

TESTS D'OUTILS INNOVANTS POUR LA CARACTERISATION DES SITES POLLUES

Caractérisation haute résolution des flux
et des concentrations en polluants dans
les eaux souterraines

RAPPORT FINAL

**Mars
2023**



EXPERTISES

REMERCIEMENTS

Rémi GILLET (GINGER-BURGEAP), Fabrice RICHEZ et Stéphane LAFORTUNE (INERIS), Cécile LEJARS (BRGM) pour les campagnes de terrain
Yohan SAUSSIER (PLM-Services) pour le prêt d'équipement et le test sur le site 1
Yves DUCLOS (ADEME)
Les propriétaires/industriels ayant mis à disposition leur site

CITATION DE CE RAPPORT

GUERIN Valérie, MICHEL Julien, ATTEIA Olivier, COME Jean-Marie, VERARDO Elicia, ESRAEL David, HUBER Vincent, BOISSARD Geoffrey (2023). **Tests d'outils innovants pour la caractérisation des sites pollués - Caractérisation haute résolution des flux et des concentrations en polluants dans les eaux souterraines**, 71p.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1872c0043 (BRGM) / 1872c0042 (INERIS) / 1872c0044 (GINGER-BURGEAP) / 1872c0045 (ADERA)

Étude réalisée par GUERIN Valérie, BOISSARD Geoffrey, BRGM, MICHEL Julien, INERIS, ATTEIA Olivier, ENSEGID, COME Jean-Marie, ESRAEL David, HUBER Vincent, GINGER-BURGEAP, VERARDO Elicia, POCIBLE pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Valérie GUERIN (BRGM)

Coordination technique - ADEME : DUCLOS Yves

Direction/Service : SFUSP

SOMMAIRE

ABSTRACT	5
1. CONTEXTE DU PROJET	6
1.1. Contexte de l'étude	6
1.2. Intérêt des outils multiniveaux	6
1.3. Typologie d'outils existants pour une caractérisation multiniveaux en nappe	7
1.3.1. Outils de caractérisation hydrodynamique	7
1.3.1.1. Outils de mesure de la conductivité hydraulique	8
1.3.1.1.1. Hydraulic Profiling Tool : HPT	8
1.3.1.2. Outils de mesure des flux horizontaux	8
1.3.1.2.1. Micromoulinets	8
1.3.1.2.2. Direct Velocity Tool : DVT	9
1.3.1.2.3. Colloïdal Borescope : CB.....	9
1.3.1.2.4. Echantillonneur passif de Flux : iFLUX	10
1.3.1.2.5. Mesure par dilution : Nagaré.....	11
1.3.1.3. Outils de mesure des flux verticaux	12
1.3.1.3.1. Heat-Pulse Flow Meter : HPF	12
1.3.1.4. Outils de mesure des flux en pompage.....	13
1.3.1.4.1. Heat-Pulse Flow Meter (HPF)	13
1.3.2. Outils multiniveaux pour la détermination des concentrations en polluants	13
1.3.2.1. Prélèvements des eaux interstitielles par forçages directs dans le sol	13
1.3.2.2. Prélèvements d'eau par pompage sélectif	14
1.3.2.2.1. Pompe entre packers : PeP	14
1.3.2.2.2. Préleveur Ciblé : PC.....	14
1.3.2.2.3. Préleveur PLM : PLM.....	15
1.3.2.2.3.2. Echantillonneur sous pression à intervalles discrets Modèle 425 : PSP.....	16
1.3.2.4. Echantillonneurs passifs.....	16
1.3.2.4.1. Définition	17
1.3.2.4.2. Echantillonneurs passifs instantanés	17
1.3.2.4.3. Echantillonneurs passifs à l'équilibre	18
1.3.2.4.4. Echantillonneurs passifs intégratifs.....	18
1.3.3. Outils multiniveaux pour la détermination des flux de polluants	19
1.3.3.1. Echantillonneurs passifs de flux (EPF).....	19
1.3.3.1.1. Fluxsamplers de la société Sorbisense	20
1.3.3.1.2. PFMs d'Enviroflux	20
1.3.3.1.3. Echantillonneurs iFLUX	21
2. METHODOLOGIE	22
2.1. Choix des outils retenus pour l'étude	22
2.1.1. Outils de caractérisation hydrodynamique	22
2.1.2. Outils de prélèvements multiniveaux	24
2.1.3. Outils de mesure de flux multiniveaux.....	27
2.2. Tests des outils en atelier sur site	28
2.2.1. Organisation des ateliers	28
2.2.2. Déploiement des outils lors des ateliers	28
2.2.3. Incertitudes associées à ce type de test.....	28
2.2.3.1. Incertitudes associées aux données brutes	28
2.2.3.1.1. Incertitudes analytiques.....	28
2.2.3.1.2. Incertitudes liées à chaque outil	28
2.2.3.2. Incertitudes sur les données calculées	28

2.2.3.3.	Incertitudes sur la position réelle des outils dans le forage	29
2.2.3.4.	Incertitudes liées à la variabilité naturelle temporelle	29
2.2.3.5.	Incertitudes liées à la conception des ouvrages	29
3.	RESULTATS DES ATELIERS DE COMPARAISON D'OUTILS.....	30
3.1.	Tests sur le site 1 : pollution par des hydrocarbures.....	30
3.1.1.	Présentation du site 1	30
3.1.1.1.	Contexte historique et hydrogéologique du site 1	30
3.1.1.2.	Description du forage utilisé pour le test sur le site 1	30
3.1.1.3.	Historique des mesures sur le site 1	31
3.1.2.	Description des tests sur le site 1.....	31
3.1.2.1.	Généralités	31
3.1.2.2.	Hydrodynamique.....	32
3.1.2.3.	Concentration.....	32
3.1.3.	Résultats et interprétation pour le site 1	33
3.1.3.1.	Hydrodynamique.....	33
3.1.3.2.	Concentration.....	35
3.1.3.3.	Flux massique de polluants	41
3.1.3.4.	Gain de connaissance	41
3.2.	Tests sur le site 2 : pollution par des COHV	41
3.2.1.	Présentation du site 2	41
3.2.1.1.	Contexte historique et géologique du site 2	41
3.2.1.2.	Description du forage utilisé pour le test sur le site 2	41
3.2.1.3.	Historique des mesures sur le site 2	42
3.2.2.	Description des tests sur le site 2.....	42
3.2.2.1.	Généralités	42
3.2.2.2.	Hydrodynamique.....	43
3.2.2.3.	Concentration.....	44
3.2.3.	Résultats et Interprétation pour le site 2.....	44
3.2.3.1.	Hydrodynamique.....	44
3.2.3.2.	Concentrations	46
3.2.3.3.	Flux massique de polluants	48
3.2.3.4.	Gain de connaissance	48
3.3.	Analyse économique	49
4.	RECOMMANDATIONS.....	51
5.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	56
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	58
	INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	60
	SIGLES ET ACRONYMES	62
	ANNEXE 1 : FICHES TECHNOLOGIQUES	63
	ANNEXE 2 : CHRONOLOGIE DES CAMPAGNES DE TERRAIN	64

ABSTRACT

Soil and groundwater contamination characterization of a site is an essential issue in order to define the modalities of monitoring and remediation actions and to reach the associated objectives. Among the recurring challenges to this characterization are the complexity of the sites, the heterogeneity of the petrophysical properties of the subsurface, and the differences in behaviour and mobility of the pollutants of interest. Understanding the spatial distribution of pollutants and the associated physical contexts is therefore a key to success for a remediation operation but also for the definition of groundwater monitoring networks.

The characterization of a groundwater pollution, carried out from a classical groundwater sampling in a piezometer, generally provides too partial information to establish a conceptual site model for heterogeneous groundwater environments. In such cases, multilevel water sampling and additional data acquisition, complementary to the chemical water quality data, are essential.

Tools exist for high-resolution characterization of sites (HRSC approach), but they are underused despite an inventory conducted by INERIS in 2020 and their recommendation in recent guide (MTECT, 2022). In order to democratize their use, tests were carried out within the framework of this project to implement different tools and show their interests and limits.

During the two tests (one site polluted by HC, one site polluted by VOCs), different innovative tools for detailed groundwater characterization were tested:

- Hydrodynamic groundwater characterization tools (hydraulic conductivity, direction and velocity of groundwater flow),
- Tools for multilevel measurements of pollution (concentrations and mass flow).

These tests allowed to specify:

- The operational conditions of their implementation (conditions of access to the technique, ease of use, necessary skills, associated costs, ...), their technical performances (accuracies, uncertainties, quantifications, ...), their limits (according to the different site contexts, ...).
- The results obtained for two site typologies (with different geology, hydrogeology and pollutants).

The results of the tests showed that these tools were able to highlight vertical heterogeneities. The results obtained with each tool are different, each of them having a different operating mode. Depending on the objectives of the study, it would be appropriate to define the most suitable tool.

The use of these tools allows to refine the conceptual site model for a better knowledge of transfers and a better design of remediation operations and monitoring network.

This comparison of tools should encourage the appropriation of innovative tools (French and foreign) for a detailed characterization of polluted sites.

Tool sheets have been drafted that specify the methods of use of the tools and their advantages and disadvantages.

1. Contexte du projet

La caractérisation de la pollution du milieu souterrain d'un site est un enjeu essentiel pour définir les actions de dépollution et atteindre les objectifs associés. Parmi les verrous récurrents à cette caractérisation, se situent la complexité des sites, les hétérogénéités géologiques des sols, les grandes différences de comportement et de mobilité des polluants d'intérêts. La compréhension de la distribution des polluants et des contextes physiques dans lesquels ils se situent représente une clé du succès du dimensionnement de la surveillance des eaux souterraines et d'une opération de dépollution.

1.1. Contexte de l'étude

La caractérisation des pollutions des eaux souterraines est souvent réalisée dans un forage à crépine longue par prélèvement ponctuel dans le temps et représentant une moyenne sur la colonne d'eau interceptée, pondérée par le flux d'eau des différents horizons. Or dans le cas de sites présentant de fortes hétérogénéités géologique et hydrogéologique et/ou d'environnements fortement contaminés notamment par des composés de type L-D-NAPL avec une migration complexe, le niveau de connaissance offert par ces mesures ne permet généralement pas l'élaboration d'un schéma conceptuel de fonctionnement suffisant pour envisager une bonne gestion du site.

Ainsi, depuis 2012, l'US EPA a développé le concept de « High Resolution Site Characterization¹ » (HRSC) afin de répondre à ce besoin de caractérisation détaillée des sites. Ce concept porte sur la réalisation d'un nombre et d'une typologie de mesures adaptées à la problématique pour parvenir à définir avec une plus grande certitude la distribution des polluants et les contextes physiques dans lesquels ils se situent.

Le guide MTECT (2022) précise les situations où des caractérisations multiniveaux sont à envisager.

Une première façon d'atteindre cet objectif est de réaliser plusieurs forages avec des crépines courtes. Cependant cela représente un coût plus élevé que l'équipement d'un site avec des forages à crépines longues. Pour discrétiser verticalement des niveaux de prélèvements au sein de forages avec des crépines longues, il est nécessaire de disposer d'outils spécifiques de prélèvement multiniveaux.

L'Ineris en 2020 a réalisé un recensement des méthodes et matériels disponibles. De nouveaux outils de prélèvement permettent également d'avoir accès, non plus uniquement, à une mesure ponctuelle mais, à une mesure intégrative dans le temps. Ces échantillonneurs passifs ont fait l'objet de projets pour qualifier leur utilisation pour les eaux souterraines (Michel, 2013 ; Michel et al., 2014 et Michel et Lemoine, 2014). Certains sont d'ores et déjà normalisés aux USA (ASTM, 2014) alors que leur utilisation en France et en Europe reste, à notre connaissance, faible.

Enfin, pour une bonne gestion des eaux souterraines contaminées, d'autres paramètres que ceux portant sur leur qualité chimique, doivent également être mesurés. La connaissance des flux d'eau et/ou de polluants ou de la perméabilité des terrains traversés est souvent nécessaire pour définir la méthode de remédiation du site et en optimiser au mieux la mise en œuvre. A ce jour, l'évaluation d'une vitesse sur la base de la loi de Darcy en considérant, un gradient moyen, une conductivité hydraulique et une porosité efficace, souvent au mieux estimée et non mesurée, est entachée d'une incertitude qui peut ne pas être acceptable selon les enjeux associés.

Une meilleure connaissance des flux d'eau et de la répartition des polluants en concentrations et en flux pourrait permettre : i) de mieux définir les réseaux de surveillance en cas de pollution ; ii) de conduire des opérations de remédiation de sites de façon plus efficace (délais, atteinte d'objectifs...), notamment dans le cadre du développement des solutions de traitement *in situ*.

1.2. Intérêt des outils multiniveaux

La répartition des polluants dans le sous-sol est fortement dépendante du comportement des polluants, de l'hétérogénéité du sous-sol et de l'âge de la pollution.

Ainsi une même pollution va se traduire dans le temps et l'espace par des profils de concentrations différents, et ce d'autant plus que l'on se situe proche de la zone source.

La Figure 1 suivante illustre ce phénomène pour une pollution par des DNAPL dans un milieu alluvionnaire avec des lentilles de matériaux peu perméables.

¹ EPA's definition of HRSC is High-resolution site characterization (HRSC) strategies and techniques use scale-appropriate measurement and sample density to define contaminant distributions, and the physical context in which they reside, with greater certainty, supporting faster and more effective site cleanup.

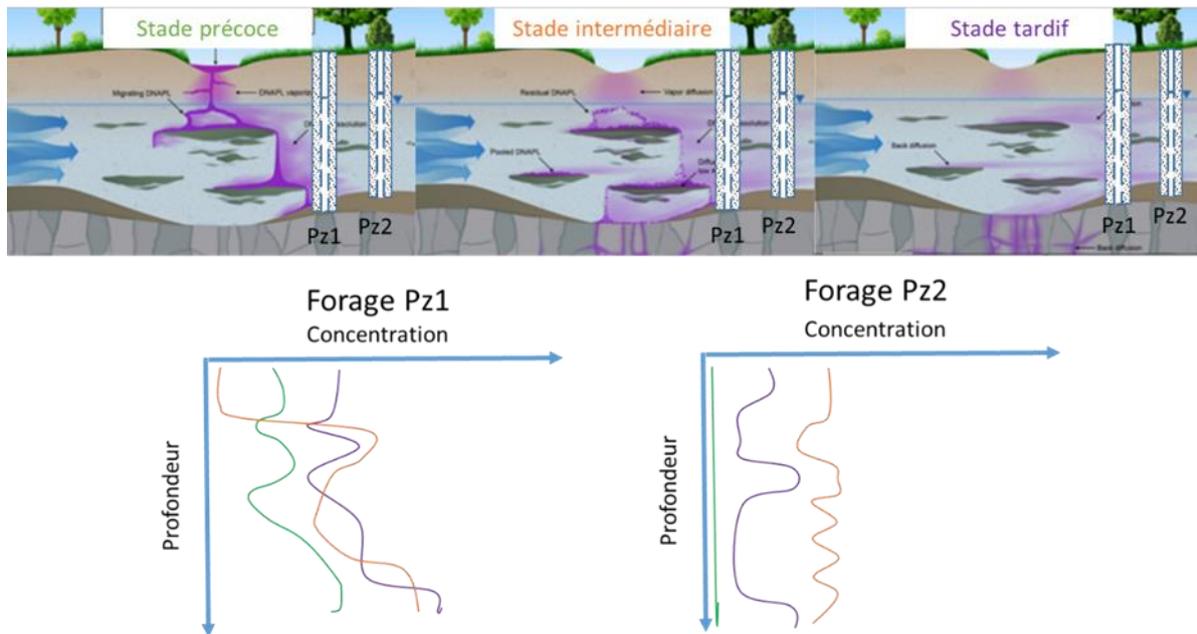


Figure 1 : Stade d'évolution d'une pollution par des DNAPL et conséquences sur les concentrations en nappe (adapté de ITRC, 2015)

Dans certains pays (Belgique, Canada (Colombie Britannique)), des longueurs maximales de crépines très courtes sont définies (ex. 1,8 m au Canada) et seuls des prélèvements dans ce type de forage peuvent être comparés aux valeurs de gestion dans le cadre d'une surveillance de site. En effet, dans des milieux hétérogènes avec un prélèvement classique (prélèvement moyen sur toute la colonne d'eau après purge de l'ouvrage) toute modification du protocole de prélèvement peut engendrer des variations significatives de concentrations (les différentes portions de l'aquifère n'étant pas mobilisées à l'identique) que l'on saurait difficilement expliquer.

La norme AFNOR NF X31-614 de 2017 préconise aussi des crépines courtes, mais sans préciser de hauteur maximale. En France, le parc de forages disponibles ne répond globalement pas à ces exigences, les crépines étant souvent longues.

Au Canada, des forages avec des crépines longues (sans mettre des aquifères différents en communication) peuvent néanmoins être utilisés dans une démarche de caractérisation d'un site (ils devront ensuite être colmatés). La compréhension de cette hétérogénéité verticale est importante pour définir la portion de l'aquifère devant faire l'objet d'une surveillance (par un forage à crépine courte) et pour définir la meilleure technique de dépollution.

Dans les forages à crépines longues, des prélèvements multiniveaux peuvent permettre de mettre en évidence cette hétérogénéité verticale et de tirer le meilleur parti des forages existants.

1.3. Typologie d'outils existants pour une caractérisation multiniveaux en nappe

Ce chapitre présente quelques outils de caractérisation multiniveaux disponibles. Cette présentation n'a pas vocation à être exhaustive, de nouveaux outils étant mis au point régulièrement. Tous les outils décrits ici n'ont pas été testés dans le cadre de cet atelier. Les outils mis en œuvre dans le cadre de cet atelier et ceux connus et mis en œuvre par ailleurs par les partenaires de ce projet sont plus particulièrement développés. Les outils utilisés dans le cadre de cet atelier sont décrits dans des fiches techniques disponibles en annexe 1.

Les outils présentés sont séparés en 3 catégories :

- Les outils donnant accès aux caractéristiques hydrodynamiques de la nappe,
- Les outils donnant accès aux concentrations en nappe,
- Les outils donnant accès au flux de polluants en nappe.

1.3.1. Outils de caractérisation hydrodynamique

Les outils permettent selon leur typologie et les conditions de déploiement d'avoir accès :

- A la conductivité hydraulique,
- Au flux d'eau en nappe.

Des outils permettent de localiser les flux entrants et sortants d'un forage. Les différences de vitesses enregistrées donnent, sur la verticale des longueurs crépinées, des informations sur les zones les plus productives (on y associe souvent la mesure de la température).

La mesure peut se faire en statique (mesure des mouvements d'eau ambiants ou en dynamique (sous pompage ou injection d'eau en tête d'ouvrage) et donne accès :

- A l'équilibre en nappe :
 - A la vitesse de Darcy horizontale,
 - Aux flux verticaux en forage,
- En nappe sous sollicitation (pompage) ;
 - Aux horizons productifs.

1.3.1.1. Outils de mesure de la conductivité hydraulique

1.3.1.1.1. Hydraulic Profiling Tool : HPT

Le HPT est un outil multiniveaux qui mesure la pression nécessaire à l'injection d'un débit d'eau pendant que la sonde est enfoncée dans le sol. Cette pression d'injection est réputée être un bon indicateur de la perméabilité à l'eau du milieu souterrain. Le HPT peut aussi être utilisé pour mesurer la pression hydrostatique à débit nul, ce qui permet la production de graphiques de pression hydrostatique et l'estimation du niveau de la nappe.

L'outil est une sonde enfoncée dans le sol grâce à une machine de forage (Figure 2). Les dimensions de la sonde sont les suivantes : hauteur 59 cm et diamètre 48 mm. La descente de la sonde est effectuée par fonçage à une cadence maximale de 2 cm/s. De l'eau sous pression est injectée dans le sol via un orifice de 20 mm de diamètre. Cet orifice est accompagné d'une membrane permettant de mesurer le débit d'eau injecté et la pression appliquée dans un sol donné.

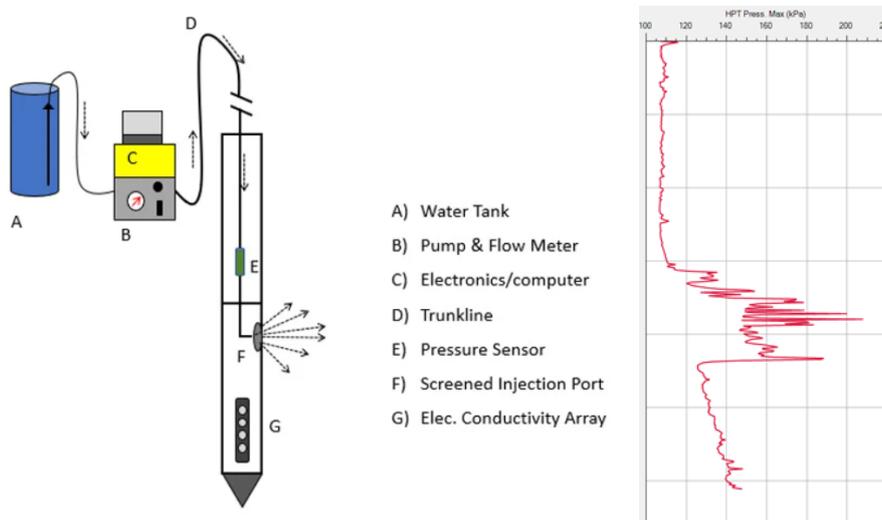


Figure 2 : Outil « Hydraulic Profiling Tool » (à gauche, ©Geoprobe) et exemple de restitution (à droite, ©GINGER-BURGEAP)

1.3.1.2. Outils de mesure des flux horizontaux

1.3.1.2.1. Micromoulinets

Les micro-moulinets classiques à hélice (Figure 3) permettent d'estimer la vitesse de flux ainsi que sa direction, qui sont déduites à partir de la vitesse de rotation des pales de l'instrument. Ils ne permettent de détecter que des vitesses assez élevées (>1 m/min).

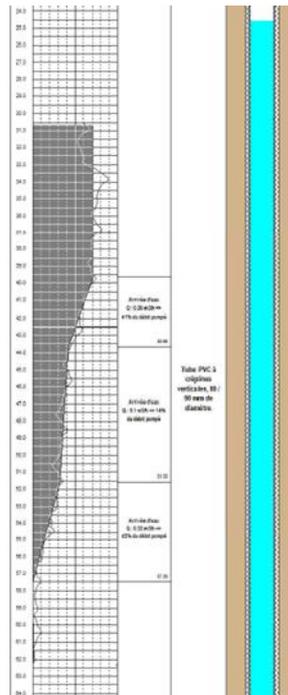


Figure 3 : Micro moulinet à hélice (à gauche) et exemple de restitution (à droite) ©BRGM-Guérin

1.3.1.2.2. Direct Velocity Tool : DVT

Le DVT (Figure 4) permet de mesurer les vitesses 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 de l'ouvrage. Les eaux traversant la crépine, et donc la fenêtre réservoir, passent ensuite par un tube relié à un système de mélange. Ce système de mélange permet d'obtenir en sortie une solution homogène entre un traceur injecté dans l'outil (NaCl) 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 de l'ouvrage.

L'outil est inséré dans l'ouvrage (diamètre forage compris entre 60 et 100 mm) à l'aide de barres de rallonge permettant d'atteindre jusqu'à 20 m de profondeur et permet des mesures du flux de Darcy compris entre 5 et 100 cm/jour.



Figure 4 : Direct Velocity Tool ©Pocible

1.3.1.2.3. Colloïdal Borescope : CB

Le colloïdal borescope, ou vélocimètre (

Figure 5), 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 de vitesse inférieure à 30 mm/s.

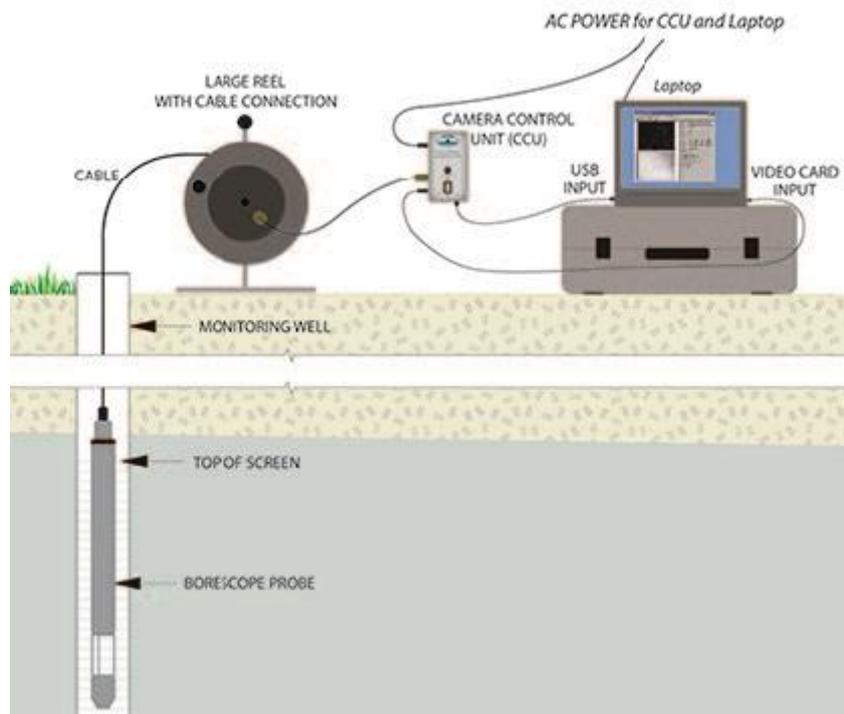


Figure 5 : Colloïdal Boreoscope ©Geotech

1.3.1.2.4. Échantillonneur passif de Flux : iFLUX

Les échantillonneurs passifs de flux iFLUX ont été développés par l'Université d'Anvers et le VITO, d'après les travaux de Verreydt et al. (2013 et 2010). Ils ont été brevetés (Verreydt et al., 2016) et la technologie est disponible via la société iFLUX, spin-off de l'université, créée en 2017.

Les échantillonneurs passifs iFLUX (Figure 6) sont composés de cartouches rigides de 15 cm de longueur. Plusieurs diamètres peuvent être fabriqués afin de s'adapter aux ouvrages les plus courants.

Une cartouche est spécifiquement conçue pour mesurer la vitesse de Darcy d'écoulement des eaux souterraines. Cette cartouche contient un mélange de 5 alcools traceurs (méthanol, éthanol, alcool isopropylique, tert-butanol et 2,4-diméthyl-3-pentanol) 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. Cette cartouche doit être exposée pendant une durée n'impliquant pas la disparition totale des traceurs.

Les échantillonneurs iFLUX permettent donc de calculer le flux d'eau (vitesse de Darcy d'écoulement des eaux souterraines) suite à l'exposition de la cartouche dédiée. Les données d'entrée nécessaires à la fourniture de ce résultat sont la taille des fentes des crépines, le type de massif filtrant et la géologie au droit de l'ouvrage à équiper, tout cela permettant d'en déduire les perméabilités à proximité immédiate des échantillonneurs.

Pour chaque profondeur de mesure, les cartouches, montées sur des tiges métalliques, sont descendues dans les forages. Il est possible d'équiper les ouvrages en multiniveaux à l'aide de ces dispositifs. Les cartouches sont ensuite envoyées à la société iFLUX pour analyse.



Figure 6 : Cartouche de flux d'eau ©iFLUX

1.3.1.2.5. Mesure par dilution : Nagaré

La technologie développée par la société Nagaré permet la mesure et le monitoring du flux d'eau souterraine (flux de Darcy) dans un aquifère. Elle est basée sur la méthode de dilution en puits unique mais s'en différencie par une injection de traceur en continu.

La concentration en traceur dans le puits est mesurée en continu depuis le début de l'injection, où elle est nulle, et jusqu'à la fin de la mesure où elle se stabilise à une concentration inférieure à la concentration d'injection. Le rapport entre la concentration stabilisée dans le puits et la concentration de traceur injecté est directement proportionnel au flux d'eau souterraine qui traverse horizontalement les crépines du puits. Plus le flux d'eau souterraine est élevé et plus la dilution du traceur par ce flux est importante et plus la concentration mesurée en traceur est faible. Le résultat de la mesure est donc un flux d'eau représentatif de toute la hauteur crépinée du puits (Figure 7-a). Moyennant l'utilisation d'obturateurs (type straddle packer ou autres), il est également possible d'effectuer un logging vertical des flux afin de caractériser l'hétérogénéité verticale des écoulements et/ou de cibler une zone d'intérêt particulière (ex. fracture, Figure 7-b).

La technologie permet également de réaliser un monitoring de la dynamique temporelle de flux d'eau souterraine. Dans ce cas, le résultat est une mesure continue du flux de Darcy en fonction du temps. Cela permet une compréhension fine de l'hydrodynamique des écoulements influencés par des facteurs naturels (interaction d'un aquifère avec un cours d'eau, étude des effets de marées sur les aquifères côtiers ...) ou anthropiques (effet d'un pompage sur les écoulements souterrains ...). Ce monitoring peut être maintenu en continu durant plusieurs jours, semaines ou mois selon l'objectif de l'étude.

La mise en œuvre nécessite une source d'énergie (électricité), un diamètre interne minimum de puits de 50 mm (2 pouces) et occupe une emprise au sol d'environ 4 m². Le temps de mesure est typiquement de 2 à 48 heures. Les traceurs utilisés (salins ou fluorescents) sont sélectionnés selon les conditions physicochimiques de l'aquifère étudié. Le flux de Darcy minimum pouvant être mesuré est de 5 cm/jour.

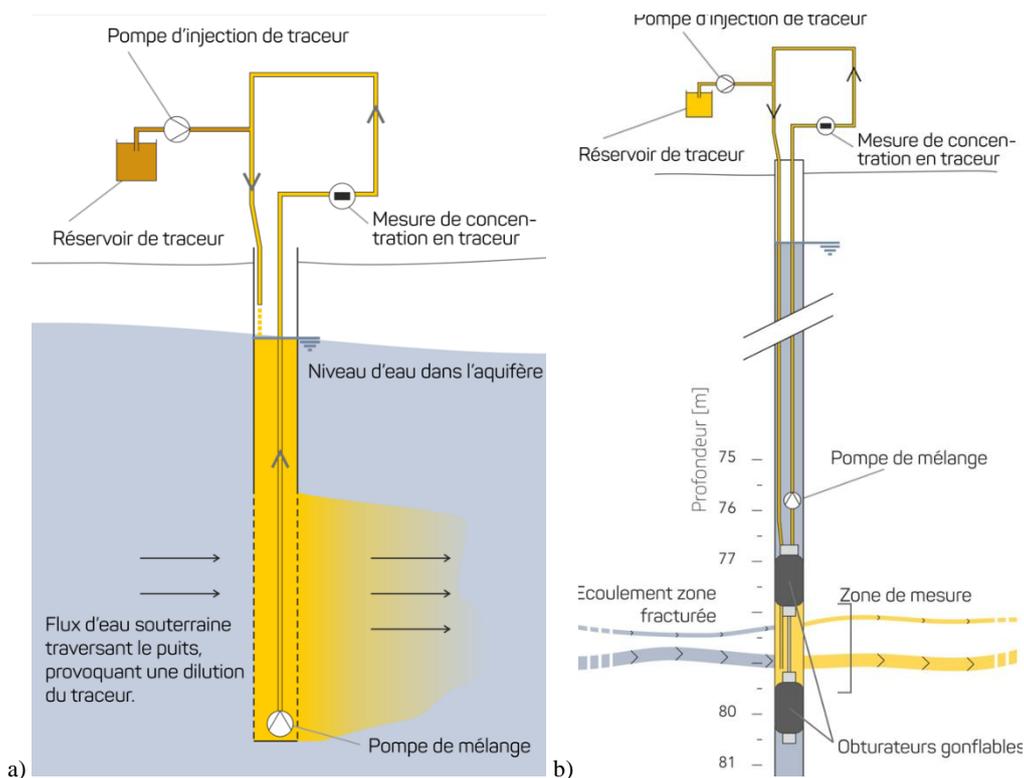


Figure 7 : Principe de l'outil développé par la société Nagare : mesure moyenne (a), mesure ponctuelle (b) (www.nagare.tech)

1.3.1.3. Outils de mesure des flux verticaux

Les flux verticaux présents dans un forage peuvent être dus à une différence de lithologie le long de l'intervalle crépiné et connectent alors des zones de charge hydraulique différente qui peuvent également présenter des concentrations différentes.

Ces flux verticaux peuvent varier d'un ouvrage à un autre, d'un site à un autre et d'une période hydrogéologique à une autre. De ce fait, il n'est pas possible de déterminer leur direction (ascendante ou descendante) ou de les quantifier sans une mesure directe. Il n'y a en outre pas de possibilité de généraliser la présence ou l'absence de flux verticaux par rapport à des typologies d'aquifère, puisque ce milieu peut être très hétérogène.

1.3.1.3.1. Heat-Pulse Flow Meter : HPF

Les flux verticaux naturels peuvent être mesurés à l'aide d'un flowmètre (ou heat pulse flowmeter, voir Figure 8) (Busse et al., 2016 ; Lo et al., 2014 ; Paillet, 2004). Cet outil 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). Cette mesure permet de quantifier les flux verticaux naturels et renseigne sur leur localisation exacte.

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.

Des photographies de la sonde, munie d'un centreur et d'un diverter (pétales permettant de forcer tout le flux à passer dans la sonde) et du treuil sont présentées Figure 8.

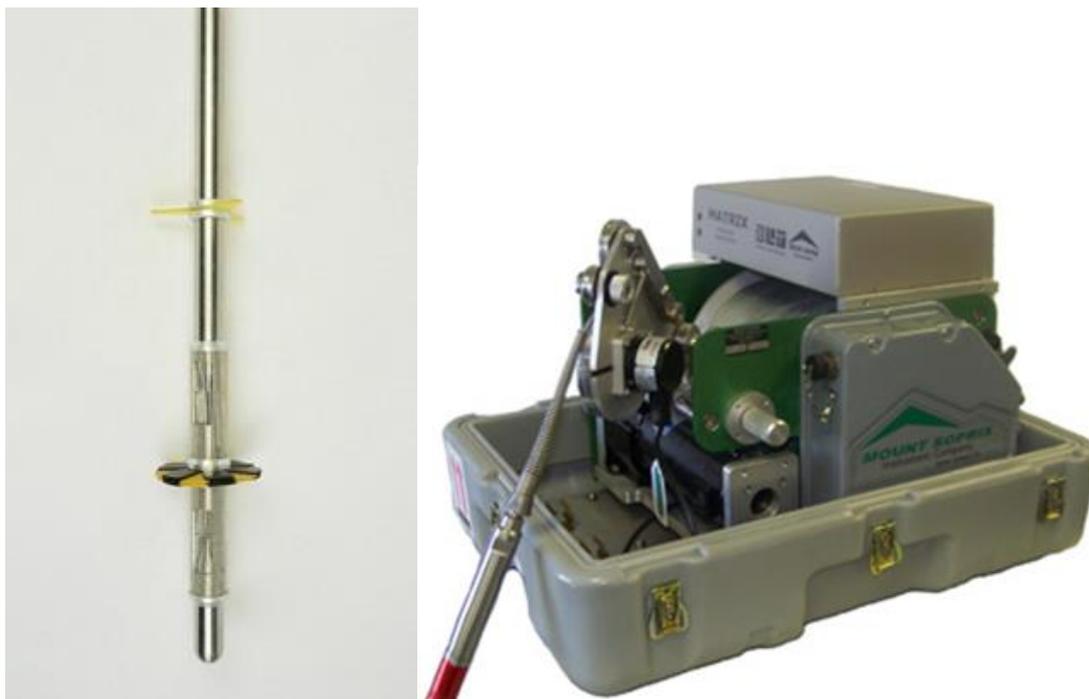


Figure 8 : Heat Pulse Flowmeter ©Mount Sopris

1.3.1.4. Outils de mesure des flux en pompage

Ces outils donnent accès aux zones de l'aquifère qui contribuent plus particulièrement au volume pompé, lors d'un prélèvement à l'aide d'une pompe immergée par exemple. Cela permet de connaître les horizons les plus contributifs en termes de débit.

1.3.1.4.1. Heat-Pulse Flow Meter (HPF)

Le flowmètre « Heat Pulse Flowmeter » (HPF) permet aussi l'identification d'horizons productifs en pompage dans les puits de forage et ouvrages. 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).

Voir la description en 1.3.1.3.1.

1.3.2. Outils multiniveaux pour la détermination des concentrations en polluants

Des outils permettent d'avoir accès à l'hétérogénéité verticale des concentrations en nappe directement via des prélèvements des eaux interstitielles par technique de fonçage dans le sol (« direct push ») (□).

Les autres outils, utilisables en forage, peuvent être classés en plusieurs catégories selon leur mode de fonctionnement :

- Les outils fonctionnant par prélèvements d'eau par pompages sélectifs (1.3.2.2) ;
- Les outils fonctionnant sans pompage (« passifs ») (1.3.2.3)
- Les échantillonneurs passifs (1.3.2.4).

1.3.2.1. Prélèvements des eaux interstitielles par fonçages directs dans le sol

Le SP16 groundwater sampler (Geoprobe, Figure 9) permet de prélever un échantillon d'eau souterraine (via les eaux interstitielles) dans des matériaux non consolidés à une profondeur allant de près de la surface du sol à plus de 30 m sous le niveau du sol. La profondeur qui peut être atteinte avec l'équipement d'échantillonnage d'eau SP16 est fonction de l'équipement et des méthodes utilisés pour faire progresser l'échantillonneur (manuel, force de percussion), de la formation pénétrée et de l'expérience de l'opérateur. Des analyses peuvent ensuite être faites sur l'échantillon d'eau prélevé. Chaque fonçage dans le sol permet un unique prélèvement d'eaux interstitielles à la profondeur atteinte. Il convient de reprendre autant d'opérations de fonçage différentes que de profondeurs à atteindre.

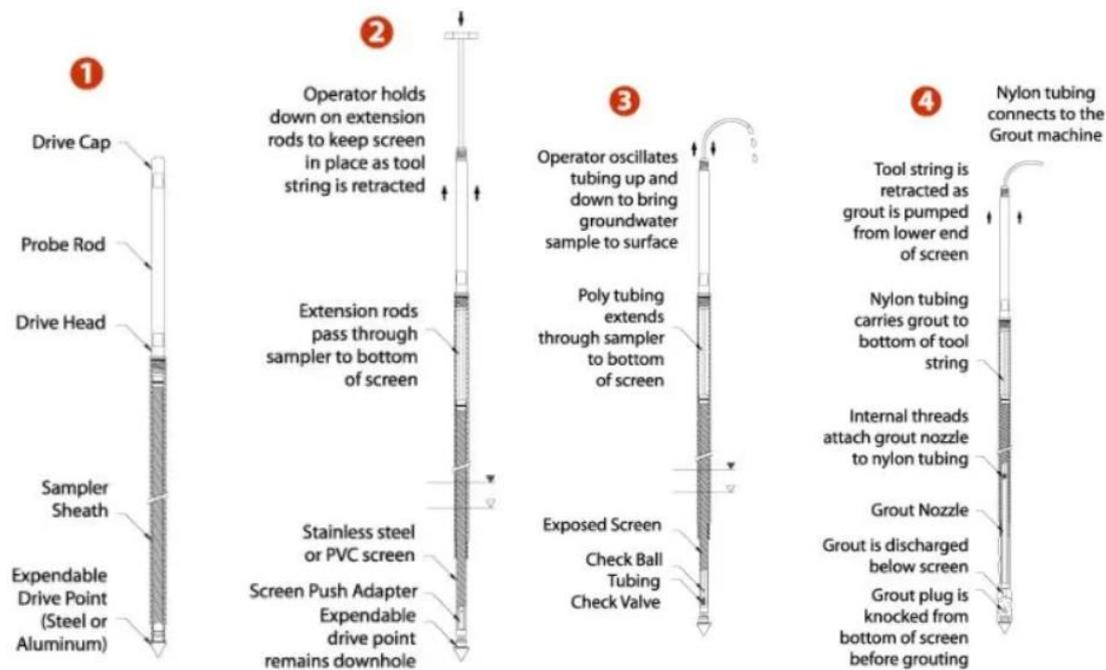


Figure 9 : SP16 Groundwater Sampler ©Geoprobe

1.3.2.2. Prélèvements d'eau par pompage sélectif

1.3.2.2.1. Pompe entre packers : PeP

Ce système, qui comprend une pompe et deux obturateurs (Figure 10), permet d'effectuer des prélèvements localisés sur une certaine épaisseur de nappe afin de préciser la distribution verticale des concentrations en polluants dissous.

Le système peut être mis en place dans des ouvrages de diamètre variable selon les diamètres de la pompe et les caractéristiques des obturateurs. Il est régulièrement utilisé pour des ouvrages dont le diamètre est compris entre 50 et 90 mm. L'espace de prélèvement, isolé entre deux obturateurs, est modulable selon le besoin à partir de 20 cm. Le prélèvement d'eau est effectué sur cette épaisseur à l'aide d'une pompe immergée (par exemple une pompe 12 V). Puis le système est déplacé à une profondeur différente pour réaliser un second prélèvement.



Figure 10 : Pompe entre packers © GINGER BURGEAP

1.3.2.2.2. Préleveur Ciblé : PC

Le Préleveur Ciblé (

Figure 11), développé par Innovasol, peut s'insérer dans des ouvrages présentant des diamètres internes compris entre 50 et 150 mm. L'espace de prélèvement, d'une hauteur de 30, 50 ou 80 cm, est isolé entre deux obturateurs. Des prélèvements d'eau sont effectués sur cette fenêtre à différentes profondeurs, à l'aide d'une pompe immergée 12 V Poséidon, afin d'échantillonner les eaux souterraines sur toute la verticale du forage. La pompe est positionnée au-dessus de l'obturateur supérieur.

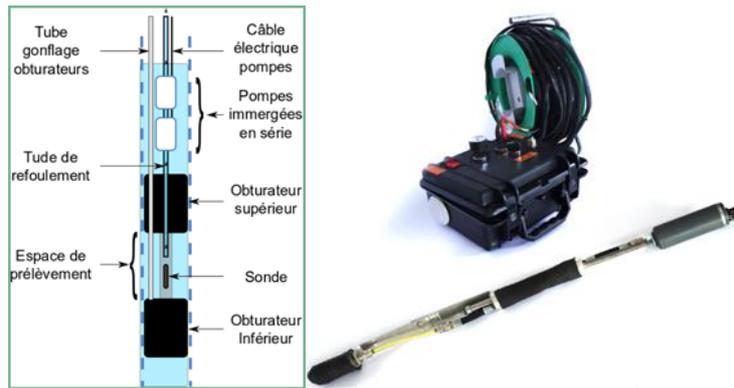


Figure 11 : Préleveur ciblé ©Pocible

1.3.2.3. Préleveur PLM : PLM

Le Préleveur développé par PLM (Figure 12) peut s'insérer dans des ouvrages présentant des diamètres internes compris entre 50 et 150 mm. L'espace de prélèvement, d'une épaisseur de 48 à 127 cm, est isolé entre deux obturateurs. Des prélèvements d'eau sont effectués sur cette fenêtre, à l'aide d'une pompe pneumatique Integra (Solinst). La pompe est positionnée au-dessus de l'obturateur supérieur.

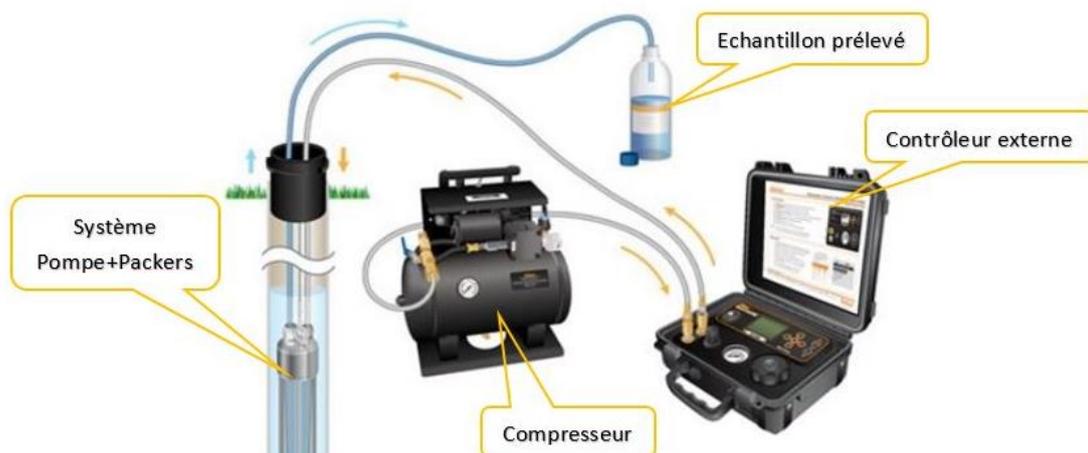


Figure 12 : Préleveur PLM ©BRGM ; ©PLM Services

1.3.2.3. Outils « passifs » sans pompage

1.3.2.3.1. Ginger - Multi Layer Sampler : G-MLS

Le GINGER Multi-Level System® (Figure 13), développé par GINGER-BURGEAP, 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) jusqu'à atteindre des conditions d'équilibre, avant d'être déposé pour récupérer les échantillons d'eau.

Le G-MLS est modulable selon les besoins d'étude, avec 20 points de prélèvements maximum et une distance minimale de 55 cm entre deux points de prélèvement. Il peut être utilisé dans des ouvrages de diamètre compris entre 50 et 90 mm et jusqu'à 50 m d'épaisseur de nappe, sans limite de profondeur totale.



Figure 13 : GINGER Multi-Level System® © GINGER BURGEAP

1.3.2.3.2. Echantillonneur sous pression à intervalles discrets Modèle 425 : PSP

Le Préleveur sous pression (Figure 14) est descendu à la profondeur de prélèvement souhaitée. La libération de la pression permet le remplissage du préleveur qui est remis sous pression pour isoler l'eau prélevée. Une fois en surface le préleveur est de nouveau dépressurisé pour permettre le remplissage des flacons.



Figure 14 : Echantillonneur sous pression à intervalles discrets, principe de fonctionnement ©Solinst

1.3.2.4. Echantillonneurs passifs

L'obtention d'un profil vertical de concentrations dans un forage peut se faire au moyen d'échantillonneurs passifs (Imbrigiotta et Harte, 2020 ; Lasagna et De Luca, 2016 ; Harte et Flanagan, 2011 ; Vroblesky et Peterson, 2004 ; Powell et Puls, 1993).

Ces outils donnent accès à la concentration dans l'eau directement ou au travers d'un support d'échange ou de sorption mis en équilibre avec l'eau de la nappe.

Cependant, à notre connaissance, leur utilisation en France n'est à ce jour pas très développée.

1.3.2.4.1. Définition

Les échantillonneurs passifs utilisés pour la mesure de la qualité des eaux souterraines peuvent être définis comme des dispositifs permettant le prélèvement d'un échantillon d'eau souterraine à une profondeur ou intervalle donné, sans transport actif d'eau (ITRC, 2007). Ainsi, le prélèvement ne nécessite aucune source d'énergie extérieure mais dépend de différentes forces et paramètres tels que la température, la pression, ainsi que le gradient des concentrations entre le milieu échantillonné et le milieu récepteur.

Les échantillonneurs passifs pour la caractérisation des eaux souterraines peuvent être classés en trois catégories :

- Les **échantillonneurs passifs instantanés** : ils permettent un prélèvement ponctuel et instantané d'un échantillon d'eau, sans purge de l'ouvrage (1.3.2.4.2) ;
- Les **échantillonneurs passifs à l'équilibre** : ils permettent l'obtention d'une concentration dans le milieu suite à la diffusion des polluants recherchés à travers une membrane et jusqu'à l'équilibre entre l'échantillonneur et le milieu (1.3.2.4.3) ;
- Les **échantillonneurs passifs intégratifs** : ils permettent la diffusion et la sorption des polluants d'intérêt qui s'accumulent sur ou dans l'échantillonneur passif jusqu'à son retrait. Ils donnent des résultats intégratifs, c'est-à-dire une valeur moyenne de la concentration durant la période d'exposition (1.3.2.4.4).

Les principaux échantillonneurs passifs de chaque catégorie sont présentés en détail dans les documents Ineris-ADEME (2014) et Ineris-ADEME (2011) : composition, durée d'exposition, mise en place, composés d'intérêt, applications, avantages, limites, références et fournisseurs.

1.3.2.4.2. Echantillonneurs passifs instantanés

Ces échantillonneurs passifs sont conçus pour prélever directement des échantillons d'eaux souterraines dans des ouvrages, sans purge. Les échantillons sont alors représentatifs des conditions régnant au moment du prélèvement et à l'endroit du prélèvement. En pratique, ces échantillonneurs sont simplement descendus dans les ouvrages puis remontés afin de récupérer l'échantillon d'eau souterraine prélevé. Notons que les constructeurs conseillent de les laisser en place pendant un certain temps permettant d'atteindre l'équilibre des conditions hydrodynamiques au sein de l'ouvrage. Le fait de laisser l'échantillonneur passif dans l'ouvrage pendant un certain temps avant de le retirer permet le rétablissement du régime hydrodynamique de l'ouvrage et évite une forte turbidité dans l'échantillon. De plus, même si les polluants s'adsorbent sur le matériau de l'échantillonneur, ce temps d'équilibre assure en principe une bonne estimation de sa concentration dans les eaux souterraines. Le document Ineris-ADEME (2011) présente certains échantillonneurs passifs instantanés. Les plus couramment utilisés sont les Hydrasleeves®. Ce type d'échantillonneur comprend les 3 constituants suivants (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) :

- une poche de polyéthylène flexible et imperméable, fermée au niveau de son extrémité inférieure, et ayant un diamètre compris entre 2,5 et 6,6 cm. Cette poche adopte une forme cylindrique lorsqu'elle est pleine, mais est plate dans le cas contraire. Elle fait généralement 76,2 cm de long, mais des poches de dimensions différentes peuvent être fabriquées. Cette poche est terminée au sommet par une valve flexible de contrôle de remplissage, qui fonctionne sur le principe de la pression hydrostatique,
- une ficelle de suspension pour maintenir la poche,
- un poids réutilisable en acier inoxydable, de 3,6 kg muni d'une attache.

Les échantillonneurs Hydrasleeve® sont conçus pour s'adapter à plusieurs diamètres de forage. Les volumes qu'il est possible de prélever sont compris entre 80 mL et 4 L.

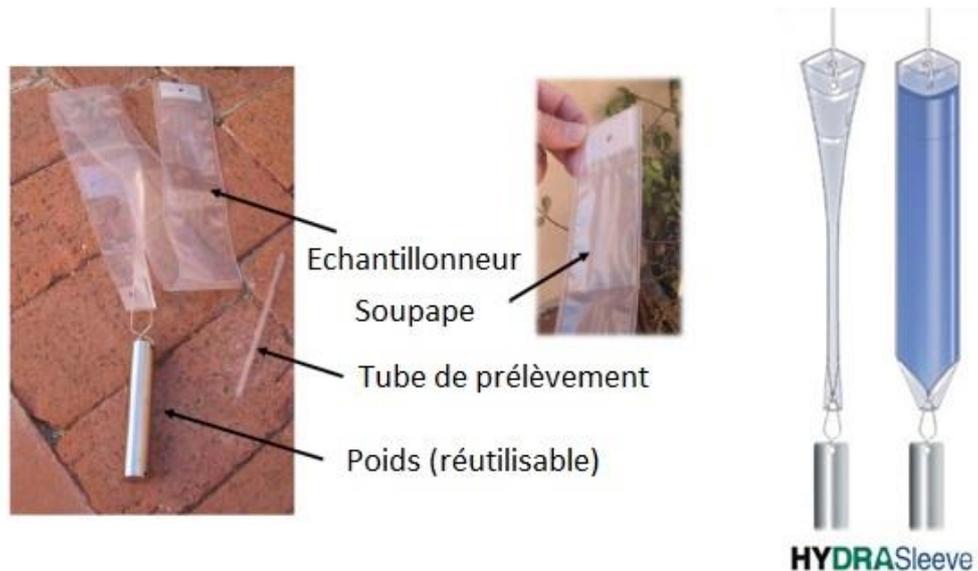


Figure 15 : Hydrasleeves® (adapté de Ineris-ADEME (2011))

1.3.2.4.3. Echantillonneurs passifs à l'équilibre

Les échantillonneurs passifs à l'équilibre sont composés d'une membrane remplie avec une phase liquide, de l'eau déionisée en général. Lorsque l'échantillonneur est exposé aux eaux souterraines polluées, les polluants vont diffuser à travers la membrane jusqu'à ce que les concentrations à l'intérieur de l'échantillonneur s'équilibrent avec celles de l'eau du forage. Ces dispositifs sont caractérisés par le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre entre les concentrations en polluants dans l'eau à échantillonner et dans le dispositif. La période requise pour obtenir l'équilibre est évaluée en laboratoire. Ce type de dispositif doit éviter les pertes de composés durant son exposition et répondre rapidement aux variations du milieu. Différents types de dispositifs peuvent être rencontrés sur le marché. Certains sont équipés d'une membrane en polyéthylène basse densité, ce qui les rend spécifiques aux composés volatils, alors que d'autres types de membranes existent, permettant l'application des échantillonneurs à une large gamme de polluants. L'un des échantillonneurs passifs à l'équilibre le plus utilisé est le PDB (polyethylene diffusion bag, voir Figure 16).

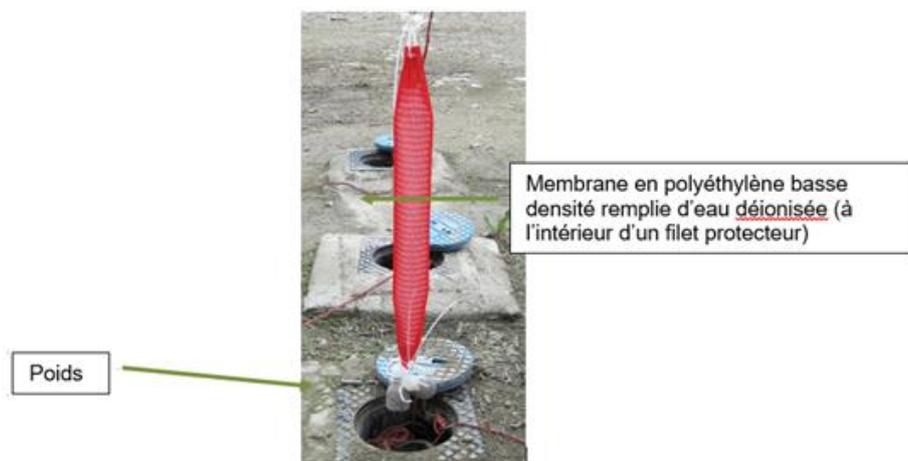


Figure 16 : PDB (Ineris-ADEME (2014))

1.3.2.4.4. Echantillonneurs passifs intégratifs

Ces échantillonneurs sont caractérisés par une forte capacité à collecter les polluants ciblés. Cette forte capacité permet une accumulation continue en polluants au cours de la période d'exposition. Celle-ci doit être adaptée en fonction des concentrations attendues afin de ne pas saturer l'échantillonneur (les échantillonneurs passifs intégratifs ne doivent pas atteindre l'équilibre avec le milieu environnant au cours de la période d'exposition). On peut donc obtenir les concentrations moyennes en polluants présents dans l'eau sur la période d'exposition, c'est-à-dire la concentration moyenne, pondérée dans le temps, lorsque le taux d'échantillonnage est connu. En général, la phase permettant le prélèvement et le milieu à échantillonner sont séparés par une

« barrière » qui en plus de définir le taux d'échantillonnage, définit également la sélectivité de l'échantillonneur pour limiter le prélèvement à certaines familles de polluants. Le taux d'échantillonnage, défini par la « barrière » dépendra également de l'échantillonneur, des propriétés physico-chimiques des polluants et des conditions régnant dans le milieu à échantillonner. Ce type d'échantillonneur passif est particulièrement intéressant lorsque les concentrations des polluants dans les eaux souterraines sont très variables d'une campagne de prélèvement à une autre. La Figure 17 présente un exemple d'échantillonneur passif intégratif : le dosimètre en céramique.



Figure 17 : Exemple d'échantillonneur passif intégratif de type dosimètre en céramique (Ineris-ADEME (2014))

Les iFLUX sont un autre exemple d'échantillonneurs passifs intégratifs, ils permettent de calculer la concentration moyenne en polluants dans les eaux souterraines sur la période d'exposition en installant simultanément une cartouche de flux d'eau (Cf. 1.3.1.2.4) et une cartouche de flux de la famille de polluants d'intérêt (Cf. 1.3.3.1.3).

1.3.3. Outils multiniveaux pour la détermination des flux de polluants

Certains outils donnent accès au flux de polluants.

Flux massique de polluants

Le flux massique de polluants correspond à la masse de polluants qui migre dans les eaux souterraines par unité de temps et par unité de surface ($g/j/m^2$ par exemple). Ce flux massique de polluants intègre non seulement les concentrations en polluants, mais également la vitesse d'écoulement des eaux souterraines, qui peut varier au sein d'un même site d'un point de prélèvement à un autre mais également sur la hauteur de la zone saturée. Ainsi, le flux massique de polluants peut permettre une meilleure compréhension du comportement du panache de pollution dans les eaux souterraines, menant globalement à une meilleure gestion des sites pollués.

1.3.3.1. Échantillonneurs passifs de flux (EPF)

Les échantillonneurs passifs de flux sont un cas particulier des échantillonneurs passifs intégratifs. En effet, en plus de la mesure de la concentration moyenne au cours de la période d'exposition, ils permettent la mesure des vitesses de Darcy d'écoulement des eaux souterraines ainsi que de la masse de polluants fixée sur le dispositif pendant leur période d'exposition dans des ouvrages dans les eaux souterraines.

Les EPF sont constitués d'une membrane souple ou rigide contenant un adsorbant qui peut être ou non imprégné de traceurs. Lors de leur exposition dans les eaux souterraines :

- les polluants dissous vont s'adsorber sur l'adsorbant,
- les traceurs vont être relargués.

La façon dont les polluants vont se fixer et les traceurs être relargués dépend de la vitesse d'écoulement des eaux souterraines, de l'affinité des traceurs et des polluants pour l'adsorbant ainsi que des concentrations en polluants dans les eaux souterraines passant à travers le dispositif.

Les échantillonneurs passifs de flux sont conçus avec un diamètre égal à celui de l'ouvrage dans lequel ils sont installés, ce qui permet de s'assurer que la totalité du flux d'eau passe à travers l'échantillonneur et non autour de celui-ci.

Lorsque les EPF sont retirés, les traceurs restants et les polluants sont extraits de l'adsorbant. La mesure de la masse de polluants fixés permet de calculer le flux massique de polluants et la mesure des traceurs restants permet de calculer la vitesse de Darcy d'écoulement des eaux souterraines. Lorsque ces deux données sont obtenues, le calcul des concentrations moyennes de polluants sur la période d'exposition est possible. La durée d'exposition doit être choisie afin d'atteindre au minimum la limite de quantification de la technique analytique qui sera utilisée pour le dosage des polluants adsorbés et afin d'éviter de saturer l'adsorbant. Par ailleurs, la quantité de traceurs restants doit également être suffisante, l'idéal étant que la moitié des traceurs introduits soient encore présents lors du retrait du dispositif. La disparition totale du traceur ou au contraire l'élution d'une

quantité minimale de sa masse initiale doivent être évitées, puisque ces situations ne permettent pas une estimation précise des flux d'eau.

Pour plus de détails sur les EPF commercialement disponibles, leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et leurs limites, le lecteur pourra se référer au document Ineris-ADEME (2020).

1.3.3.1.1. Fluxsamplers de la société Sorbisense

Les échantillonneurs passifs de flux de la société Sorbisense sont constitués de cartouches de 25 cm de long et de 5 cm de diamètre (Figure 18). Au regard de la théorie de l'échantillonnage passif pour la mesure de flux d'eau et de flux massique de contaminants, ces dispositifs sont donc idéalement adaptés pour des ouvrages d'un diamètre intérieur de 2 pouces uniquement. Ces dispositifs ont été développés et brevetés à l'université d'Aarhus (De Jonge et Rothenberg, 2003).

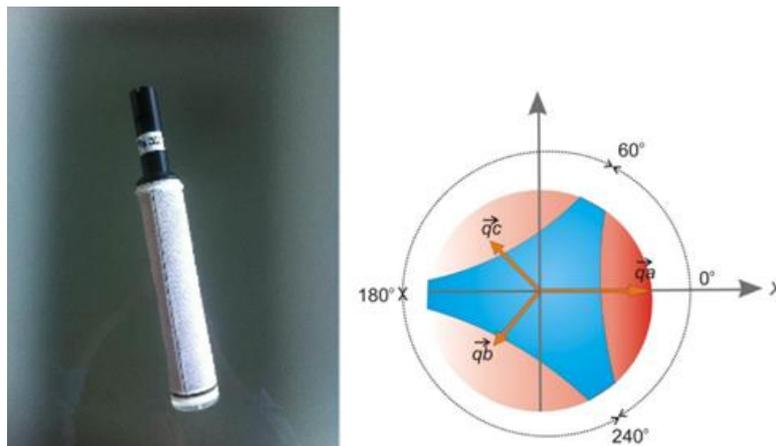


Figure 18 : Fluxsampler et coupe schématique ©Sorbisense

Les Fluxsamplers de la société Sorbisense sont composés de 3 compartiments, remplis d'un adsorbant et d'un traceur (citrate de calcium). En fonction des composés recherchés, le matériau adsorbant est un polymère ou une résine échangeuse d'ions. Il est possible de mesurer les flux en multiniveaux sur la verticale : plusieurs cartouches sont descendues dans le forage au bout de tubes métalliques s'emboîtant jusqu'à la profondeur désirée. Les analyses des cartouches sont effectuées au Danemark. Les résultats fournis comprennent la vitesse de Darcy d'écoulement des eaux souterraines, le flux massique de contaminants, leur concentration moyenne sur la période d'exposition et la masse de contaminants adsorbée dans 3 directions (0°, 120° et 240°), ce qui permet de déterminer la direction d'écoulement des eaux souterraines (Figure 18).

1.3.3.1.2. PFMs d'Enviroflux

Les PFMs (Figure 19) sont les premiers dispositifs à avoir été développés, par l'université de Floride (Hatfield et al., 2004 et 2002). Cette technologie a été brevetée en 2002 (Hatfield et al., 2003). En Europe, ces dispositifs sont également proposés par la société iFLUX, qui peut se charger de l'installation et du retrait.

Les PFMs d'Enviroflux sont constitués d'un filet protecteur en polyéthylène à l'intérieur duquel est placé un adsorbant (charbon actif ou résine) imprégné d'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. Pour fixer la durée d'exposition des PFM afin de ne pas perdre la totalité des traceurs, il est nécessaire de connaître un ordre de grandeur des vitesses d'écoulement des eaux souterraines sur le site. De même, la connaissance de l'ordre de grandeur des concentrations des composés d'intérêt permet de fixer la durée d'exposition nécessaire à l'atteinte des limites de quantification des techniques utilisées pour leur dosage et d'éviter la saturation des adsorbants.

Les PFMs sont construits à la demande, ce qui implique que leurs longueurs sont choisies par l'utilisateur. Les PFM peuvent être séparés en plusieurs sections verticales isolées par des joints. Ceci permet également d'éviter les flux verticaux à l'intérieur de ces dispositifs (mais pas dans le massif filtrant) et permet une utilisation en multiniveaux. Les résultats fournis comprennent la vitesse de Darcy d'écoulement des eaux souterraines, le flux massique de contaminants et la concentration. Pour le calcul, les données d'entrée nécessaires à la fourniture de ces résultats sont la taille des fentes des crépines, le type de massif filtrant et la géologie au droit de l'ouvrage à équiper.

Les PFM peuvent être utilisés pour une large gamme de composés organiques et inorganiques en sélectionnant un matériau adsorbant adapté aux propriétés des substances. Ils peuvent être exposés de quelques jours à plusieurs semaines.

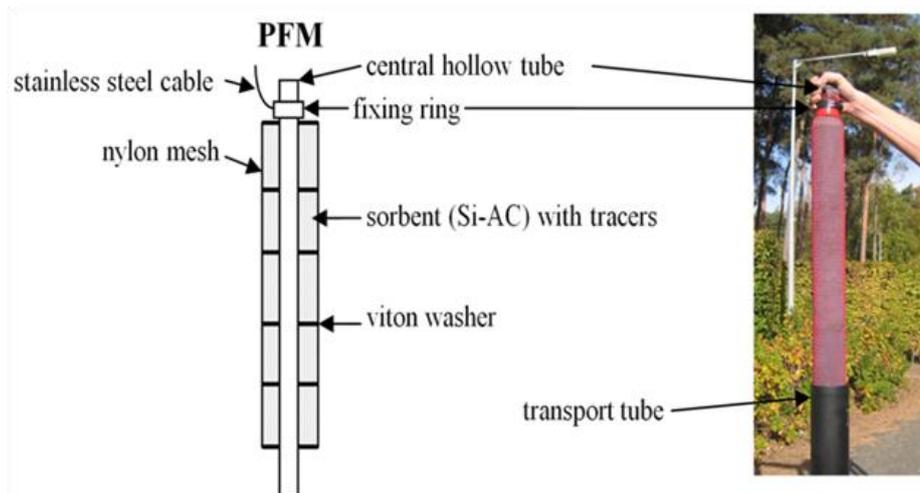


Figure 19 : Schéma d'un PFM ©iFLUX

1.3.3.1.3. Echantillonneurs iFLUX

Le système développé par iFLUX (1.3.1.2.4) propose des cartouches qui contiennent un adsorbant spécifique à la famille de contaminants d'intérêt (charbon actif ou résine),

Pour chaque profondeur de mesure, plusieurs cartouches peuvent être mises en série. Les cartouches ou groupes de cartouches, montés sur des tiges métalliques, sont descendus dans les forages (Figure 20). Il est possible d'équiper les ouvrages en multiniveaux à l'aide de ces dispositifs. Les cartouches sont ensuite envoyées à la société iFLUX pour analyse.

Les données d'entrée nécessaires à la fourniture des résultats sont les mêmes que celles nécessaires pour les PFM, à savoir la taille des fentes des crépines, le type de massif filtrant et la géologie au droit de l'ouvrage à équiper, tout cela permettant d'en déduire les perméabilités à proximité immédiate des EPF.

Afin de fixer la durée d'exposition des échantillonneurs iFLUX, il est nécessaire de connaître un ordre de grandeur des vitesses d'écoulement des eaux souterraines sur le site et des concentrations des composés d'intérêt.



Figure 20 : Echantillonneur iFLUX ©iFLUX

2. Méthodologie

2.1. Choix des outils retenus pour l'étude

De nombreux outils existent ou sont en cours de développement sans que leurs domaines de fonctionnement ne soient toujours suffisamment établis et/ou reconnus par l'ensemble des acteurs des sites et sols pollués (bureaux d'études et d'ingénierie, entreprises travaux, donneurs d'ordres, administrations...).

Les verrous portent sur les déficits de connaissances partagées des fenêtres d'utilisation de ces outils (typologies de site, géologie, hydrogéologie, polluants...), des conditions opérationnelles de leurs mises en œuvre (conditions d'accès à la technique, facilités d'utilisation, compétences nécessaires, coûts associés, ...), de leurs performances techniques (précisions, incertitudes, quantifications, ...), de leurs limites (selon les différents contextes de sites...) etc.

Les outils retenus couvrent toute la gamme de typologie d'outils existants, i.e.

- Les mesures de flux de nappe (direction, sens, vitesse ...);
- Les mesures multiniveaux sur matrice eau (concentrations, flux...);
- Les diagraphies à l'avancement (perméabilités, détection polluants...).

Par ailleurs les outils retenus sont :

- Des outils innovants, développés par des acteurs français, pour lesquels l'émergence opérationnelle peut être favorisée;
- Des outils émergents disponibles commercialement pour lesquels il s'agit de favoriser le transfert et l'appropriation.

2.1.1. Outils de caractérisation hydrodynamique

Cinq outils ont été testés sur site :

- Hydraulic Profiling Tool (HPT), qui permet d'estimer le profil de perméabilité dans l'aquifère saturé à l'aide d'une relation empirique;
- Échantillonneur passif de flux iFLUX, qui permet de mesurer la vitesse d'écoulement des eaux;
- Heat Pulse Flowmeter (HPF), qui permet de caractériser dans un forage :
 - Les flux verticaux naturels;
 - Les venues d'eau en pompage.
- Colloidal Borescope (CB) et Direct Velocity Tool (DVT), qui permettent de caractériser :
 - La vitesse d'écoulement des eaux;
 - La direction d'écoulement.

Les photos de ces outils sont reprises sur la Figure 21 ci-dessous.

Les principales caractéristiques de ces outils sont reprises dans le paragraphe 1.3.1 et le Tableau 1 ci-dessous. Ces outils ont fait l'objet de fiches qui présentent ces outils de manière plus détaillée (annexe 1).

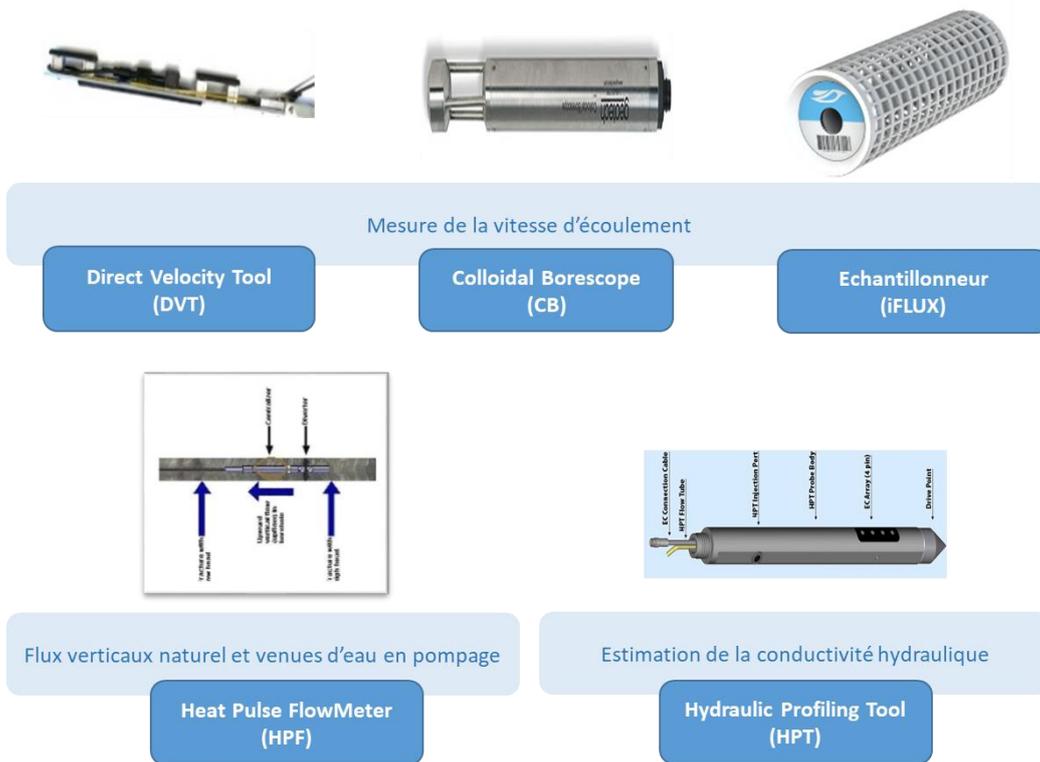


Figure 21 : Photos des outils de caractérisation hydrodynamique utilisés

Heat Pulse FlowMeter (HPF)	Sonde HPT (HPT)	Direct Velocity Tool (DVT)	Colloidal Borescope (CB)	Echantillonneur passif de flux (iFLUX)
PARAMETRE FOURNI				
Mesure des flux verticaux naturels en forage (L/s) et venues d'eau en pompage (L/s et % par horizon)	Estimation de la conductivité hydraulique de la zone saturée (m/j)	Mesure de la vitesse d'écoulement des eaux souterraines (cm/j)		
			Détermination de la vitesse et de la direction d'écoulement*	Détermination de la vitesse d'écoulement
FONCTIONNEMENT				
Mesure par dissipation d'un pulse de chaleur	Evaluation de la capacité d'infiltration d'eau injectée dans l'aquifère : mesure de débit et pression	Mesure de la dilution d'une solution injectée suivant plusieurs angles	Mesure du mouvement de particules de taille inférieure à 10 µm	Mesure de la disparition d'un traceur présent dans une cartouche
Statique	Dynamique	Passif	Statique	Passif
DISCRETISATION VERTICALE				
Décision de l'utilisateur	1,5 cm	30 cm	Décision de l'utilisateur	Décision de l'utilisateur
DIAMÈTRE D'UTILISATION (mm)				
A partir de 2 pouces	Outil direct push (type CPT) (44,5 ou 57)	60 - 100	> 52 mm	Construit sur mesure
PROFONDEUR MAXIMALE (m)				
Pas de limite	Selon la géologie et machine de forage	20 m	1 000 m	Pas de limite
TEMPS DE MESURE				
1 à 2 min par point	Temps réel: Vitesse d'enfoncement 0,5 ml/min	10-15 min/point	15 à 30 min par point	Fonction des vitesses d'écoulement
PROPRIÉTAIRE DE LA TECHNOLOGIE				
Mount Sopris	GEOPROBE®	InnovaSol	GEOTECH	iFLUX
DISPONIBILITÉ				
Prestation / achat	Prestation / achat	Prestation	Prestation/achat	Prestation

* : Non testé dans le cadre de cette étude

Tableau 1 : Principales caractéristiques des outils de caractérisation hydrodynamique utilisés

2.1.2. Outils de prélèvements multiniveaux

Six outils de prélèvement multiniveaux ont été testés :

- Des outils par pompage sélectifs entre obturateurs :
 - PeP : prélèvement entre obturateurs distants de 1 m avec une pompe Whale,
 - PC : prélèvement entre obturateurs par pompage dans une fenêtre de mesure de 50 cm,
 - PLM : prélèvement entre obturateurs avec une pompe à membrane dans une fenêtre de mesure de 30 cm,
- Des outils passifs :
 - G-MLS : prélèvement sur une fenêtre de 7 cm en passif entre obturateurs,

- PsP : préleveur ciblé par dépression sans obturateur,
- Des échantillonneurs passifs intégratifs :
 - Échantillonneurs passifs de flux iFLUX : exposition simultanée d'une cartouche de flux d'eau et d'une cartouche de flux de polluants qui, par calcul, donne accès à la concentration en nappe via la sorption sur un support.

Les photos de ces outils sont reprises sur la Figure 22 ci-dessous.

Les caractéristiques principales de ces outils sont reprises dans le paragraphe 1.3.2 et sur le Tableau 2 ci-dessous. Ces outils ont fait l'objet de fiches techniques détaillées qui sont disponibles en annexe 1.



Figure 22 : Photos des outils de prélèvements multiniveaux utilisés et principe de fonctionnement

G-MLS	PeP	PC	PSP	PLM	iFLUX	Pompe
DESCRIPTION						
Cellules de prélèvement entre deux obturateurs en série	Pompe entre 2 obturateurs (Whale)	Pompe Poséidon entre 2 obturateurs (Poséidon)	Préleveur sous pression (Solinst)	Pompe pneumatique entre 2 obturateurs (Solinst)	Cartouches de flux d'eau et de polluant	Pompe immergée
Passif	Actif	Actif	Passif	Actif	Passif	Actif
DEPLOIEMENT						
Système passif avec différentes zones prédéfinies	Outils à déployer à différentes profondeurs pour obtenir un profil					Prélèvement moyen
DISTANCE ENTRE OBTURATEURS/MESURE (cm)						
>55	>20	30, 50 ou 80	-	30, 50 ou 90	15	-
DIAMÈTRE DU FORAGE (mm)						
De 50 à 90	De 50 à 90	De 50 à 120	> 44	48-127	Adaptable	> 46
PROFONDEUR MAXIMALE (m)						
Pas de limite	20	50	150	46	Pas de limite	55
TEMPS DE MESURE OU DÉBIT PURGE						
Dépendant de la vitesse d'écoulement (>1 j)	1-3 L/min	0,4-1,7 L/min	15 sec	0,12-0,3L/min	Dépendant de la vitesse et de la concentration (qq jours à qq mois)	4L/min
PROPRIÉTAIRE DE LA TECHNOLOGIE						
GINGER-BURGEAP	-	InnovaSol	Solinst	PLM	iFLUX	Proactive, MPI, Whale, Poseidon
DISPONIBILITÉ						
Prestation / Achat	Prestation	Prestation	Location / Achat	Location / Achat	Prestation	Achat

Tableau 2 : Principales caractéristiques des outils de prélèvements utilisés

Le mode d'échantillonnage des 3 outils passifs est repris sur la Figure 23.

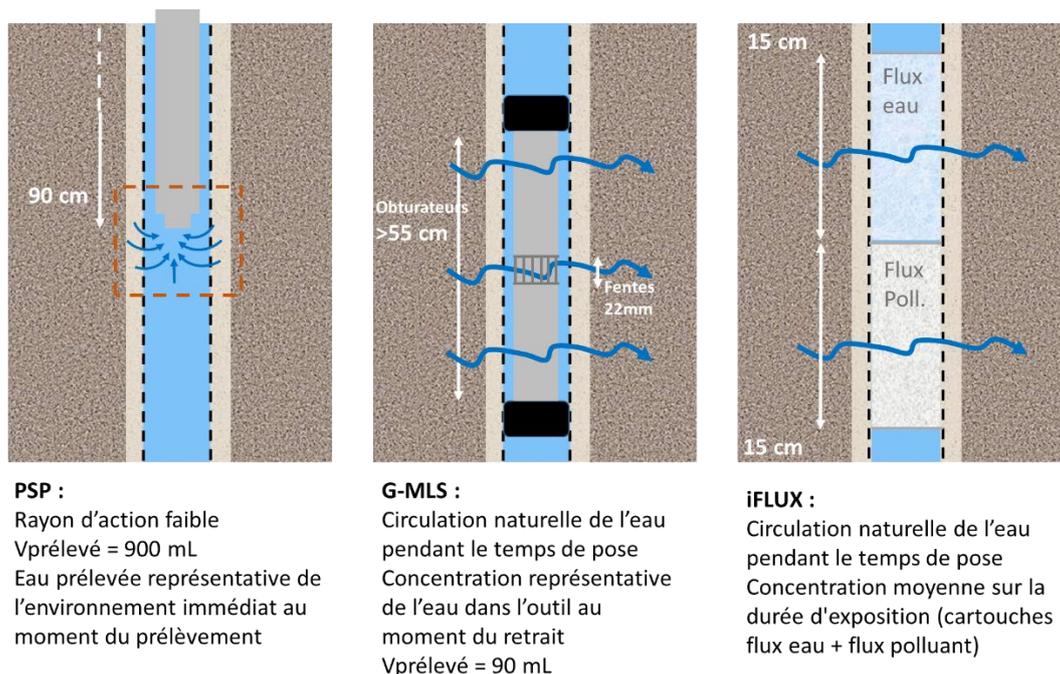


Figure 23 : Mode de fonctionnement des 3 outils passifs testés

Le mode d'échantillonnage des 3 outils multiniveaux par pompage entre obturateurs est repris sur la Figure 24.

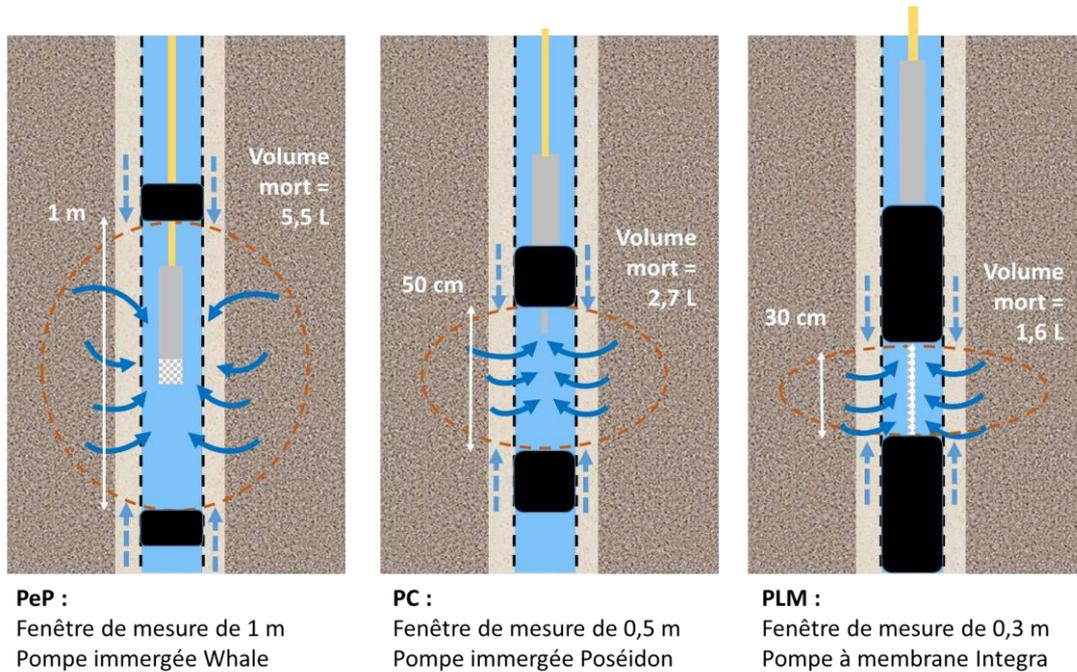


Figure 24 : Mode de fonctionnement des 3 outils multiniveaux par pompage entre obturateurs (NB : les obturateurs ne sont pas à l'échelle – volume mort au sein de l'ouvrage calculé pour un diamètre de 70 mm)

2.1.3. Outils de mesure de flux multiniveaux

Un seul outil a été déployé sur site, l'échantillonneur passif iFLUX spécifique aux polluants recherchés

La photo de cet outil est reprise sur la Figure 25 ci-dessous.

Les caractéristiques de cet outil sont reprises sur le Tableau 3 ci-dessous. Cet outil a aussi fait l'objet d'une fiche qui est disponible en annexe 1.



Figure 25 : Photo de l'outil de mesure de flux de contaminants utilisé

iFLUX		
DESCRIPTION		DEPLOIEMENT
Cartouche pour composés organiques	Passif	Installation possible de plusieurs cartouches simultanément
DISTANCE ENTRE OBTURATEURS/MESURE (cm)		DIAMÈTRE DU FORAGE (mm)
15		Sur mesure
PROFONDEUR MAXIMALE (m)		TEMPS DE MESURE OU DÉBIT PURGE
Pas de limite		Dépendant de la concentration et de la vitesse d'écoulement des eaux souterraines
PROPRIÉTAIRE DE LA TECHNOLOGIE		DISPONIBILITÉ
iFLUX		Prestation

Tableau 3 : Principales caractéristiques de l'outil de mesure de flux de polluants utilisé

2.2. Tests des outils en atelier sur site

2.2.1. Organisation des ateliers

Afin de démocratiser l'utilisation de ces nouveaux outils et approches, cette étude vise à organiser un atelier participatif pour les tester en conditions réelles.

Le principe de l'atelier participatif porte sur des essais d'outils menés en autonomie par chacun des partenaires et réalisés sur un site commun.

Le premier bénéfice attendu est la contribution à la démonstration sur site des conditions opérationnelles de mise en œuvre des outils et la contribution à une précision de leurs performances techniques.

Le deuxième bénéfice attendu, induit par la démarche participative sur un site commun, est de contribuer à mettre en évidence les complémentarités apportées par les différents outils testés.

2.2.2. Déploiement des outils lors des ateliers

L'ordre de déploiement des outils sur site a été sélectionné dans la mesure du possible pour aller des modes peu invasifs à des modes plus invasifs (voir annexe 2).

2.2.3. Incertitudes associées à ce type de test

2.2.3.1. Incertitudes associées aux données brutes

2.2.3.1.1. Incertitudes analytiques

Les incertitudes analytiques relatives au dosage des BTEX dans les échantillons d'eau (site 1) sont de 10 à 18% et de 19 à 48 % pour le dosage des COHV dans les échantillons d'eau sur le site 2.

2.2.3.1.2. Incertitudes liées à chaque outil

Les fenêtres d'isolement de l'aquifère sont différentes d'un outil à l'autre. Elles peuvent donc plus ou moins bien capter une couche polluée de taille réduite, ce qui peut engendrer des différences de concentrations.

Pour les échantillonneurs passifs de flux, l'incertitude liée à la mesure du flux de polluants est comprise entre 18 et 36 % pour les BTEX et entre 20 et 41 % pour les COHV analysés.

2.2.3.2. Incertitudes sur les données calculées

Un forage présente en milieu poreux équivalent une porosité de un (1) et une perméabilité quasi infinie. Ceci conduit l'eau de la formation à se concentrer dans le forage pour ensuite se redistribuer dans la formation à l'aval de celui-ci (cf. Figure 26). Le flux mesuré dans le forage est donc supérieur au flux réel.

Pour compenser cela il est possible de calculer un facteur α de correction, ratio entre le flux dans le forage et le flux réel, qui varie souvent entre 1 et 2. Lorsqu'un outil est inséré dans le forage, l'écoulement au sein de celui-ci est modifié.

Ce calcul a été effectué pour le DVT (Essouayed et al., 2019) où il a été montré par simulation que ce facteur était proche de 2 pour une conductivité hydraulique du milieu de 10^{-5} m.s^{-1} et de 1 pour une valeur de 10^{-3} m.s^{-1} . Etant donné les incertitudes sur la conductivité hydraulique du milieu et celle du massif filtrant, cette incertitude conduit à une erreur de l'ordre de 30% sur la valeur finale du flux.

Ce facteur est également pris en compte pour les PFM.

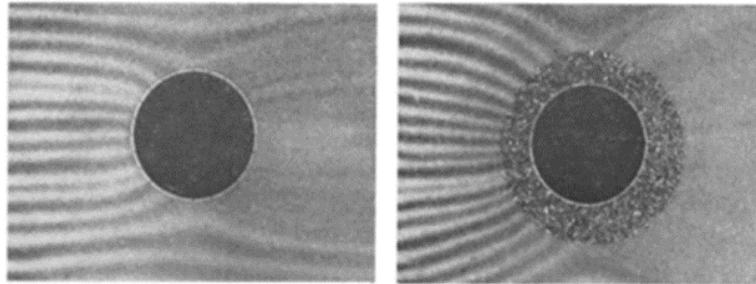


Figure 26 : Illustration de l'effet d'un forage sur l'écoulement en milieu poreux (Drost et al. 1968).

2.2.3.3. Incertitudes sur la position réelle des outils dans le forage

Lors de la mise en place des outils dans les forages, une incertitude de positionnement en Z est à prendre en compte. Cette dernière est estimée à environ 5 cm tous les 10 m.

2.2.3.4. Incertitudes liées à la variabilité naturelle temporelle

Les variations naturelles de concentrations des sites étudiés ne sont pas connues sur des périodes courtes comme lors des tests.

Pour le site 1, les tests se sont étalés sur 3 mois. Les deux campagnes réalisées à 3 mois d'intervalle avec une pompe immergée en milieu de colonne d'eau ont donné des résultats allant de 289 à 464 $\mu\text{g/L}$.

Pour le site 2, les tests se sont étalés sur 5 semaines. Les trois campagnes réalisées en semaine 1, 4 et 5 avec une pompe immergée en milieu de colonne d'eau ont donné des résultats allant de 138 à 160 $\mu\text{g/L}$.

2.2.3.5. Incertitudes liées à la conception des ouvrages

Pour les technologies déployées en forage, le massif filtrant et la constitution de l'ouvrage peuvent perturber la circulation locale des eaux et avoir une influence sur les résultats (renouvellement de l'eau dans l'ouvrage différent du renouvellement naturel au sein de l'aquifère).

De même pour les technologies faisant appel à des obturateurs, les possibilités de by-pass de circulation d'eau via le massif filtrant sont difficiles à évaluer et peuvent impacter les résultats notamment en cas de pompage excédant la capacité productive de la couche adjacente.

3. Résultats des ateliers de comparaison d'outils

3.1. Tests sur le site 1 : pollution par des hydrocarbures

3.1.1. Présentation du site 1

3.1.1.1. Contexte historique et hydrogéologique du site 1

Le site a été exploité depuis les années 1930 pour le stockage et le conditionnement de produits pétroliers. Les activités ont cessé sur site depuis une quinzaine d'années.

Les études antérieures réalisées sur site ont montré les éléments suivants :

- Le site est situé dans un méandre alluvionnaire de rivière, présentant une lithologie hétérogène allant des argiles aux sables graveleux ; des passées argileuses sont mises en évidence au travers du log de forage
- Le niveau piézométrique se situe vers 8 à 10 m de profondeur ;
- La nappe circulant dans ces alluvions s'écoule vers l'est et la rivière mais également vers l'ouest, avec un dôme piézométrique marqué au centre du site ;
- Les relations hydrauliques entre la nappe et la rivière impactent fortement les variations du niveau de la nappe au droit du site ;
- Une phase surnageante au toit de la nappe (LNAPL mobile, i.e. « flottant ») est mesurée sur de nombreux ouvrages implantés sur le site. La présence d'un stock important de LNAPL immobile a été attestée dans la zone de battement de nappe et jusque 12,3 m dans la zone de test ;
- La phase organique est essentiellement composée d'hydrocarbures pétroliers de type essence et gazole.

3.1.1.2. Description du forage utilisé pour le test sur le site 1

Le forage retenu est suffisamment loin de la zone source pour ne pas y détecter de phase pure.

Le forage est crépiné à partir de 8 m (Figure 27).

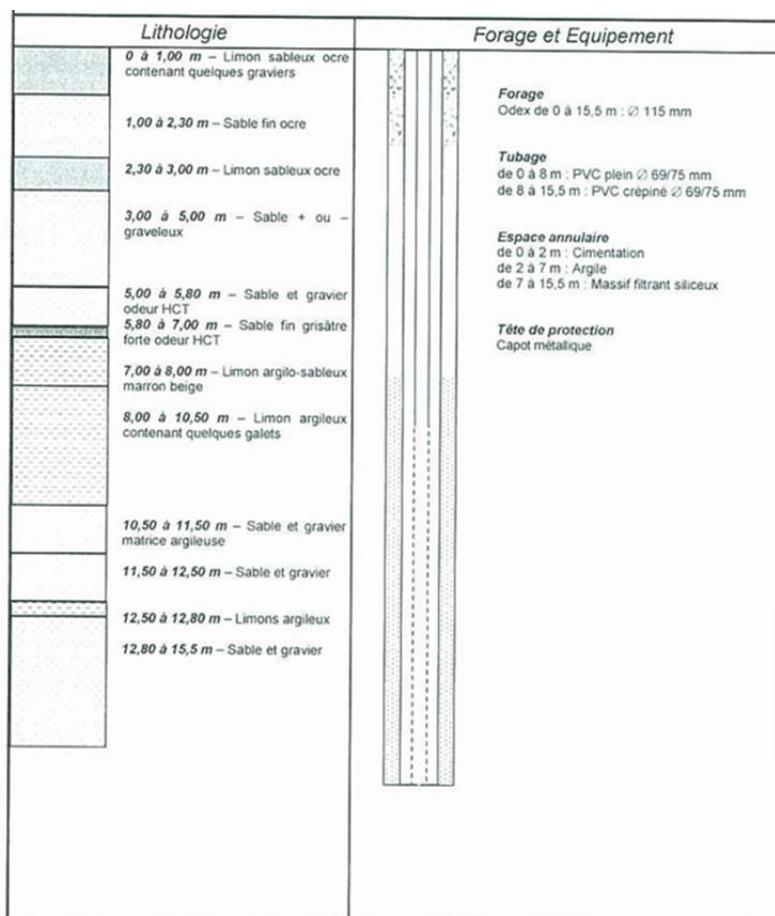


Figure 27 : Coupe du forage retenu sur le site 1

3.1.1.3. Historique des mesures sur le site 1

Les concentrations constatées au niveau du forage, ainsi que les protocoles retenus, sont repris dans le Tableau 4.

Date	Mode de prélèvement	Niveau de la nappe	HCT C10-C40 (mg/L)	BTEX (µg/L)
Oct. 2013	Prélèvement moyen : pompe à 13,5 m/capot Débit : 3L/min Volume de purge : 66 L (22 min)	10,18 m depuis le capot	24	Benzène : 16 Toluène : <1 Ethylbenzène : 8 M et P Xylène : 9 O Xylène : 4

Tableau 4 : Concentrations historiques et protocole pour le forage du site 1 avant le test

Sur le site 1, aucune caractérisation hydrodynamique n'est disponible.

3.1.2. Description des tests sur le site 1

3.1.2.1. Généralités

La période retenue pour le premier test est le début de l'été. En effet sur cette période, le niveau de la rivière est imposé par un seuil et impose la piézométrie sur site qui est donc stable pendant cette période.

Pour ce test de comparaison, les composés analysés sont les BTEX (5 composés) (Tableau 5).

Les composés sont analysés par chromatographie en phase gazeuse selon la norme NF ISO 11423-1 (1997).

Toutes les analyses ont été faites par le même laboratoire.

Composé	LQ (µg/L)	Incertitudes Résultat %
Benzène	0,2	+/- 14
Toluène	0,5	+/- 10
Ethylbenzène	0,5	+/- 13
o-Xylène	0,2	+/- 18
m+p-Xylène	0,5	+/- 13

Tableau 5 : Liste des composés analysés pour le site1, limites de quantification et incertitudes

5 points de mesures ont été retenus, avec un intervalle vertical de 1 m : 11,3 ; 12,3 ; 13,3 ; 14,3 et 15,3 m de profondeur depuis le haut du capot respectivement.

La localisation des points de mesures (en m /repère) par rapport à la coupe lithologique et à la coupe de l'ouvrage est reprise sur la Figure 28 ci-dessous.

L'objectif était de voir l'influence de la couche de limon argileux présente de 12,5 à 12,8 m / sol (12,9 à 13,2 m/repère).

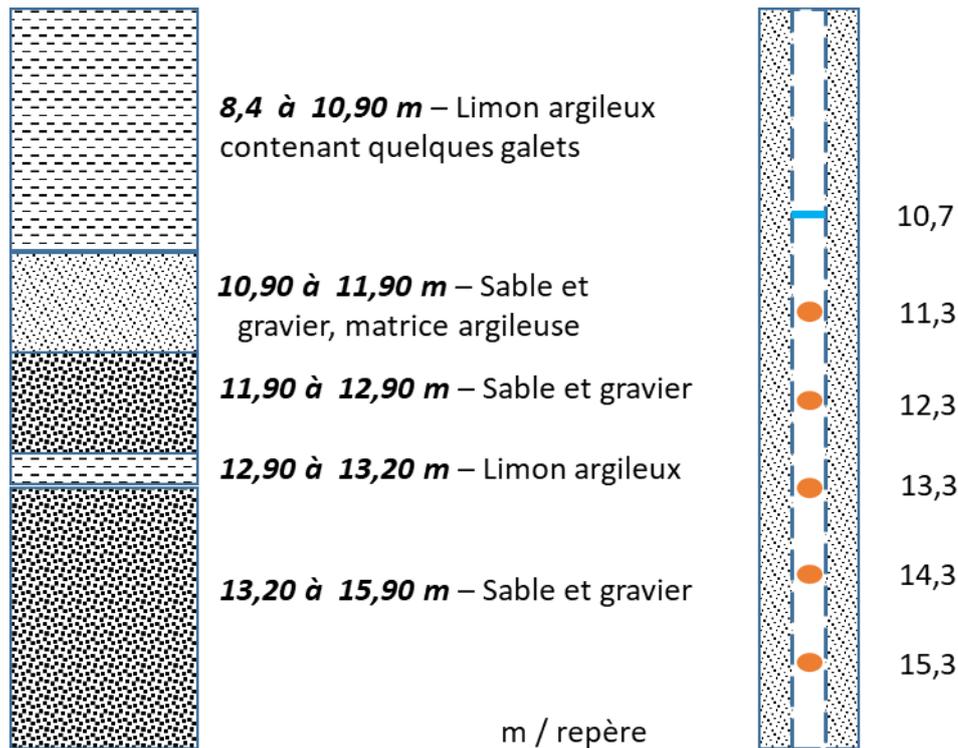


Figure 28 : Points de mesures/prélèvement retenus pour le site 1

3.1.2.2. Hydrodynamique

Les investigations suivantes ont été menées :

- HPT mesures en continu jusqu'à 15 m de profondeur à 1 m du forage ;
- DVT : déployé à 5 profondeurs et pour chaque profondeur, 2 positions de l'outil pour caractériser plusieurs directions d'écoulement ;
- iFLUX : déployé à 5 profondeurs ;
- HPF : mesure le long de la colonne d'eau à plusieurs profondeurs en statique et en pompage.

3.1.2.3. Concentration

Sept modalités de prélèvement ont été testées. Elles sont résumées sur la Figure 29 suivante :

- Un prélèvement classique par pompe immergée :
 - Le prélèvement classique mono-niveau avec une pompe immergée (pompe 12V Monsoon inox) a été effectué à deux reprises dans le temps, à titre de comparaison ;
- Des prélèvements par pompages sélectifs:
 - PeP : prélèvement à 3 hauteurs ;
 - PC : prélèvement à 5 hauteurs, du fait de la pompe positionnée au-dessus de l'obturateur supérieur, le premier prélèvement a été fait à 11,5 m au lieu de 11,3 ;
 - PLM : prélèvement à 3 hauteurs ; du fait de la longueur des obturateurs et de la pompe positionnée au-dessus de l'obturateur supérieur, seuls 3 niveaux ont été pu être réalisés ;
- Des prélèvements passifs (sans pompage) à 5 niveaux :
 - G-MLS ;
 - PsP ;
- Des prélèvements par échantillonneurs passifs intégratifs à cinq niveaux :
 - iFLUX.

Dans tous les cas, la fenêtre de prélèvement a été centrée sur les 5 hauteurs prédéfinies.

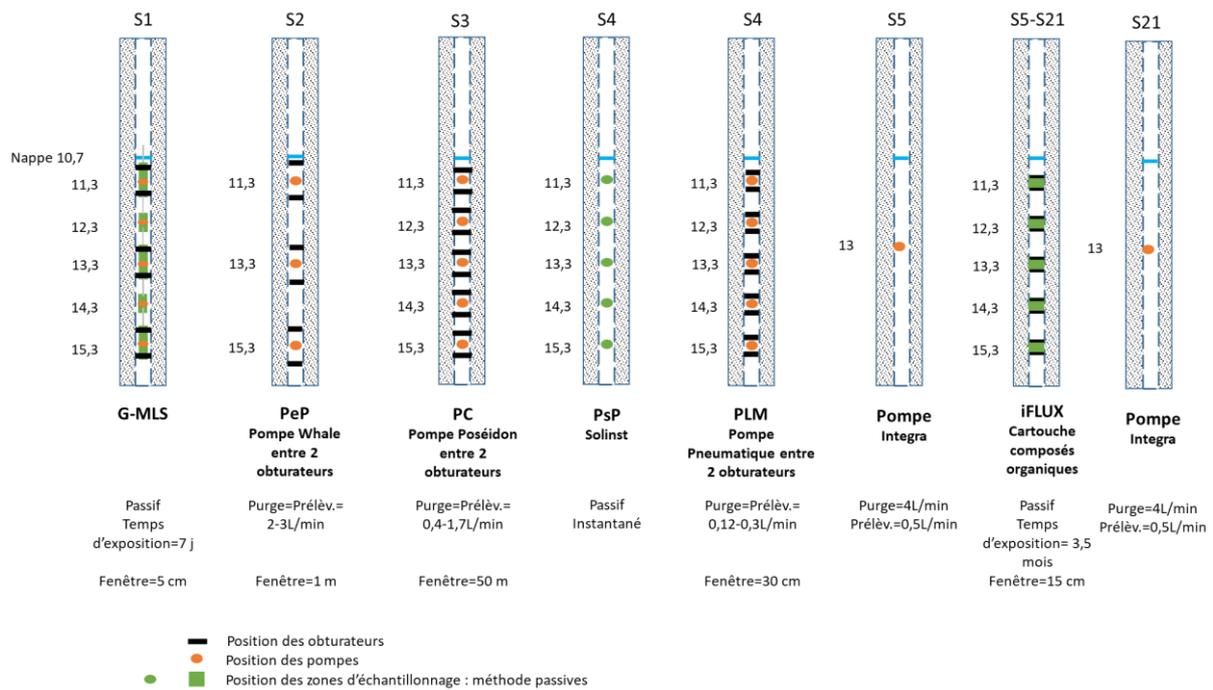


Figure 29 : Modalités de prélèvement - caractérisation chimique du site 1

Le sens d'écoulement est resté constant pendant toute la période de tests.

3.1.3. Résultats et interprétation pour le site 1

3.1.3.1. Hydrodynamique

Mesure de perméabilité

Les résultats HPT montrent une perméabilité estimée à $3 \cdot 10^{-4}$ m/s constante sur la verticale sauf entre 13 et 13,3 m de profondeur, avec une perméabilité estimée à $2 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Les résultats HPT sont cohérents avec la coupe lithologique qui montre un passage limoneux moins perméable de 12,9 à 13,2 m, le reste de la coupe géologique étant constitué d'un matériel sablo-graveleux cohérent avec les perméabilités mesurées.

Mesure des flux verticaux naturels

En statique l'HPF montre que le forage présente des flux verticaux descendants (flux négatifs) dans la partie haute de la colonne d'eau (entre 11,3 et 13,3 m de profondeur) et nuls en partie basse (14,3 m de profondeur). Aucune mesure n'a été faite à des profondeurs plus élevées afin d'éviter d'endommager l'outil en raison de la présence de particules en fond d'ouvrage.

Mesure des flux horizontaux en pompage

En pompage, l'HPF indique une contribution majeure de la couche de sable et gravier située au-dessus de la couche argileuse à 12,3 m de profondeur. En raison de la taille du flowmètre (environ 1 m entre le point de mesure du flux et le haut de l'outil) et de la profondeur de la pompe (11 m), aucune mesure n'a pu être réalisée à des horizons supérieurs (pompe immergée installée au-dessus du flowmètre).

Mesure des flux horizontaux naturels

Les vitesses de Darcy mesurées avec le DVT et les cartouches iFLUX sont du même ordre de grandeur sur les 4 points de mesure inférieurs, autour de 80 cm/j.

Le CB a été utilisé à deux reprises, avant la pose des iFLUX et après leur reprise. Lors des premières mesures, seule une vitesse à 11,3 m est mesurée, tandis que lors de la seconde intervention, des vitesses ont été mesurées à 11,3 m et 14,3 m. A 11,3 m, des vitesses de 44 et 105 m/j ont été mesurées. La vitesse mesurée à 14,3 m est de 47 m/j. Le CB donne des vitesses de circulation de nappe supérieures à 11,3 m qui pourraient expliquer les flux verticaux constatés avec l'HPF en statique. Cependant l'ordre de grandeur des vitesses mesurées par le CB est très nettement supérieur, d'un facteur 50, à celles mesurées par ailleurs. Il est à noter que cette vitesse est celle mesurée dans l'ouvrage, alors que les vitesses données par les échantillonneurs passifs de flux iFLUX et le DVT sont celles correspondant à l'écoulement des eaux souterraines dans la nappe (vitesses mesurées dans l'ouvrage, corrigée d'un facteur prenant en compte la convergence et la divergence des lignes de courant, modifiées autour d'un ouvrage en raison des différences de conductivités hydrauliques entre le massif filtrant,

l'échantillonneur passif de flux et le milieu environnant pour iFLUX et entre le massif filtrant, le tubage et le milieu environnant pour le DVT).

L'écart constaté entre l'outil DVT et iFLUX sur la vitesse de Darcy en surface reste difficilement explicable.

Certains résultats sont repris sur la Figure 30.

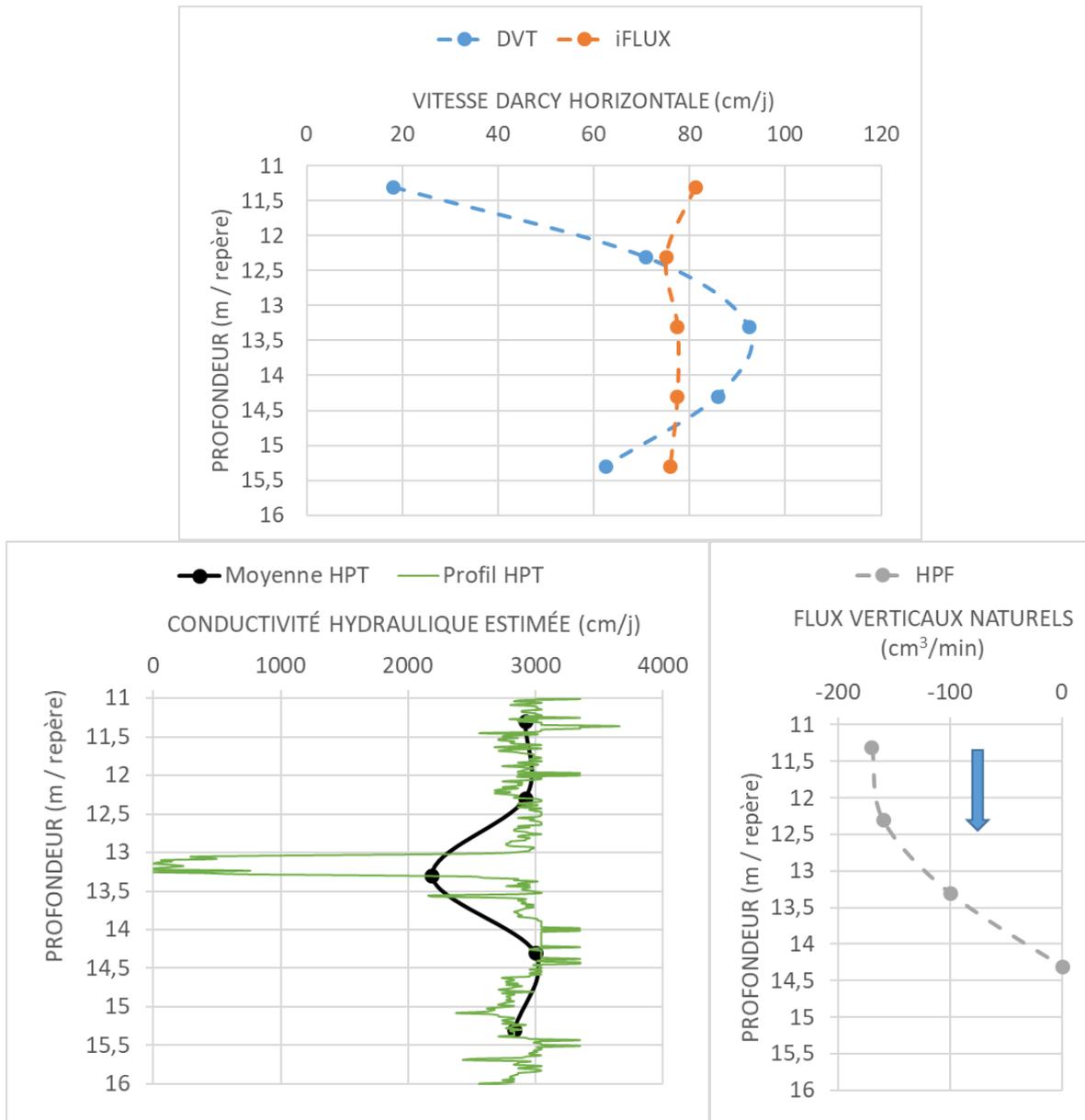


Figure 30 : Comparaison des résultats selon les outils utilisés - caractérisation hydrodynamique du site 1

Les vitesses de Darcy calculées sur la base des perméabilités estimées avec l'HPT et en considérant un gradient hydraulique de 0,01 sont de l'ordre de 20 cm/j et donc globalement plus faibles que celles calculées avec les autres outils (Figure 31).

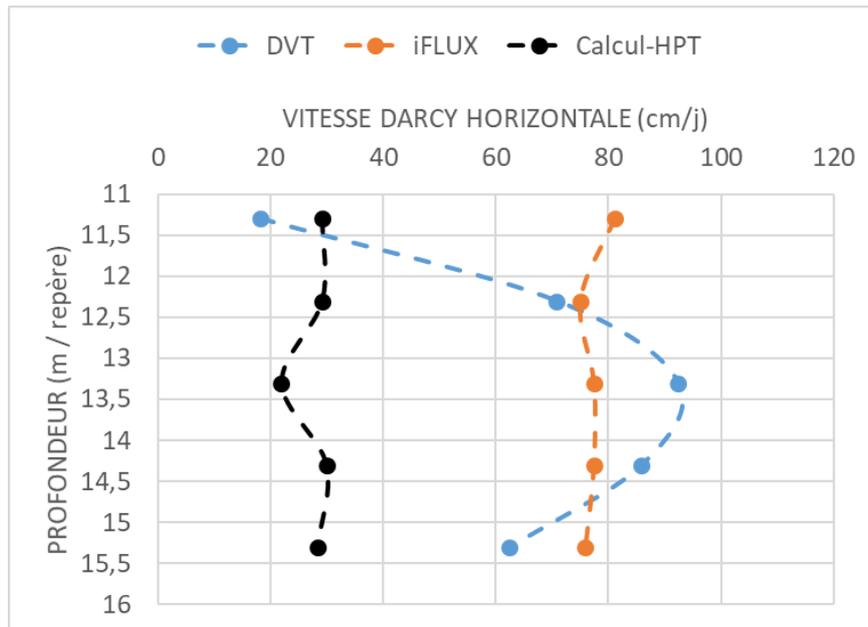


Figure 31 : Comparaison des résultats de vitesse en nappes : mesurées et calculées – site 1

3.1.3.2. Concentration

Comparaison des résultats selon la profondeur

Selon le mode de prélèvement, les résultats sont significativement différents (Figure 32). Les plus fortes concentrations sont observées avec la pompe classique simple niveau sans obturateurs (289 et 464 $\mu\text{g/L}$). Les concentrations les plus faibles sont observées avec le préleveur sous pression PsP (moyenne des concentrations observées de 9,5 $\mu\text{g/L}$).

Le profil de concentration mesuré avec PLM est proche de celui mesuré avec le PsP. Ceci est cohérent avec son caractère très peu invasif sur le milieu (très faible débit de purge et très faibles volumes purgés, Figure 23) : les concentrations mesurées sont représentatives de l'environnement très proche du forage et encore sous influence des circulations verticales. L'eau analysée est une eau plus représentative de l'eau à l'équilibre dans le forage et donc encore sous l'influence des flux descendants.

Le profil obtenu est le même pour le PC et le G-MLS.

Le PeP donne des concentrations de l'ordre de grandeur du G-MLS à 13,3 m de profondeur. Par contre il donne des concentrations beaucoup plus élevées en surface et au fond :

- Au fond, les concentrations plus fortes observées pourraient être liées à une teneur en matières en suspension plus importante ;
- En surface, cela pourrait être lié à une sollicitation de nappe induisant une « dissolution » plus importante du LNAPL résiduel existant en zone saturée jusque 12,7 m/repère du fait du débit de purge utilisé.

Ce dernier phénomène couplé à une contribution plus importante en pompage identifiée avec le HPF de la couche à 12,3 m pourrait expliquer les concentrations beaucoup plus élevées mesurées avec la pompe simple sans obturateur à débit plus élevé (purge à 4L/min et prélèvement à 0,5 L/min).

Plusieurs outils (G-MLS, PC et iFLUX) montrent une concentration plus élevée à 4 m sous le niveau d'eau, ce qui correspond au point de prélèvement sous le niveau argileux observé sur le profil géologique au niveau du forage et mis en évidence par la sonde HPT (Figure 30). Cette plus forte concentration pourrait être liée à une circulation naturelle préférentielle du panache dissous issu du flottant observé en amont. La plus forte concentration observée par le G-MLS peut être liée, soit aux concentrations lors du prélèvement, soit au fait qu'il échantillonne une portion plus petite de la nappe, et favorise donc la mise en évidence de variations verticales plus fines des concentrations.

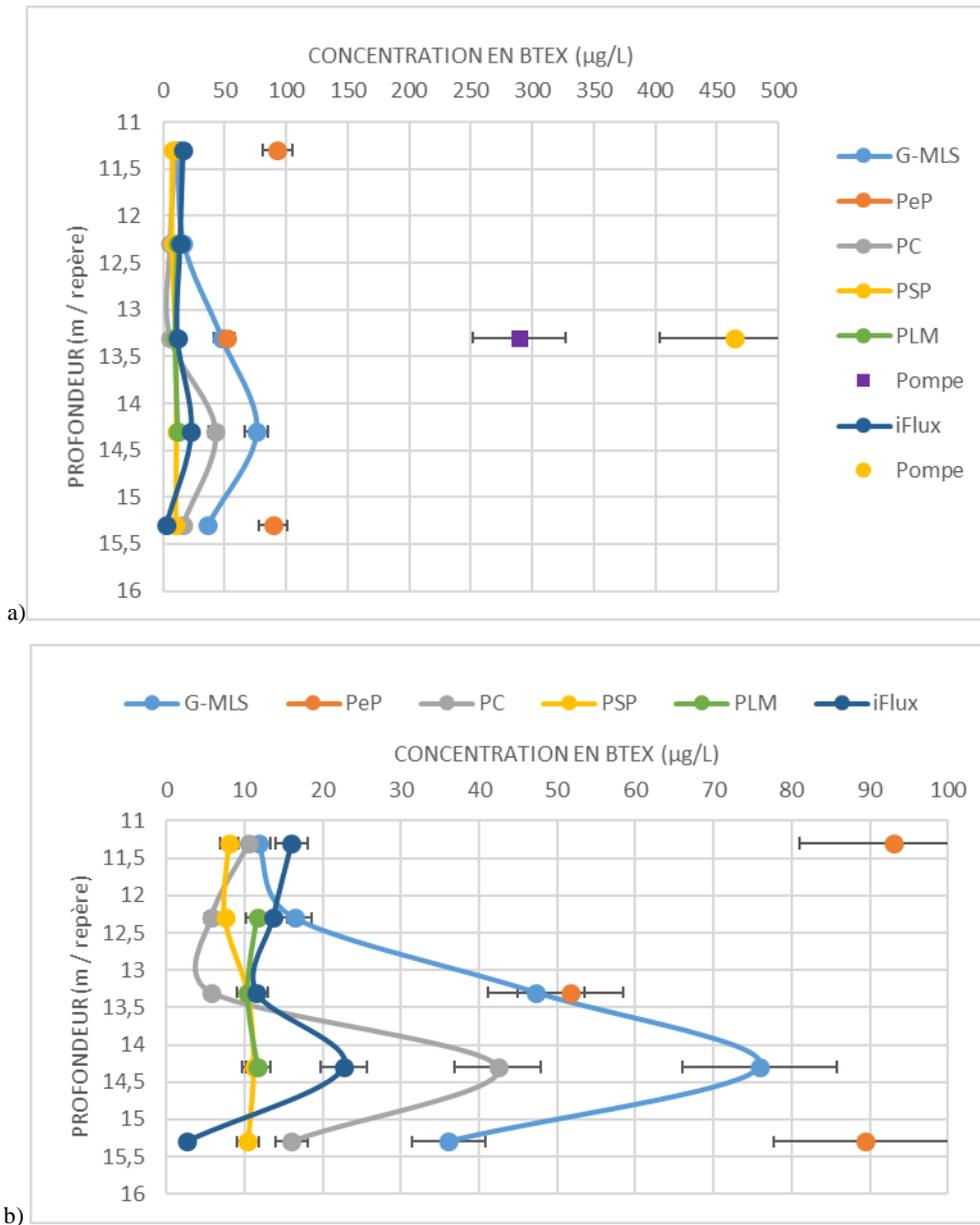


Figure 32 : Comparaison des résultats pour tous les outils utilisés - caractérisation chimique du site 1 (a) toutes concentrations mesurées ; b) concentrations mesurées avec des outils multiniveaux

Les ratios de concentrations, entre les concentrations les plus faibles et les plus fortes mesurées à une même profondeur, sont entre 2 et 51.

Si on considère les outils multiniveaux fonctionnant par pompage, le ratio est réduit de 2 à 9 (Tableau 6).

m NGF	Facteur multiplicatif entre les plus fortes et les plus faibles concentrations mesurées				
	Toutes techniques	Toutes techniques multiniveaux	Outils avec discrétisation verticale	Outils avec discrétisation verticale en pompage	Outils passifs
161,76	12	12	2	9	2
160,76	3	3	3	2	1
159,76	51	9	8	9	5
158,76	7	7	7	4	7
157,76	9	34	14	6	14

Tableau 6 : Ratio entre les plus faibles et les plus fortes concentrations observées avec les outils multiniveaux- caractérisation chimique du site 1

Les débits développés par les différents systèmes ont un ratio entre les débits les plus faibles et les plus forts de 20 et les volumes purgés présentent un ratio de 50.

Comparaison des outils fonctionnant en passif : PsP, G-MLS et iFLUX

La Figure 33 montre l'évolution des concentrations selon la profondeur pour les outils « passifs ».

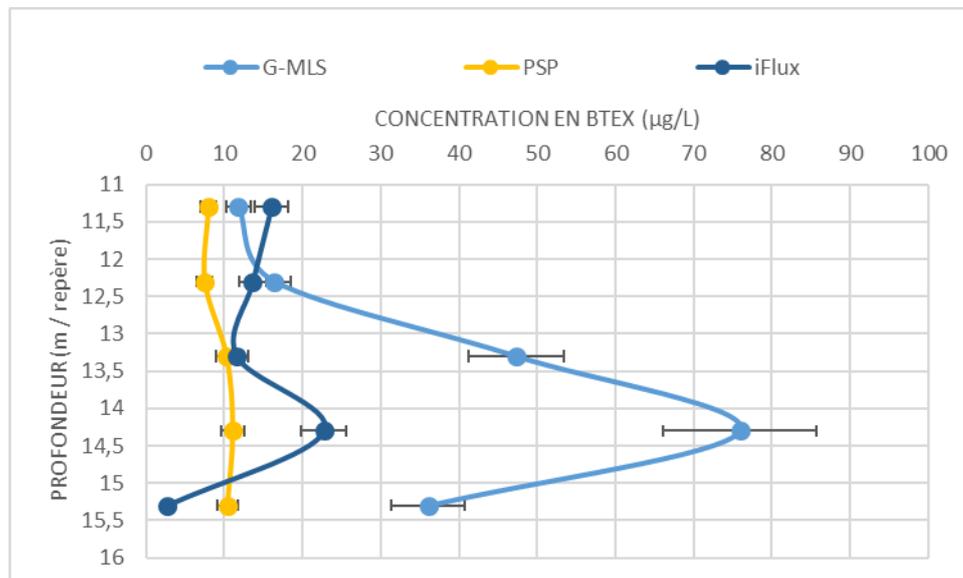


Figure 33 : Comparaison des résultats pour tous les outils fonctionnant en passif – site 1

Les concentrations mesurées avec le PsP sont similaires quelle que soit la profondeur, ce qui s'explique en raison de la présence de flux descendants dans l'ouvrage qui homogénéiseraient les concentrations dans le forage et est cohérent avec les valeurs similaires des paramètres physicochimiques sur toute la colonne d'eau. Ceci indiquerait des concentrations faibles en toit de nappe cohérentes avec les autres mesures réalisées.

Le G-MLS et les cartouches iFLUX montrent des profils avec les mêmes tendances sur la hauteur avec un pic de concentration vers 14,5 m. Ces dispositifs permettent de mettre en évidence l'hétérogénéité verticale car ils isolent différentes portions de la nappe. Les concentrations plus élevées mesurées avec le G-MLS comparativement à celles mesurées avec iFlux pourraient s'expliquer par la différence de fonctionnement des deux outils. Le G-MLS donne accès à l'eau circulant naturellement au moment du retrait (particules comprises) tandis que les cartouches iFLUX fonctionnent sur un principe d'adsorption des polluants dissous sur une résine. Dans le cas de ce test, le G-MLS a été mis à l'équilibre pendant 7 jours tandis que pour les iFLUX le temps d'exposition a été de 3,5 mois.

Comparaisons des outils utilisant un pompage : pompe classique, PC, PeP et PLM.

La Figure 34 montre l'évolution des concentrations selon la profondeur pour les outils « actifs ».

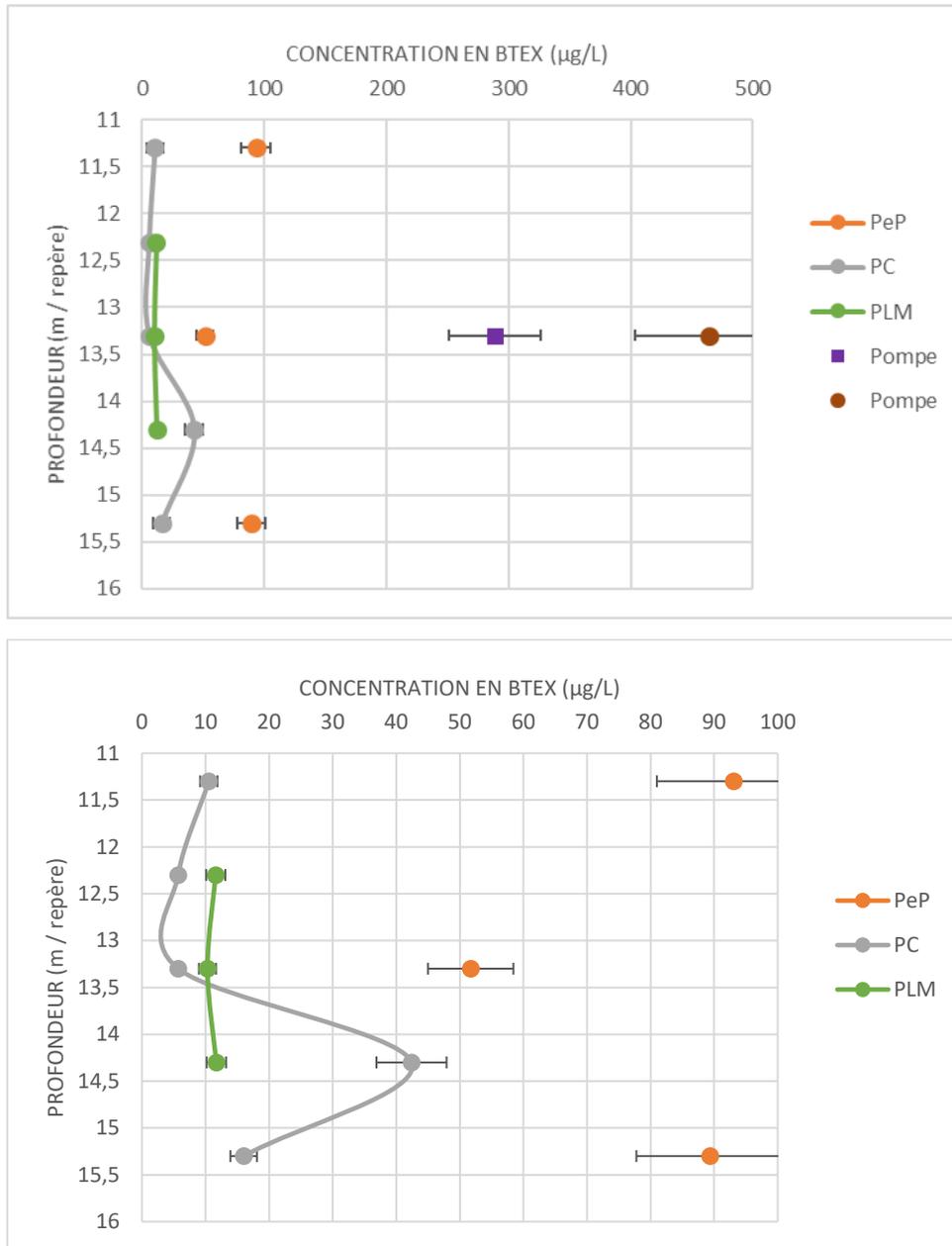


Figure 34 : Comparaison des résultats pour tous les outils fonctionnant avec un pompage – site 1

La Figure 35 montre l'évolution des concentrations selon le volume purgé pour les 3 outils fonctionnant avec un pompage entre obturateurs et pour les pompages « classiques » sans obturateur. Il est constaté que plus le volume purgé est important et plus les concentrations sont élevées. Quand on regarde les concentrations par rapport au ratio des volumes purgés aux volumes morts de colonne d'eau pour chacun des outils, les tendances sont moins claires mais là encore plus le volume purgé est important et plus les concentrations sont élevées.

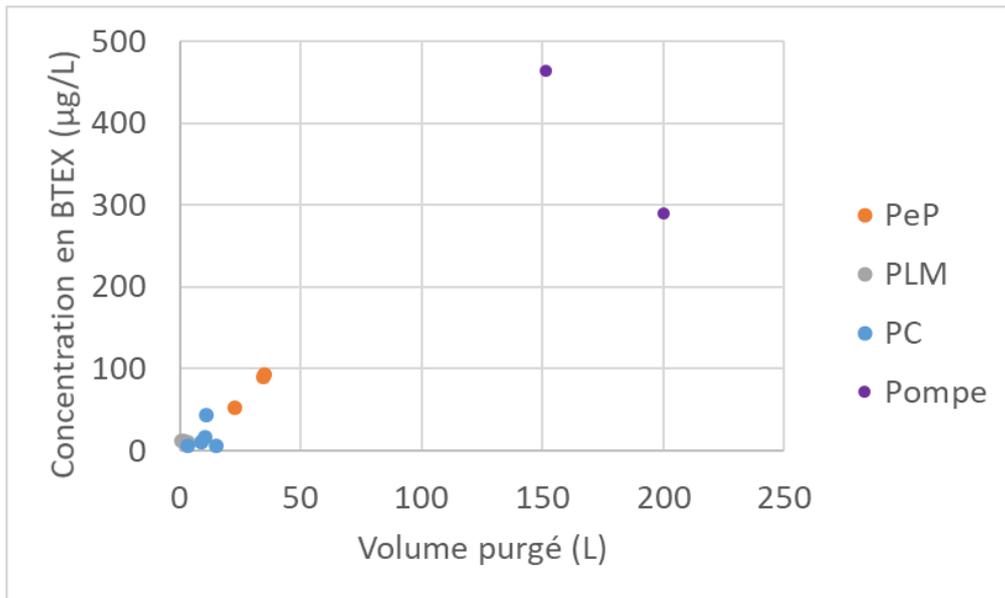


Figure 35 : Comparaison des résultats selon le volume purgé (en haut : pompage entre obturateurs uniquement ; en bas tous pompages) – site 1

La Figure 36 montre l'évolution des concentrations selon les débits de purge utilisés. Plus le débit est élevé et plus les concentrations observées sont importantes.

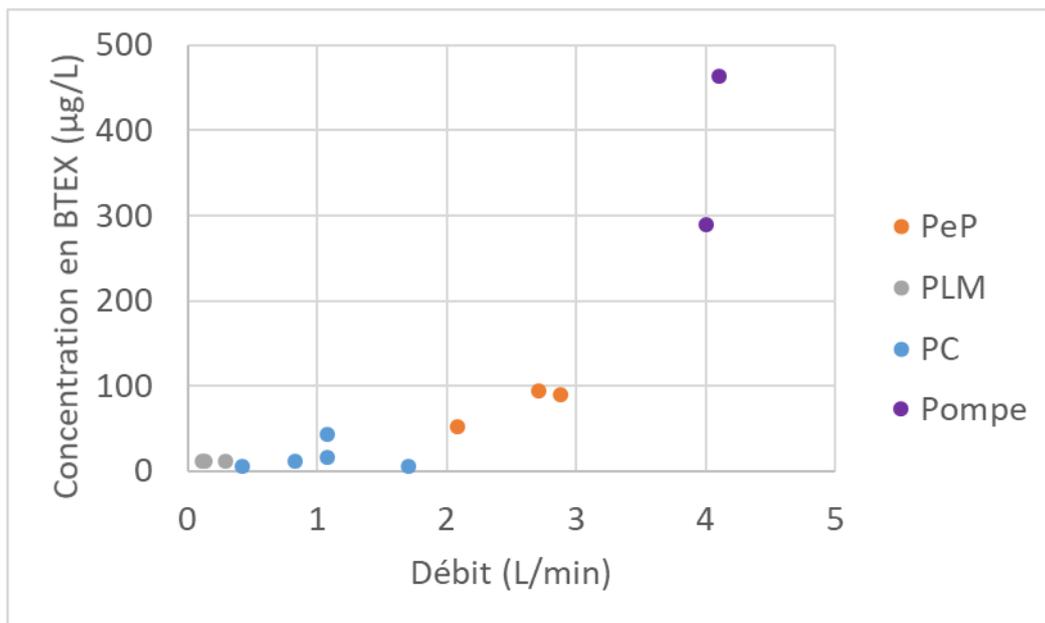
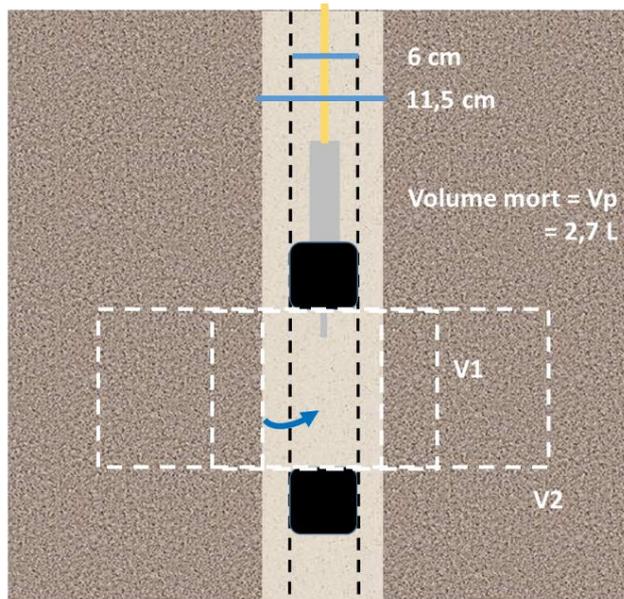


Figure 36 : Comparaison des résultats selon le débit de purge utilisé – site 1

Phénomènes pouvant expliquer les résultats avec les méthodes actives par pompage.

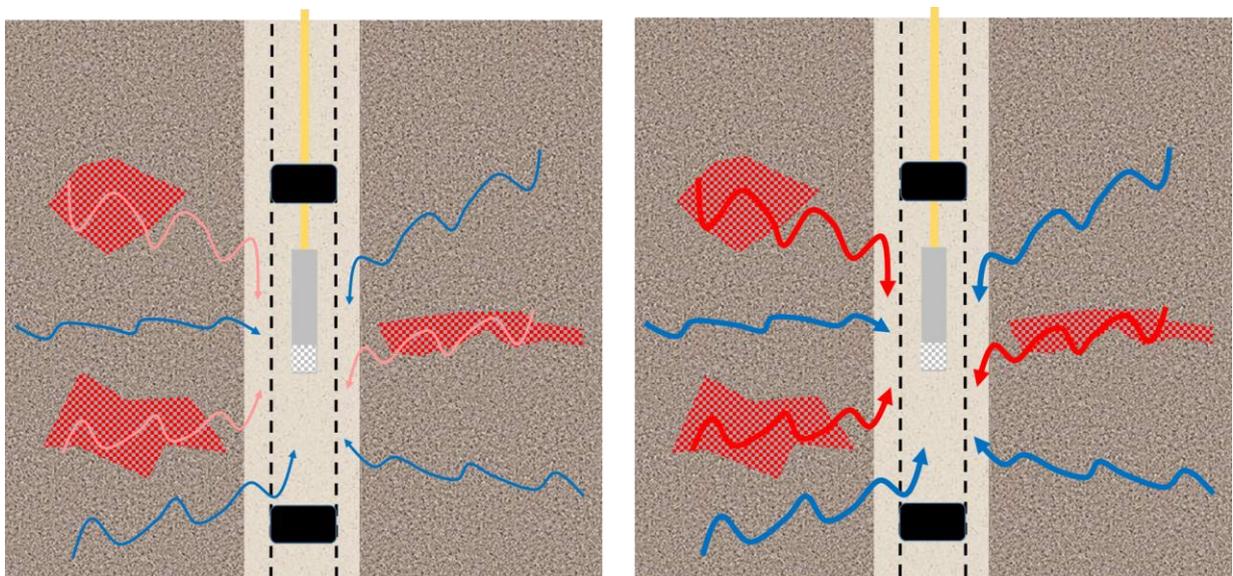
Plus le volume purgé est important, plus le rayon d'influence du pompage est important. L'eau échantillonnée provient donc dans chaque cas d'une portion de l'aquifère différente (Figure 37).



Pour le PC : fenêtre de 50 cm.
 1,41 L dans colonne forage **V1= à 10 cm = 1,4 Vp**
 1,27L dans le massif filtrant **V2= à 20 cm = 7,5 Vp**
 (porosité 0,35)
 Alluvion porosité 0,35

Figure 37 : Représentativité de l'échantillon analysé en fonction du volume purgé

Plus le débit de pompage est important, plus la vitesse de pores à proximité et dans l'ouvrage immédiate de l'ouvrage est importante et peut favoriser la solubilisation et ou une mise en émulsion (Figure 38).



Débit de purge
faible
 = circulation
 naturelle



Zone avec phase pure
 résiduelle

Débit de purge
élevé =>
 circulation
 naturelle

Figure 38 : Influence du débit sur la mobilisation du polluant sous forme de NAPL

Limites des essais réalisés

La campagne sur le site 1 a coïncidé avec des très fortes températures de l'air sur site (> 35°C). Le seuil de température des échantillons à réception au laboratoire (5°C +/- 3) n'a pas toujours pu être respecté. Il est possible que pour certains outils les concentrations analysées soient donc minorées (PLM, PsP, PC).

3.1.3.3. Flux massique de polluants

Les résultats montrent que les flux de BTEX vont grossièrement du simple au double selon les couplages d'outils utilisés (Figure 39).

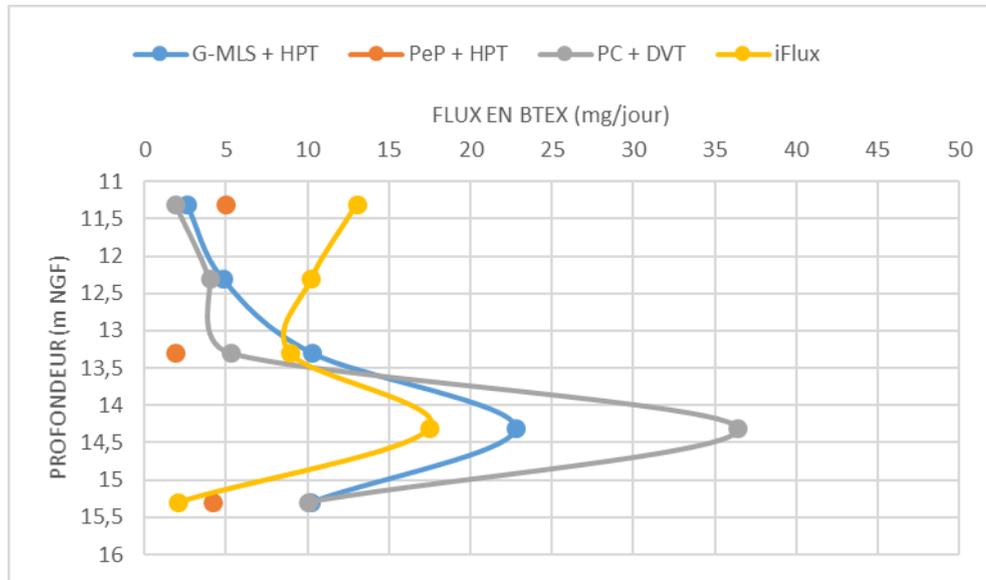


Figure 39 : Comparaison des résultats selon les outils utilisés - caractérisation du flux du site 1

3.1.3.4. Gain de connaissance

Sur la base des résultats obtenus, le transport des eaux souterraines pourrait être contraint par la présence de passées argileuses, entraînant un mouvement convectif descendant. Cette configuration pourrait expliquer l'évolution du panache de pollution dissoute constatée sur site en aval des zones sources, avec des concentrations plus importantes en profondeur qu'en surface de nappe.

3.2. Tests sur le site 2 : pollution par des COHV

3.2.1. Présentation du site 2

3.2.1.1. Contexte historique et géologique du site 2

Le site industriel est toujours en exploitation.

Les études antérieures réalisées sur site ont montré les éléments suivants :

- Le site est situé au droit d'alluvions grossières (galets et graviers) avec une matrice tantôt sableuse, tantôt sablo-limoneuse. Cet aquifère présente une épaisseur d'environ 80 m ;
- Le niveau piézométrique se situe vers 11 à 12 m de profondeur ;
- La nappe circulant dans ces alluvions s'écoule vers le Nord-Est ;
- La principale pollution rencontrée sur site est une pollution aux COHV.

La zone source située en amont hydraulique de l'ouvrage utilisé a fait l'objet d'un pilote de dépollution, 3 ans avant cet atelier.

3.2.1.2. Description du forage utilisé pour le test sur le site 2

Le forage utilisé est crépiné à partir de 7 m/sol et profond de 15 m/sol ou 15,66 m/repère (Figure 40).

Le forage retenu est suffisamment loin de la zone source pour ne pas y détecter de polluant sous forme de NAPL.

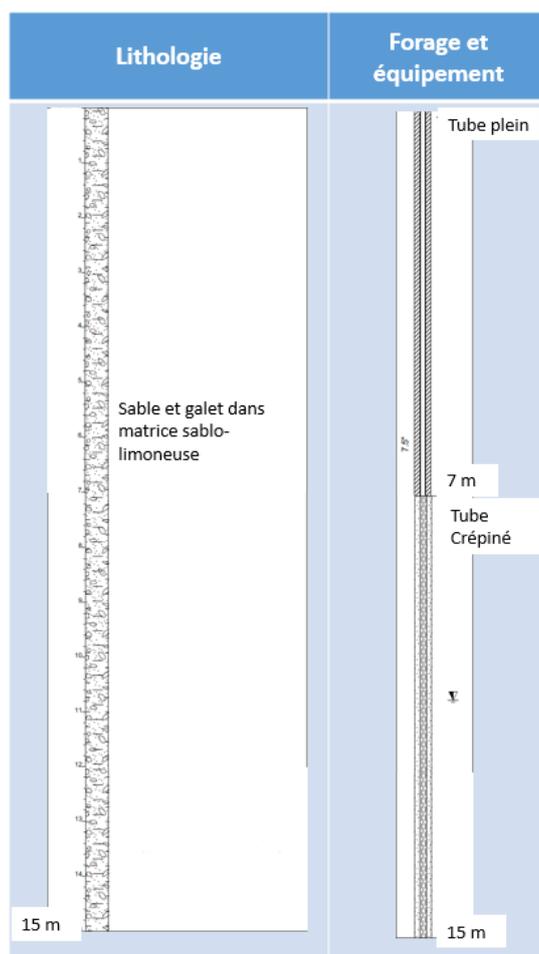


Figure 40 : Coupe du forage retenu sur le site 2

3.2.1.3. Historique des mesures sur le site 2

Les concentrations constatées au niveau du forage sont reprises dans le Tableau 7.

Suite au traitement mis en place sur site, les concentrations sont à la baisse par rapport à celles observées sur la période 2014-2016. En 2021, une variation interannuelle importante est observée.

Période	COHV
Janv. 2021 - Janv. 2022	100 – 3 800 µg/L somme de 16 COHV
Juni 2014 - Mars 2016	500 – 8 800 µg/L somme de 13 COHV

Tableau 7 : Concentrations en COHV observées dans l'ouvrage sélectionné du site 2 avant le test

Des vitesses en nappe ont été mesurées par traçage sur ce site et donnent des vitesses de Darcy entre 1,6 et 11,5 m/j.

3.2.2. Description des tests sur le site 2

3.2.2.1. Généralités

La période retenue pour le premier test est la fin d'été/début d'automne.

Pour ce test de comparaison, les composés analysés sont les COHV (15 composés) (

Composé	LQ (µg/L)	Incert. Résultat %
<i>Chlorure de vinyle</i>	0,5	+/- 44
<i>Dichlorométhane</i>	0,5	+/- 27
<i>cis-1,2-Dichloroéthylène</i>	0,5	+/- 24
<i>trans-1,2-Dichloroéthylène</i>	0,5	+/- 23
<i>Trichlorométhane</i>	0,5	+/- 28
<i>1,1,1-Trichloroéthane</i>	0,5	+/-20
<i>Tétrachlorométhane</i>	0,5	+/-21
<i>Trichloroéthylène</i>	0,5	+/-33
<i>Tétrachloroéthylène</i>	0,5	+/-26
<i>1,1-Dichloroéthane</i>	0,5	+/-19
<i>1,2-Dichloroéthane</i>	0,5	+/-32
<i>1,1-Dichloroéthylène</i>	0,5	+/-26
<i>1,2-Dichloropropane</i>	0,5	+/-48
<i>1,1,2-Trichloroéthane</i>	0,5	+/-25
<i>Hexachloro-1,3-butadiène</i>	0,5	+/-21
<i>Hexachloroéthane</i>	0,5	+/-25

Tableau 8).

Les composés sont analysés par chromatographie en phase gazeuse selon la norme NF EN ISO 10301 (1997).

Toutes les analyses ont été faites par le même laboratoire.

Composé	LQ (µg/L)	Incert. Résultat %
<i>Chlorure de vinyle</i>	0,5	+/- 44
<i>Dichlorométhane</i>	0,5	+/- 27
<i>cis-1,2-Dichloroéthylène</i>	0,5	+/- 24
<i>trans-1,2-Dichloroéthylène</i>	0,5	+/- 23
<i>Trichlorométhane</i>	0,5	+/- 28
<i>1,1,1-Trichloroéthane</i>	0,5	+/-20
<i>Tétrachlorométhane</i>	0,5	+/-21
<i>Trichloroéthylène</i>	0,5	+/-33
<i>Tétrachloroéthylène</i>	0,5	+/-26
<i>1,1-Dichloroéthane</i>	0,5	+/-19
<i>1,2-Dichloroéthane</i>	0,5	+/-32
<i>1,1-Dichloroéthylène</i>	0,5	+/-26
<i>1,2-Dichloropropane</i>	0,5	+/-48
<i>1,1,2-Trichloroéthane</i>	0,5	+/-25
<i>Hexachloro-1,3-butadiène</i>	0,5	+/-21
<i>Hexachloroéthane</i>	0,5	+/-25

Tableau 8 : Liste des composés analysés pour le site 2, limites de quantification et incertitudes

3 à 4 points de mesures ont été retenus selon les outils, entre 13 m et 15,4 m de profondeur depuis le haut du capot.

La coupe lithologique semblant être homogène, les points ont été répartis verticalement en tenant compte des contraintes des outils.

3.2.2.2. Hydrodynamique

Les investigations suivantes ont été menées :

- DVT : déployé à 2 profondeurs (13,5 et 14,5 m) ;
- iFLUX : déployé à 4 profondeurs (13,4 ; 13,85 ; 14,5 et 14,9 m) ;
- HPF : mesures le long de la colonne d'eau à 5 profondeurs en statique (13 ; 14 ; 14,2 ; 15 et 15,2 m) et à 3 profondeurs en pompage (14 ; 14,5 et 15 m).

3.2.2.3. Concentration

Sept modalités de prélèvement ont été testées et sont résumées sur la Figure 41 suivante :

- Des prélèvements classiques par pompe immergée :
 - Trois types de pompe immergée (Poséidon, MP1 (Grundfos), Whale) ont été utilisées à trois dates différentes ;
- Des prélèvements par pompages sélectifs :
 - PeP : prélèvements à 2 hauteurs (13 et 15,2 m) ;
 - PC : prélèvements à 4 hauteurs (13 ; 13,9 ; 14,9 et 15,4 m),
- Des prélèvements passifs :
 - G-MLS : prélèvements à 3 hauteurs (12,8 ; 13,8 et 14,8 m) ;
- Des prélèvements par échantillonneurs passifs intégratifs :
 - iFLUX : prélèvements à 4 hauteurs (13,6 ; 14,0 ; 14,65 et 15,0 m).

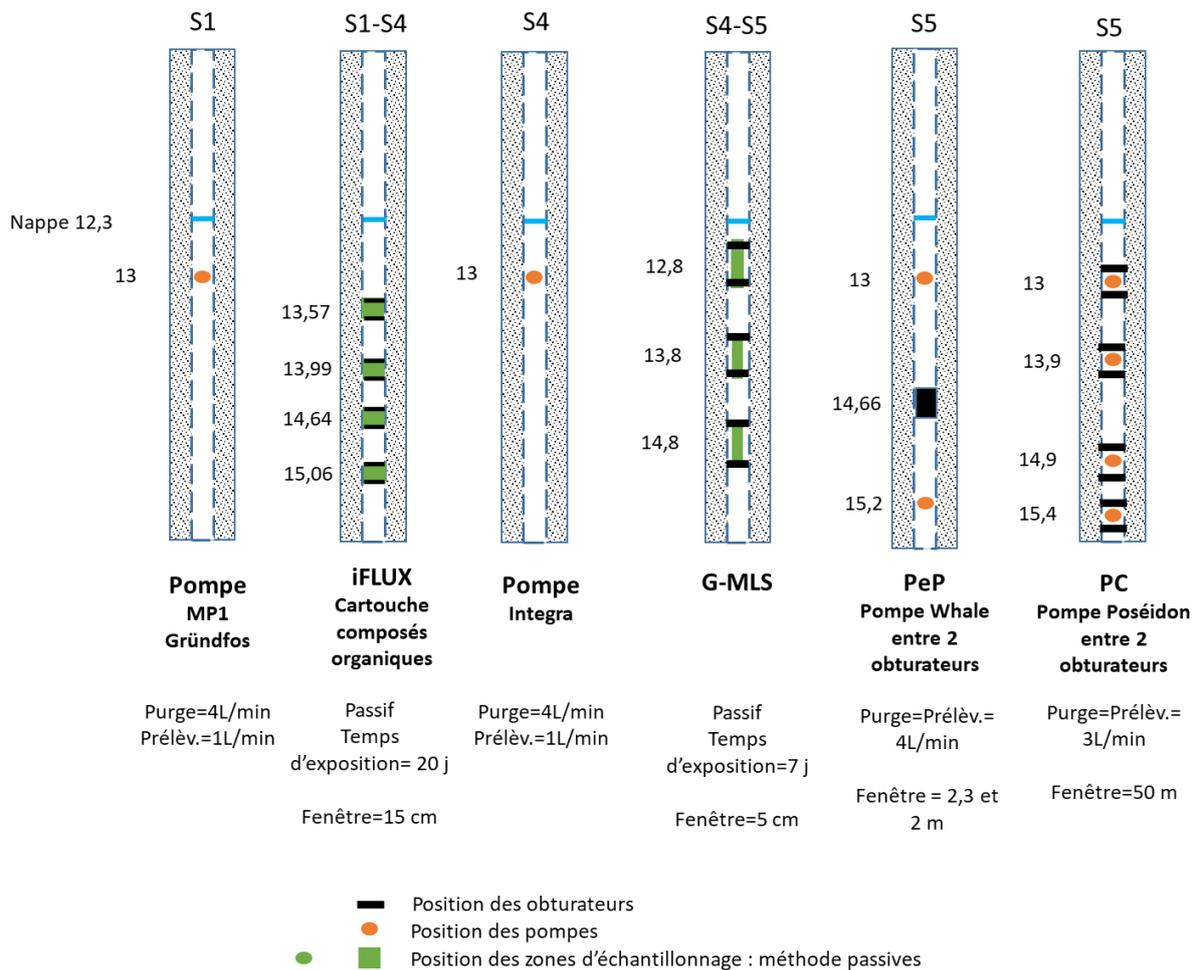


Figure 41 : Modalités de prélèvement - caractérisation chimique du site 2

Le sens d'écoulement est resté constant pendant toute la période de tests.

3.2.3. Résultats et Interprétation pour le site 2

3.2.3.1. Hydrodynamique

Mesure des flux verticaux naturels

L'outil HPF a été descendu dans l'ouvrage et une mesure a été faite à des profondeurs données lorsque l'outil était statique, sans aucune perturbation extérieure, afin de caractériser le sens des éventuels flux verticaux naturels (ascendants ou

descendants). En fond de piézomètre, une mesure de flux a été réalisée et donne le « blanc », à soustraire aux valeurs mesurées. Ces mesures ont montré l'absence de flux verticaux naturels dans l'ouvrage.

Mesure des flux horizontaux naturels

L'outil DVT n'a pas donné de résultat, le traceur ne se déplaçant pas quelle que soit la profondeur testée. Il semble que ce soit en raison des vitesses élevées dans le milieu (cf. vitesse par iFlux de plusieurs m/j) qui conduisent les écoulements à passer autour de l'outil en raison de la perte de charge associée à celui-ci. Des améliorations sont prévues pour remédier à ce défaut.

L'outil iFlux donne des vitesses homogènes aux 3 premiers niveaux investigués (entre 2,4 et 2,1 m/j) et plus faibles en fond d'ouvrage (0,56 m/j).

Mesure des flux horizontaux en pompage

En raison de la taille du flowmètre (environ 1 m entre le point de mesure du flux et le haut de l'outil) et de la profondeur de la pompe (13 m), aucune mesure n'a pu être réalisée entre 13 et 14 m de profondeur. De même, le fond de l'ouvrage ayant été mesuré à 15,62 m de profondeur et la distance entre le point de mesure du flux et le bas de l'outil étant d'environ 20 cm, la mesure la plus profonde a été réalisée à 15 m afin de ne pas dégrader l'outil en raison de la présence possible de particules en fond d'ouvrage. De ce fait, seules des mesures entre 14 et 15 m ont pu être effectuées.

Les mesures HPF en pompage montrent que l'horizon qui contribue le plus en pompage (donc lors du prélèvement d'un échantillon à l'aide d'une pompe immergée) se situe à 14,5 m de profondeur. La contribution des horizons supérieurs (14 m) et inférieurs (15 m) est moindre.

Les résultats sont repris sur la Figure 42.

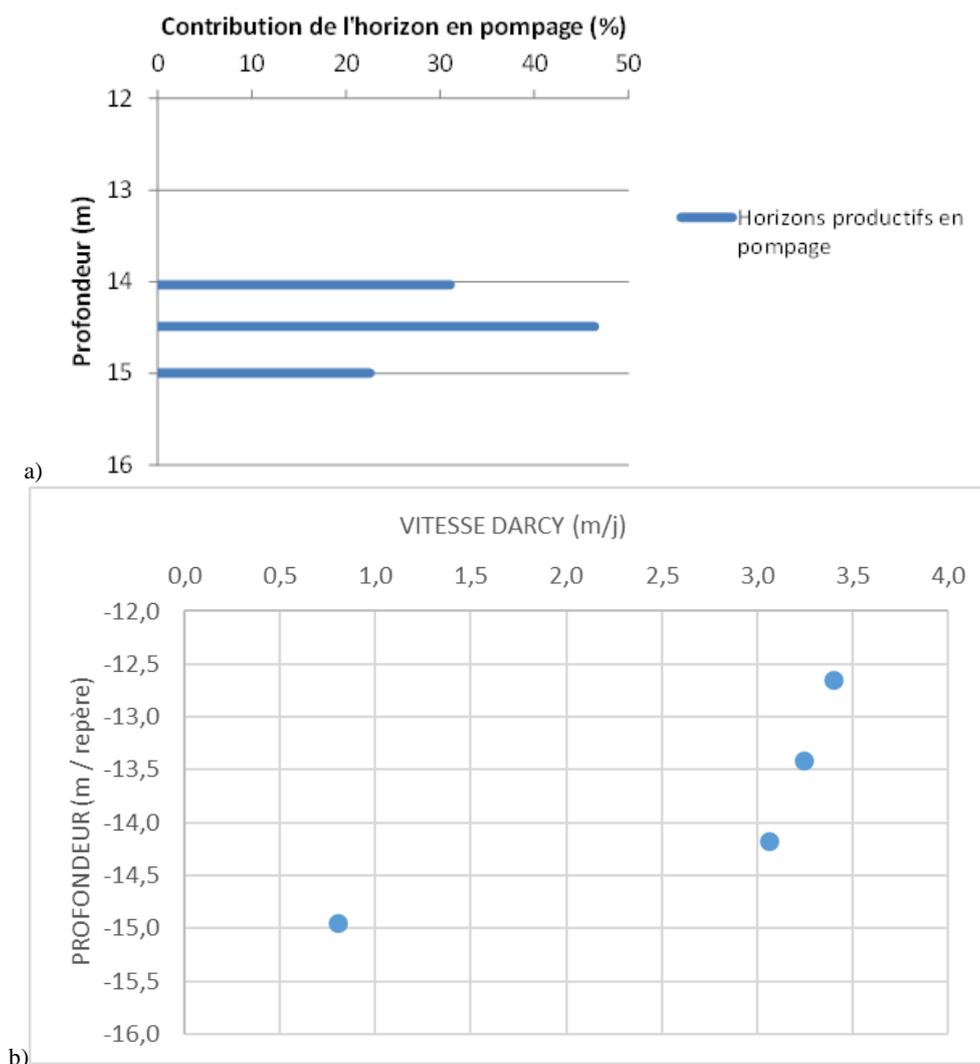


Figure 42 : Résultats selon les outils utilisés - caractérisation hydrodynamique du site 2 -a) Horizon contributif en pompage avec l'outil HPF et b) Vitesse de Darcy horizontale naturelle avec l'outil iFlux

Interprétation

Les vitesses d'écoulement des eaux souterraines sont relativement élevées au droit de cet ouvrage, ce qui était attendu au regard de la lithologie locale (horizon grossier majoritairement composé de galets, graviers et sable).

Par contre, la coupe lithologique homogène ne permet pas d'expliquer :

- les variations verticales de vitesses horizontales de Darcy mesurées avec les iFLUX
- les variations de productivité mises en évidence par le HPF.

D'autres coupes lithologiques sur le même site présentent des variations verticales de faciès. Il est possible que la description lithologique reportée sur la coupe de l'ouvrage ne soit pas assez détaillée. Cette situation met en évidence l'apport d'outils tels que le HPF et les échantillonneurs iFLUX pour une caractérisation hydrodynamique locale fine en l'absence de coupes de sondage suffisamment précises.

3.2.3.2. Concentrations

Résultats

Les concentrations totales en COHV correspondent à la somme de 15 composés (cf. Tableau 8)

Selon le mode de prélèvement, les résultats sont significativement différents (Figure 43).

Les plus fortes concentrations sont observées avec le PC (450 et 400 µg/L) en profondeur. Les concentrations les plus faibles sont observées avec le G-MLS et les iFLUX.

Pour le G-MLS, on constate un ratio maximum de 2,5 entre les concentrations maximales et minimales en COHV totaux selon les profondeurs investiguées, avec des valeurs proches à 12,8 et 13,8 m et plus faibles à 14,8 m.

Les concentrations données par les iFLUX sont homogènes aux trois premiers niveaux investigués et sont supérieures à celle mesurée au niveau le plus profond.

Les concentrations observées via le G-MLS ou les iFLUX sont du même ordre de grandeur (moyenne des concentrations observées de 58,7 et 40,1 µg/L respectivement).

Pour la pompe entre packers (PeP), un ratio de 3,7 entre les 2 échantillons est observé.

Pour le PC les concentrations sont plus fortes en fond d'ouvrage (400 et 450 µg/L respectivement à 14,9 et 15,4 µg/L) qu'en surface (141 µg/L à 12,9 m) et 10 fois plus importantes qu'à 13,9 m (42 µg/L). Les concentrations à 15,4 m ne sont pas significatives car le pompage s'est effectué en fond de puits et les eaux doivent donc contenir des particules.

La concentration observée en pompage (PeP) à 13 m est de 150 µg/L en COHV totaux, contre 76 µg/L pour celle mesurée avec le G-MLS situé presque à la même profondeur (12,8 m vs 13,0 m).

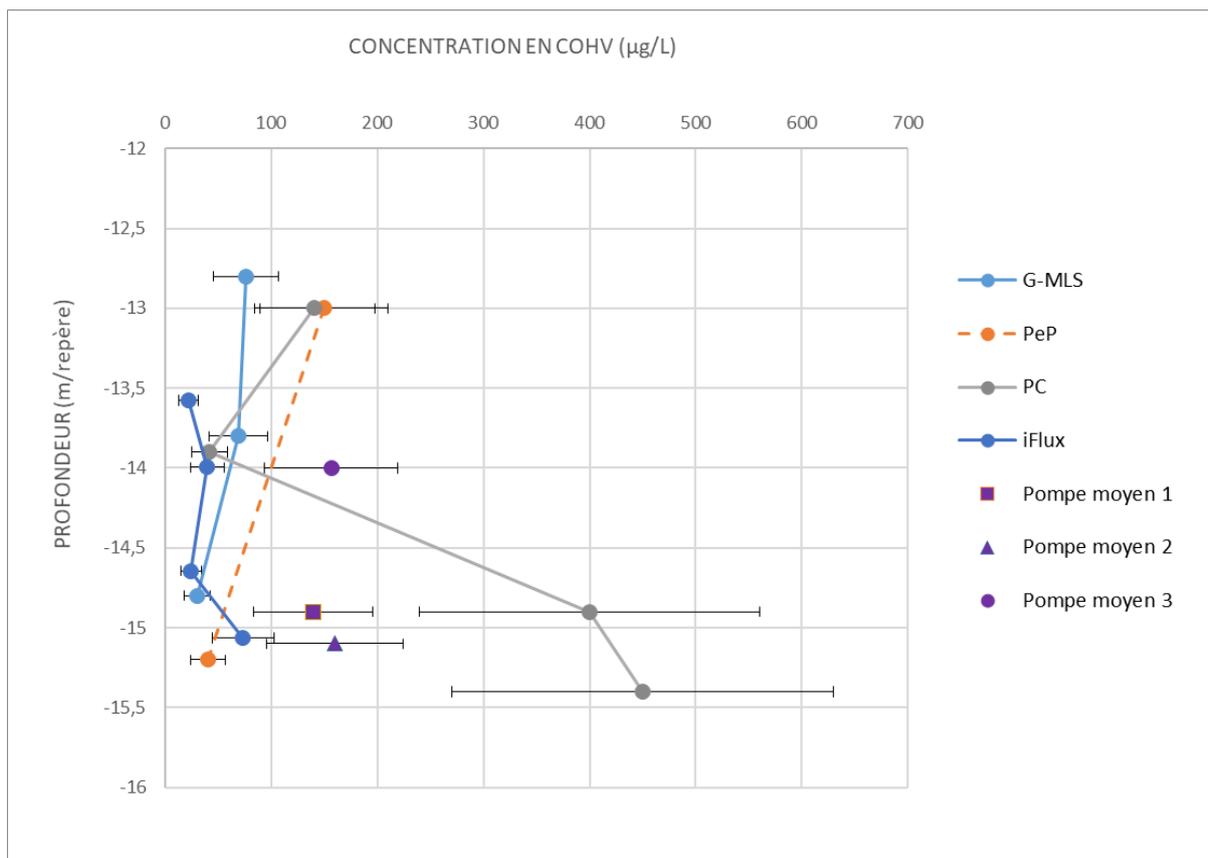


Figure 43 : Comparaison des résultats pour tous les outils utilisés - caractérisation chimique du site 2

Les ratios de concentrations, entre les concentrations les plus faibles et les plus fortes mesurées à une même profondeur sont entre 1 et 16 (Tableau 9).

Profondeur (m)	Facteur multiplicatif entre les plus fortes et les plus faibles concentrations mesurées		
	Toutes techniques	Toutes techniques multiniveaux	Outils passifs
12,8-13	1,9	2,0	
13,8-14	1,7	1,6	1,7
14,8-14,9	16,3	16,3	2,4
15,2-15,4	10,9	-	-

Tableau 9 : Ratio entre les plus faibles et les plus fortes concentrations observées avec les outils multiniveaux- caractérisation chimique du site 2

Pour les méthodes avec pompage, les débits de purge utilisés pour les différents systèmes ont un ratio de débits faible (1,3). Les volumes purgés présentent un ratio de 5,3 entre les volumes purgés les plus importants et les plus faibles.

Interprétation

Les trois pompes « classiques » (pompe sans obturateur) donnent des résultats très similaires, semblant indiquer une stabilité des concentrations de la nappe au cours de l'exercice d'intercomparaison.

Les concentrations observées avec les méthodes passives sont plus faibles et plus homogènes sur la hauteur que celles observées avec les méthodes ayant recouru à un pompage.

Une première explication pourrait être que les méthodes actives (avec pompage) en sollicitant le milieu changent les équilibres et favorisent le passage en phase aqueuse de composés et/ou favorisent la remobilisation de NAPL (Cf. Figure 38). Les concentrations différentes obtenues avec le PC et la PeP pourraient s'expliquer par la mobilisation d'horizons différents. En effet chaque outil intercepte une longueur crépiné différente.

Les épaisseur d'horizon intercepté sont différents selon les outils utilisés pour les méthodes par pompage qui peuvent expliquer les variations observées.

Malheureusement du fait de la configuration des outils, il n'a pas été possible de caractériser la contribution des horizons les moins profonds en pompage. Il n'est donc pas possible d'évaluer la concentration moyenne sur la base des variations verticales de concentrations et de productivité d'eau.

Néanmoins, si on considère les flux d'eau déterminés avec les iFLUX (Figure 42-b qui montrent que les flux d'eau sont similaires entre 12 et 14,5 m et ceux à 14,9 m qui peuvent être estimés à environ la moitié de ceux des horizons supérieurs) et les concentrations obtenues sur la verticale avec le PC (Figure 43), une estimation de la concentration moyenne en pondérant par les valeurs de flux peut être estimée. Cela donne une concentration estimée de 150 µg/L, qui correspond bien aux concentrations moyennes observées par pompage « classique ».

3.2.3.3. Flux massique de polluants

Les résultats avec les iFLUX montrent que les flux de COHV présentent un ratio de 16 selon les profondeurs investiguées (Figure 44).

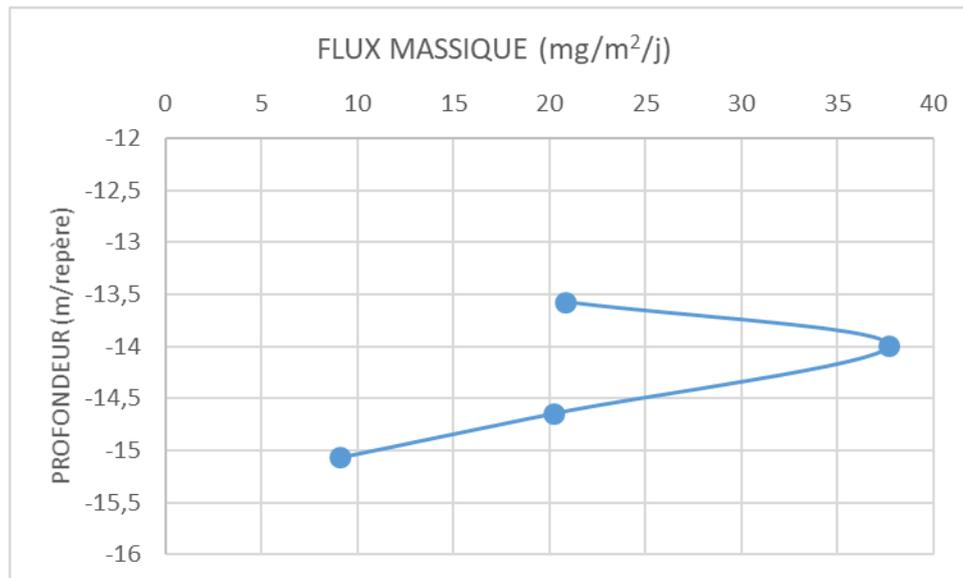


Figure 44 : Caractérisation du flux massique du site 2

3.2.3.4. Gain de connaissance

Sur la base des résultats obtenus avec les différents outils multiniveaux déployés, les hypothèses suivantes peuvent être émises quant au fonctionnement du forage du site 2 (Figure 45) :

- La présence d'une zone plus productive associée à une plus forte granulométrie locale (vers 14,5 m) ;
- Une pollution dissoute en nappe relativement « homogène » en écoulement naturel captée par les méthodes passives (Figure 45 à gauche) ;
- Une pollution mobilisée lors des pompages entre obturateurs en fond d'ouvrage qui contribue à des concentrations plus fortes (Figure 45 au milieu).
- Une pollution mobilisée à chaque niveau lors d'un pompage en milieu de colonne d'eau sans obturateur, donnant une concentration moyenne intermédiaire entre les concentrations mesurées par méthodes passives et les fortes concentrations mesurées en fond d'ouvrage par les pompages ciblés entre obturateurs (Figure 45 à droite).

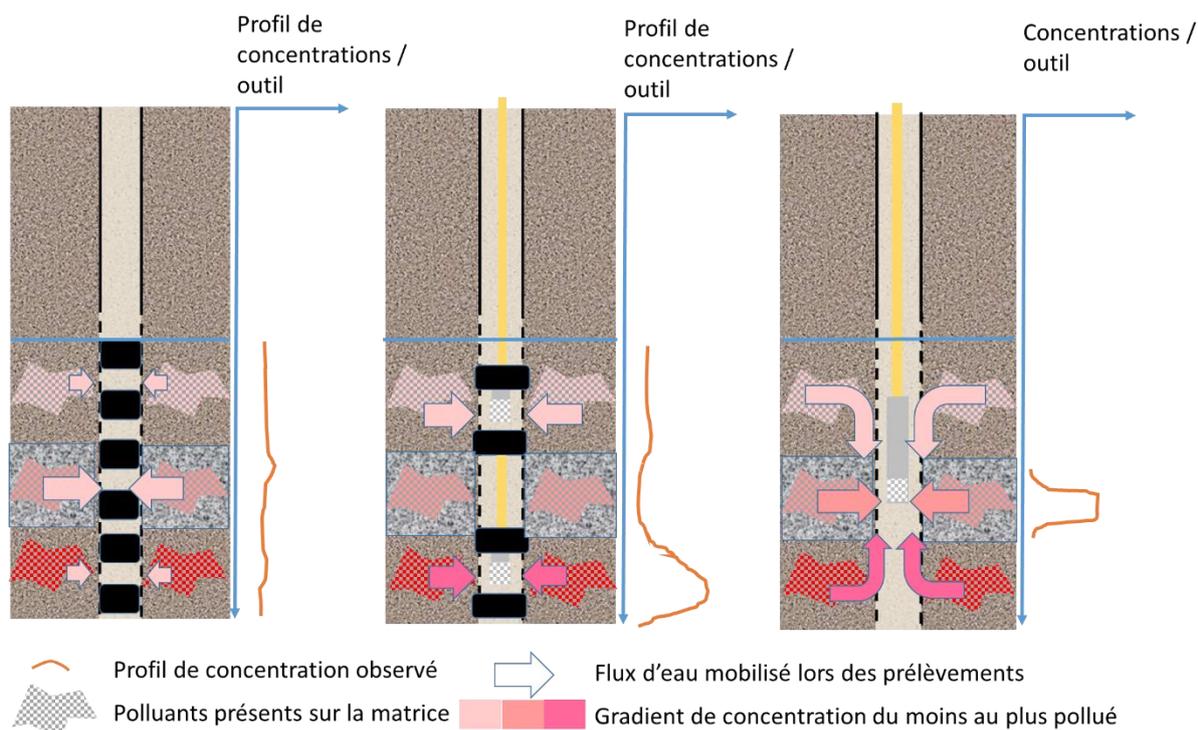


Figure 45 : Détermination de la concentration moyenne sur la base des variations verticales de concentrations et de la contribution des différents niveaux

3.3. Analyse économique

Une analyse des différents postes de dépenses pour la réalisation d'une caractérisation multiniveaux est proposée ci-dessous (coûts 2022).

Elle est proposée pour le cas d'un forage sur lequel 5 niveaux sont caractérisés pour des profondeurs entre 4 et 20 m, en distinguant :

- les coûts des dispositifs d'une part quand ceux-ci sont disponibles à la vente/location (Tableau 10) ;
- Les temps nécessaires à leur déploiement d'autre part (Tableau 11).

Outil	Location (EUR)	Achat (EUR)	Sous-traitance (EUR)
PLM Services :tag line ; Bladder avec vessie PTFE; contrôleur; compresseur	550 (location hebdomadaire)	5 000	Non
PSP	160 (location hebdomadaire)	854	non
iFLUX : fourniture de 5 cartouches de flux d'eau, 5 cartouches de flux de polluants, analyses, interprétation, rapport	Non	Non	6 400
PeP	Non	Variable selon le type de pompe et d'obturateur utilisé	Non
PC	300 (/jour)	Non	prix sur devis selon site
G-MLS	Non	Sur devis	prix sur devis selon site
DVT	Non	Non	prix sur devis selon site
CB	Non	16 000	Prix sur devis selon site
HPF	Prix sur devis	25 000	Prix sur devis selon site

Tableau 10 : Coût des outils multiniveaux

Outil	Nombre d'intervenants nécessaires	Temps nécessaire pour la préparation et le déploiement et retrait dans 1 ouvrage sur 5 profondeurs (h)	Temps nécessaires pour l'interprétation (h)	Temps d'acquisition / déploiement
PLM	2	5	-	1 journée
PSP	1	2,5	-	1 journée
iFLUX	1	2	inclus dans la sous-traitance	2 semaines à 3 mois selon la vitesse de nappe et les concentrations Nécessite 2 A/R sur le terrain minimum (plus si temporalités cartouche flux hydrique et polluant sont différentes)
PeP	1	1	-	1 journée
PC	1	2		1 journée
G-MLS	1	5	-	Généralement 1 à 3 semaines selon la vitesse de nappe Nécessite 2 A/R sur le terrain
DVT	1	3	2	1 journée
CB	1	3	0,5	1 journée
HPF en pompage	2	3	0,5	1 journée
HPF en statique	2	3	0,5	1 journée

Tableau 11 : Temps nécessaire au déploiement des outils multiniveaux

4. Recommandations

Les outils multiniveaux peuvent montrer une hétérogénéité verticale des concentrations de polluants et des vitesses de nappe. Cette connaissance permet de compléter le schéma conceptuel et de mieux localiser les horizons contaminés.

Cette connaissance est utile pour :

- interpréter les résultats de diagnostic ;
- définir les modalités de surveillance des sites ;
- aider à dimensionner et suivre des opérations de dépollution en nappe.

Outils multiniveaux de caractérisation hydrodynamique

Les outils multiniveaux de caractérisation hydrodynamique peuvent aider à mieux définir :

- La vitesse d'écoulement locale permettant ainsi de mieux évaluer les risques pour les enjeux situés à proximité (par exemple une couche d'eau avec une circulation plus rapide pouvant conduire à un impact plus fort sur un forage vs une approche avec la vitesse moyenne de nappe) ;
- La présence ou l'absence de flux verticaux, permettant d'expliquer une homogénéisation ou des variations de concentrations au sein de la colonne d'eau ;
- Les horizons contributifs en pompage, qui permettent de mieux exploiter les suivis en nappe en mettant en évidence la contribution des différents horizons à la concentration « moyenne » observée et permettent donc d'expliquer des éventuelles différences de concentrations à l'issue de l'utilisation de techniques de prélèvement différentes.

Ces outils sont notamment utiles pour une caractérisation hydrodynamique locale fine en l'absence de coupes de sondage suffisamment précises.

Outils multiniveaux de caractérisation des flux de polluants

La combinaison d'outils multiniveaux de prélèvement d'eau et de caractérisation hydrodynamique ou l'utilisation d'outils de caractérisation des flux de polluants peuvent aider à mieux définir les zones à cibler pour un traitement.

Outils multiniveaux de caractérisation chimique

Les outils par forçages directs dans le sol permettent le prélèvement des eaux interstitielles à une profondeur donnée (1.3.2.1).

Pour estimer l'hétérogénéité verticale des concentrations dans un ouvrage, on distingue en particulier :

- les outils donnant des informations sous sollicitation, via un échantillon d'eau obtenu par pompage sélectif : PeP (1.3.2.2.1), PC (1.3.2.2.2) et PLM (1.3.2.2.3) ;
- les outils donnant des informations sur l'état du milieu, via un échantillonnage direct de l'eau, sans pompage (G-MLS (1.3.2.3.1) ; PsP (1.3.2.3.2) ;
- les échantillonneurs passifs donnant les informations sur l'état des milieux en distinguant :
 - les échantillonneurs passifs instantanés, permettant un échantillonnage direct de l'eau, sans pompage (1.3.2.4.2) ;
 - les échantillonneurs passifs à l'équilibre, via la diffusion des polluants recherchés à travers une membrane et jusqu'à l'équilibre entre l'échantillonneur et le milieu (1.3.2.4.3)
 - les échantillonneurs passifs intégratifs, via une phase de diffusion et de sorption des polluants sur un support (1.3.2.4.4).

Ces outils peuvent aussi présenter un intérêt pour vérifier la bonne diffusion des produits lors des méthodes de traitement in situ par injection.

Choix des outils à retenir

Chaque outil a un mode de fonctionnement différent (passif / actif) et une capacité différente à discrétiser le milieu (fenêtre de mesure entre 7 cm et 50 cm) qui vont donner accès à différentes caractéristiques du milieu. De plus chaque outil a des limites en termes d'utilisation :

- Cas des méthodes Direct push qui sont limitées à des terrains meubles (□),
- Cas des outils déployés en forage dont les profondeurs et diamètres possibles d'utilisation peuvent être limités.

Selon les objectifs de l'étude, la sélection des outils à mettre en œuvre sera donc différente. Ainsi pour une connaissance des écoulements où la mise en œuvre d'un traitement in-situ par injection est envisagée, par exemple, on pourrait privilégier les méthodes passives. A contrario, pour définir les conditions opératoires d'une dépollution en nappe par pompage, les méthodes actives pourraient être privilégiées.

De plus chaque outil a des contraintes d'utilisation en termes de profondeur d'investigation, diamètre d'ouvrage, discrétisation verticale, etc. Aussi, le choix des outils à utiliser sera fonction des contraintes liées aux ouvrages visés.

Ces technologies ayant un certain coût, leur déploiement systématique n'est pas recommandé. Pour autant, en cas d'enjeux reconnus sur une ressource en eau ou en cas de nécessité de traitement des eaux souterraines, ces outils, en améliorant le schéma conceptuel, permettent d'affiner la définition/d'évaluer le réseau de surveillance et de retenir la méthode de traitement à privilégier et la zone à traiter en priorité. En cas de variations importantes du contexte hydrodynamique, il peut être recommandé de réaliser ces caractérisations multiniveaux à plusieurs reprises dans des contextes contrastés.

De tels outils sont développés régulièrement et cette étude n'avait pas pour objectif de tester tous les outils existants. D'autres tests pourraient donc être organisés pour de nouveaux outils.

Pour aider dans le choix des outils, les principales caractéristiques des outils testés dans cet atelier sont reprises dans le Tableau 12 : et le Tableau 13 : ci-dessous.

Technique	Echantillonneurs passifs de flux (iFLUX)	Directional Velocity Tool (DVT)	Colloïdal Borescope (CB)	Heat Pulse Flow Meter (HPF)	Hydraulic Profiling Tool (HPT)
Moyens / données nécessaires	<ul style="list-style-type: none"> • Connaissance des arrivées d'eau en pompage dans les ouvrages pour les choix de localisation, nombre et espacement des EPF dans ces ouvrages (mesures au flowmètre) • Connaissance préalable d'ordres de grandeur des vitesses d'écoulement des eaux souterraines et des concentrations pour définition du temps d'exposition 	<ul style="list-style-type: none"> • Gradient global de piézométrie pour avoir une première idée du sens d'écoulement 	<ul style="list-style-type: none"> • Localisation de l'intervalle crépiné 	<ul style="list-style-type: none"> • Localisation de l'intervalle crépiné 	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune
Facilité d'application	<ul style="list-style-type: none"> • Installation et retrait rapides et faciles • 2 déplacements nécessaires • Interprétation nécessitant une expertise pointue 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite un personnel spécialisé 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite un personnel spécialisé 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite un personnel spécialisé 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite un personnel spécialisé avec un atelier de sondage GEOPROBE
Robustesse des informations apportées	<ul style="list-style-type: none"> • Incertitudes liées à la densité de points et au nombre d'échantillonneurs installés 	<ul style="list-style-type: none"> • Encore mal connue, car peu de sites testés Un comparatif avec PFM donne les mêmes résultats sur deux sites différents 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu de retour d'expérience à l'heure actuelle 	<ul style="list-style-type: none"> • En fonction de la configuration de l'ouvrage, les données peuvent être uniquement qualitatives, mais suffisantes pour indiquer la présence de flux verticaux naturels et l'importance relative des horizons productifs en pompage 	<ul style="list-style-type: none"> • Retour d'expérience bien documenté (articles scientifiques et techniques, guides techniques)
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure des flux d'eau, des concentrations et des flux massiques de contaminants • Intégration des variations dans le temps 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure de flux rapide (15 min environ) 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures directes 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures directes 	<ul style="list-style-type: none"> • Discrétisation spatiale très fine, rapidité des mesures
Limites	<ul style="list-style-type: none"> • Expositions longues : dégradation des composés fixés possible • Pas d'information sur les niveaux non interceptés • La sorption compétitive ou limitée par la diffusion peut limiter la capacité des échantillonneurs passifs à retenir certains contaminants • Cartouches non interprétables si traceurs complètement disparus ou si adsorbant saturé (dimensionnement initial erroné) 	<ul style="list-style-type: none"> • L'orientation de l'outil par rapport aux crépines peut empêcher l'écoulement • La version utilisée ne fonctionne pas dans des milieux très perméables ($K > 10^{-3}$ m/s) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'information sur les niveaux non interceptés • En fonction de la discrétisation des points souhaitée, la mesure peut être longue pour des ouvrages à très longue crépine 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'information sur les niveaux non interceptés • En fonction de la discrétisation des points souhaitée, la mesure peut être longue pour des ouvrages à très longue crépine 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de mesures possibles dans les perméabilités très élevées

Tableau 12 : Synthèse des caractéristiques des outils de caractérisation hydrodynamique utilisés

Technique	Echantillonneurs passifs de flux (iFLUX)	Préleveur commandé sous Pression (PSP)	Préleveur Ciblé (PC)	Ginger Multi Layer Sampler (G-MLS)	Pompe pneumatique bas débit entre packers (PLM)
Moyens / données nécessaires	<ul style="list-style-type: none"> • Connaissance des arrivées d'eau en pompage dans les ouvrages pour les choix de localisation, nombre et espacement des EPF dans ces ouvrages (mesures au flowmètre) • Connaissance préalable d'ordres de grandeur des vitesses d'écoulement des eaux souterraines et des concentrations pour définition du temps d'exposition 	<ul style="list-style-type: none"> • La connaissance des profils de vitesses et / ou de la coupe lithologique est un plus pour aider à localiser les zones de prélèvement à privilégier • Connaissance de l'existence de flux verticaux nécessaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Connaissance du diamètre des ouvrages (diamètre outil adaptable sur deux gammes de valeur) 	<ul style="list-style-type: none"> • Connaissance du diamètre des ouvrages (outil utilisable pour des diamètres de 50 à 90 mm) 	<ul style="list-style-type: none"> • Connaissance du diamètre des ouvrages (outil utilisable pour des diamètres de 47 à 127 mm) • Connaissance de la profondeur d'eau à investiguer (outil limité à 46 m d'eau) • Demande une connaissance de la discrétisation verticale voulue
Facilité d'application	<ul style="list-style-type: none"> • Installation et retrait rapides et faciles • 2 déplacements nécessaires • Interprétation nécessitant une expertise pointue 	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre facile par une personne 	<ul style="list-style-type: none"> • Installation et retrait rapides et faciles • Un seul déplacement • Usage par un technicien BE possible 	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre facile par une personne dans la plupart des situations 	<ul style="list-style-type: none"> • Installation et retrait rapides et faciles • Un seul déplacement • Usage par un technicien BE possible
Robustesse des informations apportées	<ul style="list-style-type: none"> • Incertitudes liées à la densité de points et au nombre d'échantillonneurs installés 	<ul style="list-style-type: none"> • Encore mal connue, car peu de sites testés. Un comparatif avec PFM donne les mêmes résultats sur deux sites différents 	<ul style="list-style-type: none"> • Incertitudes liées au débit de pompage par rapport aux vitesses naturelles 	<ul style="list-style-type: none"> • Système passif • Incertitudes liées en priorité au nombre de points de mesure 	<ul style="list-style-type: none"> • Discrétisation verticale possible avec fenêtre de 30 à 90 cm • Débit faible, donne une information proche du puits
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure des flux d'eau, des concentrations et des flux massiques de contaminants • Intégration des variations dans le temps 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisable jusque 150 m • Facile à mettre en œuvre y compris dans des zones isolées • Facilité de nettoyage • Utilisable dans des ouvrages de petit diamètre (47 mm) 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure très rapide 	<ul style="list-style-type: none"> • Système très modulable : 1 à 20 points de prélèvements avec une distance minimale de 55 cm entre deux points de prélèvement, jusqu'à 50 m d'épaisseur de nappe 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure très rapide • Faible volume purgé à évacuer • Faible débit limitant le risque de dénoisement entre obturateurs • Matériaux chimiquement inertes limitant les risques de contamination croisée et facilitant le nettoyage

<p>Limites</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Expositions longues : dégradation des composés fixés possible • Pas d'information sur les niveaux non interceptés • La sorption compétitive ou limitée par la diffusion peut limiter la capacité des échantillonneurs passifs à retenir certains contaminants • Cartouches non interprétables si traceurs complètement disparus ou si adsorbant saturé (dimensionnement initial erroné) 	<ul style="list-style-type: none"> • En cas de flux verticaux dans les ouvrages, ne permet pas d'apporter d'information sur des variations verticales de concentration • Volume prélevé de 800 mL maximum, en cas d'analyses multiple, nécessité de déployer l'outil plusieurs fois • Vu le volume prélevé, donne accès à l'eau présente dans le forage à l'équilibre, ou après une purge • Risque de taux de MES plus élevé qu'un prélèvement par pompage 	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilité de pompage sur une épaisseur plus importante que celle des obturateurs • Massif filtrant trop conducteur 	<ul style="list-style-type: none"> • Exposition plus longue (quelques jours) qu'un prélèvement actif avec une pompe 	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilité de pompage sur une épaisseur plus importante que celle des obturateurs, si massif filtrant trop conducteur • Limité à une épaisseur de colonne d'eau de 46 m • Risque de contamination en cas de déploiement multiple sur site • Distance entre obturateurs fixe, la modification sur site demande du temps
-----------------------	--	--	---	--	--

Tableau 13 : Synthèse des caractéristiques des outils de caractérisation chimique utilisés

5. Conclusions et perspectives

Les outils multiniveaux de caractérisation hydrodynamique permettent de mieux caractériser les hétérogénéités verticales de vitesse de nappe. Cette connaissance permet d'aider à comprendre quelles couches d'eau sont sollicitées de façon préférentielle lors des prélèvements et peut contribuer à expliquer les variations observées selon les conditions de milieu (niveau de nappe) et/ou les protocoles de prélèvements utilisés.

Les tests réalisés sur deux sites, qui présentent des contextes de pollution (COHV, HCT) et hydrodynamiques différents (milieux de conductivité hydraulique contrastée 10^{-4} m/s / 10^{-2} m/s en moyenne respectivement), ont montré que même pour des colonnes d'eau de faibles extensions (4 à 5 m) des variations verticales importantes peuvent être observées.

Ainsi sur le site 1, les résultats suivants ont été obtenus :

- Hydrodynamique :
 - La perméabilité estimée est de 3×10^{-4} m/s, constante sur la verticale sauf entre 13 et 13,3 m de profondeur, avec une perméabilité estimée à 2×10^{-5} m/s ;
 - Des flux verticaux descendants (flux négatifs) ont été observés dans la partie haute de la colonne d'eau (entre 11,3 et 13,3 m de profondeur). Ils sont nuls en partie basse (14,3 m de profondeur) ;
 - L'horizon le plus productif en pompage est situé à 12,3 m de profondeur (à noter que le premier et le dernier mètre n'ont pas pu être investigués en raison de la configuration des outils) ;
 - Les vitesses de Darcy mesurées sont différentes selon les outils utilisés. Avec le DVT et les cartouches iFlux, elles sont du même ordre de grandeur sur les 4 points de mesure (autour de 80 cm/j). Le CB donne des vitesses entre 44 et 105 m/j.
- Chimie :
 - Les ratios de concentrations en hydrocarbures, entre les concentrations mesurées les plus faibles et les plus fortes à une même profondeur, sont entre 2 et 51 ;
 - Les plus fortes concentrations sont observées avec la pompe classique simple niveau sans obturateur (289 et 464 $\mu\text{g/L}$ lors des 2 campagnes). Les concentrations les plus faibles sont observées avec le préleveur sous pression PsP (moyenne des concentrations observées = 9,5 $\mu\text{g/L}$).
- Flux
 - Les flux de BTEX vont grossièrement du simple au double selon les couplages d'outils utilisés.

Sur le site 2, les résultats suivants ont été obtenus :

- Hydrodynamique :
 - L'absence de flux verticaux naturels dans l'ouvrage.
 - Les vitesses horizontales de Darcy mesurées sont homogènes pour les 3 premiers niveaux investigués (entre 2,4 et 2,1 m/j) et plus faibles en fond d'ouvrage (0,56 m/j).
 - L'horizon le plus productif en pompage se situe à 14,5 m de profondeur. La contribution des horizons supérieurs (14 m) et inférieurs (15 m) est moindre (attention le premier mètre et le dernier n'ont pas pu être investigués en raison de la configuration des outils).
- Chimie :
 - Les ratios de concentrations, entre les concentrations mesurées les plus faibles et les plus fortes à une même profondeur, sont entre 1 et 16 selon les méthodes utilisées.
 - Les plus fortes concentrations sont observées avec le PC (450 et 400 $\mu\text{g/L}$) en profondeur. Les concentrations les plus faibles sont observées avec les iFlux (22 $\mu\text{g/L}$) en surface.
- Flux
 - Les flux de COHV présentent un ratio de 16 selon les profondeurs investiguées.

Les ateliers participatifs réalisés ont permis de montrer le caractère opérationnel de ces outils, de démontrer leurs apports et d'aider à la compréhension des différences observées selon les outils déployés et avec des mesures classiques.

Lors de cet atelier, des éléments de communication ont été élaborés pour faciliter l'appropriation de ces outils :

- Des fiches outils précisent les modes d'utilisation des outils, leurs avantages et leurs inconvénients

Tests d'outils innovants pour la caractérisation haute résolution des sites pollués - Flux et concentrations | SSP-InfoTerre (brgm.fr).

- Un film présente les outils :

<https://youtu.be/lyOD2p61m74>

DES ELEMENTS STRUCTURANTS

- La mobilisation d'une diversité d'acteurs aux compétences et domaines complémentaires
- La comparaison d'outils avec des domaines/modes de fonctionnement différents
- Le test des outils sur deux sites réels
- La réalisation d'un film présentant la problématique
- La réalisation de fiches techniques

DES POINTS DE VIGILANCE

- La non exhaustivité des outils testés
- Un besoin d'appropriation par les acteurs des SSP en France

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR NF X31-614 (2017) Qualité du sol - Méthode de détection et de caractérisation des pollutions - Réalisation d'un forage de contrôle ou de suivi de la qualité de l'eau souterraine au droit et autour d'un site potentiellement pollué.
- ASTM (2014). Standard Guide for Selection of Passive Techniques for Sampling Groundwater Monitoring Wells, D7929 2014-08, © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.
- De Jonge, H., G. Rothenberg (2003) Sampling device and method for measuring fluid flow and solute mass transport. US20050235757A1
- Drost, W., Klotz, D., Koch, A., Moser, H., Neumaier, F., & Rauert, W. (1968) Point dilution methods of investigating ground water flow by means of radioisotopes. *Water Resources Research*, 4(1), 125–146. <http://doi.org/10.1029/WR004i001p00125>.
- Essouayed E., M. Annable, M. Momtbrun, et O. Atteia (2019) « An innovative tool for groundwater velocity measurement compared with other tools in laboratory and field tests », *J. Hydrol.* X, vol. 2, p. 100008, 2019.
- Harte, P.T., et S. Flanagan (2011). Application of a new verti-cal profiling tool (ESASS) for sampling groundwater quality during hollow-stem auger drilling. *Groundwater Monitoring and Remediation* 31(1): 86–98
- Hatfield, K., D. Annable, S. Kuhn, P.S.C. Rao, T. Campbell (2002) A new method for quantifying contaminant flux at hazardous waste sites, in: *Groundwater Quality: Natural and Enhanced Restoration of Groundwater Pollution*, IAHS Publication. Wallingford (UK).
- Hatfield, K., M. D. Annable, J. Cho, P. S. C. Rao, H. Klammler (2004) A Direct Passive Method for Measuring Water and Contaminant Fluxes in Porous Media. *Journal of Contaminant Hydrology*. 75(3–4), 155–81.
- Hatfield, K., P.S.C. Rao, M.D. Annable, T. Campbell (2003) Device and method for measuring fluid and solute fluxes in flow systems. US 6,402,547 B1.
- Imbrigiotta, T.E. et P.T. Harte (2020) Passive sampling of groundwater wells for determination of water chemistry: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, chap. 8, section D, book 1, 80 p
- Ineris (2020). Prélèvements d'eaux souterraines à différents niveaux. Recensement des méthodes et matériels disponibles. Rapport Ineris-20-180754-813083-v1.0
- Ineris-ADEME (2011). Synthèse bibliographique relative aux capteurs passifs utilisés pour la mesure de la qualité des eaux souterraines.
- Ineris-ADEME (2014). Mesure de la qualité des eaux souterraines à l'aide d'échantillonneurs passifs dans le contexte des sites pollués. Guide de bonnes pratiques.
- Ineris-ADEME (2020). Projet PASSIFLUX : Les échantillonneurs passifs de flux pour la mesure de la qualité des eaux souterraines. Rapport. 57 pages.
- Interstate Technology and Regulatory Council (2007). Protocol for Use of Five Passive Samplers to sample for a variety of contaminants in groundwater, ITRC Technical and Regulatory Guidance
- ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council) (2015) Integrated DNAPL Site Characterization and Tools Selection (ISC-1). Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, DNAPL Site Characterization Team. www.itrcweb.org/DNAPL-ISC_tools-selection.

- Busse J., F.L. Paillet, A. Hossack, D. Bringemeier, A. Scheuermann, L. Li (2016) Field performance of the heat pulse flow meter: Experiences and recommendations, *Journal of Applied Geophysics*, Volume 126, March 2016, Pages 158-171.
- Jamin P. (2019) Groundwater and contaminant mass fluxes monitoring in heterogeneous aquifers. PhD thesis, ULiège, 201p.
- Lasagna, M. et D.A. De Luca (2016). The use of multilevel sampling techniques for determining shallow aquifer nitrate profiles. *Environmental Science and Pollution Research* 23: 20431-20448
- Leven, C., Weiss, H., Koschitzky, H., Blum, P., Ptak, T., Dietrich, P. (2010). Direct-Push-Verfahren, Heft 15 Schriftenreihe Altlastenforum Baden-Wurtenberg e.V. E. Schweizerbart'sche, Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Lo, H.-C., P. Chen, P.Y. Chou et S.-M. Hsu (2014). The combined use of heat-pulse flowmeter logging and packer testing for transmissive fracture recognition. *Journal of Applied Geophysics* 105: 248-258
- Michel, J. (2013). Groundwater quality measurement with passive samplers – Code of best practices, INERIS reference: DRC-13-102468-03494A (projet CityChlor).
- Michel, J., Lemoine, M. (2014). Mesure de la qualité des eaux souterraines à l'aide d'échantillonneurs passifs dans le contexte des sites pollués (projet PassCityChlor).
- Michel, J., Lemoine, M., Quiot, F. (2014). Utilisation d'outils de caractérisation des eaux souterraines, des sols, des gaz du sol et de l'air intérieur de sites contaminés par des solvants chlorés en milieu urbain (projet CaraCityChlor).
- MTECT (2022) Surveillance de la qualité des eaux souterraines, 78p.
- NF EN ISO 10301(1997) Qualité de l'eau - Dosage des hydrocarbures halogénés hautement volatils - Méthodes par chromatographie en phase gazeuse
- NF ISO 11423-1 (1997) Qualité de l'eau - Détermination du benzène et de certains dérivés benzéniques - Partie 1 : méthode par chromatographie en phase gazeuse de l'espace de tête.
- NF ISO 11423-1 (1997). Qualité de l'eau - Détermination du benzène et de certains dérivés benzéniques - Partie 1 : méthode par chromatographie en phase gazeuse de l'espace de tête
- Paillet, F. (2014). Borehole flowmeter applications in irregular and large-diameter boreholes. *Journal of Applied Geophysics* 55: 39-59
- Powell, R.M. et W. Puls (1993). Passive sampling of groundwater monitoring wells without purging: multilevel well chemistry and tracer disappearance. *Journal of Contaminant Hydrology* 12: 51-77
- Verreydt, G., F. Meesters, S. De Meulenaer (2016) Device for determining mass transport of a fluid and a substance dissolved in the fluid. WO2016/207769 A1.
- Verreydt, G., J. Bronders, I. Van Keer, L. Diels, P. Vanderauwera (2010) Passive Samplers for Monitoring VOCs in Groundwater and the Prospects Related to Mass Flux Measurements. *Ground Water Monitoring and Remediation*. 30, 114–126.
- Verreydt, G., M.D. Annable, S. Kaskassian, I. Van Keer, J. Bronders, L. Diels, P. Vanderauwera (2013) Field demonstration and evaluation of the Passive Flux Meter on a CAH groundwater plume. *Environmental Science and Pollution Research*. 20, 4621–4634.
- Vroblesky, D.A. et J.E. Peterson (2004). Flow-meter and passive diffusion bag tests and potential influences on the vertical distribution of contaminants in wells at Galena Airport, Galena, Alaska, August to October 2002: U.S. Geo-logical Survey Open-File Report 02–1241, 44 p

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : Principales caractéristiques des outils de caractérisation hydrodynamique utilisés	24
Tableau 2 : Principales caractéristiques des outils de prélèvements utilisés.....	26
Tableau 4 : Concentrations historiques et protocole pour le forage du site 1 avant le test	31
Tableau 5 : Liste des composés analysés pour le site1, limites de quantification et incertitudes.....	31
Tableau 6 : Ratio entre les plus faibles et les plus fortes concentrations observées avec les outils multiniveaux- caractérisation chimique du site 1	36
Tableau 7 : Concentrations en COHV observées dans l’ouvrage sélectionné du site 2 avant le test	42
Tableau 8 : Liste des composés analysés pour le site 2, limites de quantification et incertitudes.....	43
Tableau 9 : Ratio entre les plus faibles et les plus fortes concentrations observées avec les outils multiniveaux- caractérisation chimique du site 2	47
Tableau 10 : Coût des outils multiniveaux	49
Tableau 11 : Temps nécessaire au déploiement des outils multiniveaux.....	50
Tableau 12 : Synthèse des caractéristiques des outils de caractérisation hydrodynamique utilisés	53
Tableau 13 : Synthèse des caractéristiques des outils de caractérisation chimique utilisés	55

FIGURES

Figure 1 : Stade d’évolution d’une pollution par des DNAPL et conséquences sur les concentrations en nappe (adapté de ITRC, 2015)	7
Figure 2 : Outil « Hydraulic Profiling Tool » (à gauche, ©Geoprobe) et exemple de restitution (à droite, ©GINGER-BURGEAP).....	8
Figure 3 : Micro moulinet à hélice (à gauche) et exemple de restitution (à droite) ©BRGM-Guérin	9
Figure 4 : Direct Velocity Tool ©Pocible	9
Figure 5 : Colloïdal Borescope ©Geotech.....	10
Figure 6 : Cartouche de flux d’eau ©iFLUX.....	11
Figure 7 : Principe de l’outil développé par la société Nagaré : mesure moyenne (a), mesure ponctuelle (b) (www.nagare.tech)	12
Figure 8 : Heat Pulse Flowmeter ©Mount Sopris	13
Figure 9 : SP16 Groundwater Sampler ©Geoprobe	14
Figure 10 : Pompe entre packers © GINGER BURGEAP	14
Figure 11 : Préleveur ciblé ©Pocible	15
Figure 12 : Préleveur PLM ©BRGM ; ©PLM Services.....	15
Figure 13 : GINGER Multi-Level System® © GINGER BURGEAP	16
Figure 15 : Echantillonneur sous pression à intervalles discrets, principe de fonctionnement ©Solinst	16
Figure 14 : Hydrasleeves® (adapté de Ineris-ADEME (2011))	18
Figure 16 : PDB (Ineris-ADEME (2014)).....	18
Figure 17 : Exemple d’échantillonneur passif intégratif de type dosimètre en céramique (Ineris-ADEME (2014)).....	19
Figure 18 : Fluxsampler et coupe schématique ©Sorbisense	20
Figure 19 : Schéma d’un PFM ©iFLUX	21
Figure 20 : Echantillonneur iFLUX ©iFLUX	21
Figure 21 : Photos des outils de caractérisation hydrodynamique utilisés.....	23
Figure 22 : Photos des outils de prélèvements multiniveaux utilisés et principe de fonctionnement	25
Figure 23 : Mode de fonctionnement des 3 outils passifs testés	26
Figure 24 : Mode de fonctionnement des 3 outils multiniveaux par pompage entre obturateurs (NB : les obturateurs ne sont pas à l’échelle – volume mort au sein de l’ouvrage calculé pour un diamètre de 70 mm).....	27
Figure 25 : Photo de l’outil de mesure de flux de contaminants utilisé	27
Tableau 3 : Principales caractéristiques de l’outil de mesure de flux de polluants utilisé	28
Figure 26 : Illustration de l’effet d’un forage sur l’écoulement en milieu poreux (Drost et al. 1968).....	29
Figure 27 : Coupe du forage retenu sur le site 1	30
Figure 28 : Points de mesures/prélèvement retenus pour le site 1	32
Figure 29 : Modalités de prélèvement - caractérisation chimique du site 1.....	33
Figure 30 : Comparaison des résultats selon les outils utilisés - caractérisation hydrodynamique du site 1.....	34
Figure 31 : Comparaison des résultats de vitesse en nappes : mesurées et calculées – site 1	35
Figure 32 : Comparaison des résultats pour tous les outils utilisés - caractérisation chimique du site 1 (a) toutes concentrations mesurées ; b) concentrations mesurées avec des outils multiniveaux.....	36
Figure 33 : Comparaison des résultats pour tous les outils fonctionnant en passif – site 1.....	37
Figure 34 : Comparaison des résultats pour tous les outils fonctionnant avec un pompage – site 1	38
Figure 35 : Comparaison des résultats selon le volume purgé (en haut : pompage entre obturateurs uniquement ; en bas tous pompages) – site 1.....	39
Figure 36 : Comparaison des résultats selon le débit de purge utilisé – site 1	39
Figure 37 : Représentativité de l’échantillon analysé en fonction du volume purgé	40

Figure 38 : Influence du débit sur la mobilisation du polluant sous forme de NAPL.....	40
Figure 39 : Comparaison des résultats selon les outils utilisés - caractérisation du flux du site 1	41
Figure 40 : Coupe du forage retenu sur le site 2.....	42
Figure 41 : Modalités de prélèvement - caractérisation chimique du site 2.....	44
Figure 42 : Résultats selon les outils utilisés - caractérisation hydrodynamique du site 2 –a) Horizon contributif en pompage avec l’outil HPF et b) Vitesse de Darcy horizontale naturelle avec l’outil iFlux.....	45
Figure 43 : Comparaison des résultats pour tous les outils utilisés - caractérisation chimique du site 2	47
Figure 44 : Caractérisation du flux massique du site 2.....	48
Figure 45 : Détermination de la concentration moyenne sur la base des variations verticales de concentrations et de la contribution des différents niveaux	49

SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de la transition écologique
BTEX	Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylènes
CB	Colloïdal Borescope
COHV	Composés Organiques Halogénés Volatils
DNAPL	Dense Non Aqueous Phase Liquid
DVT	Direct Velocity Toll
EPF	Echantillonneur Passif de Flux
FVPDM	Finite Volume Point Dilution Method
G-MLS	GINGER Multi Level Sampler
HCT	HydroCarbures Totaux
HPF	Heat Pulse Flowmeter
HPT	Hydraulic Profiling Tool
HRSC	High Resolution Site Characterisation
iFlux	Echantillonneurs passif de flux (hydrique et polluants)
LIF	Laser Induced Fluorescence
LNAPL	Light Non Aqueous Phase Liquid
LQ	Limite de Quantification
MIP	Membrane Interface Probe
NGF	Niveau Général Français
PC	Préleveur Ciblé développé par Innovasol
PeP	Pompe entre Packers
PLM	Préleveur bas débit entre obturateur de la société PLM
PsP	Préleveur sous Pression
SSP	Sites et Sols Pollués
US EPA	United State Environmental protection Agency
XRF	X-Ray Fluorescence

ANNEXE 1 : FICHES TECHNOLOGIQUES

Des liens hypertextes renvoient vers les fiches disponibles sur le web.

Les fiches sont disponibles : [Tests d'outils innovants pour la caractérisation haute résolution des sites pollués - Flux et concentrations | SSP-InfoTerre \(brgm.fr\)](#)

FICHES POUR UNE CARACTERISATION MULTINIVEAU DES CONCENTRATIONS.

[ÉCHANTILLONNEUR PASSIF IFLUX](#)

[PRELEVEUR CIBLE](#)

[POMPE ENTRE PACKERS](#)

[GINGER MULTI-LEVEL SAMPLER](#)

[POMPE PNEUMATIQUE BAS DEBIT ENTRE OBTURATEURS](#)

[PRELEVEUR COMMANDE SOUS PRESSION](#)

FICHES POUR DES MESURES DE FLUX HYDRIQUES MULTINIVEAU

[COLLOÏDAL BORESCOPE OU VELOCIMETRE](#)

[FLOWMETRE \(HEAT PULSE FLOWMETER\)](#)

[ÉCHANTILLONNEUR PASSIF IFLUX](#)

[DIRECT VELOCITY TOOL](#)

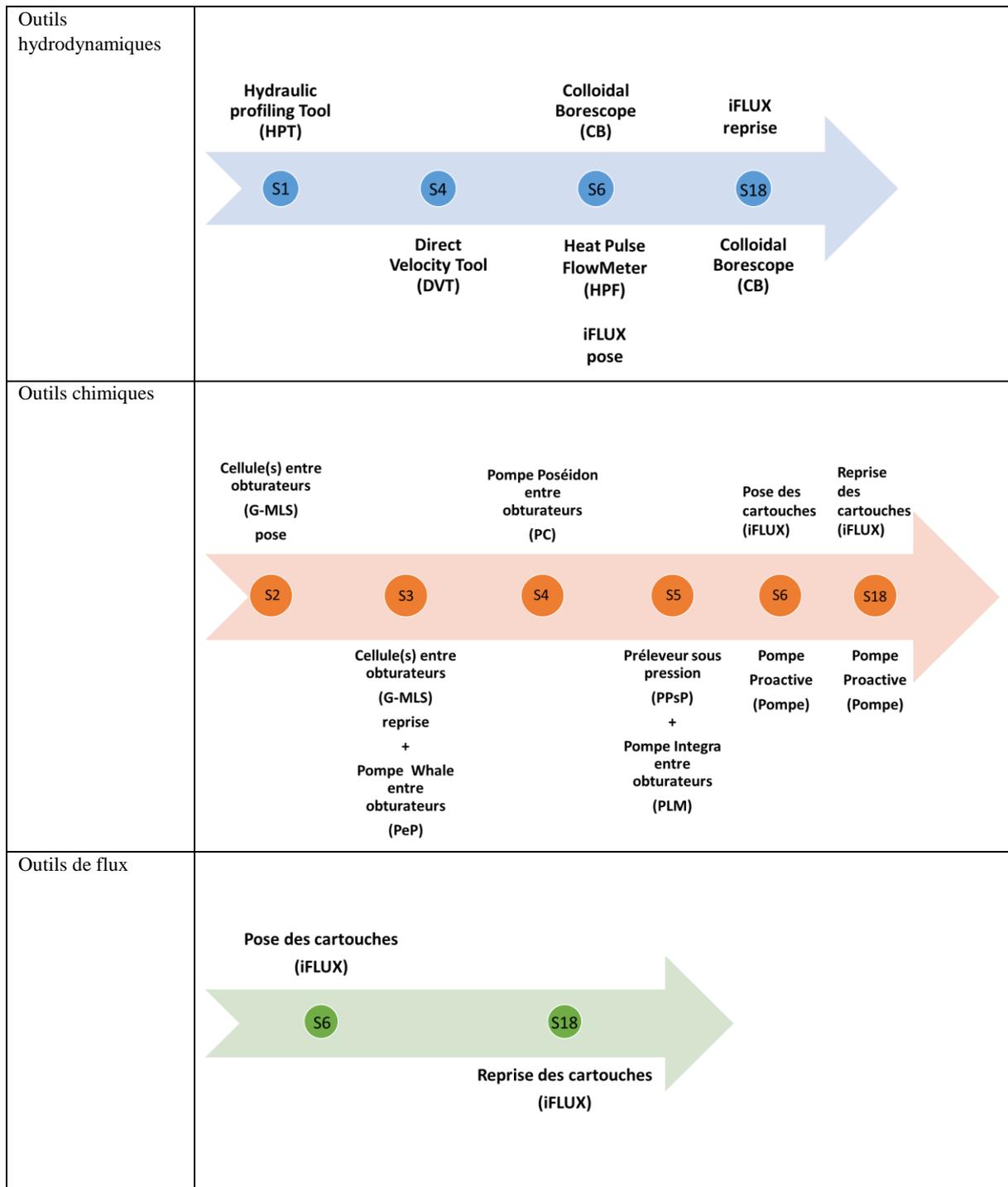
FICHE POUR DES MESURES DE FLUX MASSIQUE MULTINIVEAU

[ÉCHANTILLONNEUR PASSIF IFLUX](#)

ANNEXE 2 : CHRONOLOGIE DES CAMPAGNES DE TERRAIN

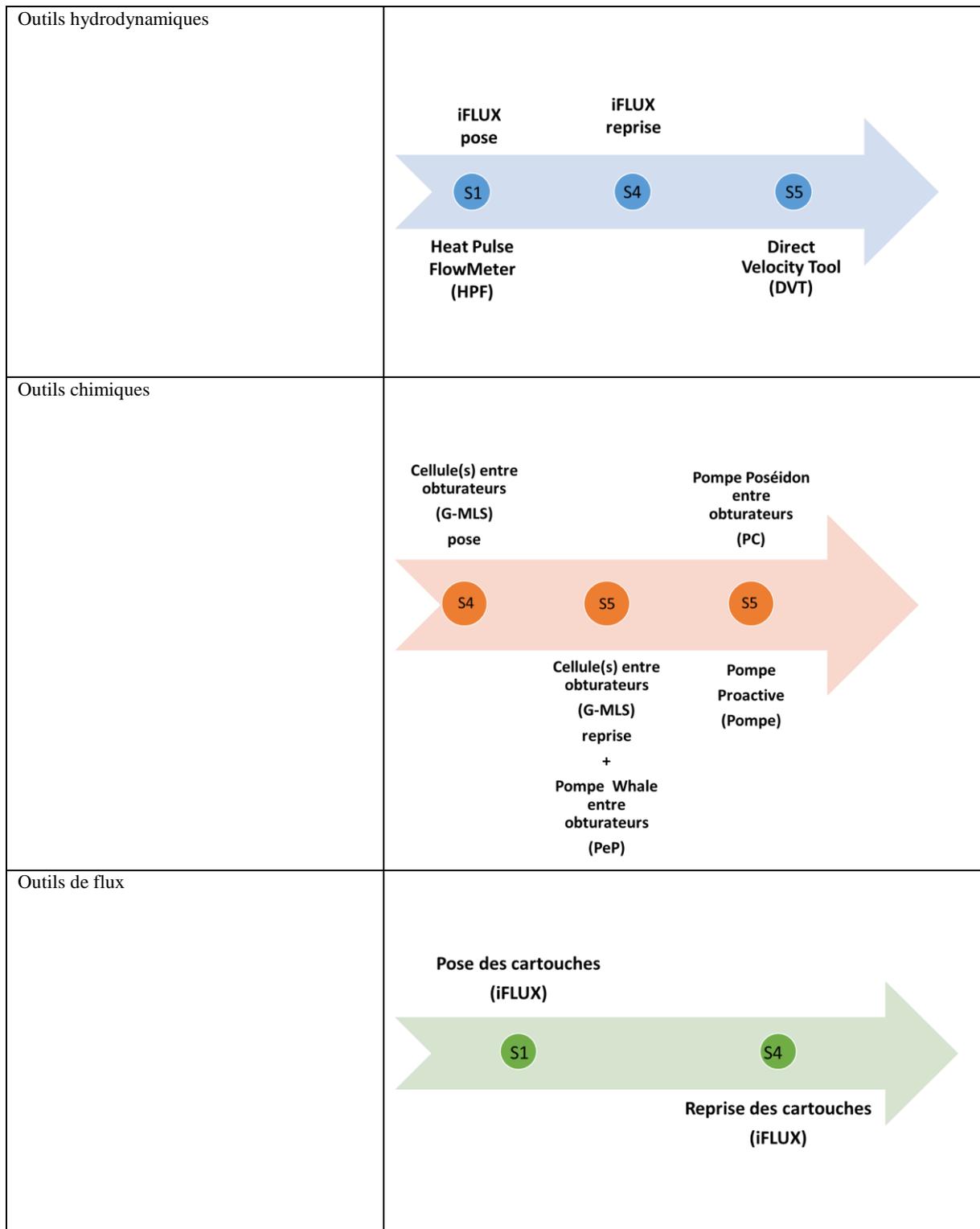
Site 1 : BTEX

Les opérations sur le site 1 se sont déroulées selon le chronogramme ci-dessous.



Site 2 : COHV

Les opérations sur le site 2 se sont déroulées selon le chronogramme ci-dessous.



L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

TESTS D'OUTILS INNOVANTS POUR LA CARACTERISATION DES SITES POLLUES

Résumé : La caractérisation de la pollution du milieu souterrain d'un site est un enjeu essentiel pour définir les risques sanitaires et les modalités de gestion de la pollution associées. Les verrous récurrents à cette caractérisation comprennent la complexité des sites, les hétérogénéités lithologiques des sols, et les grandes différences de comportement des polluants d'intérêt.

La caractérisation des pollutions à l'aide d'un prélèvement classique d'eaux souterraines réalisé dans un forage de contrôle, fournit généralement une information trop partielle pour permettre d'établir un schéma conceptuel de qualité des milieux complexes. Dans pareil cas, la réalisation de prélèvements multiniveaux et l'acquisition de données de caractérisation hydrodynamique et chimique sont recommandées.

Les tests de déploiement d'outils multiniveaux sur 2 sites réels ont montré le caractère opérationnel de ces outils, leur capacité à mettre en évidence les hétérogénéités verticales des concentrations en HCT et COHV, des vitesses d'écoulement et des flux de polluants. Ces tests ont permis de montrer l'apport de ces outils et d'expliquer des différences observées entre les outils déployés et vis-à-vis des mesures classiques (concentration moyenne sur l'épaisseur de la lame d'eau dans le puits).

Essentiel à retenir Des outils innovants de caractérisation des vitesses en nappe et de prélèvement d'eau multiniveaux ont mis en évidence des variations verticales de vitesses et de concentrations en HCT et COHV et de mesurer et ou calculer des flux massiques de polluants.

Cette caractérisation plus détaillée des eaux souterraines est un préalable utile sur certains sites pollués à enjeux, en particulier pour évaluer des risques sanitaires, dimensionner des travaux de dépollution ou encore définir un réseau de surveillance des eaux souterraines.

Ces outils ont des modalités de fonctionnement différentes et donnent par conséquent accès à des informations différentes (état de la nappe au repos ou en pompage, ...). Le choix d'un outil sera donc fonction de l'objectif de l'étude et des limites techniques des outils.

