



CARACTÉRISATION HYDRODYNAMIQUE HAUTE RÉOLUTION DE LA NAPPE

OUTILS POUR DES MESURES EN FORAGE

DESCRIPTION DU PRINCIPE DE LA TECHNIQUE

Du fait de l'hétérogénéité du sous-sol, **les flux d'eau peuvent être hétérogènes en sens et vitesses d'écoulement selon la profondeur et selon le temps** pour différentes raisons : épaisseur de la nappe de plusieurs mètres, niveaux plus ou moins perméables, cycle hautes eaux / basses eaux... Afin de connaître ces flux de manière précise selon la profondeur, il est nécessaire de **réaliser plusieurs mesures verticalement** : on parle de **caractérisation hydrodynamique haute résolution**.

La caractérisation dynamique haute résolution peut être obtenue :

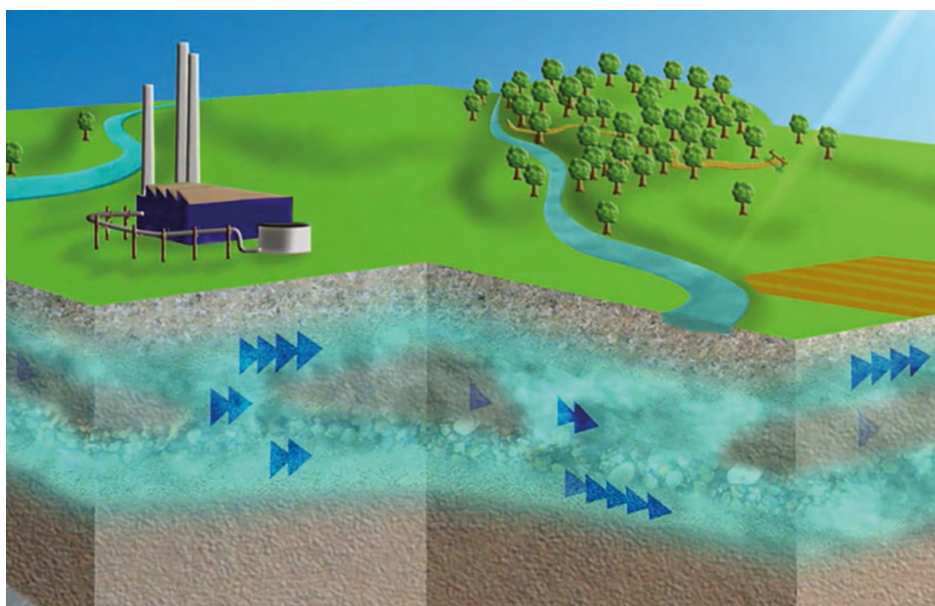
- par des essais de pompage dans des **ouvrages multiniveaux** (sélectif, en flûte de pan ou forages à plusieurs tubes) aux profondeurs correspondant aux profondeurs crépinées pour avoir accès à la perméabilité, transmissivité et emmagasinement de l'aquifère.
- par le déploiement de techniques de **direct push** qui permettent de réaliser des mesures de conductivité hydraulique directement dans le sol avec une discrétisation verticale importante. Ces techniques ont l'avantage de s'affranchir de la mise en place d'ouvrages permanents mais

ne sont pas applicables à toutes les lithologies comme des sols trop indurés. Elles peuvent être utiles pour définir le design d'ouvrages multiniveaux.

- par le déploiement à plusieurs profondeurs d'outils qui permettent d'exploiter les ouvrages existants disposant de crépines parfois longues. Ces outils peuvent être regroupés selon différentes techniques qui permettent :
 - la mesure de la **vitesse des écoulements horizontaux** sur une plage de profondeur donnée,
 - la détermination des **flux verticaux** dans l'ouvrage,
 - **l'identification des horizons les plus productifs**.

Cette fiche ne détaille que les outils qui permettent de tirer le meilleur parti des forages existants et peuvent mettre en évidence une hétérogénéité hydrodynamique verticale de la nappe.

La combinaison de ces outils avec des prélèvements multiniveaux pour mesurer la concentration en polluant (voir fiche caractérisation chimique haute résolution de la nappe) permet d'obtenir le **flux de polluant** et donc de mieux appréhender la gestion de pollutions potentielles ou avérées.



Hétérogénéité des flux d'eau liés à une hétérogénéité de la géologie de l'aquifère.

CARACTÉRISATION HYDRODYNAMIQUE HAUTE RÉOLUTION DE LA NAPPE

CONTEXTE D'UTILISATION

Dans quel contexte ?

Ces outils peuvent être utilisés dans des **ouvrages existants** et crépinés sur toute leur hauteur en zone saturée, **qui sont déjà présents sur site**. Ils sont utiles **lorsque la nappe présente des variations de vitesses selon la profondeur** ou lorsque la **coupe géologique des forages n'est pas de bonne qualité**. Leur utilisation pour déterminer les flux verticaux peut également être nécessaire pour cibler l'échantillonnage des eaux ou **au préalable de l'utilisation de certains échantillonneurs passifs** pour s'assurer qu'ils sont représentatifs de la couche aquifère adjacente.

Les limites de mesure obtenues dépendent des techniques. L'information fournie est quantitative ou qualitative.

À quelle étape ?

La caractérisation hydrodynamique est utile à chaque étape

de la gestion d'un site.

Les mesures multiniveaux sont utilisées lors du **diagnostic** afin d'évaluer de manière précise le contexte hydrogéologique et notamment la présence d'horizons plus ou moins **perméables**.

Lors de l'**interprétation de l'état des milieux (IEM)**, la connaissance précise des **vitesse d'écoulement** des eaux souterraines permet de mieux estimer le temps d'atteinte d'un enjeu par une pollution.

Lors du **plan de gestion ou du plan de conception des travaux**, la connaissance des **flux d'eau et des horizons productifs** des terrains traversés est souvent nécessaire pour sélectionner et dimensionner la méthode de dépollution du site et en optimiser la mise en œuvre.

Enfin, la connaissance de l'**hétérogénéité hydrodynamique** verticale permet de mieux concevoir le **réseau et le protocole de surveillance** des eaux souterraines.

POLLUANTS CONCERNÉS

Les outils sélectifs de mesure hydrodynamique ont un intérêt quels que soient les polluants présents.

MATÉRIEL NÉCESSAIRE

Le matériel à déployer est fonction de l'outil retenu pour la réalisation des mesures.

Certains outils de mesure des flux horizontaux ou verticaux (vélocimètre et flowmètre) reposent sur la descente et la remontée de sondes. Pour certains, le poids nécessite la présence de deux opérateurs pour la manutention.

La mesure de flux par échantillonneur passif demande la

mise en place et le retrait différé de cartouches réalisées sur mesure selon les caractéristiques des ouvrages présents.

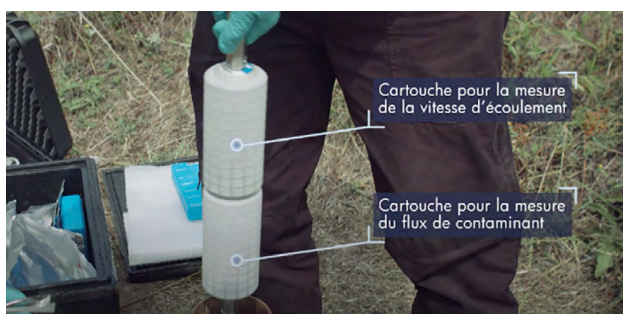
D'autres outils de mesure des flux horizontaux (DVT, mesure par dilution) ont recours à des traceurs. Ils demandent un système d'injection et un système de détection du traceur voire une caméra et peuvent être déployés entre obturateurs.



Mesure au vélocimètre



© Inertis



Cartouches iFLUX et installation dans le piézomètre



© Inertis

MÉTHODOLOGIE

Dans le but de réaliser une caractérisation hydrodynamique haute résolution représentative, le choix du matériel est à considérer avec attention. Il dépend :

- de l'objectif de la campagne dans le temps et dans l'espace : améliorer la connaissance hydrogéologique du site, préparer une caractérisation chimique multiniveaux, définir un

réseau de surveillance d'une pollution, ...

- des contraintes liées au site : diamètre des ouvrages existants, profondeur de la nappe, ...
- de l'hétérogénéité de l'aquifère et de la discrétisation verticale recherchée.

OBJECTIF	EXEMPLE D'OUTIL	PRINCIPE	CONTEXTE D'UTILISATION
Mesure des flux horizontaux	Vélocimètre (Colloidal borescope CB)	Mesure la vitesse et la direction d'écoulement des eaux souterraines grâce à une caméra permettant l'observation des particules naturellement présentes dans le forage. Un logiciel calcule leur taille moyenne, leur nombre, leur vitesse et leur direction.	Débit < 30 mm/s Diamètre du forage > 52 mm Profondeur de mesure < 1 000 m Temps de mesure : en direct, le temps de stabilisation peut durer jusqu'à 15 min Mesure en statique
	Echantillonneur passif (iFLUX)	Mesure la vitesse de Darcy d'écoulement des eaux souterraines pendant une période d'exposition grâce à l'analyse d'une cartouche dédiée contenant un mélange de 5 alcools traceurs . La quantité de traceur restante est mesurée en laboratoire après exposition. Cette méthode peut être couplée à des mesures de concentrations pour le calcul de flux massiques en polluants.	Débit : pas de limite Diamètre de forage : adaptable, construit sur mesure Profondeur de mesure : pas de limite Temps d'exposition : fonction des vitesses d'écoulement des eaux souterraines Mesure en statique Nécessite 2 déplacements sur le terrain
	Direct Velocity Tool (DVT)	Mesure la vitesse d'écoulement des eaux souterraines par la dilution d'un traceur injecté dans l'outil par les eaux souterraines le traversant. Cette méthode peut être couplée à des mesures de concentrations pour le calcul de flux massiques en polluants.	Flux de Darcy > 5 cm/j Diamètre de forage de 60 à 110 mm Profondeur de mesure < 40 m Temps de mesure : de 10 à 15 min Mesure en dynamique
	Mesure par dilution (Nagaré)	Mesure du flux de Darcy basé sur la méthode de dilution en puits unique avec une injection de traceur en continu.	Flux de Darcy > 5 cm/j Diamètre de forage > 50 mm (2') Profondeur de mesure < 150 m Temps de mesure de 2 à 48 heures Mesure en statique
Mesure des flux verticaux Identification des horizons productifs	Flowmètre (HPF)	Mesure les flux verticaux naturels et les horizons productifs en pompage à l'aide une sonde comportant une grille métallique horizontale chauffante et deux thermistors situés en-dessous et au-dessus de cette grille par des impulsions de courant électrique (charge).	Débit de 0,1 à 500 L/min Diamètre du forage > 52 mm (2') Profondeur de mesure : pas de limite Temps de mesure : environ 3 min par point Mesure en statique

Objectifs et contextes d'utilisation d'outils de caractérisation hydrodynamique haute résolution testés lors de l'étude ADEME HRSC.

Avant le déploiement, le matériel doit être préparé (et calibré pour le flowmètre pour obtenir un facteur correctif) et des mesures préliminaires sont réalisées : diamètre intérieur du forage, profondeur du forage, niveau statique, sens d'écoulement de la nappe (pour le DVT). L'outil est descendu dans le forage à la profondeur désirée. 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) selon l'outil sélectionné. A la fin de la mesure, le dispositif peut être soit remonté soit descendu pour un second prélèvement.

Certains outils donnent directement le résultat de la mesure sur site et d'autres demandent une interprétation. Pour les échantillonneurs passifs, les cartouches récupérées sont envoyées à la société distributrice pour le calcul des valeurs de flux d'eau aux profondeurs d'exposition.

Points de vigilance :

- Pour l'ensemble des méthodes présentées, la position des crépines doit être connue et l'outil ne doit être positionné que devant des zones crépinées.
- Il est indispensable que le massif filtrant et les crépines soient en bon état car s'ils sont encrassés, les mesures sont biaisées. Un développement et un temps de repos sont fortement conseillés avant la mesure si l'ouvrage n'est pas suivi régulièrement.
- Il peut être nécessaire de déployer les outils dans plusieurs contextes hydrodynamiques (hautes eaux/basses eaux ...).



AVANTAGES – INCONVÉNIENTS – MATURITÉ DE LA TECHNIQUE

AVANTAGES

Investigations

- Mesures de vitesses de Darcy et flux verticaux multiniveaux,
- Mesure directe de la direction d'écoulement sur le terrain pour certains outils,
- Large gamme de mesures de flux,
- Utilisable sur aquifères poreux ou fracturés.

INCONVÉNIENTS

Investigations

- Certains outils (échantillonneur passif) nécessitent deux déplacements sur le terrain (pose et repose) avec une indisponibilité du forage pour un suivi traditionnel pendant l'exposition,

Influence sur les résultats et incertitudes

- Nécessite de connaître un certain nombre de données pour réaliser la mesure,

Résultats d'interprétation

- Certaines interprétations des données peuvent être délicates et nécessiter du personnel qualifié et expérimenté,
- Variabilité naturelle importante qui peut demander de multiplier les mesures.

MATURITÉ DE LA TECHNIQUE



Les techniques sont abouties mais encore peu utilisées sur le terrain. Un projet [3] a permis d'illustrer les capacités des différents outils et de montrer le type de résultats obtenus avec chacun de ces outils.

DÉLAIS DE MISE EN ŒUVRE

La phase pour la préparation et le déploiement sur site est de l'ordre de la journée : il faut compter entre 2 et 6 heures pour 1 ouvrage sur 5 profondeurs. La technique d'échantillonnage passif nécessite de revenir sur site pour

recupérer les cartouches et une analyse par le fournisseur (quinzaine de jours). Certains outils donnent directement le résultat sur site et d'autres demandent une interprétation ultérieure.

PHASE	ACHAT DE MATÉRIEL	INVESTIGATIONS	TRAITEMENT
Délai associé	⌘ ⌘ ⌘ > ⌘ ⌘ ⌘	⌘ ⌘ ⌘ > ⌘ ⌘ ⌘	⌘ ⌘ ⌘ > ⌘ ⌘ ⌘
⌘ : jour / ⌘⌘ : semaine / ⌘⌘⌘ : mois			

ÉLÉMENTS DE COÛTS

Les coûts de déploiement dépendent du matériel, du nombre d'opérateurs nécessaires (entre 1 et 2) et du temps de mesure.

Certains outils sont disponibles uniquement par des prestations de sous-traitance, d'autres peuvent être loués et/ou achetés.

PHASE	ACHAT DE MATÉRIEL	INVESTIGATIONS	TRAITEMENT
Coût associé	€€€ > €€€	€€€	€€€
€ < 100 € / €€ < 1 000 € / €€€ > 1 000 €			

POUR EN SAVOIR PLUS – RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] *Rapport Prélèvements d'eau souterraine à différents niveaux - Recensement des méthodes et matériels disponibles* – INERIS – Février 2020
- [2] *Recueil des fiches des outils innovants pour la caractérisation haute résolution des sites pollués : Flux et concentrations* - ADEME, BRGM, GINGER-BURGEAP, INERIS, INNOVASOL/POCIBLE – Janvier 2021
- [3] *Rapport ADEME HRSC - Tests d'outils innovants pour la caractérisation des sites pollués - Caractérisation haute résolution des flux et des concentrations en polluants dans les eaux souterraines* – Novembre 2023
- [4] *Caractérisation haute résolution des sites pollués - Vidéo chaîne YouTube BrgmTV - 2020*
- [5] *E.ESSOUAYED et al. - An innovative tool for groundwater velocity measurement compared with other tools in laboratory and field tests - décembre 2018*
- [6] *Rapport Ineris / ADEME - Mesure de la qualité des eaux souterraines à l'aide d'échantillonneurs passifs dans le contexte des sites pollués. Guide de bonnes pratiques* - 2014