

SONDE À INTERFACE MEMBRANAIRE (MIP)

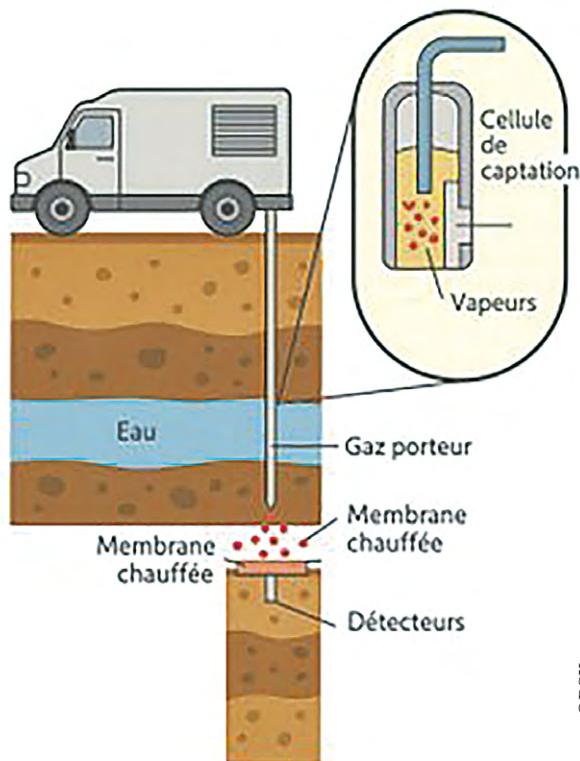
DÉTECTION *IN SITU* EN TEMPS RÉEL DES COV DANS LES SOLS ET LES EAUX SOUTERRAINES

DESCRIPTION DU PRINCIPE DE LA TECHNIQUE

La Sonde à interface membranaire (MIP) est une technique d'analyse semi-quantitative *in situ* sans prélèvement et en temps réel des composés organiques volatils (COV) présents dans les sols ou les eaux souterraines.

La sonde MIP est enfoncée dans le sol à l'aide d'un dispositif direct push. À son extrémité, le dispositif est constitué d'une membrane semi-perméable chauffée en moyenne à 120–130 °C pour favoriser la volatilisation des COV présents dans le sol ou la nappe qui l'entoure. Les vapeurs générées traversent la membrane et sont transportées en surface par un gaz porteur vers un train d'analyse contenant un ou plusieurs détecteurs en fonction des composés ciblés (détecteur à photoionisation (PID), détecteur à ionisation de flamme (FID), détecteur spécifique aux halogénés (XSD)). Les signaux générés sont proportionnels à la concentration des polluants du milieu traversé, mais ne donnent pas une concentration exacte sans calibration spécifique (mesure semi-quantitative). Le système d'acquisition synchronise ces mesures avec la profondeur d'avancement de la sonde pour obtenir un profil vertical, en temps réel, de la distribution des COV présents en profondeur.

Elle permet de localiser précisément et rapidement les sources de pollution, d'identifier les interfaces géologiques impactées et d'orienter les sondages. Le couplage avec des capteurs de conductivité (EC) et de perméabilité (HPT) permet de contextualiser les signaux de pollution dans leur environnement géologique.



©RSK – 2025

Schéma de fonctionnement d'une sonde MIP

CONTEXTE D'UTILISATION

La sonde MIP est adaptée aux contextes où une pollution par des COV est suspectée, en profondeur ou non, dans la zone saturée ou non saturée. Elle est pertinente sur des sites à sources diffuses ou multiples, lorsqu'il est nécessaire d'obtenir une lecture continue du sous-sol pour affiner la compréhension des transferts verticaux et horizontaux ou localiser des poches de pollution résiduelles. Son déploiement est utile dans des environnements contraints où la densité des points d'investigations est limitée (zones urbaines, emprises industrielles actives, sites à accès difficile, etc.), ou lorsque le temps imparti à la caractérisation est réduit.

La sonde MIP est particulièrement adaptée aux terrains meubles à moyennement compacts, présentant une bonne pénétrabilité et une perméabilité modérée à élevée (limons, sables fins à moyens, graves peu compactées...). En revanche, la technique rencontre des difficultés de mise en œuvre dans les formations très compactes ou cémentées qui ralentissent la progression de la sonde. La technique n'est pas adaptée aux terrains graveleux, aux alluvions grossiers (galets et graves grossières), et aux moraines (risque de casse de la tête). Dans un sol très argileux, la faible diffusion des polluants vers la membrane peut limiter la détection des COV. La MIP est régulièrement déployée jusqu'à 15 m dans les terrains

favorables mais nécessite un accès et une logistique compatible avec un véhicule porteur ou une sondeuse embarquée.

À quelle étape ?

La MIP peut être utilisée en phase de diagnostic ou de suivi de chantiers de dépollution, en complément ou en amont de forages carottés. La MIP est adaptée aux phases d'investigations environnementales et de diagnostic initial, pour explorer rapidement la verticalité d'une pollution par COV et guider l'implantation des prélèvements de sol ou la position des ouvrages piézométriques ou de piézairs dans les secteurs présentant les concentrations les plus significatives. Grâce à son acquisition continue, elle permet de localiser des poches résiduelles, de discriminer les interfaces perméables et de cibler les zones à enjeux forts pour les prélèvements *in situ*.

En phase de dépollution, la MIP contribue au suivi de l'efficacité des traitements *in situ*, à la vérification de l'abattement des sources et à l'ajustement opérationnel des systèmes de pompage, d'injection ou de confinement. Son usage est également pertinent pour anticiper les transferts verticaux en aval de travaux et mieux dimensionner les actions correctives.

SONDE À INTERFACE MEMBRANAIRE (MIP)

POLLUANTS CONCERNÉS

La MIP est conçue pour détecter de manière **semi-quantitative** les **COV** présents dans le sol en zone saturée et non saturée avec une limite de détection aux alentours du ppm (sols) et du ppb (eaux). Elle est sensible aux hydrocarbures légers de type **BTEX** (benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes), aux **essences de type naphta**, et aux **solvants chlorés** (trichloroéthylène, perchloroéthylène, etc.). Le **type de détecteur couplé (PID, FID, XSD)** conditionne la nature des composés détectés. Le PID est sensible aux COV

aromatiques et à certains composés oxygénés (ex. : cétones, acétaldéhyde), le FID permet une mesure globale des composés carbonés, et le XSD cible les composés halogénés. L'efficacité de la détection dépend des propriétés physico-chimiques des composés (volatilité, polarité, masse molaire), et leur capacité à traverser la membrane chauffée. Les composés semi-volatils (point d'ébullition > 200 °C) ou peu mobiles peuvent donner un signal atténué ou non détectable.

MATÉRIEL NÉCESSAIRE

La mise en œuvre de la sonde MIP repose sur une **unité d'avancement de type direct push**, généralement embarquée sur un véhicule ou une sondeuse hydraulique, capable d'enfoncer la sonde jusqu'à la profondeur cible sans forage destructif. La sonde, généralement de diamètre 40 mm, comprend une **cellule de chauffage** équipée d'une **membrane perméable** thermorégulée, un **système de transport des vapeurs** par gaz porteur (azote), et un **ensemble de détecteurs embarqués** en surface, logés dans une unité d'analyse. En fonction des cibles recherchées, le dispositif peut coupler un **PID**, un **FID**, voire un **XSD**, selon la nature des polluants recherchés et la configuration choisie. Le système inclut

également une **chaîne d'acquisition numérique** synchronisée avec la profondeur, un **système de calibration** (gaz étalons), et des capteurs optionnels pour le **couplage avec des mesures de conductivité électrique (EC)**. Un couplage avec des mesures de **perméabilité (HPT)** peut permettre de mieux comprendre les couches préférentielles de transfert des polluants ou envisager une éventuelle dépollution par pompage ou injection.

Un **opérateur formé est indispensable** pour assurer la calibration, le suivi en temps réel des signaux, la gestion des interférences, et l'entretien régulier des composants sensibles (filtres, lampes, lignes).

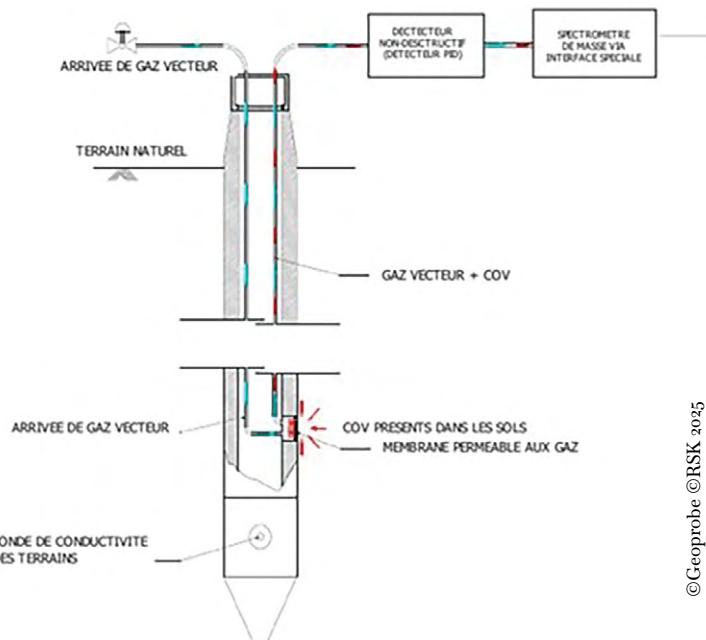


Schéma du dispositif pour l'usage d'une sonde MIP

MÉTHODOLOGIE

Études préalables

La détection des **COV** par **MIP** dépend de la **volatilité** des composés. Les **familles de polluants ciblés doivent donc être préalablement identifiées** afin d'anticiper leur compatibilité avec les détecteurs disponibles. La diffusion des **COV** vers la membrane du MIP peut être limitée dans un sol peu perméable (argileux, ou compact), ce qui peut affecter la détection. La

présence de structures influençant les transferts verticaux et horizontaux des polluants doivent être connues de même que la présence d'une nappe, sa profondeur, et le sens d'écoulement pour positionner au mieux les sondages. Il s'agit aussi d'anticiper la **nature des sols et leur compacité**, car la progression de la sonde peut être limitée ou à éviter en présence de matériaux trop durs ou de structures enterrées intercalaires. Des **tests**

préliminaires sur un ou deux points pilotes peuvent permettre de valider l'application de la technique. Il est important de **s'assurer de l'accessibilité des zones à investiguer** par un véhicule porteur ou une sondeuse hydraulique, et prévoir les mesures de sécurité associées (détection réseaux, ATEX si besoin).

Calibration

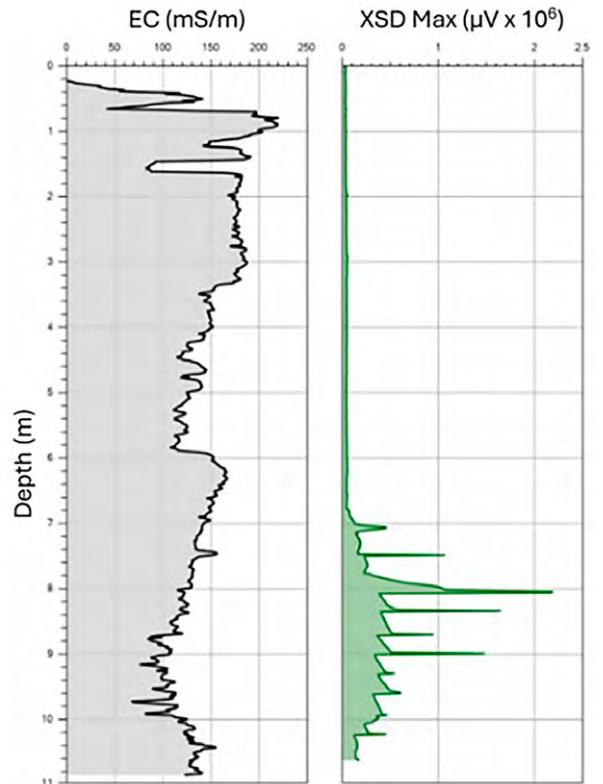
La qualité des données produites par la MIP repose sur une **calibration rigoureuse** du système de détection. Avant et après chaque sondage, la sonde, la membrane, la ligne de corps et les détecteurs doivent faire l'objet de tests à l'aide de solutions standardisées contenant un composé cible ou des gaz étalons. Les détecteurs embarqués (PID, FID, XSD) peuvent être étalonnés à l'aide de **gaz standards de concentration connue** (ex. : mélanges d'isobutylène, de méthane, etc. selon le détecteur utilisé). La calibration se déroule en surface, sur l'unité d'analyse, en injectant le gaz étalon dans le circuit pour ajuster la réponse du capteur à une valeur de référence. Une vérification à l'air ambiant propre (blanc avec bouteille de gaz d'air ou d'azote synthétique certifiée sans COV) est recommandée afin de s'assurer de l'absence de dérive ou de pollution résiduelle du système. Cette opération permet de garantir la **comparabilité des profils** entre plusieurs points et de détecter d'éventuelles anomalies de fonctionnement (dérive du signal, saturation, interférence). Ces étapes doivent être consignées dans le journal de terrain.

Mise en œuvre

La sonde est **progressivement enfoncée dans le sol** par enfoncement statique (direct push), à une vitesse de 1 à 2 cm/s afin de permettre à la membrane d'atteindre sa température maximale et de capter le maximum de polluants volatils à chaque intervalle d'arrêt. La membrane chauffée entre alors en contact avec les milieux traversés, favorisant la volatilisation des COV environnants. Ces composés diffusent à travers la membrane et sont transportés par un flux d'azote vers les détecteurs situés en surface. Les **données sont acquises en continu**, synchronisées avec la profondeur, et restituées sous forme de profils verticaux. La vitesse d'avancement, la température de la cellule, et le débit du gaz porteur sont surveillés en temps réel pour garantir la stabilité du signal. En cas de pollutions concentrées, un **déttergent adapté (Alconox)** ou un **débit d'azote** peuvent être utilisés pour nettoyer l'ensemble du matériel entre les sondages. **Les tests doivent être réalisés avant et après chaque sondage** (blanc, test de fin de sonde) afin de confirmer l'absence de dérive instrumentale, ou de pollutions croisées.

Analyse/Interprétation des résultats

Les résultats se présentent sous forme de **profils verticaux d'intensité de signal**, exprimés en mV ou mV/s pour chaque détecteur. Ces signaux traduisent une présence potentielle de COV à différentes profondeurs, **mais ne correspondent pas à une concentration absolue mais semi-quantitative en polluants du milieu. Le signal est proportionnel à leur(s) présence(s)**. L'interprétation des données brutes repose sur le contexte géologique et hydrogéologique et sur la **comparaison des signaux entre détecteurs**, leur position dans la stratigraphie et leur recouplement avec les profils de conductivité (EC) ou de perméabilité (HPT).



©Géoprobe

Profil MIP montrant à gauche la conductivité électrique (EC) du sol et à droite, les signaux d'un détecteur MIP-XSD

L'analyse doit tenir compte des **limites de détection spécifiques**, des éventuelles interférences entre composés (mélanges complexes), ainsi que des effets d'atténuation liés à la nature du sol (porosité, humidité, compacité). L'interprétation finale doit être confrontée à des analyses de confirmation en laboratoire sur des échantillons prélevés a posteriori aux profondeurs ciblées et, pour certains points, dans les matrices dédiées (sols, gaz du sol, eaux souterraines).

Les profils MIP permettent d'établir une cartographie des panaches de pollution, pour définir des volumes d'excavation ou orienter des forages destructifs.

Points de vigilance :

- Il n'est pas possible d'identifier précisément les COV détectés en cas de mélange,
- La mesure est semi-quantitative,
- Chaque détecteur a ses propres **plages de sensibilité** et peut réagir différemment selon les propriétés du ou des composés,
- La technique est **peu adaptée aux formations compactes ou cémentées** (risque de casse),
- Une **humidité élevée des sols (>85 %)**, une **température proche de 0°C**, ou une **perméabilité faible** peuvent réduire la volatilisation des COV et limiter leur détection,
- Les profils MIP doivent être recoupés avec d'autres données (ex. : analyses, sondages, etc.),
- La présence de produits purs peut saturer la membrane MIP, altérer la sonde et fausser les résultats mesurés.



AVANTAGES – INCONVÉNIENTS – RETOURS D'EXPÉRIENCES

AVANTAGES

Polluants

- Différents capteurs sont disponibles en fonction de la famille de COV ciblée.

Mise en œuvre

- Mobilisable en une journée (6 sondages MIP ≤ 10 m peuvent être réalisés par jour),
- Fonctionne de manière autonome depuis un véhicule ou une plate-forme,
- Ne nécessite aucun prélèvement.

Résultats

- Produit un profil vertical continu de la présence de COV,
- Pas de délais d'analyse (mesure en temps réel),
- Couplage possible avec d'autres capteurs HPT (perméabilité) et EC (conductivité) pour faciliter la compréhension des mécanismes de transfert des polluants,
- Permet, en phase de diagnostic avec l'acquisition d'informations sur site en temps réel, de mieux définir l'extension d'une zone source et de pollution concentrée.

INCONVÉNIENTS

Polluants

- Limiter aux polluants les plus volatils (point d'ébullition inférieur à 200 °C).

Mise en œuvre

- Nécessite un accès au site compatible avec l'utilisation d'un dispositif de type direct push,
- Peu adaptée aux sols consolidés (sols compacts, alluvions très grossières, etc.),
- Coût de mobilisation significatif en cas d'intervention sur un nombre limité de sondages ou si les conditions d'accès sont complexes.

Résultats d'interprétation

- Ne permet ni l'identification exacte ni la quantification directe des composés,
- L'interprétation des signaux nécessite des recoupements par des analyses ciblées.

RETOURS D'EXPÉRIENCE :

Les campagnes réalisées en contexte industriel (anciens ateliers de dégraissage, zones de stockage d'hydrocarbures) ou dans le cadre de projets de réhabilitation urbaine ont démontré la **pertinence de la MIP pour localiser des sources en zone saturée**, orienter des piézomètres, des piézaires ou des essais de pompage ou optimiser la stratégie de dépollution. Elle a également parfois permis de détecter des poches de DNAPL non repérées par des sondages classiques, et d'éviter des implantations inutiles de forages profonds. La MIP s'est révélée être un bon outil pour visualiser en 2D ou 3D les panaches de polluants, et caler des modèles hydrodynamiques et hydrodispersifs. Cependant, l'interprétation des signaux en présence de mélanges complexes ou de matrices hétérogènes peut être délicate. Enfin, en raison du coût élevé de la prestation, la MIP est souvent réservée à des sites à enjeux ou à des phases exploratoires bien ciblées.

DÉLAIS DE MISE EN ŒUVRE

Une fois le matériel acheminé et les tests de calibration réalisés (quelques heures), la sonde peut être **opérationnelle en 1 heure**. 50 à 80 m linéaires peuvent être sondés par jour pour une équipe aguerrie. Le délai varie selon la profondeur, le nombre de sondages et la nature du terrain et la distance entre les points de sondage. Les résultats sont directement visualisables sur site pour une première **interprétation immédiate**. Un traitement approfondi des données (croisement

MIP/HPT/EC, intégration au modèle du site) peut être réalisé dans les jours qui suivent.

PHASE INVESTIGATIONS ANALYSE ET TRAITEMENT

Délai associé ☒ ☒

☒: jour / ☒☒: semaine / ☒☒☒: mois

ÉLÉMENTS DE COÛTS

La technique présente un **coût unitaire élevé** lié à la logistique embarquée (véhicule porteur, instrumentation, personnel spécialisé) et au matériel de détection. Le coût journalier se situe entre **2 500 et 4 500 € HT**, incluant l'analyse, le matériel, les opérateurs et le traitement des résultats. Ce coût peut être compensé par une **réduction du nombre de sondages destructifs**, le **ciblage précis des forages** à instrumenter dans le contexte de zones étendues

ou complexes, l'**accélération de la phase d'étude** ou un gain de temps dans certains chantiers.

PHASE INVESTIGATIONS ANALYSE ET TRAITEMENT

Coût associé €€ > €€€ €€

€ < 100 € / €€ < 1 000 € / €€€ > 1 000 €

POUR EN SAVOIR PLUS - RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BRGM RP-70001-FR (2023) – Techniques d'investigation innovantes en SSP – outils *in situ* et mesures en continu
 [2] Geoprobe Systems (2013) – Membrane Interface Probe Technical Guide & Operating Principles
 [3] Arcilla (2020) – Fiche présentation MIP-HPT