Mesure de flux massiques de contaminants dans les eaux souterraines Tests sur sites ateliers

Julien MICHEL[1*], Goedele VERREYDT[2], Fabrice RICHEZ[1] et Hélène DEMOUGEOT-RENARD[3]
[1] : INERIS, Parc Technologique ALATA, BP2, 60550 Verneuil-en-Halatte, France, julien.michel@ineris.fr, fabrice.richez@ineris.fr
[2] : iFLUX, Galileilaan 15, 2845 Niel, Belgique, goedele@ifluxsampling.com
[3] : eOde, 7 chemin de Mont-Riant, 2000 Neuchâtel, Suisse, helenedemougeotrenard@eode.ch

* contact : julien.michel@ineris.fr

Résumé
Les flux massiques de contaminants peuvent permettre une meilleure gestion des sites et sols pollués. Cependant, à l'heure actuelle, ils sont estimés à partir d'échantillons moyens d'eaux souterraines et du flux d'eaux souterraines obtenu par la méthode de Darcy. Dans cette estimation, les variations spatiales et temporelles de ces données ne sont pas prises en compte, ce qui induit une forte incertitude sur le flux massique de contaminants. Les échantillonneurs passifs de flux (EPF) permettent de les mesurer directement. Dans le cadre du projet Passiflux, deux d'entre eux (les PFMs d'Enviroflux et les échantillonneurs iFLUX) ont été exposés au cours de 4 campagnes sur 2 sites. Les concentrations moyennes déduites des EPF sont généralement comparables aux concentrations obtenues à partir d'échantillons d'eau prélevés selon la technique conventionnelle, à la lumière des horizons productifs en pompage. L'intérêt de ces dispositifs pour une mesure multi-niveaux et une meilleure caractérisation de la contamination a également pu été démontré dans le cadre de ce projet. Ces dispositifs demandent désormais à être testés pour mesurer la charge massique traversant un plan de référence sur site réel, au moyen de forages positionnés dans le plan.

Introduction
A l'heure actuelle, la gestion des eaux souterraines contaminées est principalement orientée par la mesure de concentrations ponctuelles, dans le temps et dans l'espace, des contaminants d'intérêt, en accord avec les normes et limites de qualité exprimées en concentration. Cependant, dans certains cas, ces données ne sont pas suffisantes, notamment pour l'évaluation et la gestion du comportement des panaches de pollution. En effet, 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, est une composante à part entière du comportement des panaches de pollution qui n'est pas intégrée dans une valeur de concentration.

Le flux massique de contaminants au sein du panache permet de prendre en compte cette composante. Il correspond à la masse de contaminants qui migre dans les eaux souterraines par unité de temps et par unité de surface (g/j/m^2 par exemple) et est calculé en combinant les concentrations avec la vitesse d'écoulement de Darcy des eaux souterraines. Ainsi, le flux massique de contaminants permet une meilleure compréhension du comportement du panache de pollution dans les eaux souterraines, utile à une meilleure gestion des sites pollués. On peut citer par exemple une meilleure définition des termes sources, des voies de transfert des contaminants, des conditions aux limites utilisées dans les modèles de transfert de contaminants dans les eaux souterraines, des taux d'atténuation naturelle ou encore des techniques de dépollution ainsi que de leur dimensionnement.

Cependant, à l'heure actuelle, l'estimation des flux massiques de contaminants, calculée à partir d'échantillons moyens d'eaux souterraines prélevés dans des piézomètres et du flux d'eaux souterraines obtenu par la méthode de Darcy, est relativement imprécise. En effet, les variations spatiales et temporelles de concentration et de flux des eaux souterraines induisent des variations du flux massique de contaminants qui peuvent être de plusieurs ordres de grandeur. Cette approche induit donc des incertitudes en ce qui concerne le terme source et les conditions aux limites, ce qui peut entacher la robustesse des modèles de prédiction utilisés et d'une manière générale conduire à une mauvaise gestion de la pollution.

De ce fait, une mesure directe des flux massiques de contaminants apparaît plus robuste et les échantillonneurs passifs de flux (EPF) pourraient constituer une bonne alternative. C'est pourquoi, l'objectif de ce travail, inscrit dans le cadre du projet Passiflux cofinancé par l'ADEME, était d'évaluer des EPF en :

- statuant sur la facilité à se les procurer et à les mettre en œuvre sur le terrain ainsi que sur la façon de fournir des informations en termes de concentrations et de flux de contaminants,
- mettant en évidence leur capacité à donner des résultats en multi-niveaux.

Ce projet fait suite à d'autres travaux menés par l'INERIS sur les échantillonneurs passifs pour la mesure de la qualité des eaux souterraines dans le contexte des sites pollués ([1], [2], [3]).

Matériel et méthodes

Sur toute la durée du projet, deux types d'EPF ont été exposés sur 2 sites dont les eaux souterraines sont contaminées par des COHV : des PFM (Passive Flux Meter, VITO-Enviroflux) et des échantillonneurs iFLUX. Les PFMs 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 traceurs. Ils sont construits à la demande, ce qui implique que leurs longueurs sont choisies par l'utilisateur. Dans le cadre de ce projet, les PFMs utilisés avaient une longueur de 1 m et étaient composés de deux unités de 50 cm chacune, permettant ainsi 2 mesures de vitesses d'écoulement des eaux souterraines et de concentrations par PFM. Les échantillonneurs iFLUX sont composés de cartouches rigides de 16,5 cm de longueur et pour chaque profondeur de mesure, 2 cartouches sont mises en série : l'une pour la mesure des vitesses d'écoulement des eaux souterraines et l'autre pour la mesure des concentrations en contaminants. Les adsorbants sont les mêmes que ceux utilisés pour les PFMs. Tout comme pour les PFMs, le diamètre d'une cartouche correspond exactement au diamètre interne du piézomètre à équiper.

Sur le site 1, 3 campagnes d'exposition de PFMs ont été menées, avec des expositions variant entre 2 et 3 mois, dans 4 à 6 piézomètres. Sur ce site, le perchloroéthylène (PCE) est le composé mesuré majoritairement (concentration inférieure à 100 µg/L), les concentrations en trichloroéthylène (TCE), le cis dichloroéthylène (cis-DCE) et le trans dichloroéthylène (trans-DCE) étant inférieures à 1 µg/L. Le chlorure de vinyle (CV) n'a pas été quantifié. Sur le site 2, des échantillonneurs iFLUX ont été exposés au cours d'une campagne, dans 2 ouvrages. Les concentrations en COHV dans les eaux souterraines étaient comprises entre 0,01 et 100 mg/L.

A chaque campagne d'exposition des EPF, un prélèvement d'eaux souterraine selon la technique conventionnelle (prélèvement à la pompe après purge de l'ouvrage) a été réalisé avant et après exposition.

Par ailleurs, dans les ouvrages équipés d'EPF, une mesure de la contribution en pompage des différents horizons de la zone saturée de l'intervalle crépiné a été réalisée à l'aide d'un flowmètre. En effet, les concentrations mesurées dans les échantillons d'eaux souterraines prélevés selon la technique conventionnelle et les concentrations données par les EPF placés à différentes profondeurs ne sont pas directement comparables entre elles.

Des recherches à l'échelle du terrain et du laboratoire ont montré que, quelle que soit la position de la pompe dans l'ouvrage, l'échantillon prélevé dans ces conditions est un mélange, pondéré par le flux entrant dans le piézomètre durant le pompage, de tous les niveaux de la zone saturée de l'intervalle crépiné [4]. De ce fait, la concentration d'un échantillon obtenu par pompage dans un ouvrage correspond à une concentration moyenne le long de l'intervalle crépiné, pondéré par le flux d'eau dans les différents horizons.

Dans le cas des EPF utilisés, les flux verticaux naturels pouvant être présents dans les ouvrages sont bloqués, ce qui implique que la concentration donnée par les EPF, quant à elle, est représentative de la concentration à la profondeur à laquelle l'échantillonneur passif est placé.

De ce fait, pour évaluer les concentrations données par les EPF et pouvoir les comparer aux concentrations mesurées dans les échantillons d'eaux souterraines prélevés par pompage, la concentration moyenne, pondérée par le flux, a été calculée dans chaque ouvrage. Il s'agit de la somme des concentrations données par les EPF installés dans chaque ouvrage à différentes profondeurs, pondérées par la contribution en pompage de l'horizon en face duquel ils ont été placés.

Résultats et discussion

La Figure 1 présente une comparaison des données suivantes, pour la troisième campagne d'exposition des PFM sur le site 1 (décembre 2017 – février 2018) :

- les concentrations en PCE mesurées dans les échantillons d'eaux souterraines prélevés par pompage après purge des ouvrages (prélèvement conventionnel), avant et après exposition des EPF (barres bleues et rouges),
- la moyenne de ces deux concentrations (calculée, barres vertes),
- la « concentration moyenne calculée », pondérée par le flux, pour les EPF (barres oranges).

Les résultats sont similaires pour les deux premières campagnes d'exposition des PFM sur ce site.

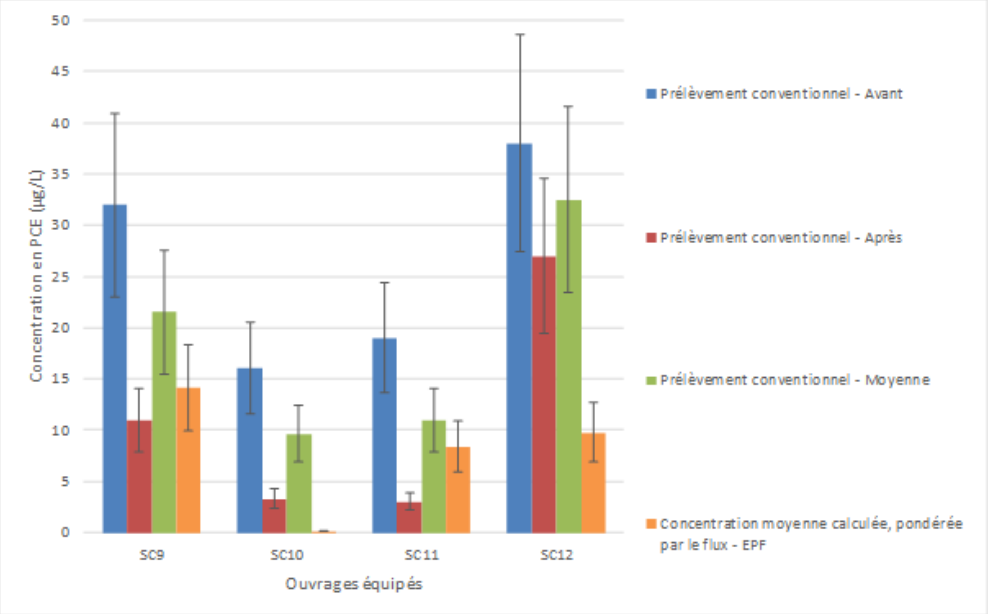


Figure 1 : Comparaison des concentrations en PCE dans les eaux souterraines (prélèvement conventionnel et concentration moyenne calculée, pondérée par le flux, pour les EPF)

En SC9 et en SC11, la concentration moyenne pondérée par le flux, calculée à partir des EPF est similaire à la concentration moyenne calculée à partir des échantillons prélevés de manière conventionnelle, en considérant l'incertitude analytique.
En SC10, la concentration moyenne pondérée par le flux, calculée à partir des EPF, est inférieure à la concentration moyenne calculée à partir des échantillons prélevés de manière conventionnelle (respectivement 0,09 et 9,65 µg/L). Ces deux concentrations ne sont pas du même ordre de grandeur, ce qui n'invalide pas les EPF. Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que les EPF aient été presque exclusivement placés en face d'horizons non productifs en pompage, et que les concentrations en PCE en face de ces horizons soient nulles ou très faibles. Cette stratégie d'exposition a été mise en œuvre volontairement pour répondre à un objectif du projet, à savoir la mise en évidence de concentrations différentes de celles mesurées dans les échantillons pris de manière conventionnelle, à des niveaux qui ne contribuent pas ou très peu lors du pompage.

Cette configuration met donc en évidence l'intérêt de ces dispositifs passifs, puisqu'une mesure dans un échantillon d'eau prélevé de manière conventionnelle pourrait surestimer les concentrations aux différents horizons, et pourrait engendrer des travaux de dépollution non adaptés et plus coûteux, voire non nécessaires.

En SC12, la concentration moyenne calculée à partir des EPF est inférieure à la concentration moyenne calculée à partir des échantillons prélevés de manière conventionnelle. Ces deux concentrations sont respectivement de 9,8 et 32,5 µg/L, donc restent du même ordre de grandeur, en considérant les incertitudes analytiques. Au cours de cette campagne, les concentrations les plus élevées en PCE ont été mesurées par l'EPF placé le plus haut dans l'ouvrage, à 3,6 m de profondeur.

Au retrait des EPF, l'horizon qui contribuait le plus en pompage correspondait à l'horizon le plus en surface, en face duquel aucun EPF n'a été placé (3,1 m de profondeur). Ceci pourrait donc expliquer le fait que la concentration moyenne calculée à l'aide des EPF ne corresponde pas exactement à la concentration mesurée dans les échantillons d'eau prélevés par pompage. En effet, au regard de la concentration mesurée en face de l'horizon inférieur, l'hypothèse de concentrations plus élevées en surface peut être avancée. Un EPF placé en face de cet horizon aurait permis de vérifier cette hypothèse. Dans le cas où celle-ci serait vérifiée, la concentration moyenne calculée à partir des EPF devrait être plus élevée que celle calculée actuellement et donc plus proche de la concentration moyenne calculée à partir des échantillons prélevés de manière conventionnelle.

Cette configuration met encore une fois en avant l'intérêt de ces dispositifs pour une mesure multi-niveaux et une meilleure caractérisation de la contamination, puisque les concentrations moyennes mesurées dans les échantillons d'eaux souterraines prélevés de manière conventionnelle pourraient sous-estimer les concentrations à certaines profondeurs et donc le risque.

Tous ces résultats montrent également l'importance des mesures au flowmètre lors de la pose d'échantillonneurs passifs en multi-niveaux, pour une bonne compréhension des données.

Sur le site 2, les tendances sont similaires, avec, d'une manière générale, une bonne cohérence entre les concentrations mesurées par les échantillonneurs passifs de flux et la concentration moyenne calculée à partir des concentrations mesurées dans les échantillons d'eaux souterraines, prélevés avant et après exposition, selon la technique conventionnelle, en considérant les incertitudes analytiques.

Conclusions et perspectives

Les essais menés dans le cadre du projet PASSIFLUX ont montré que les 2 types d'EPF étaient faciles à mettre en place et à retirer.

Les concentrations moyennes déduites des EPF sont généralement comparables (au moins du même ordre de grandeur) aux concentrations obtenues à partir d'échantillons d'eau prélevés selon la technique conventionnelle. Cette comparaison est uniquement possible à la lumière des horizons productifs en pompage, ce qui montre l'importance des mesures au flowmètre lors de la pose d'échantillonneurs passifs en multi-niveaux, pour une bonne compréhension des données. L'intérêt de ces dispositifs pour une mesure multi-niveaux et une meilleure caractérisation de la contamination a également pu été démontré dans le cadre de ce projet, puisque les concentrations moyennes mesurées dans les échantillons d'eaux souterraines prélevés de manière conventionnelle pourraient sous-estimer ou surestimer les concentrations à certaines profondeurs et donc mésestimer le risque.

Ces dispositifs demandent désormais à être testés pour mesurer la charge massique traversant un plan de référence sur site réel, au moyen de forages positionnés dans le plan, afin de montrer leur plus-value par rapport aux calculs menés actuellement.

Remerciements

L'INERIS et ses partenaires remercient le Ministère en charge de l'Environnement pour son soutien ainsi que les exploitants ou anciens exploitants en charge de la surveillance pour la mise à disposition de sites ateliers et de données.

Références

[1] Michel, J. (2013) Groundwater quality measurement with passive samplers – Code of best practices, INERIS reference: DRC-13-102468-03494A (projet CityChlor)

[2] 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)

[3] 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)

[4] MacDonald, J.-P., Smith, R.M. (2009). Concentration Profiles in Screened Wells under Static and Pumped Conditions. *Ground Water Monitoring and Remediation,* 29, 78 – 86