, présence éventuelle d'hétérogénéités verticales des perméabilités
- ordre de grandeur de la vitesse de pore pour estimer le temps de rééquilibre de la nappe.

Mise en œuvre

Réalisation des mesures préliminaires (niveau statique, profondeur de l'ouvrage, présence éventuelle de NAPL, ...) nécessaire à la définition/vérification de la configuration du système.

Assemblage de la configuration retenue : choix des unités et des longueurs de tubes entre cellules de prélèvement. Cette configuration peut être réalisée au bureau ou sur site. La pose du système comprend les étapes suivantes :

- connexion du tube d'alimentation de la pression au dispositif de commande
- pose du système dans le forage
- connexion de la bouteille de gaz au dispositif de commande
- mise sous pression du système, ce qui permet de gonfler les obturateurs et d'ouvrir les cellules de prélèvement
- fermeture des vannes
- le système est laissé en place un certain temps, jusqu'à retrouver les conditions d'équilibre de la nappe (généralement 1 à 10 jours selon les vitesses de pore)

La dépose du système comprend les étapes suivantes :

- fermeture des cellules de prélèvement (en relâchant la pression)
- remontée du système en surface
- mise en flaconnage des échantillons d'eau à l'aide d'un outil d'extraction, l'outil étant conçu pour minimiser le contact à l'air au moment de l'extraction de l'eau des cellules de prélèvement.

Avantages, inconvénients et limites d'application de la technique

Avantages :

- Obtention de profils verticaux de concentration dans les eaux souterraines sans perturber l'équilibre du panache (hormis les éventuelles perturbations générées par le forage),
- Prélèvement simultané des échantillons d'eau à plusieurs profondeurs, jusqu'à 20 échantillons
- Prélèvement direct d'eau, à la différence des systèmes fondés sur la diffusion moléculaire (cellules de dialyse, par exemple les PDB),
- Prélèvement possible d'eau chargée en MES, d'émulsions ou de NAPL,
- Faible distance entre 2 prélèvements (55 cm),
- Grande modularité dans le choix des distances entre 2 prélèvements (55 cm à plusieurs dizaines de mètres si besoin),
- Contact à l'air minimisé lors du transfert d'eau de la cellule de prélèvement au flaconnage
- Prélèvements possibles à grande profondeur et avec une épaisseur importante d'eau souterraine (50 m),
- Matériaux chimiquement inertes et facilement nettoyable.

Inconvénients :

- Durée de la campagne de prélèvement (plusieurs jours), ce qui induit par ailleurs de venir 2 fois sur le terrain (lors de la pose et lors de la dépose),
- Protection du système de prélèvement pendant la durée de la pose, selon les contextes (voie publique, ...).

Limites :

- Volume d'eau prélevé (90 mL),
- Dispositif adapté pour des diamètres de puits compris entre 50 et 90 mm. Pour des diamètres plus petits ou plus grands, il conviendrait de fabriquer un dispositif modifié.

Disponibilité et coûts

Le G-MLS est disponible à la vente ou sous forme de prestation de services. Les prix de vente sont disponibles sur devis. Le Tableau 1 décrit les budgets temps nécessaires.

Tâche	Budget temps
Configuration du système *: selon la configuration * au bureau ou sur site	2 à 4 h (1 technicien)
Pose du matériel dans un forage	1 h (1 technicien)
Dépose du matériel sur un forage	1 à 2 h (1 technicien)
Interprétation : graphique des profils de concentrations, éventuellement calcul des flux massiques	1 h (1 technicien ou ingénieur)

Tableau 1 - Estimation du budget temps d'un prélèvement

Complément d'information

[1] Site web BURGEAP : www.burgeap.fr

[2] Résultats du projet HRSC

Film : <https://www.youtube.com/watch?v=lyOD2p61m74>

Rédacteur

David ESRAEL, Jean-Marie CÔME (BURGEAP, groupe GINGER)



FICHE TECHNIQUE

Concentrations multiniveaux
des polluants

Outils pour la caractérisation
haute résolution des sites et
sols pollués

Pompe pneumatique bas débit entre obturateurs

METHODE ACTIVE

Fenêtres adaptable tailles disponibles : 30, 60 et 90 cm

Diamètre de forage 48 - 127 mm

Profondeur < 46 m sous eau

Débit : 0.1 - 1 L/min



Principe

Ce dispositif, qui comprend **une pompe immergée entre deux obturateurs**, permet de **prélever des échantillons d'eau de nappe à une profondeur donnée en régime dynamique**.

Matériel nécessaire

Le système est constitué d'une pompe pneumatique à vessie dont la crépine d'aspiration est située entre deux obturateurs hydrauliques.

Un matériel nécessaire pour réaliser un prélèvement (Figure 1) est le suivant :

- une pompe à vessie ;
- le compresseur associé
- les 2 obturateurs hydrauliques ;
- une pompe manuelle avec un manomètre ou un compresseur avec un contrôleur de pression pour gonfler les obturateurs :
- le tuyau de refoulement ;
- un câble de suspension (acier inox de préférence),
- en option des centreurs si besoin.

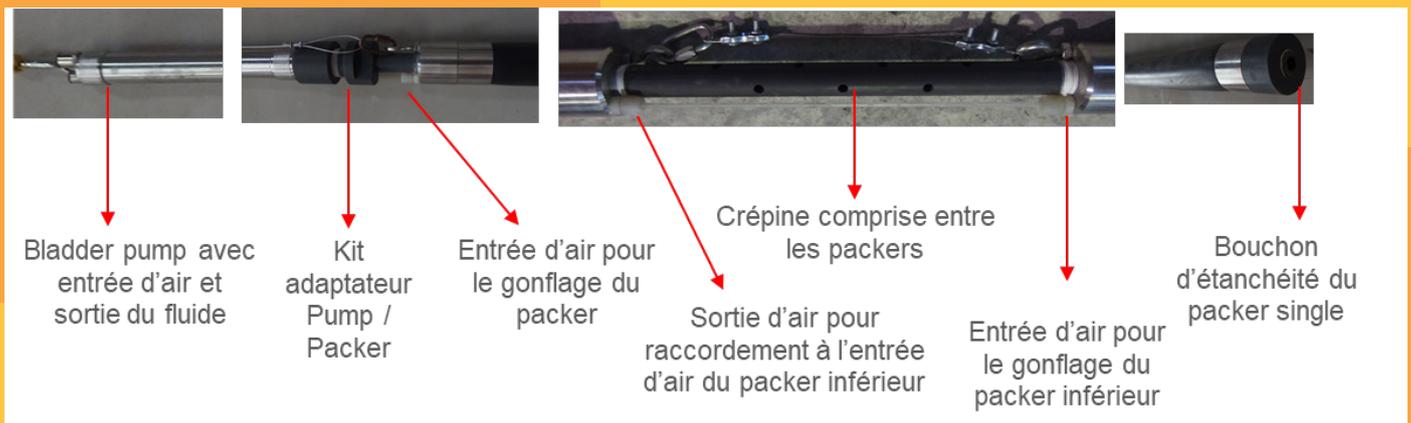


Figure 1 : Schéma du préleveur bas débit entre obturateurs

Données préalables nécessaires

La position des crépines doit être connue, l'outil ne devant être positionné que devant des zones crépinées.

La connaissance de la lithologie de l'aquifère (ou des mesures de flux préalables) sont un plus pour bien identifier les zones à caractériser.

Mise en œuvre

Avant déploiement, le dispositif est entièrement solidarisé pour éviter tout soucis à la pose et à la dépose avant la mise en œuvre.

Ensuite les étapes suivantes sont réalisées :

- Le dispositif est descendu à la profondeur de prélèvement souhaitée (fenêtre de mesure en face de la couche à investiguer),
- Les obturateurs sont mis sous pression,
- Le compresseur de la pompe est mis en route,
- La purge est réalisée jusqu'à obtention d'une stabilité des paramètres physico-chimiques,
- Le prélèvement se fait en sortie du tuyau d'exhaure,
- Les obturateurs sont dépressurisés,
- Le dispositif est soit remonté soit descendu pour un second prélèvement.



Figure 2 : Montage pour un prélèvement avec le préleveur bas débit entre obturateurs

Avantages, inconvénients et limites d'application de la technique

Avantages :

- Simple à mettre en œuvre,
- Prélèvement prend le même temps qu'un prélèvement classique, le temps de purge étant réduit du fait d'une faible fenêtre de mesure,
- Très faible débit limitant les risques de dénoiement entre obturateurs,
- Matériaux utilisés sont chimiquement inertes limitant les risques de contamination croisée et facilitant le nettoyage.

Inconvénients :

- Obtention d'un profil demande de déployer l'outil successivement à plusieurs profondeurs.

Limites :

- Bypass d'eau possible depuis le massif filtrant est en cas de crépine continue, mais est limité par les très faibles débits,
- Dispositif défini à l'avance, la distance entre les obturateurs étant fixes,
- Risques de contaminations existent en cas de déploiement à plusieurs niveaux

Disponibilité et coûts

Le préleveur est disponible à la location ou à l'achat en France

Des éléments de temps passés sont résumés dans le Tableau 1 suivant.

Charge externe (hors transport)	En €
Location (1 semaine)	Environ 450
Achat	Environ 5000
Temps	En heure
Déploiement du matériel sur 1 forage des flux massiques	0,5 (1 technicien)
Un prélèvement à une profondeur	0,3 -0,5 (1 technicien)

Tableau 1 : Estimation du budget d'un prélèvement

Complément d'information

[1] Site du fabricant SOLINST : <https://www.plm-equipements.com/fr/35-prelevement-eau>

[2] Résultats du projet HRSC

Film : <https://www.youtube.com/watch?v=lyOD2p61m74>

Rédacteur

V. Guérin & Geoffrey Boissard (BRGM) et Yohan Saussier (PLM Equipements)

FICHE TECHNIQUE

Concentrations multiniveaux
des polluants

Outils pour la caractérisation
haute résolution des sites et
sols pollués

Préleveur commandé sous pression

METHODE PASSIVE

Prélèvement simple niveau

Diamètre de forage < 150 mm

Profondeur < 150 m

Volume prélevé : 175 à 800 mL

Utilisation avant ou après purge statique ou dynamique



Principe

Le préleveur commandé permet de **prélever** des échantillons d'eau de nappe à une **profondeur** donnée en statique et donc sans brassage par un jeu de pression dépression.

Matériel nécessaire

Un matériel relativement simple est nécessaire pour réaliser un prélèvement (Figure 1) :

- Le préleveur en acier inoxydable,
- L'enrouleur avec son tubage (PEBD (polyéthylène basse densité) ou téflon) d'amené d'air permettant la mise sous pression de l'outil,
- Une pompe manuelle avec un manomètre ou un compresseur avec un contrôleur de pression,
- Un câble de suspension (acier inox de préférence),
- L'embout permettant la vidange de l'outil.

Plusieurs préleveurs de volume différent sont disponibles.



Figure 1 : Matériel nécessaire pour la mise en œuvre du préleveur ciblé (image issue de [1])

Données préalables nécessaires

La **position des crépines** doit être connue, l'outil ne devant être positionné que devant des zones crépinées.

La détermination des **horizons productifs** ou non ou a minima de la **lithologie** est un plus pour définir les profondeurs de déploiement du préleveur.

Mise en œuvre

Avant son introduction dans le forage, le préleveur doit être pressurisé avec la pompe manuelle pour empêcher l'eau d'entrer à l'intérieur durant la descente.

La pression requise doit être calculée avant l'introduction du préleveur dans le forage. Elle est définie comme suit

Pression (Bar) = Hauteur de colonne d'eau (m) x 0,098 + 0,7 Bar

Avec Hauteur de colonne d'eau (m) = Profondeur de prélèvement souhaitée / repère - niveau statique de la nappe phréatique / repère

Le préleveur est descendu dans le forage à la profondeur voulue, après avoir déconnecté la pompe.

Une fois à la profondeur souhaitée, la pression est relâchée et la pression hydrostatique remplit l'échantillonneur d'eau provenant de la colonne d'eau à proximité de l'orifice inférieur.

Lorsque le préleveur est rempli (attendre 1 à 3 minutes), il peut être repressurisé, pour éviter toutes pertes lors de la remonté à la surface. La pompe est déconnectée avant la remontée

Une fois en surface, le préleveur est à nouveau dépressurisé.

Un embout permet alors la vidange de l'outil et le remplissage des flacons.

L'enrouleur a une fixation de pression pour une pompe manuelle et un interrupteur pression / purge qui est utilisé pour appliquer et relâcher la pression sur l'échantillonneur.

Des billes de contrôle « flottantes » à l'intérieur des échantillonneurs empêche l'eau de pénétrer dans le tube, évitant ainsi la nécessité de décontaminer le tube.



Figure 2 : Montage pour un prélèvement avec le préleveur bas débit entre obturateurs

La **descente de l'outil doit être lente** afin de ne pas engendrer de chocs sur les tubes pouvant entraîner la libération de fines.

En cas de prélèvement multiples, il faut toujours faire **les prélèvements du moins au plus profonds**.

NB : en cas de prélèvements profonds, il est conseillé d'appliquer la pression et dépression en 2 temps (surpression pour 50 m d'eau, une fois à 50 m on augmente la pression pour atteindre celle souhaitée et idem à la remontée pour la dépressurisation).

La propreté des billes doit être contrôlée régulièrement.

Les joints doivent être contrôlé et changer régulièrement.

Avantages, inconvénients et limites d'application de la technique

Avantages :

- Simplicité de mise œuvre et d'appareillage ; elle est facilement déployable même dans les zones difficile d'accès.
- Matériaux chimiquement inertes : acier inoxydable, joint en viton et clapet en téflon, permettant un nettoyage entre les prélèvements. L'étuvage est également possible en cas de prélèvement stérile.
- Prélèvements sont possibles jusque 150 m de profondeur.

Inconvénients :

- En cas de renouvellement faible de la colonne d'eau, risque de prélever de l'eau venant uniquement du forage et non de l'aquifère ;
- Lors de sa mise en œuvre, la proportion de particules dans les eaux échantillonnées est souvent supérieure à celles d'un échantillonnage actif avec purge, ce qui peut surestimer les composés liés aux particules (ETM et composés très hydrophobes) en cas d'analyses sur brut.

Limites :

- Volume d'eau prélevé relativement faible, l'outil devra donc être déployé plusieurs fois à une même profondeur si le volume de flaconnage à remplir est important ;

Disponibilité et coûts

Le préleveur est disponible à la location ou à l'achat en France

Des éléments de temps passés sont résumés dans le Tableau 1 suivant.

Prestation extérieure	Prix unitaire en €
Location (1 semaine)	???
Achat	???
Temps	En heure
Déploiement du matériel sur 1 forage	0,5 (1 technicien)
Un prélèvement à une profondeur	0,3 -0,5 (1 technicien)

Tableau 1 : Estimation du budget d'un prélèvement

Complément d'information

[1] Site du fabricant SOLINST :

Description : <https://www.solinst.com/products/groundwater-samplers/425-discrete-interval-sampler/>

Film d'utilisation de l'outil en anglais : <https://youtu.be/W96x-b7wD8I>

Fiche technique : <https://www.solinst.com/products/data/425.pdf>

[2] Résultats du projet HRSC

Film : <https://www.youtube.com/watch?v=lyOD2p61m74>

Rédacteur

V. Guérin & Geoffrey Boissard (BRGM)

FICHE TECHNIQUE

Mesures de flux Hydriques
multiniveaux

Outils pour la caractérisation
haute résolution des sites et
sols pollués

Colloidal borescope ou vélocimètre

MESURE DE LA DIRECTION ET DE LA VITESSE D'ÉCOULEMENT DES EAUX
SOUTERRAINES

Débit < 30 mm/s

Diamètre du forage : > 52 mm

Profondeur : 1 000 m



Principe

Le vélocimètre permet la **mesure directe** de la **direction d'écoulement** ainsi que de la **vitesse de Darcy** des eaux souterraines, dans les forages, à une profondeur donnée.

Le système comporte une caméra permettant d'observer les particules naturellement présentes dans les forages. Un logiciel calcule leur taille moyenne, leur nombre, leur vitesse et leur direction.

Cet outil est adapté pour des mesures d'un débit inférieur à 30 mm/s.

Matériel nécessaire

Le matériel nécessaire à la mesure de la direction et de la vitesse d'écoulement des eaux souterraines est le suivant :

- une sonde comportant une caméra,
- une unité de contrôle de la caméra,
- un enrouleur muni du câble de connexion entre la caméra et l'unité de contrôle,
- un ordinateur muni du logiciel AquaLITE pour la visualisation, l'enregistrement et la mise en forme des données.

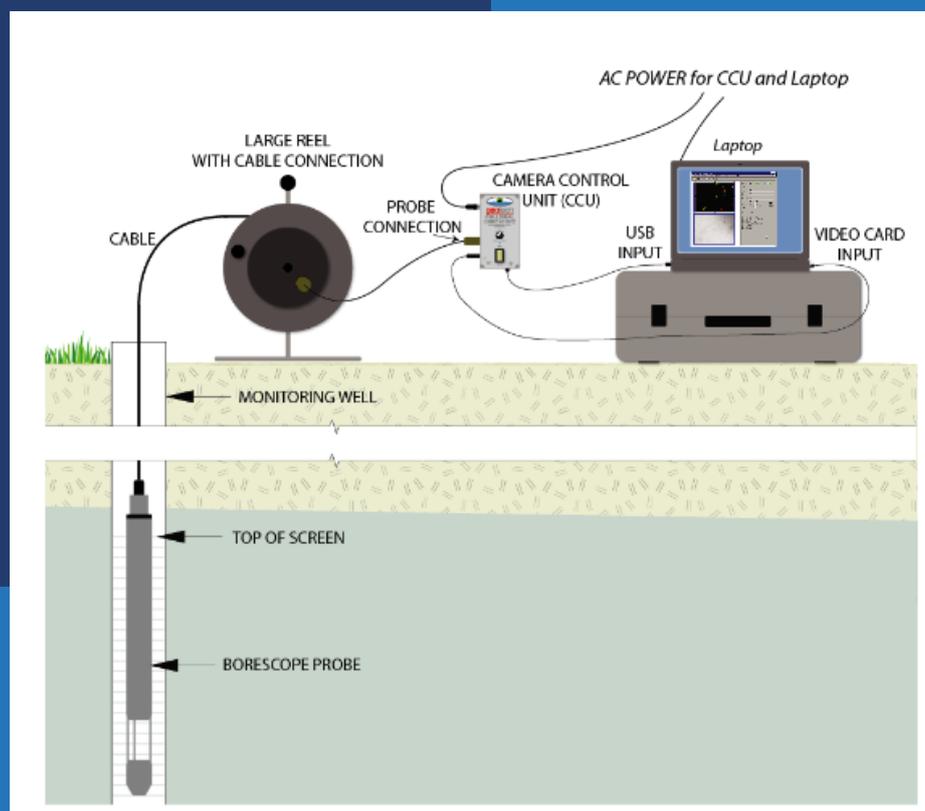


Figure 1 : Matériel nécessaire pour la mise en œuvre du colloidal borescope

Données préalables nécessaires

La position des crépines doit être connue, l'outil ne devant être positionné que devant des zones crépinées.

Mise en œuvre

Afin que les perturbations du milieu soient minimales avant les mesures, la sonde doit être descendue lentement dans le forage.

Lorsque l'outil est à la profondeur souhaitée, les mesures peuvent être démarrées. Deux types de conditions peuvent être rencontrés dans le forage lors d'une mesure :

- si un écoulement horizontal dans une seule direction est observé, cela signifie que l'outil est placé dans une zone d'écoulement préférentiel où un écoulement de l'eau a lieu,
- si des conditions d'écoulement variables sont observées (notamment en termes de direction), alors l'outil n'est pas en face d'une zone d'écoulement préférentiel et doit être descendu à une profondeur différente.

L'expérience montre que si des conditions d'écoulement variables persistent pendant 15 à 20 minutes, l'outil doit être descendu à une profondeur différente.

En tout état de cause, l'introduction de l'outil dans le forage perturbe l'écoulement. De ce fait, si les mesures montrent une seule direction d'écoulement à une profondeur donnée et que la vitesse d'écoulement décroît avec le temps, il est nécessaire de laisser l'outil en place jusqu'à stabilisation de cette vitesse pour des mesures fiables. Il est important que la direction et la vitesse d'écoulement soient stables pour des mesures fiables.

Avantages, inconvénients et limites d'application de la technique

-Avantages :

- Mesure directe de la direction et de la vitesse d'écoulement des eaux souterraines.

-Inconvénients :

- Temps de stabilisation peut être long,
- Interprétation des données délicate.

-Limites :

- Vitesse maximale : 30 mm/s
- Taille de particule minimale : 10 µm

Disponibilité et coûts

Le colloïdal borescope est disponible à l'achat et à la prestation.

Des éléments de coûts et de temps passé pour une mesure de la direction et de la vitesse d'écoulement des eaux souterraines à une profondeur donnée sont résumés dans le Tableau 1.

Temps	En heure
Installation et rangement du matériel	0,5 (1 technicien)
Stabilisation après introduction de l'outil	0,25 – 0,5 (1 technicien)
Mesure après stabilisation	0,25 – 0,5 (1 technicien)

Tableau 1 : Estimation du coût de la mesure de la direction et de la vitesse d'écoulement à une profondeur

Il est à noter que l'interprétation des données est délicate et nécessite un temps ingénieur.

Complément d'information

[1] Site internet du fabricant : www.geotechenv.com

[2] Résultats du projet HRSC

Film : <https://www.youtube.com/watch?v=lyOD2p61m74>

Rédacteur

J. Michel (Ineris)

FICHE TECHNIQUE

Mesures de flux Hydriques
multiniveaux

Outils pour la caractérisation
haute résolution des sites et
sols pollués

Flowmètre (Heat Pulse Flowmeter HPF)

MESURE DES FLUX VERTICAUX NATURELS ET DES HORIZONS PRODUCTIFS EN
POMPAGE

Quantitatif : 0,1 à 4 L/min

Qualitatif : 4 - 500 L/min

Diamètre du forage : à partir de 2 pouces

Profondeur : pas de limite

Temps de mesure : environ 3 min par profondeur



Principe

Le flowmètre « Heat Pulse Flowmeter » (HPF) permet la **mesure de flux verticaux naturels** et d'**horizons productifs en pompage** dans les puits de forage et piézomètres. Il est particulièrement adapté pour **mesurer les bas débits** (de 0,1 à 4 L/min) mais peut être utilisé également de manière qualitative pour des débits plus élevés pour identifier les venues d'eau par exemple (jusqu'à 500 L/min).

La sonde comporte une grille métallique horizontale chauffante et deux thermistors situés en-dessous et au-dessus de cette grille. Des impulsions de courant électrique (charge) sont appliquées à la grille métallique chauffant ainsi le fluide autour de celle-ci. Selon la direction du flux, ce fluide plus chaud sera détecté par l'un ou l'autre des thermistors. Le temps mis pour atteindre le thermistor donne la valeur du débit.

Matériel nécessaire

Le matériel nécessaire à la mesure des flux verticaux naturels est le suivant :

- une sonde, munie idéalement de deux centreurs (en parties haute et basse de l'outil) et d'un « diverter » permettant à tout le flux d'eau de passer dans la sonde puisque seuls les flux passant dans la sonde sont mesurés (voir Figure 1 gauche),
- un treuil muni d'un câble en acier au bout duquel est connecté la sonde, permettant sa descente dans l'ouvrage, ainsi qu'une centrale d'acquisition (voir Figure 1 droite),
- un trépied, permettant de guider le câble lors de sa descente et de sa montée dans l'ouvrage afin que la sonde soit en permanence centrée dans l'ouvrage,
- un ordinateur pour la visualisation et l'enregistrement des données.

Pour la mesure des horizons productifs en pompage, une pompe immergée doit être mise en place dans l'ouvrage.



Figure 1 : Matériel nécessaire pour la mesure des flux verticaux naturels et des horizons productifs en pompage (sonde à gauche, treuil et centrale d'acquisition à droite)

Données préalables nécessaires

La position des crépines doit être connue, l'outil ne devant être positionné que devant des zones crépinées.

Mise en œuvre

Afin de ne pas perturber le milieu et pour permettre une équilibration rapide de l'outil avant chaque mesure, celui-ci doit être déplacé lentement dans le forage (au maximum de 1 à 1,5 m/min).

Calibration de l'outil

Le diverter utilisé pour forcer le flux à passer dans la sonde n'est pas totalement étanche et en présence de flux verticaux, l'eau peut passer par les côtés. C'est pourquoi une calibration est nécessaire.

La calibration s'effectue comme suit :

- l'outil est placé au niveau d'une partie non crépinée du forage,
- une pompe est placée juste au-dessus de l'outil et mise en marche à un débit inférieur à 4 L/min,
- une mesure est lancée et le débit indiqué $Q_{\text{flowmètre}}$ est comparé avec le débit de la pompe Q_{pompe} .

Le rapport des deux valeurs ($F = \frac{Q_{\text{pompe}}}{Q_{\text{flowmètre}}}$) donne le coefficient correctif par lequel il faudra multiplier toutes les valeurs mesurées pour obtenir le débit réel.

Mesure des flux verticaux naturels

Les mesures doivent être réalisées selon les étapes suivantes :

- caractérisation qualitative des flux verticaux : l'outil est descendu dans le forage et une mesure est faite tous les 2 à 5 m suivant la profondeur du forage et le besoin de discrétisation verticale pour déterminer le sens des flux verticaux (ascendants ou descendants). En fond de piézomètre, une mesure de flux est réalisée et donne le « blanc », à soustraire des valeurs mesurées,
- les flux verticaux sont mesurés :
 - si les flux sont ascendants, les mesures doivent être faites en remontant l'outil, pour que les pétales des diverters soient courbés vers le bas,
 - si les flux sont descendants, les mesures doivent être faites en descendant l'outil, pour que les pétales des diverters soient courbés vers le haut.

Identification des horizons productifs en pompage

Une pompe est placée dans la partie non crépinée du forage en zone saturée et des mesures de flux verticaux sont réalisées lors de la remontée de l'outil. Lorsque l'outil est sous la pompe, la valeur du débit de la pompe doit être retrouvée. Si aucune partie non crépinée se trouve en zone saturée, les valeurs obtenues à chaque horizon sont qualitatives.

Interprétation de l'essai

Ces mesures sont un préalable recommandé pour le dimensionnement de campagnes de prélèvement en multi-niveaux (profondeur de prélèvement), ainsi que pour la compréhension et l'interprétation des données obtenues, puisque les concentrations les plus fortes ne sont pas nécessairement associées aux horizons les plus productifs en pompage.

En présence de flux verticaux naturels dans les forages, ces derniers vont avoir tendance à homogénéiser les concentrations dans la colonne d'eau. Dans ce cas, la mise en place d'échantillonneurs passifs à différents niveaux permettra d'obtenir uniquement une concentration moyenne sur la hauteur crépinée soumise à ces flux verticaux et dans ce cas, l'exposition d'un seul échantillonneur passif suffit.

Les horizons productifs en pompage renseignent avant tout sur la provenance de l'eau en cas de pompage. C'est une mesure importante à réaliser afin de comprendre et d'interpréter les éventuelles différences pouvant exister entre les concentrations obtenues par des prélèvements à un niveau donné et celles mesurées dans les échantillons d'eaux obtenus par pompage à différentes profondeurs. Cette mesure permet également de dimensionner le nombre et la profondeur des prélèvements multi-niveaux (échantillonnage en face des horizons les plus productifs ou non).

Avantages, inconvénients et limites d'application de la technique

-Avantages :

- Détection de flux plus faibles qu'avec un micro-moulinet,
- Résultats en direct sur le terrain.

-Inconvénients :

- Treuil lourd : besoin de deux personnes pour la manutention s'il ne peut pas rester dans le véhicule,
- Mesures et interprétation nécessitant du personnel qualifié.

-Limites :

- Mesures quantitatives de 0,1 à 4 L/min
- Mesures qualitatives de 4 à 500 L/min
- Evaluation qualitative des horizons productifs en pompage si pas de tube plein en zone saturée

Disponibilité et coûts

Le flowmètre est disponible à l'achat, à la location et en prestation.

Des éléments de coûts et de temps passé pour une mesure des flux verticaux naturels et des horizons productifs en pompage dans un forage ayant 10 m de colonne d'eau sont résumés dans le Tableau 1.

Temps	En heure
Installation et rangement du matériel	0,5 (1 technicien)*
Calibration	0,25 (1 technicien)
Mesure des flux verticaux naturels	1,3 (1 technicien)
Identification des horizons productifs en pompage	1,25 (1 technicien)

Tableau 1 : Estimation du coût pour mesure de flux sur 10 m de colonne d'eau

* : L'ensemble des mesures peut être réalisé par une personne. En revanche, pour l'installation et le rangement du matériel, si le treuil ne peut pas être laissé dans le véhicule, une deuxième personne est nécessaire pour sa manutention au regard de son poids (environ 25 kg pour 300 m de câble).

Complément d'information

[1] Site internet du fabricant : <https://mountsopris.com/>

[2] Site internet d'un revendeur en Europe (Luxembourg) : <https://www.alt.lu/>

[3] Résultats du projet HRSC

Film : <https://www.youtube.com/watch?v=lyOD2p61m74>

Rédacteur

J. Michel (Ineris)

FICHE TECHNIQUE

Mesures de flux Hydriques
multiniveaux

Outils pour la caractérisation
haute résolution des sites et
sols pollués

Echantillonneur passif iFLUX

METHODE PASSIVE

Mesures en multi-niveaux

Hauteur d'une cartouche : 16 cm

Diamètre de forage : adaptable, construit sur mesure

Profondeur : pas de limite

Durée d'exposition : fonction des vitesses d'écoulement des eaux souterraines



Principe

Les échantillonneurs iFLUX permettent de calculer le **flux d'eau** (vitesse de Darcy d'écoulement des eaux souterraines) à l'aide d'une cartouche dédiée. Elle contient un mélange de 5 alcools traceurs dont les facteurs de retard sont contrastés, afin de pouvoir mesurer différents ordres de grandeur de flux d'eau. La quantité de traceur restante est mesurée après exposition et permet de calculer la vitesse d'écoulement des eaux souterraines.

Matériel nécessaire

Le matériel nécessaire est fourni par la société iFLUX, selon un plan d'installation préalablement défini avec l'utilisateur. Il comprend :

- les cartouches permettant la mesure du flux d'eau,
- les tiges filetées, les écrous et les connecteurs en inox permettant d'assembler les cartouches aux profondeurs définies.

Des exemples de configuration sont présentés Figure 1.

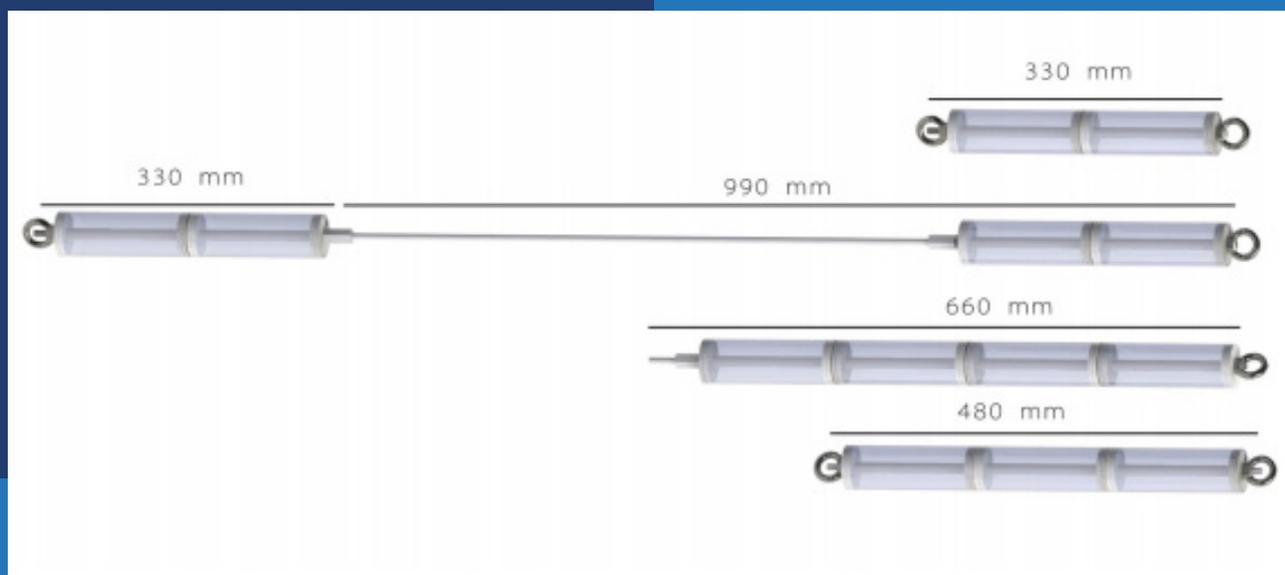


Figure 1 : Mise en œuvre d'échantillonneurs iFLUX (de gauche à droite acquisition de données : pour 2 flux d'eau à 1 profondeur, pour 2 flux d'eau à 2 profondeurs, pour 4 flux d'eau à 1 profondeur, pour 3 flux d'eau à 1 profondeur)

Données préalables nécessaires

Définition de la durée d'exposition des échantillonneurs iFLUX : estimée à partir de l'ordre de grandeur des vitesses d'écoulement des eaux souterraines sur le site.

Calcul de la vitesse d'écoulement dans la nappe : perméabilités à proximité immédiate des échantillonneurs iFLUX déduite de la taille des fentes des crépines, du type de massif filtrant et de la géologie au droit du forage à équiper.

Mise en œuvre

Les échantillonneurs iFLUX sont insérés dans les tiges filetées fournies par la société iFLUX. Le nombre de tiges filetées à mettre en place entre chaque échantillonneur et de connecteurs à insérer entre les tiges filetées est donné par le plan d'installation fourni par la société iFLUX en fonction des profondeurs d'exposition définies par l'utilisateur. Cet assemblage se fait directement au niveau de la tête de forage (voir Figure 2) et les échantillonneurs sont descendus dans le forage lentement et au fur et à mesure de l'assemblage. Un câble en inox est également fourni pour attacher l'ensemble à la tête du forage. Pour le retrait, les échantillonneurs sont sortis du forage un par un et les tiges filetées ainsi que les connecteurs démontés au fur et à mesure.



Figure 2 : Mise en place des échantillonneurs iFLUX

Interprétation de l'essai

Les valeurs de flux d'eau aux profondeurs d'exposition sont calculées et fournies par la société iFLUX.

Avantages, inconvénients et limites d'application de la technique

-Avantages :

- Intégration des variations dans le temps,
- Possibilité de mesures multi-niveaux (si déploiement de plusieurs cartouches simultanément).

-Inconvénients :

- Nécessité de venir 2 fois sur le terrain : pose et dépose,
- Le forage retenu ne pourra pas faire l'objet d'un suivi traditionnel par pompage pendant l'exposition.

-Limites :

- Problème d'interprétation des résultats si changement de direction d'écoulement des eaux souterraines pendant la durée d'exposition,
- Cartouches non interprétables si les traceurs ont complètement disparu. saturée

Disponibilité et coûts

Des éléments de coûts et de temps passé pour une mesure des flux d'eau au moyen d'échantillonneurs iFLUX sont résumés dans le Tableau 1.

Prestation extérieure	Prix unitaire (€)
Fourniture d'une cartouche, analyse, interprétation et rendu des résultats (société iFLUX)	Se rapprocher de la société iFLUX
Temps	En heure
Pose des échantillonneurs iFLUX	0,25 (1 technicien)
Retrait des échantillonneurs iFLUX	0,25 (1 technicien)

Tableau 1 : Estimation du coût pour mesure du flux d'eau à 1 profondeur

Complément d'information

[1] Site internet du fabricant iFLUX : <https://www.ifluxsampling.com>

[2] Résultats du projet HRSC

Film : <https://www.youtube.com/watch?v=lyOD2p61m74>

Rédacteur

J. Michel (Ineris)



FICHE TECHNIQUE

Mesures de flux Hydriques
multiniveaux

Outils pour la caractérisation
haute résolution des sites et
sols pollués

Direct Velocity Tool (DVT)

MESURE DE LA VITESSE D'ÉCOULEMENT DES EAUX SOUTERRAINES

Vitesse de Darcy cm/j

Diamètre de forage de 60 à 110 mm

Profondeur de la nappe > 8 m

Profondeur de l'aquifère < 20 m

Temps de mesure de 10 à 15 min



Principe

Le Direct Velocity Tool (DVT) permet de mesurer les vitesses de Darcy des eaux souterraines à une profondeur donnée. Si couplé à des mesures de concentrations, il est possible de déterminer les flux massiques en polluants.

Le DVT permet de mesurer les vitesses de Darcy des eaux souterraines à l'aide d'une mesure de dilution. L'outil est composé d'une longue fenêtre réservoir étanche qui se plaque contre la paroi crépinée du piézomètre. Les eaux traversant la crépine, et donc la fenêtre réservoir, passent ensuite par un tube relié à un mélangeur. Ce dernier permet d'obtenir en sortie une solution homogène entre un traceur injecté dans l'outil et les eaux souterraines le traversant. La concentration obtenue à partir du mélange homogène permet ensuite de calculer la vitesse des eaux traversant la partie crépinée du piézomètre.

Matériel nécessaire

Le DVT est un appareil composé de vérins pneumatiques, d'une fenêtre réservoir étanche réceptrice du flux d'eau, d'un mélangeur et d'une sonde de mesure de la conductivité électrique de l'eau.

Le matériel nécessaire pour réaliser une mesure de la vitesse de Darcy est le suivant :

- le DVT ;
- les barres en aluminium permettant de descendre le DVT dans le forage ;
- un tuyau d'alimentation en traceur, un tuyau d'alimentation en air et un filin de suspension ;
- une pompe manuelle avec un manomètre ou un compresseur avec un contrôleur de pression ;
- une pompe péristaltique avec un débitmètre d'une sensibilité de 0,1 mL/min ;
- une caméra de forage ;
- une boussole ;
- une solution de traceur (solution saline) ;
- un conductimètre d'une sensibilité de 1 μ S)

Données préalables nécessaires

La position des fentes des crépines doit être connue, l'outil doit être plaqué en face des fentes de la partie crépinée du forage. La caméra de forage positionnée sur le DVT permet d'identifier la position des fentes des crépines.

Le sens d'écoulement de la nappe doit être connu. Le DVT doit être plaqué contre une surface crépinée du forage face au sens d'écoulement présumé de la nappe.

Mise en œuvre

Une fois le forage identifié, des mesures préliminaires sont réalisées (diamètre intérieur du forage, niveau statique, profondeur du forage). Ensuite le matériel est déployé :

- positionnement de la caméra de forage sur le DVT ;
- connexion du tuyau d'alimentation en air comprimé du DVT à la pompe à air manuelle ou au compresseur ;
- connexion de la pompe péristaltique entre le tuyau d'alimentation en traceur du DVT et le flacon de traceur ;
- remplissage du tuyau d'alimentation en traceur ;
- repérage du sens d'écoulement présumé de la nappe à l'aide de la boussole.

Le DVT est descendu dans le forage à la profondeur souhaitée. La valeur de la conductivité électrique de la nappe est relevée.

Par la suite, la caméra de forage est utilisée afin de positionner la fenêtre réservoir du DVT au niveau des fentes des crépines du forage situées face au sens d'écoulement de la nappe. L'outil est alors plaqué contre la crépine en gonflant les vérins pneumatiques jusqu'à une pression d'environ 7 bars augmentée de 1 bar tous les 10 m de profondeur.

La pompe péristaltique est mise en marche au débit souhaité. La valeur de la conductivité électrique mesurée par le DVT est relevée lorsque celle-ci est stabilisée (après un temps compris entre 10 et 15 min).

Pour finir, le système de gonflage des vérins pneumatiques est purgé et le DVT peut être déplacé à la prochaine profondeur de mesure de la vitesse de Darcy ou **dans une autre direction si la direction d'écoulement est mal connue.**

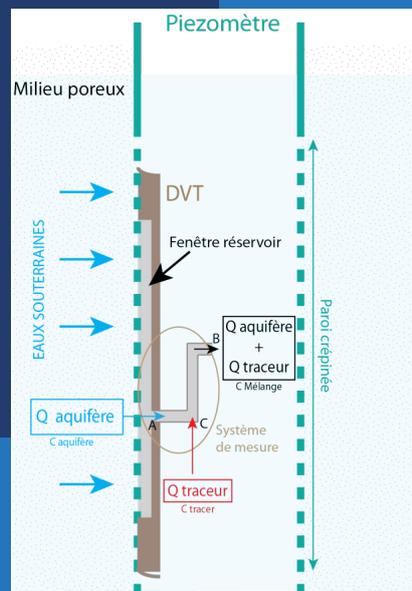


Figure 1 : Principe de fonctionnement du DVT

Interprétation de l'essai

A partir de la valeur de la conductivité électrique du mélange entre le traceur injecté dans le DVT et les eaux souterraines le traversant il est possible de déterminer la vitesse de Darcy de la nappe. En supposant que les deux fluides initiaux sont mélangés de manière homogène, et en adoptant une conservation de la masse, il est possible d'établir l'équation suivante :

$$Q_{\text{nappe}} X_{\text{nappe}} + Q_{\text{traceur}} X_{\text{traceur}} = (Q_{\text{nappe}} + Q_{\text{traceur}}) X_{\text{mélange}} \quad [1]$$

Où :

Q caractérise le débit
et X la conductivité électrique du traceur

Durant la manipulation, la conductivité électrique des différents fluides (traceur, nappe et mélange) ainsi que le débit d'injection du traceur, sont connus. Il est alors possible de calculer le débit de la nappe ayant traversé le DVT (Q_{DVT}) :

$$Q_{\text{dvt}} = Q_{\text{traceur}} * \frac{(X_{\text{mélange}} - X_{\text{traceur}})}{(X_{\text{nappe}} - X_{\text{mélange}})} = q_{\text{dvt}} * S_{\text{fenêtre}} \quad [1]$$

Où :

q_{dvt} représente la vitesse de Darcy traversant le DVT
 $S_{\text{fenêtre}}$ représente la surface de la fenêtre réservoir du DVT

La vitesse de Darcy de la nappe q_{nappe} correspond à la vitesse de Darcy traversant le DVT q_{dvt} est corrigée par le coefficient de distorsion α , selon l'équation suivante :

$$q_{\text{nappe}} = \alpha q_{\text{dvt}}$$

Le coefficient de distorsion α prend en considération la distorsion du flux d'eau traversant le forage provoqué par la présence du DVT.

Avantages, inconvénients et limites d'application de la technique

-Avantages :

- Le DVT permet de réaliser des mesures de vitesse de Darcy dans une gamme de vitesses comprises entre 5 cm/j et 1m/j, ce qui représente la grande majorité des vitesses d'écoulements des eaux souterraines.
- Il peut être déployé par un unique opérateur dans un temps limité et adapté aux contraintes opérationnelles (entre 10 et 15 minutes par point de mesure).

-Inconvénients :

- Le sens d'écoulement de la nappe supposé de la nappe doit être connu avant la réalisation des mesures. A défaut, plusieurs mesures à une même profondeur avec le DVT disposé à différentes orientations peuvent être réalisées afin de situer le sens d'écoulement de la nappe.

-Limites :

- L'outil doit être utilisé pour des mesures dans des nappes d'eau présentant un niveau piézométrique inférieur à 8 m/sol ;
- Le DVT n'est pas adapté pour des mesures de vitesse d'écoulement en milieu très perméable ($> 10^{-3}$ m/s) .

Disponibilité et coûts

Le flowmètre est disponible à l'achat, à la location et en prestation.

Des éléments de coûts et de temps passé pour une mesure des flux verticaux naturels et des horizons productifs en pompage dans un forage ayant 10 m de colonne d'eau sont résumés dans le Tableau 1.

Temps	En heure
Déploiement du matériel sur 1 forage	0,5 (1 technicien)*
Une mesure à une profondeur (purge + prélèvement)	0,5 (1 technicien)
Exploitation des résultats sur 1 forage	2 (1 technicien)

Tableau 1 : Estimation du temps nécessaire pour une mesure de vitesse de Darcy

Complément d'information

[1] Site du prestataire PoCible :

Description : <https://www.pocible.fr/metro/direct-velocity-tool-dvt>

Fiche technique : <https://www.pocible.fr/wp-content/uploads/2019/10/DVT.pdf>

[2] Résultats du projet HRSC

Film : <https://www.youtube.com/watch?v=lyOD2p61m74>

Rapport :

Rédacteur

FICHE TECHNIQUE

Mesures de flux massiques
multiniveaux

Outils pour la caractérisation
haute résolution des sites et
sols pollués

Echantillonneur passif iFLUX

Méthode passive

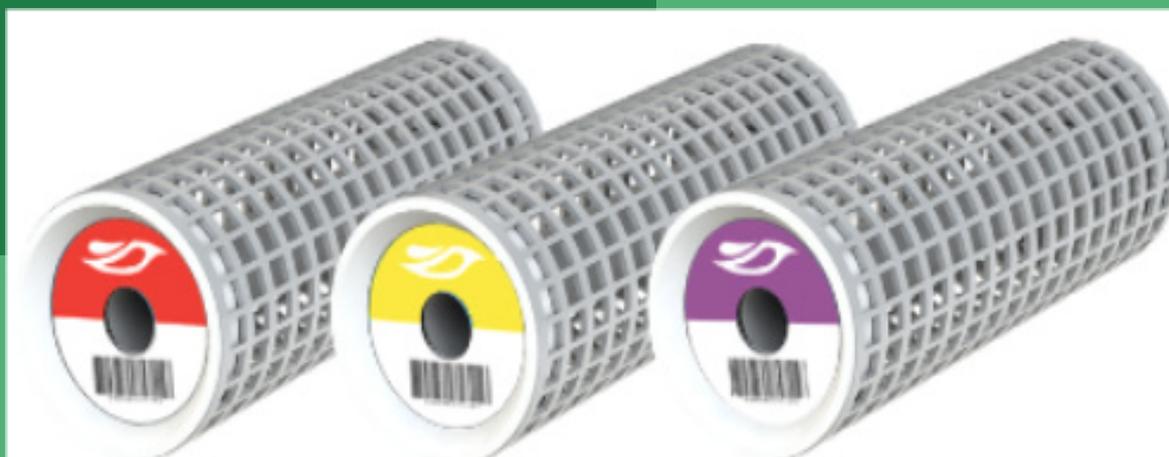
Mesures multiniveaux

Hauteur d'une cartouche : 16cm

Diamètre de forage : adaptable, construit sur mesure

Profondeur : pas de limite

Durée d'exposition en fonction des concentrations attendues dans les eaux souterraines



Principe

Les échantillonneurs iFLUX permettent de calculer le **flux massique de polluants** dans les eaux souterraines pendant leur période d'exposition en installant une **cartouche correspondant à la famille de polluant considérée**. Les polluants s'adsorbent sur l'adsorbant contenu à l'intérieur de l'échantillonneur passif pendant toute sa durée d'exposition dans les eaux souterraines.

Matériel nécessaire

Le matériel nécessaire est fourni par la société iFLUX, selon un plan d'installation préalablement défini avec l'utilisateur, il comprend:

- les cartouches, une pour le flux d'eau et les autres pour les contaminants,
- les tiges filetées, les écrous et les connecteurs en inox permettant d'assembler les cartouches aux profondeurs définies.

Des exemples de configuration sont présentés Figure 1

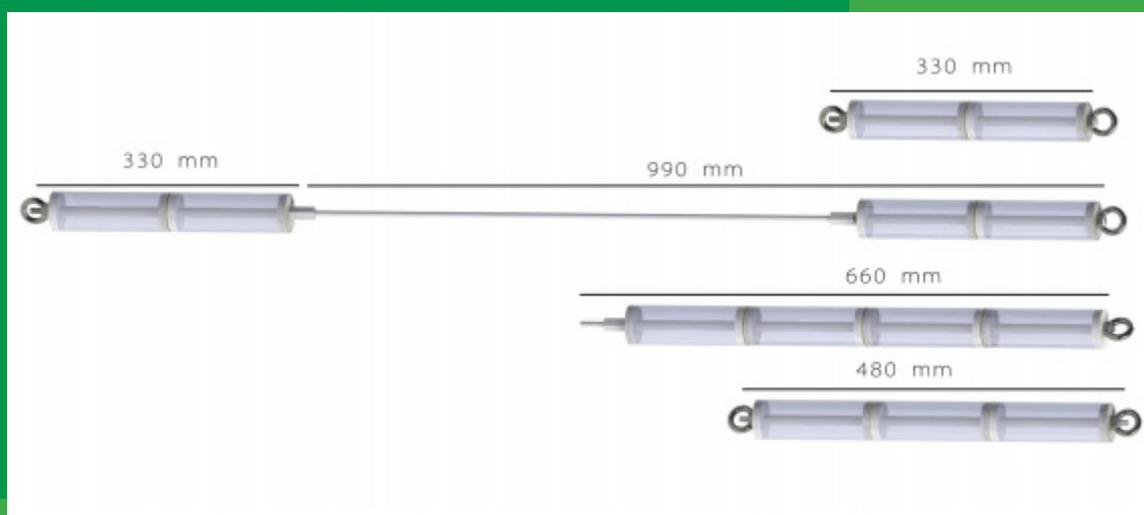


Figure 1 : Matériel nécessaire pour la mise en œuvre des échantillonneurs iFLUX (de gauche à droite : 1 concentration à 1 profondeur ; 1 concentration à 2 profondeurs ; 3 concentrations à 1 profondeur ; 2 concentrations à 1 profondeur)

Données préalables nécessaires

Définition de la **durée d'exposition** des échantillonneurs iFLUX : estimée à partir de l'**ordre de grandeur des vitesses d'écoulement** des eaux souterraines sur le site et de la **gamme de concentrations** des composés d'intérêt.

Mesure des **horizons productifs** en pompage conseillée au préalable afin de pouvoir :

- définir les profondeurs d'installation des échantillonneurs passifs de flux dans des piézomètres,
- comprendre et interpréter les données obtenues, puisque les flux massiques les plus forts ne sont pas nécessairement associés aux horizons les plus productifs en pompage (voir fiches de mesure des flux hydriques).

Mise en œuvre

Les échantillonneurs iFLUX sont insérés dans les tiges filetées fournies par la société iFLUX. Le nombre de tiges filetées à mettre en place entre chaque échantillonneur et de connecteurs à insérer entre les tiges filetées est donné par le plan d'installation fourni par la société iFLUX en fonction des profondeurs d'exposition définies par l'utilisateur. Cet assemblage se fait directement au niveau de la tête du forage (voir Figure 2) et les échantillonneurs sont descendus dans le forage lentement et au fur et à mesure de l'assemblage. Un câble en inox est également fourni pour attacher l'ensemble à la tête du forage. Pour le retrait, les échantillonneurs sont sortis du forage un par un et les tiges filetées ainsi que les connecteurs démontés au fur et à mesure.



Figure 2 : Mise en place des échantillonneurs iFLUX

Interprétation de l'essai

Les valeurs de concentrations aux profondeurs d'exposition sont calculées et fournies par la société iFLUX.

Avantages, inconvénients et limites d'application de la technique

-Avantages :

- Intégration des variations dans le temps,
- Possibilité de mesures multiniveaux (si déploiement de plusieurs cartouches « chimiques » simultanément).

-Inconvénients :

- Nécessité de venir 2 fois sur le terrain : pose et dépose,
- Pour les faibles concentrations, les durées d'exposition sont longues, le forage retenu ne pourra pas faire l'objet d'un suivi traditionnel par pompage pendant l'exposition.

-Limites :

- Pour des expositions longues, une dégradation des composés fixés est possible ainsi que le dépôt de films (bactérien, phase pure) limitant la diffusion au sein de la cartouche,
- Problème d'interprétation des résultats en cas de changement de direction d'écoulement des eaux souterraines pendant la durée d'exposition,
- Sorption compétitive ou limitée par la diffusion peut limiter la capacité des échantillonneurs passifs à retenir certains polluants
- Cartouches non interprétables si l'adsorbant est saturé (temps d'exposition trop long/ concentrations plus importantes que prévues).

Disponibilité et coûts

Des éléments de coûts et de temps passé pour une mesure des flux massiques de polluants au moyen d'échantillonneurs iFLUX sont résumés dans le Tableau 1.

Prestation extérieur	Prix unitaire (€)
cartouche, analyse, interprétation et rendu des résultats (société iFLUX)	Se rapprocher de la société iFLUX
Temps	En heure
Pose des échantillonneurs iFLUX	0,25 (1 technicien)
Retrait des échantillonneurs iFLUX	0,25 (1 technicien)

Tableau 1 : Estimation du coût d'un prélèvement (1 polluant à une profondeur)

Complément d'information

[1] Site internet du fabricant iFLUX : <https://www.ifluxsampling.com>

[2] Résultats du projet HRSC

Film : <https://www.youtube.com/watch?v=lyOD2p61m74>

Rédacteur

J. Michel (Ineris)



Mise à jour: Octobre 2020