



Suivi *in situ* de l'ANC :

Protocole d'échantillonnage pour les filières traditionnelles non drainées d'ANC

RAPPORT FINAL

Céline GIBELIN (Cerema, direction territoriale Ile de France)
Philippe BRANCHU (Cerema, direction territoriale Ile de France)

Décembre 2017

Document élaboré dans le cadre du PANANC

Partenariat

Protocole d'échantillonnage pour les filières traditionnelles non drainées d'ANC

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
1	22/02/18	

Affaire suivie par

Céline GIBELIN - Département Ville Durable – Unité Eau
Tél. : 06 60 38 66 85 /
Courriel : celine.gibelin@cerema.fr
Site de Trappes : Cerema Ile-de-France – 12 rue Teisserenc de Bort, 78190 Trappes-en-Yvelines

Références

n° d'affaire :

Maître d'ouvrage : AFB (Claire Leval)

Devis n° xx/xxx du jj/mm/aaaa

Rapport	Nom	Date	Visa
Établi par	Céline GIBELIN	22/02/18	
Avec la participation de	Philippe BRANCHU		
Contrôlé par			
Validé par	Jean GABER	23/02/18	

Conditions de diffusion :

Notice (jusqu'au sommaire inclus)	diffusable non diffusable
Rapport d'étude	libre (document téléchargeable librement) contrôlé (celui qui en veut communication doit en faire la demande et obtenir l'autorisation et les conditions d'usage auprès du commanditaire) confidentiel (document non diffusable)

Droits

Ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans autorisation expresse de :

Crédits photos – illustrations :

Contexte de programmation et de réalisation

L'arrêté du 7 mars 2012, modifiant l'arrêté du 7 septembre 2009, fixe les prescriptions techniques applicables aux installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO₅. Ces arrêtés techniques modifient grandement les possibilités techniques offertes à toute personne ou groupement de personnes de moins de 20 habitants, ayant besoin de s'équiper ou de réhabiliter une filière d'épuration.

La réglementation décline, par son article 6 et ses articles 7 et 8 deux grandes possibilités de prescriptions techniques.

L'article 6, qui s'applique aux « *installations de traitement par le sol en place ou par massif reconstitué* » concerne les filières qualifiées par nombre de techniciens comme « classiques » ou « traditionnelles ». Il s'agit des épandages sur sol en place et des différentes formes de filtres à sable. Il ne génère pas d'évolutions majeures.

Les articles 7 et 8 autorisent désormais l'installation de dispositifs agréés par les ministères en charge de l'ANC (ministères en charge de l'environnement et de la santé) et décrivent la procédure d'évaluation à appliquer pour obtenir cet agrément. De nombreux constructeurs se sont donc lancés dans des procédures d'agréments.

Afin de pouvoir juger des performances réelles des différentes filières installées, un travail de suivi in situ a été engagé ces dernières années par différents acteurs publics sur le territoire national, afin d'alimenter la base de données du Groupe National Public du suivi in situ de l'assainissement non collectif. Ce suivi s'est concentré pour des raisons pratiques de métrologie aux filières drainées, qu'elles soient « traditionnelles » ou agréées.

Ce document consiste en une proposition de protocole de suivi qui pourrait s'appliquer aux filières « traditionnelles » non drainées.

Les auteurs

Céline Gibelin

Responsable de l'Unité Eau – Cerema Ile de France

Email : celine.gibelin@cerema.fr

Philippe Branchu

Responsable programme transversal Gestion durable du sol et de l'eau – Cerema Ile de France

Email : philippe.branchu@cerema.fr

Les correspondants

Onema : Claire Leval, email : claire.leva@afbiodiversite.fr, Agence Française pour la Biodiversité

Cerema : Céline Gibelin, email : celine.gibelin@cerema.fr, Cerema direction territoriale Ile de France

Droits d'usage :	<i>Usage interne</i>
Couverture géographique :	<i>National</i>
Niveau géographique	<i>National</i>
Niveau de lecture	<i>Professionnels, experts,</i>
Nature de la ressource :	<i>décideurs</i>
	<i>Rapport final</i>

Suivi *in situ* de l'ANC :
Protocole de suivi des filières non drainées
Rapport final

Résumé

L'arrêté du 7 mars 2012, modifiant l'arrêté du 7 septembre 2009, fixe les prescriptions techniques applicables aux installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO₅. Ces arrêtés techniques modifient grandement les possibilités techniques offertes à toute personne ou groupement de personnes de moins de 20 habitants, ayant besoin de s'équiper ou de réhabiliter une filière d'épuration.

La réglementation décline, par son article 6 et ses articles 7 et 8 deux grandes possibilités de prescriptions techniques.

L'article 6, qui s'applique aux « *installations de traitement par le sol en place ou par massif reconstitué* » concerne les filières qualifiées par nombre de techniciens comme « classiques » ou « traditionnelles ». Il s'agit des épandages sur sol en place et des différentes formes de filtres à sable. Il ne génère pas d'évolutions majeures.

Les articles 7 et 8 autorisent désormais l'installation de dispositifs agréés par les ministères en charge de l'ANC (ministères en charge de l'environnement et de la santé) et décrivent la procédure d'évaluation à appliquer pour obtenir cet agrément. De nombreux constructeurs se sont donc lancés dans des procédures d'agréments.

Afin de pouvoir juger des performances réelles des différentes filières installées, un travail de suivi *in situ* a été engagé ces dernières années par le Groupe National Public de suivi *in situ* de l'assainissement non collectif. Ce travail s'est, pour des raisons pratiques de métrologie focalisé sur les filières drainées, qu'elles soient « traditionnelles » ou agréées. Il est cependant important d'avoir un retour d'expérience sur les filières « traditionnelles » non drainées, c'est à dire celles avec un rejet diffus dans le sol.

Ce document propose sur la base d'une revue bibliographique, un protocole d'échantillonnage des eaux diffusées dans le sol pour les filières traditionnelles non drainées.

Mots clés

Suivi in situ, eaux usées traitées, filières traditionnelles non drainées, sol, protocole.

SOMMAIRE

1. Introduction.....	7
2. L'eau dans le sol.....	8
3. Prélèvements d'eau dans le sol.....	8
3.1 Lysimètres.....	9
3.2 Les bougies poreuses.....	9
3.3 Les plaques poreuses.....	10
3.4 Choix du matériau.....	11
3.5 Prélèvement ponctuel ou en continu.....	11
4. Mesures de l'état de l'eau dans le sol.....	12
4.1 Tension de l'eau dans le sol.....	12
4.2 Mesures de la teneur en eau dans le sol.....	12
5. Mise en œuvre dans la bibliographie.....	13
6. Cartographie du sous-sol.....	13
6.1 Conductimétrie électromagnétique.....	13
6.2 Mesure géophysique de la résistivité électrique.....	14
6.2.1 Description de la méthode.....	14
6.2.2 Exemples d'utilisation et de mise en œuvre.....	16
6.2.3 Intérêts des méthodes géophysiques.....	17
7. Proposition de protocole.....	17
7.1 Cartographie du site.....	17
7.2 Instrumentation du site.....	17
7.3 Différents cas envisagés.....	18
8. Conclusion.....	21
Bibliographie.....	22
Table des illustrations.....	23
Figures.....	23
Tableaux.....	23

Remerciements

- Cerema Ile de France : David Ramier
- IRSTEA : Vivien Dubois

Glossaire et abréviations

ANC : Assainissement Non Collectif
DBO5 : Demande Biologique en Oxygène à 5 jours
DCO : Demande Chimique en Oxygène
ERT : Electrical Resistivity Tomography
FDR : Frequence Domain Reflectometry
GNP : Groupe National Public
MES : Matières En Suspension
NH4+ : azote ammoniacal
NO3- : nitrates
NTK : azote kjeldahl
PANANC : Plan d'Actions Nationales de l'Assainissement Non Collectif
PO43- : phosphates
PT : Phosphore Total
SPANC : Service Public d'Assainissement Non Collectif
TDR : Time Domain Reflectometry

1. Introduction

Inscrit dans les priorités du Plan d'Actions Nationales de l'Assainissement Non Collectif (PANANC), un suivi in situ d'installations d'assainissement non collectif a été réalisé de 2011 à 2016 par le Groupe National Public du suivi in situ de l'assainissement non collectif (GNP). Il a fait l'objet d'un rapport publié en septembre 2017 (Boutin *et al.*, 2017). Cette étude, coordonnée par l'IRSTEA, a consisté à évaluer plus de 200 installations équipées de dispositifs drainés traditionnels – ou classiques - (filtre à sable) et de dispositifs agréés. Les filières traditionnelles non drainées, c'est-à-dire les installations avec traitement par le sol en place ou par un massif reconstitué (cf. figures 1 et 2), ne faisaient donc pas partie du panel étudié.

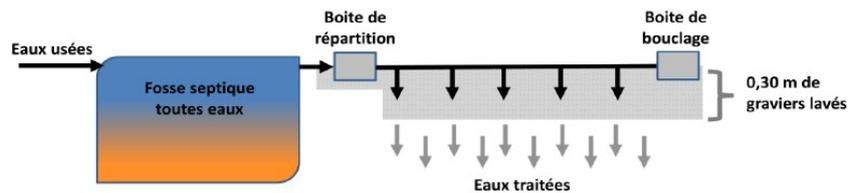


Figure 1 : fosse et épandage souterrain dans le sol en place (MEDDE, 2012)

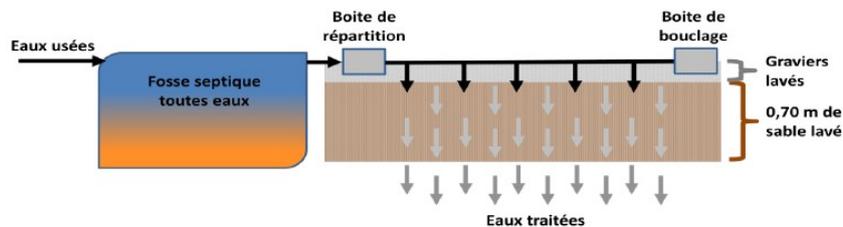


Figure 2 : lit filtrant vertical non drainé (MEDDE, 2012)

L'assainissement non collectif concerne 15 à 20% de la population française et les filières traditionnelles représentent la majorité des installations du parc français. Pour compléter l'évaluation des systèmes d'ANC à disposition des propriétaires non raccordés au réseau public d'assainissement, il apparaît nécessaire de compléter l'étude précédente du GNP en s'intéressant aux performances des filières traditionnelles non drainées.

Dans ces filières, le sol a la particularité d'être utilisé à la fois comme système de traitement (sol en place ou reconstitué) et comme système d'évacuation des eaux. Le rejet dans le sol est diffus et la plupart du temps enterré, et en cela, plus compliqué à instrumenter qu'un rejet ponctuel localisé. L'objectif de ce présent rapport est de compiler, à partir d'une étude bibliographique, les éléments nécessaires à l'instrumentation de sites à rejet diffus dans le sol pour aboutir à l'élaboration d'un protocole permettant le suivi *in situ* de filières traditionnelles d'assainissement non collectif non drainées.

Les installations d'assainissement non collectif sont mises en œuvre chez les particuliers qui n'ont pas accès à un réseau d'assainissement pour l'évacuation de leurs eaux usées vers un dispositif de traitement centralisé (station de traitement des eaux usées). Le matériel permettant les mesures et les prélèvements d'eau seront donc installés en domaine privé. De ce fait, les instruments choisis doivent dans la mesure du possible être robustes, nécessiter une maintenance limitée et ne pas impliquer de nuisances inacceptables pour le particulier (impact visuel trop important, matériel nécessitant une présence accrue chez le particulier ou des remaniements de terrain excessifs...).

L'objectif du protocole est de pouvoir aboutir à la réalisation de prélèvements permettant une analyse qualitative des effluents percolés voire d'une estimation quantitative des flux d'eau à travers le sol. En premier lieu, ce rapport présente des éléments d'étude bibliographique ; d'abord sur l'état de l'eau dans le sol, puis sur les méthodes de prélèvements d'eau et les mesures de l'état de l'eau dans le sol et enfin sur des méthodes géophysiques pour la cartographie du sol. En second lieu, un protocole, associant les différentes technologies détaillées précédemment est proposé.

2. L'eau dans le sol

A l'interface atmosphère/sol, l'eau peut avoir différents comportements : le ruissellement en surface, l'évaporation ou l'infiltration. La teneur en eau d'un sol est fonction de la porosité et de la perméabilité du sol. Le volume maximal d'eau qu'un sol peut retenir (capacité de rétention du sol) dépend essentiellement de sa granulométrie.

Une fois qu'elle a pénétré dans le sol, l'eau est soumise à différents phénomènes : l'évapotranspiration, les forces de capillarité, la gravité.

Ainsi, dans le sol, plusieurs types d'eau sont définis en fonction de l'intensité des forces qui lient l'eau aux grains de sol (cf. figure 3) :

- l'eau de constitution des minéraux (eau totalement indisponible),
- l'eau fortement adsorbée à la surface des colloïdes minéraux et organiques et qui est solidaire des grains,
- l'eau de rétention capillaire (ou réserve hydrique du sol) présente dans les micropores du sol (eau qui peut s'évaporer mais qui ne percole pas),
- l'eau libre ou gravitaire qui remplit les macropores du sol, percole et s'infiltré jusqu'à la nappe. La circulation de cette fraction d'eau dans le sol dépend de la porosité et de la perméabilité du sol (Musy *et al.*, 1991).

Les prélèvements d'eau à réaliser dans le cadre du protocole à définir visent donc l'eau gravitaire et dans une moindre mesure l'eau de rétention capillaire.

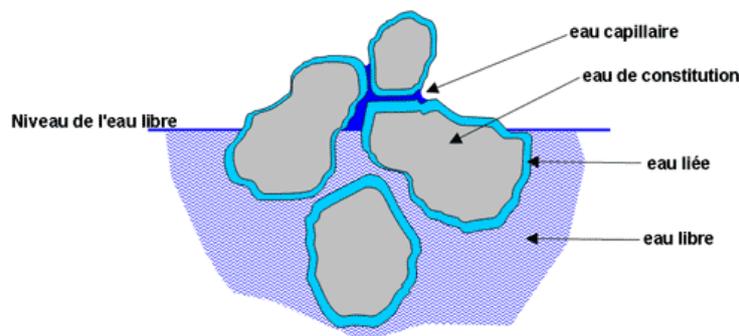


Figure 3 : les formes de l'eau dans le sol, une vue schématique (Musy *et al.*, 1991)

3. Prélèvements d'eau dans le sol

Les prélèvements d'eau dans le sol se font traditionnellement avec différents instruments : lysimètre, bougie poreuse, plaque poreuse... Les techniques permettant les prélèvements d'eau dans le sol ont pour certaines, fait l'objet d'un développement depuis plusieurs décennies. Le présent rapport n'est pas exhaustif quant aux différents types d'instruments existants. Il tend à décrire ceux majoritairement rencontrés pour répondre aux questions hydrologiques et hydrauliques dans le sol, notamment pour l'étude d'installations d'assainissement non collectif.

3.1 Lysimètres

La méthode lysimétrique a pour objet de réaliser un bilan entrée-sortie des composés minéraux ou organiques sur une colonne verticale de sol dont le volume est parfaitement connu (Muller, 1996). Un

lysimeètre est une cuve étanche dans laquelle un sol est mis en place de manière la moins remaniée possible (cf. figure 4). La face supérieure de la cuve est exposée à des agents (atmosphériques par exemple), alors que les faces latérales empêchent tout échange avec l'extérieur. La face inférieure, drainée, permet de récupérer la solution évacuée (Müller, 1996).

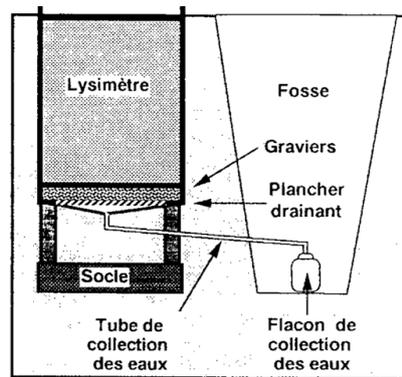


Figure 4 : éléments constitutifs d'un lysimètre (Muller, 1996)

3.2 Les bougies poreuses

Les bougies poreuses (cf. figure 5) sont formées d'une cupule cylindrique creuse, placée dans un tube fermé hermétiquement par un bouchon par lequel passent un ou deux tubes capillaires. La cupule est composée d'un matériau poreux, supposé inerte chimiquement (par exemple de la céramique, du PTFE, du quartz, de l'incox...). L'extraction de la solution du sol s'effectue par application d'une dépression à l'intérieur de la bougie poreuse. La dépression est créée par une pompe (à main ou électrique).

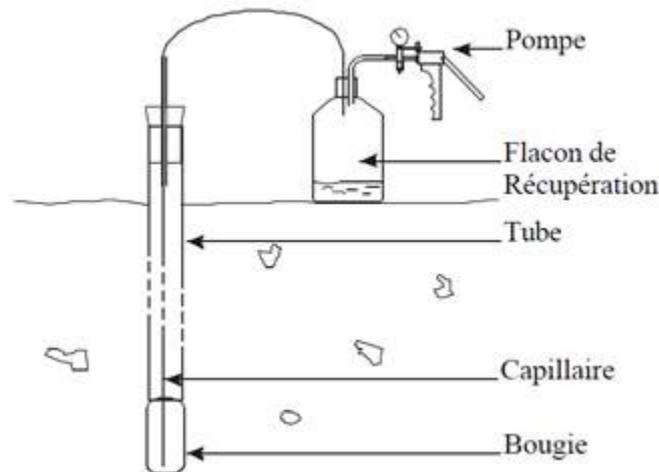


Figure 5 : schéma de mise en œuvre d'une bougie poreuse (Bès et Sévenier, 1999)

Les bougies sont différenciées par leur diamètre de pores, ce qui conditionne la pression d'entrée d'air, c'est-à-dire la pression à partir de laquelle l'air force son chemin à travers la paroi poreuse humectée. La dépression appliquée à une bougie poreuse en place dans le sol devra donc rester inférieure à cette pression d'entrée d'air (Bès et Sévenier, 1999).

La gamme de dépression utilisée le plus fréquemment est comprise entre 0.3 et 0.8 bar (Müller, 1996). Pour un prélèvement dans la zone non saturée, il est nécessaire d'appliquer dans la bougie poreuse une dépression supérieure à la tension du sol pour que le gradient de charge créé entraîne un écoulement du sol vers le capteur (Müller, 1996). Pour prendre en compte l'hétérogénéité spatiale de répartitions des flux dans le sol, il est nécessaire d'installer un nombre suffisant de capteurs (Müller, 1996).

Cette technique présente l'avantage d'être peu coûteuse et facile à mettre en œuvre. Les bougies ne perturbent que de façon minimale le sol en place. Elles doivent par contre être installées à l'avance par rapport au prélèvement. Elles ne prélèvent que l'eau déplacée par la dépression exercée. Les bougies

peuvent être installées de manière verticale ou horizontale. L'implantation verticale est la version la plus courante. Plus facile, elle présente néanmoins le risque de générer des écoulements verticaux préférentiels le long de la canne. La mise en œuvre horizontale évite les écoulements préférentiels (Muller, 1996). Le soin apporté à la mise en place d'une bougie détermine la qualité et la durabilité de son fonctionnement. Pendant la mise en place, il faut éviter tout tassement du matériau pouvant entraîner une baisse de conductivité dans la zone mais il faut aussi assurer un bon contact entre le sol et la paroi du capteur (Muller, 1996), par une « boue » créée à partir du sol en place. Le sol doit être filtrant, ni trop argileux ni trop caillouteux. Par ailleurs, les bougies se colmatent progressivement, elles doivent donc éventuellement être remplacées (par exemple, une diminution de la conductivité hydraulique de 20 fois a pu être observée après un séjour de 8 semaines sur le terrain) (Bès et Sévenier, 1999). Enfin, l'utilisation de bougies pose la question de la représentativité de la solution échantillonnée. L'extraction de solution se faisant sur un faible volume de sol il est possible qu'elle ne permette pas de caractériser d'éventuels écoulements préférentiels. Il est ainsi généralement conseillé d'en disposer plusieurs à un même niveau pour appréhender cette question.

Les bougies ne permettent pas de faire directement des estimations de flux ; elles doivent donc être associées à d'autres instruments type tensiomètres et sondes d'humidité.

3.3 Les plaques poreuses

Les plaques poreuses sont conçues pour extraire l'eau du sol sur des surfaces plus importantes que les bougies. Une plaque poreuse est composée d'une plaque en matériau poreux (céramique, nylon, acier inoxydable fritté, plastique, verre) insérée dans un cadre et reliée à un tube pour le prélèvement de la solution (Weihermüller *et al.*, 2007). Le principe de fonctionnement est similaire à celui d'une bougie, mais avec une zone d'interception plus grande (cf. figure 6).

Les plaques poreuses sont sélectionnées pour avoir une valeur d'entrée d'air plus faible que le potentiel de la matrice sol/eau qui doit être investiguée (Cooper, 2016).

Il est possible ou non d'appliquer une tension à la plaque. L'absence de tension tend à la formation d'une zone saturée au-dessus de la plaque ce qui entraîne une divergence des flux au niveau de la plaque et une sous-estimation des flux réels mais aussi une influence sur la concentration des solutés dans l'échantillon. L'application d'une tension constante à la plaque aboutit également à une perturbation de l'écoulement car la tension matricielle du sol évolue et finit par être différente de la tension appliquée à la plaque. Pour limiter les perturbations d'écoulement, il est possible d'appliquer une tension équivalente à celle du sol, en associant le fonctionnement de la plaque poreuse à des tensiomètres positionnés à la même profondeur que la plaque (Weihermüller, *et al.*, 2017).

Figure 6 : schéma d'un système de prélèvement avec plaque poreuse (Cooper, 2016)

L'inconvénient majeur de la plaque poreuse est associé à son installation. Elle doit être installée latéralement à partir d'une fosse ou une tranchée ou directement dans la parcelle à étudier en excavant une partie du sol qu'il faut ensuite replacer en limitant au maximum les remaniements. Dans le cas d'une mise en place latérale, le tunnel d'installation doit avoir un plafond plat pour maximiser la surface de contact avec la plaque poreuse (Cooper, 2016).

Les plaques poreuses ont par contre l'avantage d'intercepter une surface plus importante que les bougies par exemple. Elles permettent ainsi de détecter plus facilement les écoulements préférentiels et d'extraire des volumes d'eau plus importants. Moyennant un asservissement de la dépression à l'état de l'eau dans le sol, le volume collecté par une plaque poreuse est considéré comme proche du flux intégré sur la surface de la plaque et de la durée de collecte (Cooper, 2016).

Des fournisseurs proposent des plaques qui peuvent être connectées les unes aux autres pour permettre d'établir une zone de prélèvement de la taille souhaitée (cf. figure 7). Selon les modèles, les plaques peuvent être installées verticalement ou horizontalement selon le flux d'eau à intercepter.

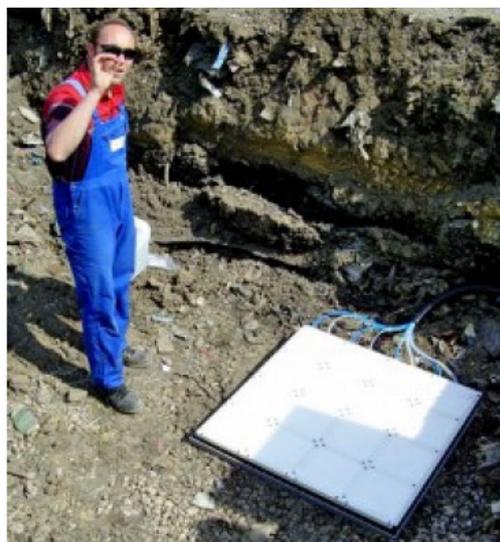


Figure 7 : plaque poreuse en plastique ecoTech d'ICT international (à gauche : élément individuel ; à droite : association de 16 éléments)

3.4 Choix du matériau

Le matériau constituant le milieu poreux à travers lequel la solution aqueuse est prélevée, a une grande importance. Il doit être choisi en fonction notamment des substances à étudier dans les prélèvements d'eau. En effet, beaucoup de solutés dans le sol montrent des propriétés de sorption spécifique quand ils sont mis en contact avec différents matériaux (ecoTech).

Le tableau suivant présente les matériaux à utiliser préférentiellement pour des plaques poreuses en fonction des paramètres à analyser.

Tableau 1 : pertinence des matériaux de plaques poreuses au regard des substances à étudier (ecoTech)

Solutés	Ceramic	Glass	Plastics
Pesticides, DOC	-	++	-
Phosphate	--	++	++
Nitrate, chloride, bromide, sulfate, sodium	++	++	++
Heavy metals	--	-	++

3.5 Prélèvement ponctuel ou en continu

Deux types de prélèvements peuvent être envisagés pour l'eau du sol par l'intermédiaire d'une bougie ou d'une plaque poreuse :

- prélèvement ponctuel : dans ce cas, les échantillons peuvent être recueillis au moyen d'une pompe manuelle ;
- prélèvement continu : dans ce cas, l'installation d'une petite pompe électrique sera nécessaire (pompe péristaltique par exemple).

Dans le cas des lysimètres, les échantillons prélevés en sortie de la plaque drainante sont généralement représentatifs d'un laps de temps plus ou moins long.

4. Mesures de l'état de l'eau dans le sol

La mesure de l'état de l'eau dans le sol est un moyen de calculer les flux d'eau. Elle se base sur deux paramètres principaux : la tension et la teneur en eau du sol.

4.1 Tension de l'eau dans le sol

Les forces de capillarité entre les grains du sol et la tension superficielle du film d'eau autour des grains déterminent un potentiel de matrice qui tend à retenir l'eau et peut être mesuré avec un tensiomètre. La succion d'un sol dépend de sa texture, de la taille des pores et de la quantité d'eau contenue par rapport à sa capacité de rétention.

Les mesures de tension d'eau dans le sol permettent de déterminer la force de rétention de l'eau par le sol. Cette tension mesurée à l'aide d'un tensiomètre ou d'une sonde tensio-électrique est une pression inférieure à la pression atmosphérique. La tension exercée par le sol sur l'eau influence la disponibilité de l'eau et sa capacité à circuler dans le sol.

Le tensiomètre est constitué d'un cylindre de plastique creux muni à la base d'une bougie poreuse, relié à une centrale d'acquisition qui enregistre la pression à l'intérieur du cylindre. Le tensiomètre est enfoui dans le sol de façon à ce que la bougie soit placée à la profondeur de mesure voulue. Lorsque le sol s'assèche, l'eau diffuse à travers la bougie poreuse vers le sol. Comme le tube est étanche, il se crée alors une tension qui est enregistrée par la centrale d'acquisition. Plus les valeurs de tension sont élevées, plus le sol est sec. Lorsque le sol est saturé, la tension est nulle (Bergeron, 2005). Les tensiomètres permettent une mesure en continu de la tension de l'eau dans le sol. Ils sont souvent utilisés en association avec des instruments de prélèvements d'eau dans le sol, comme les bougies ou les plaques poreuses.

4.2 Mesures de la teneur en eau dans le sol

La teneur en eau dans le sol peut être mesurée avec plusieurs techniques (Radcliffe *and al.*, 2010) :

- méthode gravimétrique : cette méthode destructive consiste à passer au four à 105°C un échantillon de sol et à comparer sa masse initiale et sa masse après séchage pour en déduire la masse d'eau.
- méthode par sonde à neutrons : méthode extrêmement chère et réglementée du fait de l'utilisation de source radioactive. Dans le cas d'étude présent, les installations étant mises en place chez des particuliers, cette technique est de toute façon éliminée par principe.
- méthode par mesure de la conductivité électrique : cette méthode est très peu précise, elle est fortement influencée par la nature et la salinité des sols
- méthode capacitive : il s'agit d'une mesure de la permittivité diélectrique Cette méthode est bien adaptée aux petits volumes de sol.
- méthode TDR (Time Domain Reflectometry) : cette méthode est basée sur la détermination du temps de propagation d'une onde électromagnétique le long d'une électrode placée dans le sol. Le temps de propagation de cette onde est dépendant de l'humidité dans le sol (mesure de la permittivité diélectrique). Le volume d'influence de cette technique est supérieur à celui des techniques capacitives. La mesure est faiblement influencée par la température, la salinité et le type de sol. Les sondes TDR peuvent être installées verticalement et horizontalement (dans une fosse). Localement, les sondes TDR permettent des mesures raisonnablement précises (Brunet *et al.* 2010).
- méthode FDR (Frequency Domain Reflectometry) : basées sur un fonctionnement similaire aux sondes TDR, les sondes FDR déterminent la différence entre la fréquence de l'onde émise et celle de l'onde réfléchi par le sol, qui dépend de la teneur en eau du sol.

Toutes les sondes précédemment listées ont pour objectif de mesurer la permittivité du sol. Elles doivent toutes être étalonnées avec le sol qui fait l'objet de l'expérimentation. Elles sont plus ou moins sensibles à la salinité et la température et doivent être installées avec soin pour limiter les perturbations du sol.

Les sondes capacitives permettent de mesurer de faibles volumes (il existe de petites sondes) et surtout elles ne sont pas chères. Cependant, elles sont aussi moins précises que les sondes TDR ou FDR, qui mesurent quant à elles un volume plus important mais sont aussi plus onéreuses.

5. Mise en œuvre dans la bibliographie

La bibliographie montre souvent une association de plusieurs types d'instruments pour étudier les installations d'assainissement non collectif ayant le sol comme exutoire.

Ainsi, Gill *et al.* (2009) et O’Luanaigh *et al.* (2012) ont utilisé des systèmes de prélèvement associés à des tensiomètres pour étudier des installations d’ANC utilisant des tranchées d’infiltration. Dans le cas étudié par O’Luanaigh *et al.* (2012), des bougies ont été installées le long de tranchées, à différentes profondeurs (0.35 – 0.65 – 0.95m). Sur une des tranchées, des tensiomètres ont été mis en place aux mêmes profondeurs pour permettre la mesure de la tension hydrique. Les bougies ont aussi été utilisées par Yang *et al.* (2017) pour l’étude du transfert des micropolluants de fosses septiques à la nappe phréatique à travers trois systèmes d’épuration (goutte à goutte, tranchée de gravier, système de traitement de l’azote)

Les systèmes de prélèvement doivent être installés de manière soignée dans un sol non perturbé pour éviter la création d’écoulements préférentiels et s’assurer qu’ils sont localisés dans le panache des effluents (Gill *et al.*, 2009).

La veille du prélèvement (Gill *et al.*, 2009) voire 48h avant (Yang *et al.*, 2017), les systèmes de prélèvement sont dépressurisés à l’aide d’une pompe à vide manuelle (Gill *et al.*, 2009) ou une pompe péristaltique (Yang *et al.*, 2017). Les échantillons sont recueillis le jour suivant avec une pompe à vide dans des tubes plastiques stérilisés et stockés en glacière jusqu’au laboratoire (Gill *et al.*, 2009). La consigne de dépression doit être bien inférieure à la valeur d’entrée d’air dans les bougies pour s’assurer que l’eau du sol provenant de la zone non saturée est attirée horizontalement et qu’il n’y a pas assèchement local du sol entraînant des ruptures dans l’échantillonnage (O’Luanaigh *et al.* 2012).

Les plaques poreuses, quant à elles, ont également été utilisées en France dans le cadre du projet ANGRES (Mise en place d’un indicateur intégratif pour la gestion du potentiel épurateur des sols soumis à l’infiltration en assainissement non collectif – coordinateur O. Fouché). Un filtre vertical non drainé a ainsi été instrumenté lors de sa mise en œuvre par des plaques poreuses en quartz situées dans le sol sous-jacent au filtre (-40 cm) et à la base du filtre. Des sondes pour mesurer les teneurs en eau ont également été mises en place aux mêmes profondeurs. Les échantillons ont été prélevés en appliquant une dépression de 0,5 bar pendant 12h (Seidl *et al.*, 2015).

6. Cartographie du sous-sol

6.1 Conductimétrie électromagnétique

Un conductimètre électromagnétique est constitué de 2 bobines distantes de 1m : une bobine émettrice et une réceptrice. La bobine émettrice, parcourue par un courant d’amplitude et de fréquence données, génère un champ magnétique. Ce dernier induit dans le sol un champ magnétique secondaire, dont l’intensité dépend de la conductivité électrique du sol. L’intensité du champ est alors mesurée par la seconde bobine. La fréquence du courant et la distance entre les bobines définissent la profondeur atteinte et la sensibilité de la mesure. La technique (cf. figure 8) permet d’investiguer le sol et le proche sous-sol, entre 25 cm et 3 m de profondeur. La mesure est extrêmement rapide à réaliser (45 min pour 12500 m²) (Forquet *et al.*, 2017). Elle intègre la conductivité électrique sur l’ensemble de la profondeur de la mesure, or la conductivité électrique du sol dépend du type de matériau traversé, de la porosité et de la teneur en eau.



Figure 8 : mesure par conductimètre électromagnétique (Forquet *et al.*, 2017)

La méthode, non intrusive, permet in fine d’obtenir une image de la variabilité du sol sur le plan horizontal (mais sans en expliquer les origines) et ainsi d’identifier des zones de différentes natures (Forquet *et al.*, 2017). Elle pourrait donc être utilisée, sur de grandes parcelles, pour orienter la localisation des filières (neuves) et des instruments à mettre en place. Les résultats obtenus se présentent sous forme de carte (cf. figure 9).

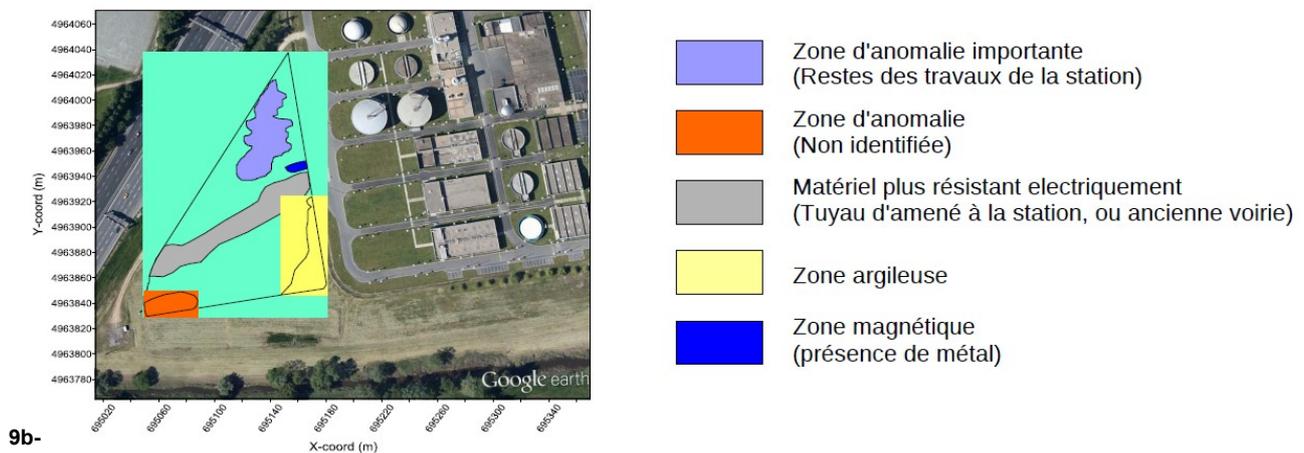
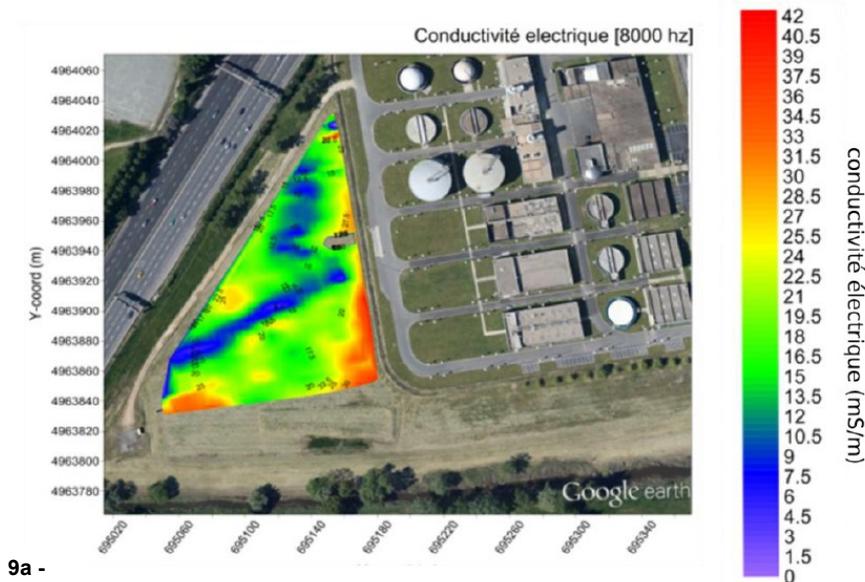


Figure 9 : a- résultats d'une prospection électromagnétique; b - représentation conceptuelle issue d'une prospection électromagnétique (Forquet *et al.* 2017)

6.2 Mesure géophysique de la résistivité électrique

1 DESCRIPTION DE LA MÉTHODE

Le sondage électrique ou tomographie de la résistivité électrique (Electrical Resistivity Tomography, ERT) est une méthode, non intrusive, de connaissance du sol, basée sur l'évaluation de la résistivité apparente d'un sol, mesurée sur le terrain. La résistivité électrique ρ (en $\Omega.m$) caractérise la capacité du courant électrique à circuler dans le milieu naturel : sa connaissance permet d'appréhender la structure et la lithologie du sous-sol.

La conductivité électrique (et son inverse la résistivité électrique) représente la capacité de la matière à mettre en mouvement les charges libres sous l'action d'un champ électrique. Concrètement, la méthode consiste en l'implantation dans le sol d'électrodes (usuellement entre 24 et 96, (Forquet *et al.*, 2017) : une intensité connue est injectée dans le sol entre 2 électrodes alors qu'un autre jeu de 2 électrodes, alignées sur les premières, mesure le potentiel électrique résultant et donc la différence de potentiel (cf. figure 10).

La valeur de résistivité apparente, vue par ce quadripôle est égale à :

$$\rho (\Omega.m) = K \frac{dv}{i}$$

où K est un coefficient de forme fonction de la répartition géométrique des électrodes A, B, M, N
(Moreau *et al.* 2006).

La résistivité mesurée résulte de la contribution volumique de toutes les parcelles du milieu traversé par le courant émis en fonction de la distance à la source. Si le sol est homogène, la résistivité apparente est égale à la résistivité intrinsèque (Chouteau et Gloaguen, 2003). Un faible potentiel électrique indique une résistance élevée du média.

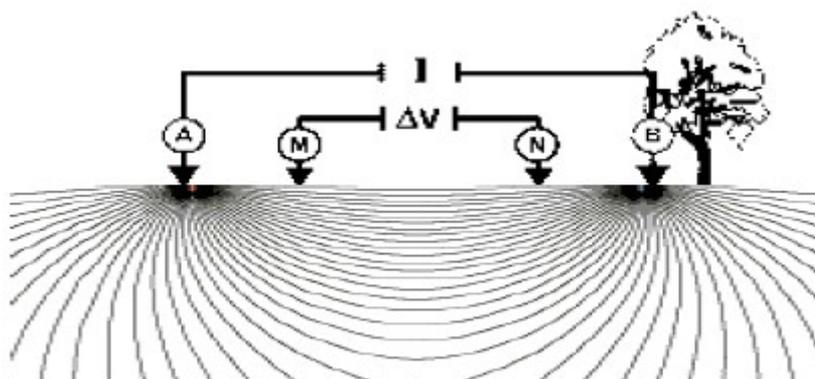


Figure 10 : principe d'une mesure de tomographie de la résistivité électrique (Moreau *et al.*, 2006)

Le courant injecté circule dans le sol d'une électrode à l'autre et sa pénétration en profondeur est fonction de l'écartement des électrodes de courant. La densité de courant est plus forte près de la surface qu'en profondeur : 50% de tout le courant circule sur une profondeur inférieure à la distance séparant les électrodes. Pour augmenter la pénétration, la distance entre les électrodes doit être augmentée (Chouteau et Gloaguen, 2003).

Il existe différents dispositifs, selon la disposition et l'écartement des électrodes d'injection et des électrodes de mesures :

1. Dispositif Wenner
2. Dispositif Wenner – Schlumberger
3. Dispositif dipole-dipole
4. Dispositif pole-dipole
5. Dispositif pole-pole.

Les mesures réalisées sur le terrain doivent faire l'objet d'un traitement mathématique « d'inversion » pour aboutir à une représentation de la valeur de résistivité « vraie » en chaque point de la section de terrain investiguée sur une carte 2D. La méthode donne l'estimation de la distribution de la résistivité électrique du sol, le long d'un plan vertical (Forquet *et al.*, 2017).

Chaque dispositif d'électrodes a ses avantages et ses inconvénients et plusieurs méthodes d'inversion existent. Il faut choisir à l'aide du logiciel d'inversion la meilleure configuration pour les électrodes en fonction des structures géologiques à mettre en évidence.

La résistivité électrique est sensible à de nombreux paramètres : la porosité, la température, la teneur en eau, la conductivité de l'eau, la composition chimique de l'eau, la nature du sol.

Cette technique a pour avantage de cartographier le sol en tenant compte de son hétérogénéité à une échelle large, de l'ordre de la parcelle, ce qui n'est pas le cas des mesures ponctuelles. Elle a également pour avantage d'être une méthode non intrusive et peut donc être mise en œuvre assez facilement dans différents contextes.

La mesure est relativement rapide (moins d'une heure) mais la mise en place est longue et peut s'avérer laborieuse, voire impossible en cas de végétation dense (Forquet *et al.*, 2017).

2 EXEMPLES D'UTILISATION ET DE MISE EN ŒUVRE

Cette méthode de l'ERT devient largement utilisée pour :

- réaliser des investigations hydrogéologiques (Brunet *et al.* 2010),
- obtenir des images détaillées (i) des contenus en eau (ii) des structures proches des surfaces et /ou (iii) une représentation des processus hydrologiques (Brunet *et al.* 2010)
- étudier l'infiltration dans les médias poreux (Degueurce *et al.* 2016).

Ainsi, l'ERT a permis la production d'une bonne délimitation des horizons de sols et un suivi des circulations d'eau pendant l'irrigation d'un champ de maïs même si les artefacts numériques dus au réseau d'électrodes ou à l'inversion mathématique de la résistivité apparente peuvent rendre l'interprétation compliquée (Brunet *et al.* 2010). Brunet *et al.* (2010) ont donc cherché à évaluer les performances de mesures d'ERT en les comparant à des mesures localisées de teneur en eau réalisées avec des sondes TDR (Time Domain Reflectometry) dans un sol des Cévennes. Après une phase de calibrage en laboratoire, une parcelle de 400 m² a été instrumentée. Le système d'ERT et les mesures de TDR mises en place sur 3 verticales à différentes profondeurs, ont donné des résultats avec une bonne correspondance. La différence maximale entre les 2 technologies n'excédait pas 15%. L'influence de la température est très importante pour l'interprétation des mesures de résistivité électrique visant à déterminer le contenu en eau d'un sol : la température avait donc été mesurée en plusieurs profondeurs du sol (Brunet *et al.*, 2010). Par ailleurs, plusieurs incertitudes doivent être prises en compte dans l'interprétation de l'ERT pour la détermination du contenu en eau : ces incertitudes concernent la température, la résistivité de l'eau en solution, la porosité et l'algorithme pour l'inversion de la résistivité apparente.

La technologie a aussi été utilisée dans des décharges pour la caractérisation in-situ des débits de lixiviats à travers de massifs de déchets ménagers. Les résultats ont permis d'améliorer le design des systèmes d'injection de lixiviat et d'enrichir la connaissance sur le comportement des déchets ménagers (Degueurce *et al.* 2016).

Moreau *et al.* (2006), en partenariat avec Suez environnement, ont utilisé la méthode d'ERT pour le suivi de la réinjection de lixiviat dans un bioréacteur pour le stockage des déchets ménagers et assimilés. Il a été montré le potentiel de la méthode géophysique du panneau électrique pour suivre la diffusion de lixiviat réinjecté à l'aide d'un mode de représentation différentiel de la résistivité électrique. Les observations réalisées ont permis de localiser précisément les bulbes de diffusion du lixiviat, d'estimer le rayon d'action de la réinjection autour des brins d'injection et d'estimer la cinétique de diffusion du lixiviat avec l'enregistrement de plusieurs séquences de mesures.

Degueurce *et al.* (2016) ont mis en œuvre l'ERT pour évaluer la diffusion de lixiviat dans un digesteur anaérobie de matières solides. Les mesures d'ERT ont alors été répétées plusieurs fois (avant, pendant et après l'injection de lixiviat) au même endroit. Le suivi de l'ERT par pas de temps est utile car les variations de contenu en eau peuvent être considérées comme le paramètre principal influençant la résistivité électrique, si la température et la porosité restent constantes pendant l'injection de lixiviat. Dans la plupart des cas, selon les hypothèses précédentes, une augmentation de la résistivité électrique indique une diminution du contenu en eau et une diminution de la résistivité électrique indique l'infiltration de liquide (Degueurce *et al.* 2016). Les mesures initiales d'ERT ont montré des valeurs différentes de résistivité entre le radier et le haut du digesteur, différences attribuées à la densité et au gradient de contenu en eau. Pendant l'injection de lixiviat, la méthode a permis d'identifier l'infiltration et a fourni des premiers résultats fiables de la percolation des lixiviats dans le massif. La méthode de l'ERT a été mise en œuvre avec succès, elle a mis en exergue l'incapacité du système d'injection à permettre une humidification égale de tout le massif de déchets.

3 INTÉRÊTS DES MÉTHODES GEOPHYSIQUES

La conductimétrie électromagnétique permet une cartographie « horizontale » des sous-sols pour identifier des zones de natures différentes. Elle pourrait avoir un intérêt pour aider à l'implantation de filière de traitement dans le cas de grandes parcelles. L'ERT, quant à elle, permet une cartographie « verticale » du sous-sol. Cette technologie de l'ERT commence à être éprouvée pour l'évaluation de la répartition de l'eau dans le sol.

Le caractère non intrusif des méthodes géophysiques les rend particulièrement intéressantes, notamment pour des interventions en terrains privés.

7 Proposition de protocole

Aux vues des lectures bibliographiques réalisées et des associations d'instruments déjà éprouvées pour le suivi ou l'étude de filières d'assainissement non collectif avec traitement et dispersion par le sol, il est proposé d'utiliser de manière complémentaire des systèmes de prélèvement d'eau du sol (plaques poreuses ou bougies poreuses) asservis à des tensiomètres et de la cartographie du sol/proche sous-sol par tomographie de résistivité électrique et éventuellement conductivité magnétique.

Pour les prélèvements d'eau, le lysimètre n'est pas envisagé à priori dans ce protocole : bien qu'il soit plus représentatif que les bougies en terme de solution échantillonnée, au regard du volume de sol pris en compte, la mise en place du lysimètre est beaucoup plus complexe. Et par ailleurs, vu les volumes de sol mobilisés par les installations d'ANC non drainées, il faudrait sans doute la mise en place de plusieurs lysimètres par installation. Les plaques poreuses, quant à elles, peuvent être combinées pour augmenter la surface étudiée.

La mise en œuvre des prélèvements et des mesures nécessite de trouver des propriétaires disposés à autoriser la mise en place des équipements adéquats sur leur terrain et à laisser un accès aussi fréquent que nécessaire aux agents en charge des prélèvements. Afin de se laisser le maximum d'opportunités, il est envisagé de solliciter à la fois des propriétaires d'installations nouvelles ou en réhabilitation, ou des installations en cours de fonctionnement. Pour cela, les SPANC, les services ANC des départements et les agences de l'eau pourront être sollicités. Les sites en construction ou réhabilitation devront être construits dans les règles de l'art. Les sites déjà en fonctionnement devront présenter un cahier d'entretien à jour ou du moins une absence avérée de dysfonctionnement.

7.1 Cartographie du site

La cartographie verticale (tomographie) et éventuellement horizontale (conductimétrie électromagnétique) doit aider à préciser l'état des lieux par la cartographie des hétérogénéités du sol en place et l'identification des écoulements.

Pour les installations existantes, la cartographie doit aider à préciser l'hétérogénéité du sol, donner des indications sur les écoulements et préciser le bulbe de diffusion. En effet, ces systèmes qui doivent théoriquement traiter l'eau de manière homogène à leur surface sont souvent sollicités dans les premiers mètres à l'aval de la boîte de répartition des eaux. Il est donc primordial avant de réaliser une instrumentation d'obtenir une image de cette sollicitation. A partir de ces informations, il devrait ensuite être possible d'optimiser les emplacements et le nombre de capteurs nécessaires, pour mener les futurs prélèvements.

Pour les installations à réaliser (installations neuves et réhabilitation), la cartographie à priori pour les dispositifs à tranchée d'épandage doit permettre d'identifier les hétérogénéités du sol dans lequel le traitement se fera, et éventuellement orienter sur le meilleur emplacement pour mettre en place les tranchées.

7.2 Instrumentation du site

Les plaques poreuses ont des zones d'interception plus grandes que les bougies et permettent une meilleure approche du flux. Cependant leur mise en place étant contraignante et nécessitant d'avoir accès au profil de sol, leur utilisation, couplée à la mesure tensiométrique, est proposée dans le cas des installations neuves ou en réhabilitation pour être mises en place au moment du terrassement. En outre, pour limiter les coûts, les plaques poreuses seront utilisées en association avec des bougies. Dans ce cas, les bougies situées sous le niveau des plaques seront positionnées en léger décalage de ces dernières pour limiter les perturbations lors du prélèvement.

Pour les installations déjà en fonctionnement, des bougies poreuses seules pourront être installées en association avec des tensiomètres. Leur mise en place est également intrusive mais dans une moindre mesure et la cartographie initiale devrait permettre d'optimiser le nombre de points.

Concernant la tensiométrie, les sondes TDR bien que plus chères que les sondes capacitives pourraient être utilisées en raison du volume plus important qu'elles mesurent.

Dans la mesure du possible, les filières seront équipées d'un système de comptage amont (débitmètre ou compteur horodaté), idéalement juste avant le système de répartition dans le sol. Ce point de comptage et de prélèvement permettra la réalisation de bilans physico-chimiques amont-aval et le calcul du flux d'entrée de polluants dans le sol.

Bien qu'équipés de systèmes d'équirépartition, il s'avère souvent que la diffusion des effluents dans le sol se fait de manière prépondérante sur les premiers mètres linéaires. Pour les installations neuves ou réhabilitées, les plaques et bougies ainsi que les tensiomètres seront donc préférentiellement concentrés sur les 10 premiers mètres linéaires. Pour les installations existantes, la cartographie initiale permettra de positionner les capteurs.

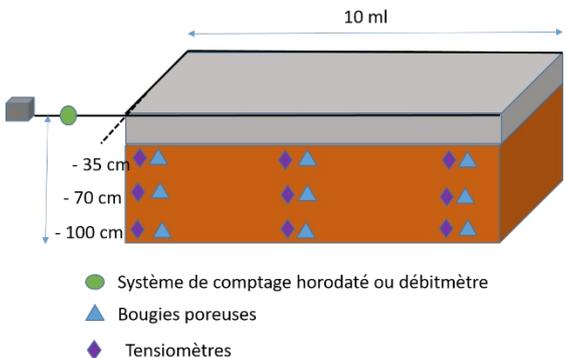
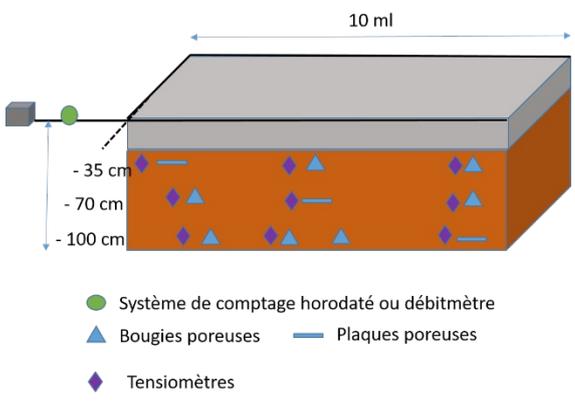
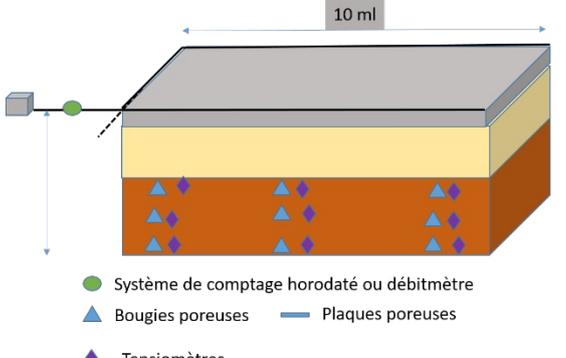
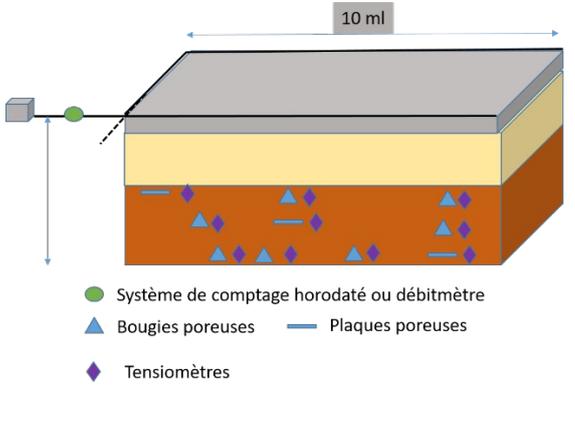
7.3 Différents cas envisagés

Selon le type de filière à instrumenter (fosse septique et sol en place ou fosse septique et lit filtrant vertical) et l'état de cette dernière (neuve/réhabilitation ou en fonctionnement), le protocole sera adapté. Différents cas peuvent ainsi être prédéfinis, selon l'ordre d'utilisation des méthodes et le type d'instruments à mettre en place (cf. tableau 2).

Pour les filières avec sol en place (cas 1 et 2), les instruments seront positionnés à différentes profondeurs sous la couche de gravier (en général de l'ordre de 30 cm) : soit typiquement à -35 cm, -70 cm et -1 m.

Pour les filières équipées de filtre à sable (cas 3 et 4), les instruments seront positionnés dans la mesure du possible sous le massif filtrant. L'épaisseur du massif filtrant étant généralement de l'ordre de 80 cm (70 cm de graviers et 10 cm de sable), les instruments pourraient être placés à environ -80 cm et -100 cm. Une troisième profondeur pourrait éventuellement être investiguée en fonction de la nature du sol/ sous-sol (par exemple à -130 cm). A chacune de ces profondeurs des tensiomètres seront mis en place. Dans le cas des lits filtrants verticaux existants, l'implantation des instruments pourrait être délicate notamment si le massif filtrant n'a pas une tenue suffisante lors du perçage (tarière). Dans ce cas, les instruments pourraient être mis sur les côtés du massif filtrant, mais avec une représentativité moindre. La cartographie préliminaire par méthode(s) géotechnique(s) apparaît particulièrement importante dans ce cas.

Tableau 2 : cas prédéfinis de protocole

	Filière existante (en fonctionnement)	Filière à créer ou à réhabiliter
Fosse septique avec sol en place	<p>Cas 1</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Cartographie initiale pour caractérisation du sol et panache de sollicitation préférentielle (tomographie et éventuellement conductivité électromagnétique) 2. Mise en place de bougies et de tensiomètres  <p>● Système de comptage horodaté ou débitmètre ▲ Bougies poreuses ◆ Tensiomètres</p>	<p>Cas 2</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Implantation de plaques et bougies, ainsi que de tensiomètres. 2. Cartographie a posteriori pour situer les instruments par rapport à la sollicitation  <p>● Système de comptage horodaté ou débitmètre ▲ Bougies poreuses — Plaques poreuses ◆ Tensiomètres</p>
Fosse septique avec lit filtrant drainé (filtre à sable)	<p>Cas 3</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Cartographie initiale pour caractérisation du sol et zone de sollicitation préférentielle (tomographie et éventuellement conductivité électromagnétique) 2. Mise en place de bougies et de tensiomètres, sur la plus grande surface possible du filtre  <p>● Système de comptage horodaté ou débitmètre ▲ Bougies poreuses — Plaques poreuses ◆ Tensiomètres</p>	<p>Cas 4</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Implantation de plaques et bougies, ainsi que de tensiomètres. 2. Cartographie a posteriori pour situer les instruments par rapport à la sollicitation  <p>● Système de comptage horodaté ou débitmètre ▲ Bougies poreuses — Plaques poreuses ◆ Tensiomètres</p>

En première approche, pour un suivi sur une longueur de 10 m, on peut imaginer la mise en place de 2 à 3 alignements de bougies/plaques sur 3 profondeurs et sur 3 verticales différentes soit entre 18 et 27 instruments de prélèvement (bougies/plaques) et 9 tensiomètres (cf. figure 11). Cette proposition sera à amender selon les résultats des cartographies initiales pour les filières existantes, et la résistance des massifs (pour les lits filtrants verticaux existants).

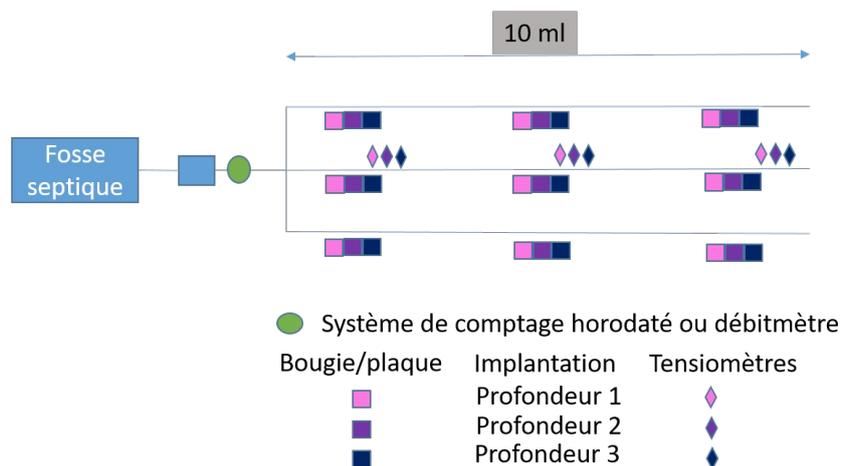


Figure 11 : proposition initiale de répartition des instruments

Les analyses envisagées pour mener ce suivi sont pour le point amont : MES, DCO, DBO₅, NTK, NH₄⁺, NO₃⁻, PT, PO₄³⁻ et éventuellement les indicateurs de contamination fécale. Pour les points de prélèvement dans le sol, les mêmes paramètres sont envisagés hormis le paramètre MES qui ne sera pas caractérisé en raison du caractère filtrant des bougies et plaques poreuses.

Au regard de ces paramètres, le verre paraît un matériau adapté pour les plaques poreuses.

Pour la réalisation des analyses, des micro-méthodes pourront être utilisées pour diminuer le volume d'eau à prélever. En première approche, des échantillons de 1 l seront à prélever. Une dépression sera appliquée aux bougies et/ou plaques poreuses au moins 24h voire 48 h avant les prélèvements.

Les précipitations pourraient influencer la composition des échantillons, notamment par dilution des eaux infiltrées dans le sol. Il faudra donc privilégier les prélèvements par temps sec. La connaissance des données météorologiques, notamment celles liées aux précipitations est nécessaire, notamment en cas de bilan massique. Dans la mesure du possible, un pluviomètre sera mis en place sur la parcelle ou à proximité. A défaut, les données de la station météorologique la plus proche seront à récupérer.

Le dispositif (plaques/bougies, tensiomètres) est prévu pour être autonome, il fonctionnera sur batteries. Le fonctionnement envisagé est de réaliser des campagnes de 7 jours consécutifs. La veille du lancement les sondes et les bougies seront connectées, la pompe à vide sera mise en marche, asservissant les bougies/plaques à la mesure des tensiomètres. Les bougies/plaques seront connectées à leur flaconnage (cf. figure 12). Cette caisse de prélèvement devra être située sur ou à proximité de l'installation. Tous les jours les échantillons seront collectés et envoyés pour analyse au laboratoire. En fin de cycle de prélèvement, la caisse sera débranchée et emmenée par les techniciens. La connectique (tubulure des bougies/plaques poreuses, connecteurs/câbles des tensiomètres) sera protégée (souillures, eau) jusqu'à la prochaine campagne.



Figure 12 : dispositif de pompage et de recueil des eaux prélevées à partir des bougies/plaques poreuses (ecoTech GmbH).

8 Conclusion

Le suivi des filières traditionnelles d'ANC fait l'objet de peu de suivi opérationnel en raison principalement des difficultés liées à la métrologie. En effet, les mesures et prélèvements d'eau dans le sol nécessitent des instruments particuliers avec une mise en œuvre précise et soignée pour éviter les perturbations dans le sol qui peuvent influencer les mesures.

Néanmoins, dans le cadre du suivi *in situ* des filières d'ANC, après avoir suivi des filières traditionnelles et agréées drainées, il apparaît important de suivre également des filières traditionnelles non drainées. C'est pourquoi, un protocole adapté aux filières non drainées est ici proposé, associant des techniques géophysiques, des mesures d'état de l'eau dans le sol et des prélèvements d'eau.

Bibliographie

- Moreau, S ; Bouyé, J-M. ; Vigneron, V. (2006) Application de la méthode géophysique du panneau électrique pour le suivi de la réinjection des lixiviats dans un bioréacteur : retour d'expérience
- Bergeron, D. (2005) Mieux irriguer avec les tensiomètres, Direction régionale de la capitale-nationale - Québec
- Bès, B. et Sévenier, G. (1999) Système de prélèvement de la solution du sol par bougies poreuses, fiche de protocole, INRA Avignon, Unité de sciences du sol
- Bloem, E. ; Hogervorst, F.A.N. ; de Rooij, G.H. (2009) A field experiment with variable suction multicompartiment samplers to measure the spacio temporal distribution of solute leaching in an agricultural soil, *Journal of contaminant hydrology* 105 (131-145)
- Brunet, P. ; Clément, R. ; Bouvier, C. (2010) Monitoring soil water content and deficit using electrical resistivity tomography (ERT) – a case study in the Cevennes area, France. *Journal of Hydrology* 380 (146-153)
- Boutin, C. ; Olivier, L. ; Agenet, P. ; Parisi, S. ; Artuit, P. ; Branchu, P. ; Decout, A. ; Dubois, V. ; Dubourg, L. ; Dhumeaux, D. ; Jousse, S. ; Leval, C. ; Mouline, B. ; Portier, N. ; Rambert, C. ; Souliac, L. ; Szabo, C. (2017). Assainissement non collectif : le suivi *in situ* des installations de 2011 à 2016. Synthèse technique du rapport final. S1 : Fiches techniques par dispositif. S2 : Rapport final. S3 : Synthèse tout public. S4 : Base de données. S5 : Présentation plénière Assises Limoges Septembre 2017. S6 : Présentation atelier 9 Assises Limoges Septembre 2017. <https://irsteadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00054553>
- Chouteau, M. ; Gloaguen, E. (2003) Tomographie électrique en génie et en environnement, Cours de tomographie électrique, Ecole polytechnique de Montréal.
- Cooper, J. D. (2016) Soil water measurement : a practical handbook
- Degueurce, A. ; Clément, R. ; Moreau, S. ; Peu, P. (2016) On the value of electrical resistivity tomography for monitoring leachate injection in solid state anaerobic digestion plants at farm scale. *Waste management* 56 (125-136)
- Ecotech GmbH, extraction of soil solution with ecotech suction plates - Manual
- Forquet, N. ; Bisone, S. ; Clément, R. (2017) Etudes préalables sur site : une méthodologie pour décrire un site et choisir les points d'échantillonnage et/ou de mesure de capacité d'infiltration, IRSTEA
- Gill, L. W. ; O'Luanaigh, N. ; Johnston, P.M. ; Misstear, B.D.R. ; O'Suilleabhain, C. (2009) Nutrient loading on subsoils from on-site wastewater effluent, comparing septic tank and secondary treatment systems. *Water research*, volume 43, issue 10, pages 2739-2749
- MEDDE (2012) Assainissement non collectif, Guide d'information sur les installations – Outils d'aide au choix, 2012, Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie. Müller J.C. (1996). Trente ans de lysimétrie en France (1960-1990) : une technique, un outil pour l'étude de l'environnement. INRA edition. 392p.
- Müller J.C. (1996) Trente ans de lysimétrie en France (1960-1990) : une technique, un outil pour l'étude de l'environnement. INRA edition. 392p.
- Musy, A ; Soutter, M ; (1991) Physique du sol. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne 335p.
- O'Luanaigh N.D., Gill L.W., Misstear B.D.R., Johnston P.M. (2012) The attenuation of micro-orgCeranismis in on-site wastewater effluent discharged into highly permeable subsoils. *Journal of Contaminant Hydrology*, 142-143 : 126-139.
- Radcliffe, D.E. ; Simunek, J. (2010) Soil physics with HYDRUS : modeling and applications. CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton, FL.

Seidl M., Caupos E., Nasri B., Saillé C., Fouché O. (2015) Élimination des parabènes et du triclosan dans un filtre non drainé de l'assainissement non collectif (ANC). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 28, n°1, p.75-79.

Weihermüller, L. ; Siemens, J. ; Deurer, M. ; Knoblauch, S. ; Rupp, H. ; Göttlein, A. ; Püts, T. (2007) *In situ* soil water extraction : a review ; *Journal of environmental quality* 36, 1735-1748.

Yang, Y-Y. ; Toor, G.S. ; Wilson, P.C. ; Williams, C. F. (2017) Micropollutants in groundwater from septic systems : transformation, transport mechanisms and health risk assessment. *Water Research*, volume 123, pages 258-267

Table des illustrations

Figures

Figure 1 : fosse et épandage souterrain dans le sol en place (MEDDE, 2012)	7
Figure 2 : lit filtrant vertical non drainé (MEDDE, 2012)	7
Figure 3 : les formes de l'eau dans le sol, une vue schématique (Musy <i>et al.</i>, 1991)	8
Figure 4 : éléments constitutifs d'un lysimètre (Muller, 1996)	9
Figure 5 : schéma de mise en œuvre d'une bougie poreuse (Bès et Sévenier, 1999)	9
Figure 6 : schéma d'un système de prélèvement avec plaque poreuse (Cooper, 2016)	10
Figure 7 : plaque poreuse en plastique ecoTech d'ICT international (à gauche : élément individuel ; à droite : association de 16 éléments)	11
Figure 8 : mesure par conductimètre électromagnétique (Forquet <i>et al.</i>, 2017)	13
Figure 9 : a- résultats d'une prospection électromagnétique; b - représentation conceptuelle issue d'une prospection électromagnétique (Forquet <i>et al.</i> 2017)	14
Figure 10 : principe d'une mesure de tomographie de la résistivité électrique (Moreau <i>et al.</i>, 2006) ..	15
Figure 11 : proposition initiale de répartition des instruments	20
Figure 12 : dispositif de pompage et de recueil des eaux prélevées à partir des bougies/plaques poreuses (ecoTech GmbH)	20

Tableaux

Tableau 1 : pertinence des matériaux de plaques poreuses au regard des substances à étudier (ecoTech)	11
Tableau 2 : cas prédéfinis de protocole	19

AFB
HallC – LeNadar
5squareFélixNadar
94300Vincennes
0145143600

Cerema
Cité des mobilités
25 av. François Mitterrand
69674 BRON cedex
04 72 14 30 30
www.cerema.fr