



Départements Recherche et Développement, et Assistances Techniques

Réf. : CONV-000173

Wavre, le 30 janvier 2026

Durabilité des systèmes d'infiltration et efficacité du nettoyage des systèmes d'infiltration enterrés



Rapport scientifique reprenant les résultats des premiers essais

Projet subventionné par Arrêté Ministériel dans le cadre de la Mesure 33 de la chaîne de valeur prioritaire Eau de Circular Wallonia.



Adresse de correspondance

Boulevard de la Woluwe 42 – B-1200 Bruxelles
T +32 (0)2 775 82 20 – **E** brrc@brrc.be
W www.crr.be – **TVA** BE 0407.571.927

Bureaux

Fokkersdreef 21
B-1933 Sterrebeek
T +32 (0)2 766 03 00

Avenue A. Lavoisier 14
B-1300 Wavre
T +32 (0)10 23 65 00

1 Résumé

Les systèmes d'infiltration souterrains sont des outils essentiels pour une bonne gestion des eaux pluviales, du fait de leur capacité d'infiltration et de rétention. Ils permettent de tamponner de larges volumes d'eau issus d'événements climatiques extrêmes en recrudescence, et de limiter les risques d'inondations en zones peu perméables. Toutefois, ces systèmes sont vulnérables aux colmatages induits par des eaux de ruissellement polluées. Peu d'études se sont jusqu'à présent penchées sur les processus de colmatage, encore moins en conditions réelles. Le couplage de la perte de capacité d'infiltration et de son potentiel de régénération offre un champ d'étude encore inexploré. Pour ce projet, un poste d'essai sur mesure a été construit, simulant les conditions réelles par un ensemble de paramètres prédéfinis. Ce poste a permis d'étudier le colmatage accéléré par un sable fin standard de structures alvéolaires ultra-légères (SAUL) et d'un tuyau perforé. Une analyse de l'évolution des débits lors du colmatage a montré une réponse différente des deux systèmes, qui dépend de la structure interne du système d'infiltration. En parallèle, la capacité de ces systèmes à être restaurés après des processus de nettoyage a également été analysée. Il en résulte une perte partielle et définitive de la capacité d'infiltration après colmatage des deux systèmes. En revanche, les protocoles de nettoyage utilisés se sont montrés plus adaptés pour partiellement régénérer la capacité d'infiltration du tuyau perforé, tandis qu'ils semblent incompatibles avec la structure cubique des SAUL. Dans les deux cas, les pertes définitives sont imputées à une masse de polluant remplissant les volumes inaccessibles aux buses de curage employées. Nous suggérons dès lors, pour maximiser le large potentiel d'infiltration et la durée de vie des SAUL, que les volumes traités fassent l'objet d'une filtration en amont du système. Dans les deux cas, cette étude souligne l'importance d'un monitoring et d'un entretien réguliers des systèmes d'infiltration enterrés.

2 Table des matières

Contents

1	Résumé	2
2	Table des matières	3
3	Introduction	7
3.1	Contexte de la Gestion Intégrée des Eaux Pluviales	7
3.2	Diverses solutions de systèmes d'infiltration enterrés	7
3.2.1	Structures alvéolaires ultra-légères	10
3.2.2	Tuyau perforé en polypropylène	10
3.3	Une vulnérabilité commune au colmatage	11
3.4	Objectifs du projet.....	11
4	Méthodologie	12
4.1	Principe du poste d'essai.....	12
4.2	Conception	12
4.3	Assemblage du poste d'essai	14
4.3.1	Remplissage du conteneur	14
4.3.2	Installation des structures alvéolaires ultra-légères	15
4.3.3	Installation du tuyau perforé en polypropylène	16
4.3.4	Assemblage du circuit d'eau.....	19
4.3.5	Protection de la citerne	20
4.4	Déroulement des expériences	20
4.4.1	Capacité hydraulique du sable d'infiltration et état stationnaire.....	21
4.4.2	Infiltration d'eau polluée	21
4.4.3	Nettoyage et inspections	22
5	Résultats	25
5.1	Mesure de la capacité d'infiltration initiale	25
5.2	Infiltration à travers les structures alvéolaires ultra-légères	25
5.3	Infiltration à travers le tuyau perforé.....	29
5.4	Inspections visuelles	32
5.4.1	Inspections visuelles des structures alvéolaires ultra-légères.....	32
5.4.2	Inspections visuelles du tuyau perforé	35
5.4.3	Caractéristiques de l'eau après curage	36

6	Discussion.....	37
6.1	Contrôle et évolution des débits	37
6.1.1	Potentiel d'infiltration du sable	37
6.1.2	Modélisation de l'infiltration	37
6.2	Comportement du Millisil® W4 à travers le poste d'essai	39
6.2.1	Migration du polluant au-delà du géotextile	39
6.2.2	Pertinence de ce polluant.....	39
6.3	Comportement des systèmes d'infiltration lors du colmatage	40
6.3.1	Modes de colmatage du tuyau perforé	40
6.3.2	Modes de colmatage des caissons SAUL	41
6.4	Potentiels de régénération des curages.....	43
6.4.1	Performance des protocoles de curage.....	43
6.4.2	Cycles colmatages – curages sur le long terme	44
6.5	Premières préconisations en situations réelles	45
6.6	Limites du modèle.....	45
7	Conclusions.....	46
8	Perspectives	47
9	Remerciements.....	48
10	Références	49
11	Annexes	52
11.1	Annexe 1 : Fiche Proctor/IPI du sable calcaire lavé 0/4 mm	52
11.2	Annexe 2 : Mesures par gammadensimétrie	53
11.3	Annexe 3 : Mesures post-compaction.....	55
11.3.1	Mesures à la sonde de battage	56
11.3.2	Mesures par pénétromètre Panda.....	63

Liste des figures

Figure 1 (page précédente) : Exemples de systèmes d'infiltration de surface (A-B) et enterrés (C-G). A : Champ d'infiltration en cours de tamponnement (VLARIO, 2025) ; B : Noue compartimentée (VLARIO, 2025) ; C : Structures alvéolaires ultra-légères (Vanelstraete et al., 2025) ; D : Schéma d'une cave d'infiltration sous un espace de parking (Good Urban Practice, 2025) ; E : Sommet d'un tuyau vertical d'infiltration mis en œuvre, avec trop-plein (BlauwGroenVlaanderen, 2022) ; F : Tuyaux en béton poreux (Tubobel Group, 2021) ; G : Schéma d'une chaussée avec infiltration dans la sous-fondation par injection latérale (Aquafin, 2025). 10

Figure 2 : Photo aérienne du poste d'essai finalisé en fonctionnement. La pompe amont et le prolongement du tuyau en PVC qui l'alimente sont ici masqués par le conteneur technique. ...	13
Figure 3 : Installation des structures alvéolaires ultra-légères dans le conteneur d'infiltration. A : Pose des premiers caissons sur la couche compactée de fondation, et sur un géotextile de filtration de type 5.3 (COPRO, 2024) ; Ensemble des sept caissons emboîtés et reliés aux ouvertures de chaque côté du conteneur ; C : Fermeture du géotextile de filtration par coutures mécaniques et lignes de colle à chaud ; D : étanchéification des tuyaux de connexion par des bandes géotextiles et des lamelles de caoutchouc.	16
Figure 4 : Installation du tuyau perforé en PP et remplissage du conteneur d'infiltration. A : Répartition d'une couche de sable autour du tuyau en PP fraîchement posé ; B : Compactage à la plaque vibrante de l'avant-dernière couche de sable d'infiltration.	18
Figure 5 : Eléments constitutifs notables du circuit d'eau. A-B : Connecteurs en inox accommodant les entrées et sorties des deux pompes et du débitmètre inductif ; C : Pièces de raccordement en PETG-CF (polyéthylène téréphtalate modifié au glycol et fibre de carbone), imprimées en 3D pour une parfaite étanchéité ; D : Vanne de direction vers le conteneur citerne (gauche) ou vers le réseau d'égouttage (droite) ; E : Conduites vers l'entrée du conteneur citerne, avec possibilité d'y connecter une arrivée d'eau semi-automatisée en provenance du bâtiment pour le remplissage (gauche).	19
Figure 6 : Principe théorique d'un essai, subdivisé en ses différentes étapes, et exprimé selon en termes de débits apparents, ou relativement à la capacité d'infiltration initiale du système. Schéma pas à l'échelle.	20
Figure 7 : Différents modèles de buse de nettoyage utilisées pour les essais de curage de ce projet. A-C : buses utilisées par l'entreprise X. la buse C étant dotée d'une tête rotative. D-E : buses utilisées par l'entreprise Y, la buse E possédant un fond plat et fermé.	24
Figure 8 : Evolution de la capacité d'infiltration des SAUL par mesure de débits instantanés au débitmètre inductif. A : mesures exprimées selon la masse de polluant ajouté ; B : mesures exprimées selon une échelle de temps, avec en vignettes les masses totales de polluant, en kg.	27
Figure 9 : Corrélations entre la fréquence des pompes et les mesures affichées par le débitmètre.	28
Figure 10 : Préparation du protocole de nettoyage B.	29
Figure 11 : Evolution de la capacité d'infiltration du tuyau perforé en PP par mesure de débits instantanés au débitmètre inductif. A : mesures exprimées selon la masse totale de polluant ajouté ; B : mesures exprimées selon une échelle de temps, avec en vignettes les masses de polluant, en kg. La quantité de Millisil® retirée au cours des curages étant inconnue, les masses adjointes lors du second colmatage correspondent aux incréments.	31
Figure 12 : Images issues des différentes inspections visuelles des structures alvéolaires ultra-légères. A : vue macro d'un pied de la paroi proximale, à l'état neuf ; B : vue macro du même pied, à l'état colmaté ; C : vue macro du même pied, après curage, montrant toujours une masse non-négligeable de polluant ; D : vue de la nef proximale après curage.	33
Figure 13 : Images issues des différentes inspections visuelles des structures alvéolaires ultra-légères, suite. A : vue macro d'une partie de la nef latérale, à l'état neuf ; B : vue macro du même emplacement, à l'état colmaté ; C : vue macro du même emplacement après curage, montrant	

la différence de hauteur du lit de polluant induite par le nettoyage partiel de la buse de nettoyage ; D : vue du dépôt de polluant au fond de la chambre de visite, à l'état colmaté.	34
Figure 14 : Lit de Millisil® (blanc) déposé sous les caissons SAUL et la membrane géotextile de filtration, et mis au jour lors du démantèlement du système. L'ampleur de la migration horizontale Millisil® observée au-delà du géotextile le long des parois verticales reste minime (voir ellipse rouge).	35
Figure 15 : Images issues des différentes inspections visuelles du tuyau perforé en PP. A : vue générale de l'intérieur du tuyau, à l'état neuf ; B : idem, avec détail sur les fentes d'infiltration inférieures ; C : vue macro du lit de polluant au fond du tuyau à l'état colmaté, et des dépôts en forme de branchies entre les fentes inférieures ; D : macro du même emplacement qu'en C, après curage.	36
Figure 16 : Schéma explicatif pour le calcul des surfaces d'infiltration en vigueur selon les régions wallonne (RW, projection à l'horizontale, rouge) et flamande (RF, surfaces latérales, jaune), avec comme exemples les deux systèmes d'infiltration testés dans le cadre de ce projet. A : vue frontale d'un caisson SAUL (voir section 4.3.2) ; B : vue frontale du tuyau perforé en PP, redessiné d'après VLARIO (2025) (voir section 4.3.3). Les surfaces renseignées correspondent à un système d'infiltration d'une longueur d'un mètre.	38
Figure 17 : Mode de colmatage d'un tuyau d'infiltration perforé. A : Infiltration d'eau claire, sans obstruction ; B : Dépôt de polluant à l'interface entre le tuyau et la membrane géotextile ; C : Saturation de l'interface, le polluant ne s'y dépose plus une fois une certaine hauteur atteinte, et un débit stable est atteint par une infiltration majoritairement latérale ; D : Lors de la lente vidange du tuyau, des dépôts en « branchies » se forment entre les fentes inférieures.	41
Figure 18 : Mode de colmatage des caissons SAUL. A : Infiltration d'eau claire, sans obstruction ; B : Dépôt de polluant sur la face inférieure ; C : La face intérieure étant colmatée, l'infiltration est majoritairement latérale, plaquant temporairement les particules de polluant en suspension contre la membrane géotextile, et atteinte d'un débit minimum ; D : Après une période de repos et une lente vidange, les particules retombent sur la face inférieure, rendant la capacité d'infiltration latérale, et obtention d'un effet rebond dans la courbe de débit.	43

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des paramètres de chacun des protocoles de nettoyage mis en œuvre. ...	22
Tableau 2 : Synthèse des mesures préliminaires de calibration des pompes et de la capacité hydraulique du sable.	25
Tableau 3 : Compte rendu des résultats numériques des essais de colmatage et nettoyage des SAUL.	26
Tableau 4 : Compte rendu des résultats numériques des essais de colmatage et nettoyage du tuyau perforé en PP.	30

3 Introduction

3.1 Contexte de la Gestion Intégrée des Eaux Pluviales

Le concept de « Gestion Intégrée des eaux de pluie (GIEP) » s'inscrit comme une réponse récente des villes aux conséquences cumulatives de deux phénomènes distincts : l'imperméabilisation des surfaces et le dérèglement climatique. Le premier a graduellement progressé depuis des décennies, à mesure que les villes se sont étendues et densifiées. L'eau de pluie est traditionnellement collectée par les réseaux d'égouttage après ruissellements depuis les toitures et sur les voiries imperméables. Le second phénomène – le réchauffement climatique – normalise pour sa part des épisodes plus intenses et fréquents de sécheresse et de pluie. Ce volume d'eau supplémentaire contribue à saturer le réseau d'égouttage, et potentiellement inonder les zones les plus vulnérables.

Les mesures types de la GIEP consistent à restaurer autant que possible l'infiltration naturelle de l'eau de pluie à travers les sols en zone urbaine, et diminuer la dépendance vis-à-vis de l'égouttage (Bruxelles Environnement & Buxelles Mobilité, 2023; VLARIO, 2025). D'autres méthodes restent possibles là où l'implémentation de surfaces vertes n'est pas envisageable, à l'instar de systèmes d'infiltration enterrés. Cet intérêt pour une meilleure gestion, voire une valorisation de cette ressource en eau, existe depuis plusieurs décennies, mais n'a véritablement pris son essor que récemment. De ce fait, un nombre croissant de codes de bonnes pratiques, cahiers de charge, documents normatifs, ou articles scientifiques décrivent les différentes spécificités de ces systèmes, et leurs conditions de mise en place (Bruxelles Environnement & Buxelles Mobilité, 2023; COPRO, 2021; IFSTTAR, 2011; NBN, 2020; Sehgal & Drake, 2018; Sidek et al., 2002; Vanelstraete et al., 2025; VLARIO, 2025; Wong, 2020). Par leur biais, les eaux de ruissellement recueillies sont tamponnées, permettant une infiltration progressive à travers le sol.

3.2 Diverses solutions de systèmes d'infiltration enterrés

Les solutions naturelles d'infiltration offrent un bon compromis entre espaces verts et faibles coûts de mise en œuvre, pour peu que l'on dispose d'une surface suffisante d'un sol raisonnablement perméable (Figure 1.A,B) (Teller et al., 2023; Vanelstraete et al., 2025; VLARIO, 2025). Lorsque de tels aménagements ne sont pas suffisants, ou envisageables, les systèmes d'infiltration enterrés peuvent offrir une alternative viable (Pillaert, 2025). De manière générale et non exhaustive, ces systèmes enterrés peuvent être catégorisés comme suit :

- Les chambres de stockage : s'y retrouvent des espaces délimités par des éléments qui créent un volume souterrain majoritairement constitué de vide. Par hauteur croissante, citons les champs d'infiltration enterrés, les caissons d'infiltration ou structures alvéolaires ultra-légères (Figure 1.C ; section 3.2.1) ou caissons d'infiltration, et les caves d'infiltration, grandes assez que pour permettre une visite par du personnel (Figure 1.D) (BPF PIPES GROUP, 2022; IFSTTAR, 2011; Lee et al., 2025; Vanelstraete et al., 2025; VLARIO, 2025; Wong, 2020). En matières plastiques ou en béton, ces structures doivent être installées de manière qu'elles puissent durablement soutenir les charges provenant des couches de sol supérieures. Les puits ou bacs d'infiltration, usuellement en béton

preux, sont des variantes collectant les eaux pluviales tout en verticalité, pour garantir une infiltration en profondeur au travers d'une couche de sol plus perméable (Teller et al., 2023).

- Les tuyaux d'infiltration : horizontaux comme verticaux, leur potentiel d'infiltration provient d'une perméabilité de leur surface garantie par des perforations (voir section 3.2.2), ou du béton poreux (Figure 1.E,F) (VLARIO, 2025).
- Dans le corps de chaussée : la voirie peut également contribuer au tamponnement des eaux pluviales, lorsque les conditions de trafic, de sol et d'urbanisme le permettent (Figure 1.G). Le volume utile à la rétention se situe dans le volume intergranulaire de la sous-fondation non-liée. Ce volume est accessible soit directement, par infiltration de l'eau de pluie à travers un revêtement de voirie perméable, soit indirectement par l'intermédiaire de drains d'égouttage. Cette seconde option prévoit une connexion dans sa partie basse avec la sous-fondation, et les conduites du réseau d'égouttage ne sont alors sollicitées que comme trop-plein (Teller et al., 2023; Vanelstraete et al., 2025; VLARIO, 2025).

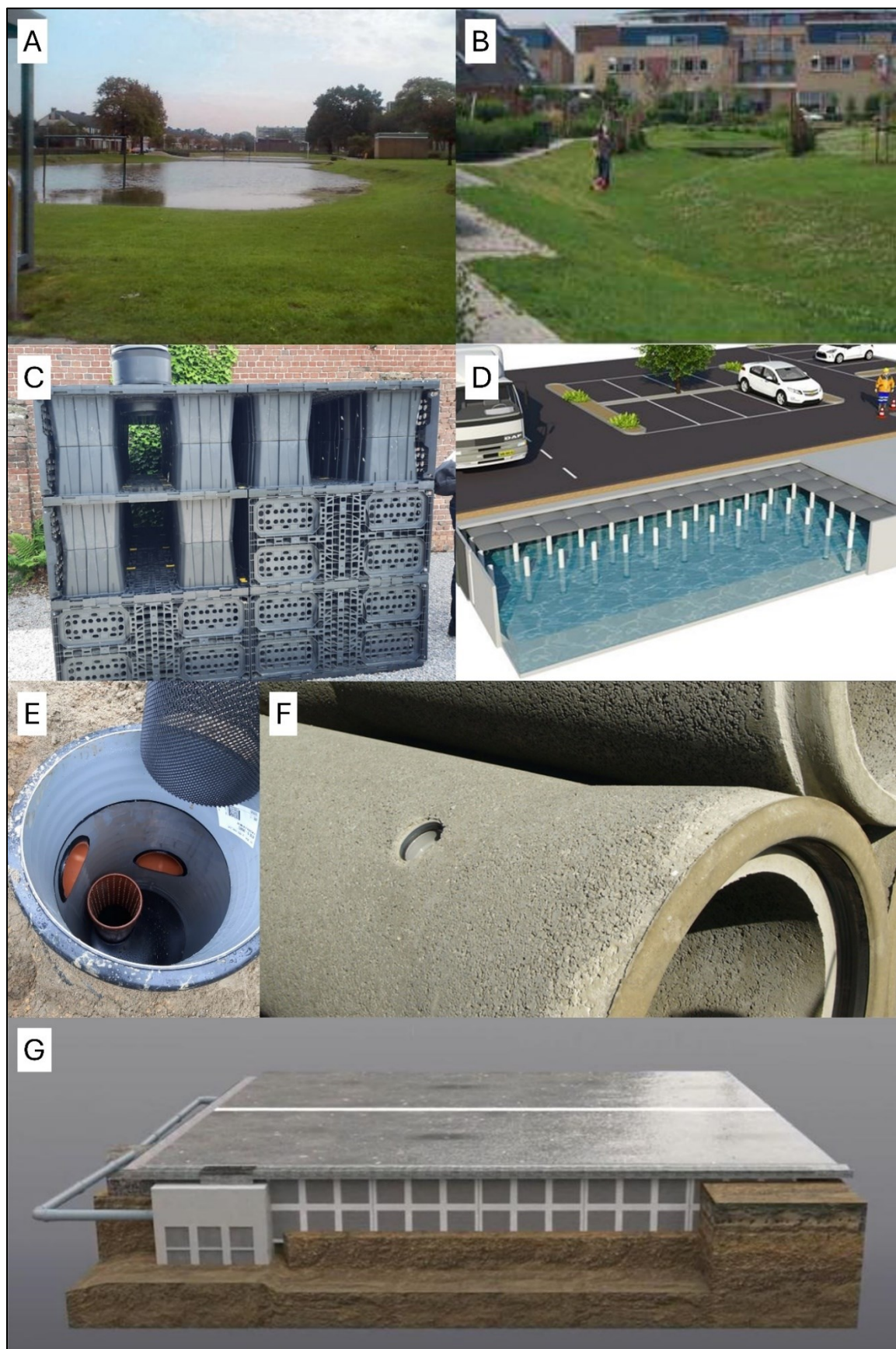


Figure 1 (page précédente) : Exemples de systèmes d'infiltration de surface (A-B) et enterrés (C-G). A : Champ d'infiltration en cours de tamponnement (VLARIO, 2025) ; B : Noue compartimentée (VLARIO, 2025) ; C : Structures alvéolaires ultra-légères (Vanelstraete et al., 2025) ; D : Schéma d'une cave d'infiltration sous un espace de parking (Good Urban Practice, 2025) ; E : Sommet d'un tuyau vertical d'infiltration mis en œuvre, avec trop-plein (BlauwGroenVlaanderen, 2022) ; F : Tuyaux en béton poreux (Tubobel Group, 2021) ; G : Schéma d'une chaussée avec infiltration dans la sous-fondation par injection latérale (AquaFin, 2025).

3.2.1 Structures alvéolaires ultra-légères

Les structures alvéolaires ultra-légères (SAUL), unités géocellulaires ou encore caissons d'infiltration (Figure 1.C), sont utilisées depuis les années 1980 pour la rétention d'eaux pluviales, bien que leur utilisation ne se soit généralisée que récemment (BPF PIPES GROUP, 2022; Wong, 2020). Des déclinaisons de ce système existent avec ou sans trop plein, ou encore en aval d'une chambre de sédimentation pour permettre une revalorisation des volumes stockés (Lee et al., 2025).

Diverses études montrent que ces dispositifs sont particulièrement utiles pour lisser le débit de pointe d'un événement pluviométrique et diminuer le volume d'eau rejeté. Ces deux objectifs permettent en parallèle de diminuer le risque d'inondations à échelle locale et à désengorger le réseau d'égouttage (Sidek et al., 2002).

Plusieurs installations reprenant un assemblage de ces caissons ont déjà été testées dans des climats différents (Bong et al., 2023; Sidek et al., 2002). Bong et al. (2023) ont étudié une installation de 10 m² en Malaisie, dont les épisodes pluviométriques hors de la saison de la mousson étaient toutefois capables de générer des volumes d'eau importants. Il en ressort que ces modules étaient capables de tamponner un minimum 65% du volume d'eau de pluies jusque 30 mm. Ces valeurs diminuent jusque 35% pour des épisodes de tempête tropicale (Bong et al., 2023). Les limitations de l'expérience se situent au niveau de l'absence de ruissellement et de la perméabilité de la simulation de sol. Toutefois, ces valeurs prouvent déjà l'efficacité de ces systèmes pour lutter contre les risques liés aux fortes pluies, pour peu qu'ils soient installés judicieusement.

3.2.2 Tuyau perforé en polypropylène

La littérature scientifique dans le domaine de la mécanique des fluides, et les CCT Qualiroutes et SB250, considèrent surtout l'utilisation de tuyaux perforés pour le drainage (Afrin et al., 2016; Agentschap Wegen en Verkeer, 2025; Bhattarai et al., 2025; CCT Qualiroutes, 2021/2025; Liu et al., 2017; Murphy, 2013). Cela implique que l'eau arrive à l'intérieur du tube par les perforations à la surface de sa membrane, pour qu'elle soit redirigée ou collectée, à la manière d'un wadi pourvu d'un tuyau de drainage à sa base (VLARIO, 2025).

L'utilisation d'un tuyau perforé dans le cas d'une infiltration directe dans le sol implique un fonctionnement inversé, où l'eau d'infiltration provient de conduites, et est restituée dans le sol par la surface des perforations. La littérature ne s'est jusqu'à présent que peu intéressée à l'hydrodynamique de ce scénario, a fortiori si l'eau charrie des particules à travers les orifices. En outre, cette fonction d'infiltration ne figure pas telle quelle dans le cahier de charge Qualiroutes. Une mention y figure toutefois dans la version 5.0 du SB250 (Chapitre 13,

paragraphe 24.7), qui rappelle les prescriptions du PTV 829 liées aux géotextiles associés (Agentschap Wegen en Verkeer, 2025; COPRO, 2024).

3.3 Une vulnérabilité commune au colmatage

Malgré des formes et des contextes d'applications différents, tous ces modèles sont vulnérables au colmatage. L'interface entre un matériau perforé ou poreux et le sol en place doit en effet être recouverte d'un géotextile de filtration (COPRO, 2024), à même de prévenir la migration de particules au sein du dispositif d'infiltration. Toutefois, cette précaution entraîne l'obstruction progressive des pores de cette membrane géotextile par des fines ou débris organiques, diminuant la capacité d'infiltration du système. C'est pourquoi, un entretien par curage à intervalles réguliers est nécessaire, d'autant plus que les solutions de prétraitement à même de réduire la charge sur le système d'infiltration ne sont généralement pas mises en œuvre, pour des raisons financières à court terme. La quantité limitée de retours d'expérience ne permet pas non plus de retracer l'évolution des performances de ces dispositifs d'infiltration, ni de déterminer les facteurs qui influent sur la fréquence et l'efficacité des méthodes de curage.

3.4 Objectifs du projet

Pour pallier le gap de connaissances, le CRR a lancé un projet visant à simuler, en surface, un système d'infiltration enterré à taille réelle, mis en œuvre selon les spécifications des cahiers de charge types. Cette simulation de sol infiltrant est raccordée à un circuit d'eau artificiellement altérée par un polluant inorganique standard.

L'installation de ce poste d'essai permet de simultanément investiguer plusieurs variables susceptibles d'influencer le cycle de vie de dispositifs d'infiltration, avec un intérêt particulier pour la question de leur durabilité. Notre objectif principal est de déterminer dans quelle mesure un système d'infiltration prédéfini est compatible avec un protocole de nettoyage répandu dans l'entretien des réseaux d'égouttage. Il incombe dès lors d'étudier la migration du polluant après le nettoyage, la dégradation éventuelle du système, et le taux de régénération de sa capacité d'infiltration, par comparaison des débits aux états neuf et nettoyé. Toutefois, cette approche requiert également de se concentrer sur l'impact du polluant sur la performance du système, à chaque étape de l'expérience.

Il est à noter que les expériences décrites dans ce rapport concernent un ensemble de paramètres préalablement fixés (paramètres liés aux régimes d'infiltration, à la nature et la concentration du polluant, au système d'infiltration stricto sensu et au curage), pour simuler un cycle de vie marqué par le colmatage et le nettoyage. Le poste d'essai est conçu pour permettre sur le long terme une variation de ces paramètres initiaux selon les questions de recherche ultérieures, ou selon la demande du secteur, qui peut valoriser le poste d'essai pour développer de nouveaux protocoles.

Dans le cadre de ce rapport, deux différents systèmes d'infiltration ont été implémentés et testés dans le poste d'essai, de même que deux différentes méthodes de curage.

4 Méthodologie

4.1 Principe du poste d'essai

Le cœur du poste d'essai est constitué d'un conteneur retravaillé pour y accueillir une simulation de sol sableux infiltrant. Un modèle de système d'infiltration enterré, capte de l'eau en provenance d'une citerne en amont, qu'il stocke et infiltre progressivement. L'eau est évacuée en contrebas, et le débit à la sortie du conteneur est mesuré en temps réel. Le principe d'une expérience repose sur la pollution de cette eau par un agent inerte (le Millisil® W4), qui induit un colmatage progressif des membranes géotextiles du dispositif. Un essai repose donc sur l'analyse de l'évolution de ce colmatage, ainsi que l'étude de la performance des protocoles de nettoyage existants dans le secteur pour libérer le système.

4.2 Conception

Cet ambitieux projet a requis l'élaboration de plusieurs schémas pour le poste d'essai, articulés autour de considérations en génie civil, hydraulique, instrumentation et automatisation, et cadre légal. La première version du poste d'essai comprenait une citerne d'eau surélevée qui rassemblait les fonctions de citerne et de cuve de mélange du polluant. Pour des raisons financières et pratiques – le poste d'essai ayant pour vocation d'être démontable et mobile – ce premier modèle a été abandonné, au profit d'un schéma où le polluant serait incorporé en aval d'un conteneur citerne. Ce modèle définitif permet de limiter les pertes d'eau en faisant tourner le dispositif en circuit fermé, le réservoir n'étant vidé que lors du nettoyage à la fin d'une expérience.

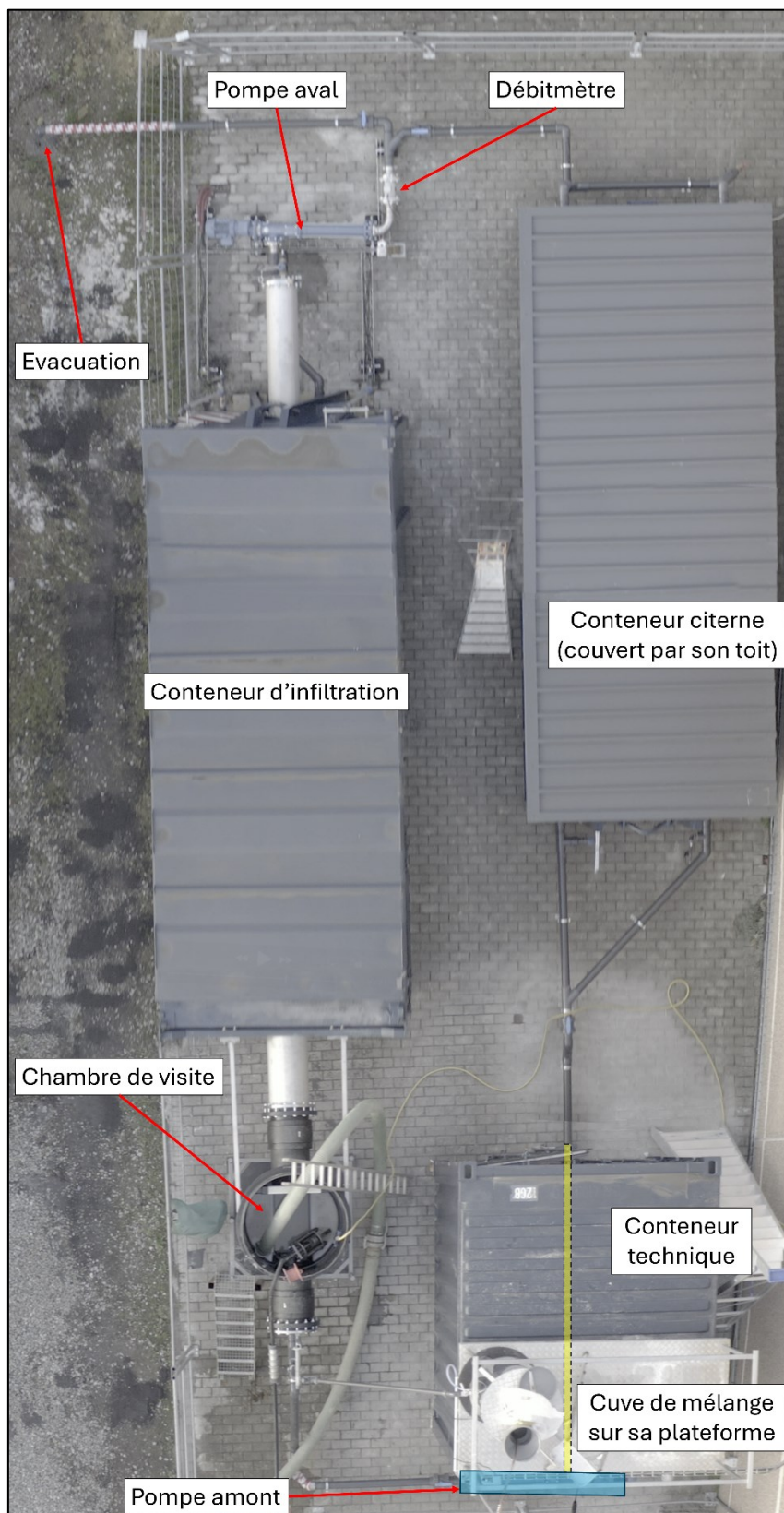


Figure 2 : Photo aérienne du poste d'essai finalisé en fonctionnement. La pompe amont et le prolongement du tuyau en PVC qui l'alimente sont ici masqués par le conteneur technique.

Le modèle retenu du poste d'essai repose sur la fabrication et l'interconnexion de sept modules :

- Un conteneur faisant office de réserve d'eau ;
- Des éléments de tuyauterie fonctionnant en circuit fermé ;
- Deux pompes à vis déportée ;
- Une chambre de visite ;
- Une cuve de mélange du polluant ;
- Le conteneur d'infiltration, abritant la simulation de sol drainant et le dispositif d'infiltration enterré ;
- Un débitmètre à induction magnétique.

Ces sept modules constituent les éléments nécessaires au bon fonctionnement du poste d'essai. Un huitième module, un conteneur technique, assure d'une part la centralisation des commandes et le monitoring en temps réel des paramètres de l'expérience, afin de garantir la sécurité et l'automatisation du dispositif.

Bien que la section 4.3 décrive les spécificités techniques et d'assemblage du poste d'essai, de plus amples détails et illustrations supplémentaires à propos de chacun des modules sont disponibles en section 4.2 du rapport remis au Cluster H₂O en août 2025.

4.3 Assemblage du poste d'essai

Outre les difficultés techniques évoquées dans le rapport final d'août 2025 pour chaque module, l'assemblage du poste d'essai a requis un nombre important de précautions et amené des contraintes nouvelles. Les conteneurs citerne, d'infiltration et technique ont été positionnés sur le parking latéral du site de Wavre du CRR (Figure 2), avec une précision de l'ordre du centimètre. L'équilibrage du conteneur d'infiltration a également requis une mise à niveau au millimètre, assurée par mesures laser aux quatre coins du conteneur, afin de stabiliser l'édifice sur une surface en pente légère.

4.3.1 Remplissage du conteneur

Après préparation de la surface du conteneur par sablage et application d'une peinture anti-corrosion, la première étape de l'assemblage a consisté à poser un double-fond dans le conteneur. Six plaques perforées en acier galvanisé y ont été posées, créant un volume libre qui facilite l'écoulement de l'eau infiltrée vers l'extérieur du conteneur. Un géotextile de séparation de type 2.5 (COPRO, 2024) a par la suite été préparé sur mesure pour enrober les parois de ce conteneur.

Le sable d'infiltration a été présélectionné pour correspondre aux critères des cahiers de charges types. Le CCT Qualiroutes ne donne aucune définition de sable d'infiltration, ni de critères sur les matériaux éligibles. Toutefois, quelques lignes directrices peuvent être suivies en regard des spécifications du Standaardbestek 250 (Chapitre 13 de la version 5.0, section 6.2.20) (Agentschap Wegen en Verkeer, 2025), qui préconisent notamment une granularité 0/4 mm ou 0/6 mm (selon un indice G_{F85}), un taux de fines inférieur à 7%, et une distribution de la courbe granulométrique respectant un certain degré d'uniformité et de continuité ($CU > 6$ et $CC < 2$, respectivement). Les fillers, de fraction 0/0,125 mm, doivent également satisfaire une valeur au

bleu de méthylène ($MB_F < 1,5$). Pour finir, les coefficients de Los Angeles (LA) et Micro Deval (M_{DE}), caractérisant respectivement la résistance mécanique des grains à la fragmentation et à l'usure sur la granulométrie 10/14 mm d'un même matériau, restent inférieurs à 25. Ces différentes précautions permettent de limiter la création de fines lors de la mise en œuvre du matériau, et donc de garantir sa perméabilité (Siriwardene et al., 2007).

Dans le cas de notre poste d'essai, nous avons opté pour un sable calcaire 0/4 mm lavé de Holcim S.A. (code produit 04a02), qui satisfait les critères précédemment cités. Sa perméabilité mesurée en laboratoire s'élève à $1,14 \cdot 10^{-4}$ m/s à l'Optimum Proctor Normal. L'Annexe 11.1 renseigne l'Optimum Proctor à une densité de 1844 kg/m^3 , pour une teneur en eau de 6,08%.

Pour chaque remplissage du conteneur autour d'un des systèmes d'infiltration testé, le sable a été disposé par couches de vingt centimètres, et chaque couche compactée selon les exigences du PTV 8003-1.0 (COPRO, 2024). La qualité du compactage a été mesurée par gammadensimétrie, à différents emplacements à la surface, et ce après trois à cinq passages au pilonneur et/ou à la plaque vibrante. En moyenne, les valeurs de compactage ainsi obtenues sont de $94 \pm 1\%$ OPN (Annexe 11.2). Cette procédure a été interrompue lorsque le remplissage du conteneur a atteint le niveau de l'arrivée d'eau, pour permettre l'installation du système d'infiltration concerné. Le remplissage et compactage du volume résiduel a repris selon le même mode opératoire, par trois passages à la plaque vibrante ou cinq au pilonneur dans les recoins les plus étroits. Huit couches ont été nécessaires pour que le système d'infiltration soit recouvert par trente centimètres de sable après compactage. Une mesure finale à la sonde de battage (Annexe 11.3.1) et au pénétromètre Panda (Annexe 11.3.2) a validé la qualité du compactage au sommet du sol.

4.3.2 Installation des structures alvéolaires ultra-légères

Le premier système d'infiltration testé pour ce projet consistait en des structures d'infiltration ultra-légères (SAUL). Dimensionnées pour l'intérieur du conteneur, sept caissons en polypropylène de modèles Wavin Q-bic Plus ont été assemblés et rigidifiés par des panneaux latéraux, aboutissant à un ensemble mesurant 420 cm de long, 120 cm de large et 63 cm de haut (Figure 3). Ce volume de $3,18 \text{ m}^3$ est constitué de vide à 95%.



Figure 3 : Installation des structures alvéolaires ultra-légères dans le conteneur d'infiltration. A : Pose des premiers caissons sur la couche compactée de fondation, et sur un géotextile de filtration de type 5.3 (COPRO, 2024) ; Ensemble des sept caissons emboîtés et reliés aux ouvertures de chaque côté du conteneur ; C : Fermeture du géotextile de filtration par coutures mécaniques et lignes de colle à chaud ; D : étanchéification des tuyaux de connexion par des bandes géotextiles et des lamelles de caoutchouc.

La pose au sein du conteneur d'infiltration s'est faite d'abord en installant les cinq premiers et le dernier caissons sur un géotextile filtrant de type 5.3 (COPRO, 2024), pour les connecter aux ouvertures du conteneur par des tubes en inox de 400 mm (amont) et 300 mm (aval) (Figure 3.A,B). Le sixième caisson a été posé par la suite pour refermer le système. Le géotextile de filtration a été ensuite tendu et refermé autour des caissons par collage et couture mécanique (Figure 3.C). L'étanchéité est assurée par des jointoiements en silicone, des lamelles de caoutchouc de 3 mm d'épaisseur, et des couches de géotextiles maintenues en place sur la circonférence des tuyaux par points de colle, coutures et colliers serrants (Figure 3.D).

4.3.3 Installation du tuyau perforé en polypropylène

Contrairement aux caissons SAUL, le tuyau perforé en polypropylène (PP), de modèle Ultra Kyma ID400 issu de Dyka.be, est constitué d'une seule pièce (Figure 4.A). Le diamètre intérieur du tuyau est de 325 mm, dans une membrane crénelée autour de laquelle un géotextile de filtration type 5.3 est déjà enroulé (COPRO, 2024). Un manchon est intégré à une des deux extrémités, de diamètre interne 450 mm.

Ces spécificités ont conduit à des difficultés de mise en place très différentes des caissons SAUL. Le manchon a dû être raboté que pour que le tuyau soit précisément aussi long que l'intérieur du conteneur, raccords inclus. A l'aide d'une grue, le tuyau a été déposé en oblique puis redressé sur les premières couches de sable, avant que ses extrémités ne soient encastrées dans les conduites de 400 mm et 300 mm. Des sections en demi-lunes ont été dimensionnées et découpées dans une plaque de bois contreplaqué pour accommoder les jointures au maximum. L'étanchéité à l'eau et au Millisil® s'est réalisée en trois étapes : (i) une jointure en silicone le long des raccordements en demi-lune, (ii) la pose d'une mousse de polyuréthane par-dessus, puis après séchage (iii) un pourtour de géotextile de séparation.

Le volume plus faible occupé par le tuyau perforé par comparaison aux caissons SAUL ont requis un plus grand volume de sable d'infiltration pour terminer le remplissage du conteneur. En revanche, son alignement au centre a facilité le compactage, qui a pu intégralement se faire à la plaque vibrante (section 4.3.1 ; Figure 4.B).



Figure 4 : Installation du tuyau perforé en PP et remplissage du conteneur d'infiltration. A : Répartition d'une couche de sable autour du tuyau en PP fraîchement posé ; B : Compactage à la plaque vibrante de l'avant-dernière couche de sable d'infiltration.

4.3.4 Assemblage du circuit d'eau

Le circuit d'eau du poste d'essai est constitué d'éléments de tuyauterie pour la plupart en PVC-HD, d'un diamètre intérieur de 3 pouces. Toutefois, de nombreux ajustements ont été à prévoir. Cela inclut : (i) des adaptateurs de et vers les conteneurs (de diamètre 4 pouces), (ii) des raccordements avec des connecteurs en inox en entrée et sortie de chacune des deux pompes et du débitmètre (Figure 5.A,B), ainsi que (iii) des sections biseautées créées par impression 3D pour accommoder des petites mais significatives différences de diamètre (Figure 5.C).

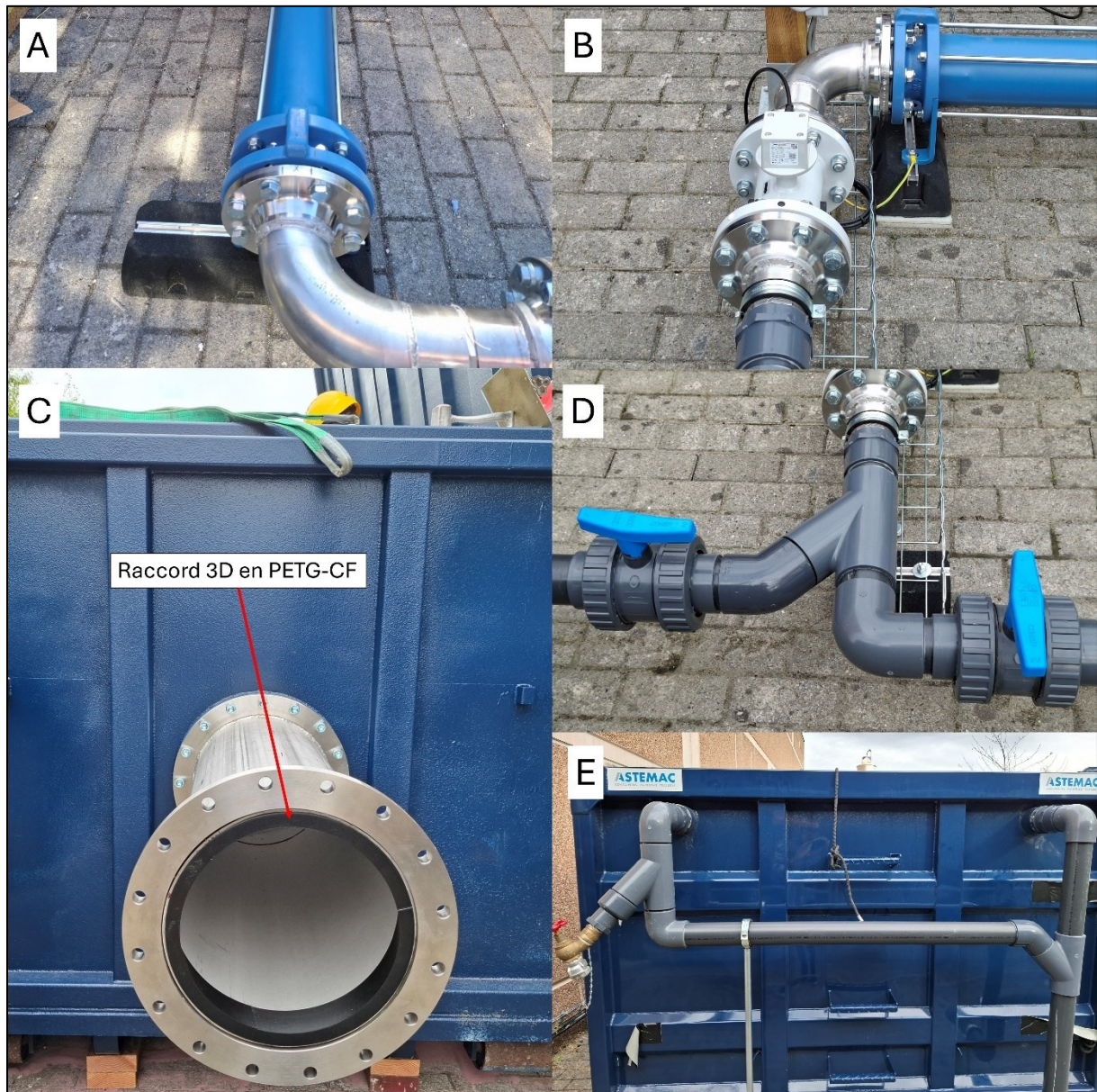


Figure 5 : Eléments constitutifs notables du circuit d'eau. A-B : Connecteurs en inox accommodant les entrées et sorties des deux pompes et du débitmètre inductif ; C : Pièces de raccordement en PETG-CF (polyéthylène téréphtalate modifié au glycol et fibre de carbone), imprimées en 3D pour une parfaite étanchéité ; D : Vanne de direction vers le conteneur citerne (gauche) ou vers le réseau d'égouttage (droite) ; E : Conduites vers l'entrée du conteneur citerne, avec possibilité d'y connecter une arrivée d'eau semi-automatisée en provenance du bâtiment pour le remplissage (gauche).

Un ensemble de robinets a également été installé le long de ce circuit pour ouvrir ou fermer le conteneur citerne, diriger l'eau en sortie de débitmètre vers la citerne ou l'évacuer vers le réseau d'égouttage (Figure 5.D), ou encore y raccorder l'arrivée d'eau en provenance du bâtiment pour remplir le conteneur citerne (Figure 5.E).

4.3.5 Protection de la citerne

Depuis la finalisation du poste d'essai à l'été 2025, il est apparu que l'eau stockée dans le conteneur citerne devait être protégée de l'extérieur. L'incorporation accidentelle de débris dans le volume de la citerne menaçait d'obstruer les conduites, de même que l'exposition d'une surface d'eau inerte à la lumière du soleil y favorise la croissance d'algues. C'est pourquoi une structure en lamelles imbriquées d'acier a été conçue pour être fixée au-dessus des parois du conteneur citerne (Figure 2). Ce dispositif a été installé avant que la première expérience ne débute.

4.4 Déroulement des expériences

Cette section vise à établir un mode opératoire typique d'un essai, qui se subdivise en trois parties : (i) l'établissement d'un état stationnaire, (ii) une phase d'infiltration en présence de l'élément polluant et (iii) l'inspection, nettoyage et remesure du système. Chaque système d'infiltration est colmaté et curé à deux reprises, pour tester un plus large éventail de protocoles de nettoyage. La suite des opérations est schématiquement représentée en Figure 6.

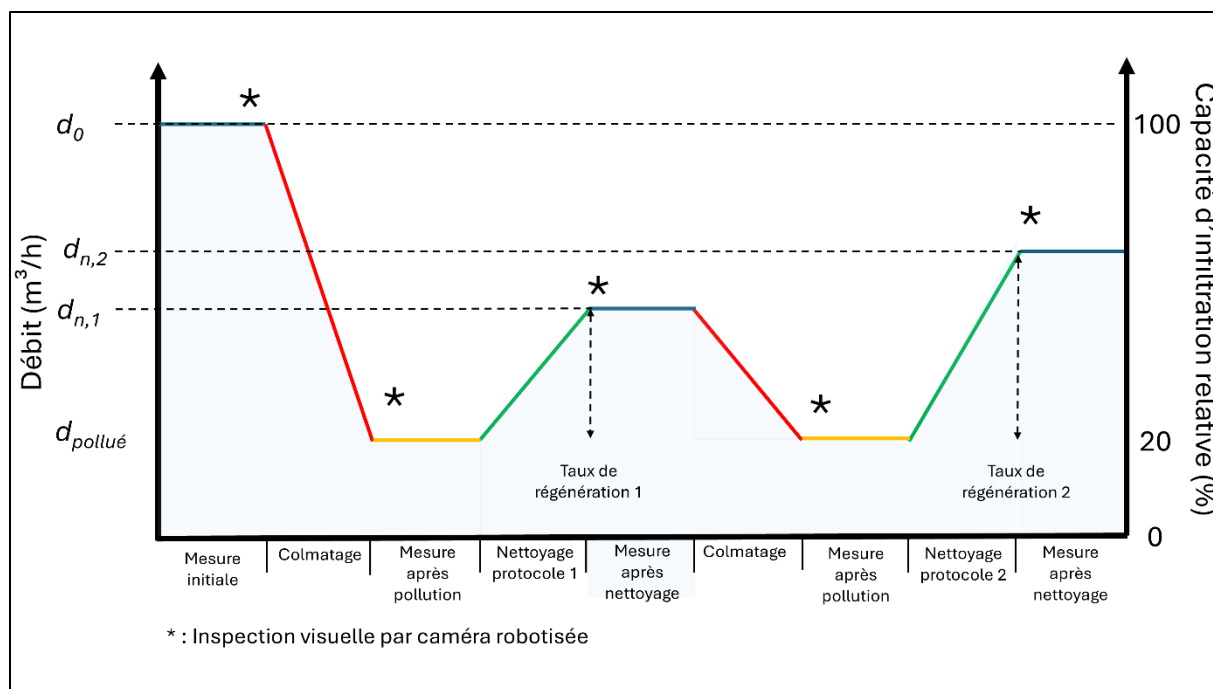


Figure 6 : Principe théorique d'un essai, subdivisé en ses différentes étapes, et exprimé selon en termes de débits apparents, ou relativement à la capacité d'infiltration initiale du système. Schéma pas à l'échelle.

Avant le début d'une expérience et sans l'automatisation des opérations centralisées dans le conteneur technique, il convient de vérifier que les consommables (eau potable ou issue du toit du bâtiment, Millisil® W4) soient prêts, et que tous les composants opérationnels (vannes,

débitmètre, pompes, commandes, mélangeur de la cuve). L'intérieur du système d'infiltration est une première fois inspecté par une caméra robotisée insérée par la chambre de visite, et pilotée à distance (voir section 5.4). Enfin, la dernière étape avant le début d'une expérience consiste à vérifier la capacité hydraulique de la simulation de sol en place.

4.4.1 Capacité hydraulique du sable d'infiltration et état stationnaire

La première étape de l'expérience consiste à comparer la capacité hydraulique du sol mis en œuvre dans le conteneur d'infiltration avec la valeur obtenue en laboratoire. Cette démarche vise à déterminer sur quelle fréquence les pompes doivent être calibrées pour optimiser l'infiltration à travers le sable. Un régime trop faible limiterait l'écoulement naturel, faussant ainsi les résultats d'une expérience. Similairement, une fréquence trop élevée des pompes risquerait de générer un écoulement irrégulier vers le débitmètre, voire de surévaluer la capacité hydraulique du sable par effet de succion. Cette mesure a été obtenue après obtention d'un écoulement permanent, en déconnectant la pompe à la sortie du conteneur d'infiltration. La fréquence de la pompe en amont nécessaire pour maintenir un niveau d'eau constant dans le conteneur est ensuite corrélée avec un débit. Les valeurs acquises pour ces mesures préliminaires sont reprises en section 5.1.

L'expérience en elle-même débute par l'établissement d'une circulation d'eau en état stationnaire. Il s'agit du même régime que celui utilisé pour la calibration des pompes : les flux entrant et sortant s'équilibrent, avec un niveau d'eau constant à l'intérieur du conteneur d'infiltration. Ici toutefois, la pompe aval est ici reconnectée, et le niveau piézométrique aligné sur le système d'infiltration est prédéterminé, à 80% de sa hauteur.

Les vannes et la pompe en amont du conteneur d'infiltration sont ouvertes, celles en aval d'abord maintenues fermées, afin de saturer le sable et atteindre la hauteur piézométrique de référence. La seconde moitié du circuit d'eau est alors actionnée à son tour, avec un réglage potentiel des pompes pour compenser une éventuelle fluctuation du niveau piézométrique. L'état stationnaire est atteint après obtention des valeurs seuil des niveaux piézométriques et du débitmètre, avec corrélation des fréquences des pompes, et après un maintien suffisamment long du régime. Un état stationnaire requiert du temps, car il suppose que l'intégralité de la porosité du sable d'infiltration soit saturée, et en écoulement permanent. Une mesure précise de débit [d_0] est lue sur le débitmètre après minimum trois minutes (Tableau 2 ; Figure 6).

4.4.2 Infiltration d'eau polluée

La phase de colmatage peut alors débiter. La cuve de mélange, à ce stade remplie d'eau claire, est activée, à savoir que cette eau est agitée par l'allumage des batteurs et l'introduction d'air comprimé par le bas de la cuve. Le Millisil® est manuellement incorporé dans la cuve de mélange par sacs de 25 kg, par le biais d'un bac d'alimentation intégré. Lorsque ce sable fin tourbillonne en suspension homogène, le robinet de la cuve est ouvert pour incorporer cette eau polluée dans le circuit principal par effet Venturi. L'opération est répétée à intervalles réguliers, autant de fois que nécessaire, en fonction de la réaction du conteneur d'infiltration. Toutefois, il convient d'ajouter le Millisil® par paliers, pour prévenir un ensablement des canalisations.

L'adjonction de sable dans le circuit au niveau de la chambre de visite implique un dépôt attendu au sein du système d'infiltration. Ce sable fin devrait progressivement colmater les pores du géotextile de filtration sur la surface d'infiltration du système, impliquant une chute du débit. Le débitmètre rend compte des fluctuations du débit en sortie du conteneur, et la puissance des pompes est ajustée en conséquence pour maintenir un niveau d'eau constant. La cuve de mélange est coupée et déconnectée du circuit principal lorsque le débit instantané stagne ou atteint un minimum de 20% du débit initial [$d_{pollué} = 0,2d_0$] (Figure 6). La pompe amont est fermée à son tour, permettant au conteneur d'infiltration de se vider de son eau, et de la renvoyer vers le conteneur citerne par l'intermédiaire de la pompe aval. Toutefois, il est également possible de rediriger l'eau vers le réseau d'égouttage. Cette évacuation est envisagée notamment en prévision de températures négatives. Les différentes vannes permettent de cloisonner le volume d'eau dans le conteneur citerne, puis de vider les tuyaux de leur eau résiduelle, afin d'éviter que le gel ne les endommage.

4.4.3 Nettoyage et inspections

Après que le poste d'essai est éteint et que la vidange du conteneur d'infiltration s'est opérée, la caméra robotisée procède à un second examen visuel par l'intérieur du système d'infiltration (Figure 6). Ce deuxième passage permet de localiser les zones les plus affectées par le dépôt de polluant. Ces renseignements sont très précieux pour les entreprises de curage mobilisées pour nettoyer les systèmes encrassés, car ils leur permettent de paramétrer au mieux le protocole de nettoyage. Le curage est réalisé au moyen d'une buse insérée par la chambre de visite, injectant de l'eau sous pression sur toute la longueur du système d'infiltration. Les protocoles existants impliquent un certain nombre de paramètres, incluant :

- Le modèle de la buse utilisée ;
- Le nombre de passages de la buse de nettoyage ;
- Le volume d'eau requis pour effectuer le curage du système d'infiltration ;
- Le débit et la pression auxquels l'eau est projetée à l'intérieur du système colmaté ;
- La pression interne du tuyau d'aspiration.

Tableau 1 : Synthèse des paramètres de chacun des protocoles de nettoyage mis en œuvre.

Protocole		A	B	C	D
Firme		X ¹		Y ¹	
Date		28/11/2025	28/11/2025	18/12/2025	18/12/2025
Buse de nettoyage		(Figure 7.B)	(Figure 7.C)	(Figure 7.D)	(Figure 7.E)
Nombre de passages	Allers-retours	2	2	2	2
Débit de la pompe (haute pression)	L/min	270	270	330	330
Pression de la buse	bar	140	250	130	130
Sous-pression du tuyau d'aspiration	mbar	-850	-850	-800	-800
Débit du tuyau d'aspiration	m ³ /h	3100	3100	3200	3200

¹ : Les deux entreprises ont été anonymisées dans le corps du présent rapport. Elles sont chaleureusement remerciées en section 9, sans ordre particulier.

Une inspection visuelle supplémentaire est lancée après le curage, afin de déterminer l'efficacité du protocole, et de constater d'éventuels dégâts qu'il aurait occasionnés. L'expérience se termine par une nouvelle mesure de débit à l'eau claire, après acquisition d'un état stationnaire. Le débit après nettoyage [d_n] est comparé au débit initial, et le taux de régénération peut être calculé. Pour un débit résiduel de 20%, le taux correspond à : $[R_{0,20}(\%) = 100 * (\frac{d_n}{d_0} - 0,2)]$ (Figure 6).

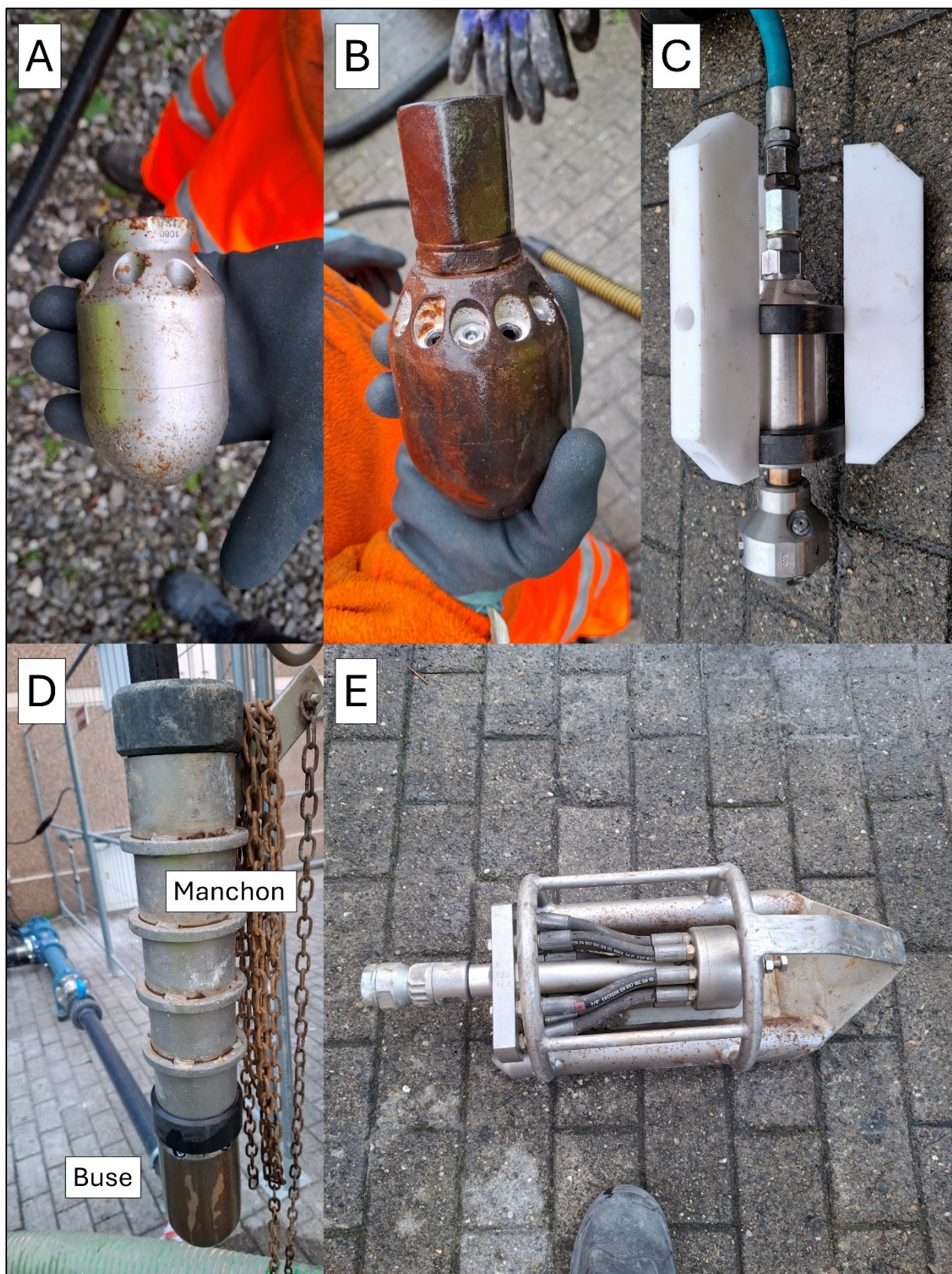


Figure 7 : Différents modèles de buse de nettoyage utilisées pour les essais de curage de ce projet. A-C : buses utilisées par l'entreprise X, la buse C étant dotée d'une tête rotative. D-E : buses utilisées par l'entreprise Y, la buse E possédant un fond plat et fermé.

5 Résultats

5.1 Mesure de la capacité d'infiltration initiale

Les valeurs renseignées (Tableau 2) se situent dans le même ordre de grandeur que le test effectué en laboratoire, mais restent plus élevées, ce qui sera discuté en section 6.1.1. Les fréquences obtenues permettent néanmoins de tirer le meilleur parti du spectre de fonctionnement des pompes, permettant une plus grande précision pour tracer l'évolution du débit au cours d'une expérience.

Tableau 2 : Synthèse des mesures préliminaires de calibration des pompes et de la capacité hydraulique du sable.

	Fréquence pompe amont	Débit associé [d_0]	Surface d'infiltration du lit de sable	Capacité hydraulique en place	Capacité hydraulique en laboratoire
	(rpm)	(m ³ /h)	(m ²)	(m/s)	(m/s)
Système 1 : Structures Alvéolaires Ultra-Légères	1094	17,28	13,5	$3,56 \cdot 10^{-4}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$
Système 2 : tuyau perforé en PP	1040	16,56		$3,41 \cdot 10^{-4}$	

5.2 Infiltration à travers les structures alvéolaires ultra-légères

Il est bien vite apparu nécessaire que de grandes quantités de Millisil® W4 seraient nécessaires pour colmater les SAUL. C'est pourquoi la cuve de mélange a été cycliquement remplie d'eau pour y incorporer du polluant par chargements de 50 kg (Tableau 3). Des dépôts de Millisil® ont par conséquent été aperçus au fond de la chambre de visite (voir section 5.4.1).

Tableau 3 : Compte rendu des résultats numériques des essais de colmatage et nettoyage des SAUL.

Date	Heure	Millisil ajouté	Débit	Fréquence pompe amont	Fréquence pompe aval
		kg	m ³ /h	rpm	rpm
<u>Colmatage 1</u>					
21/11/2025	11:10:00	0	17,28	1094	1092
21/11/2025	11:45	50	16,2	1001	1007
21/11/2025	12:15	100	12,52	798	806
21/11/2025	12:35	150	11,24	726	726
21/11/2025	13:30	200	9,42	618	618
24/11/2025	11:45	250	9,1	600	600
24/11/2025	12:30	300	7,6	460	510
24/11/2025	13:50	350	5,8	390	402
24/11/2025	14:30	400	3,4	256	256
26/11/2025	10:00	450	6	399	406
26/11/2025	14:30	450	5,05	339	339
27/11/2025	13:30	450	6,3	435	435
28/11/2025	6:30	450	5,3	387	365
28/11/2025	7:00	450	5,9	392	410
<u>Curage 1</u>					
28/11/2025	11:30	450	4,8	335	336
<u>Colmatage 2</u>					
28/11/2025	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<u>Curage 2</u>					
28/11/2025	13:45	450	4,5	325	322
28/11/2025	14:30	450	5,5	375	376

Il est observé une décroissance linéaire entre la masse de polluant et le débit mesuré par le débitmètre (Figure 8.A), cette dernière étant d'ailleurs précisément corrélée à la fréquence des pompes (Figure 9). Cette tendance s'est interrompue lorsque la valeur de débit de 3,4 m³/h a été atteinte (= $d_{pollué} = 0,2d_0$; Figure 8.A,B). L'expérience a dû être interrompue autour de 9,5 m³/h de débit ou 600 rpm (Figure 8.B), afin de régler un souci technique au niveau de la gamme de fréquences auxquelles les pompes pouvaient fonctionner, sans impact sur la progression de l'essai. La régression linéaire montre que pour cet essai, la capacité d'infiltration du système baisse d'environ 33 L/h pour chaque kilogramme de Millisil® incorporé (Figure 8.A). En revanche, une mesure de routine effectuée deux jours plus tard (26 novembre) a montré que la capacité d'infiltration était remontée (Tableau 3; Figure 8.A,B). L'ajout de 50 kg de Millisil® supplémentaires dans le système n'a pas permis de faire descendre la capacité d'infiltration jusqu'à la valeur précédemment atteinte de 20% de la capacité initiale (Tableau 3). Similairement, la capacité d'infiltration était remontée entre 5,3 m³/h et 6,3 m³/h les deux jours suivants (27 et 28 novembre) (Figure 8.B; Tableau 3). Il faut donc considérer que le régime linéaire est interrompu lorsque le circuit d'eau est mis à l'arrêt pendant une période de minimum plusieurs heures.

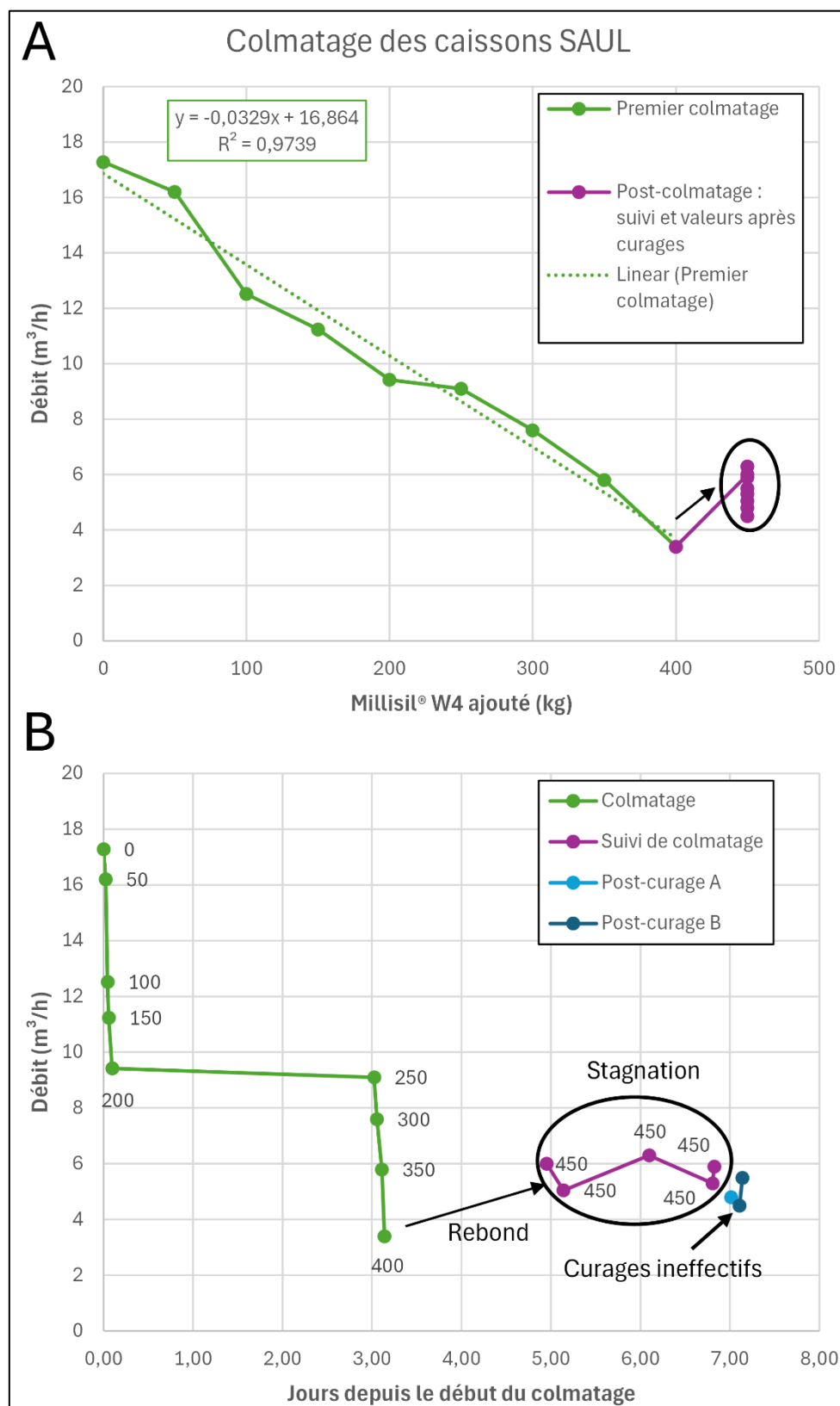


Figure 8 : Evolution de la capacité d'infiltration des SAUL par mesure de débits instantanés au débitmètre inductif. A : mesures exprimées selon la masse de polluant ajouté ; B : mesures exprimées selon une échelle de temps, avec en vignettes les masses totales de polluant, en kg.

Une première tentative de curage a été effectuée le vendredi 28 novembre en matinée. La buse initialement utilisée (Figure 7.A) devait progresser à travers les caissons SAUL par propulsion induite par les jets d'eau sous pression. La structure rectangulaire des SAUL a toutefois entravé sa progression, car l'ogive a dévié de sa trajectoire dès son introduction dans le premier caisson. Pour y remédier, une deuxième ogive, plus lourde (Figure 7.B) a été montée à l'extrémité du tuyau de nettoyage, et une corde l'a reliée au niveau piézométrique situé à l'autre extrémité du système d'infiltration. Cette corde a permis de guider la progression de l'ogive sur toute la longueur des caissons SAUL. En revanche, cet artifice n'est pas représentatif des conditions réelles pour des systèmes effectivement enterrés. Après les deux allers-retours de la buse selon le protocole A (Tableau 1), la capacité d'infiltration du système a été mesurée à 4,8 m³/h, soit moins qu'avant le début du curage (Tableau 3), pour un taux de régénération donc nul.

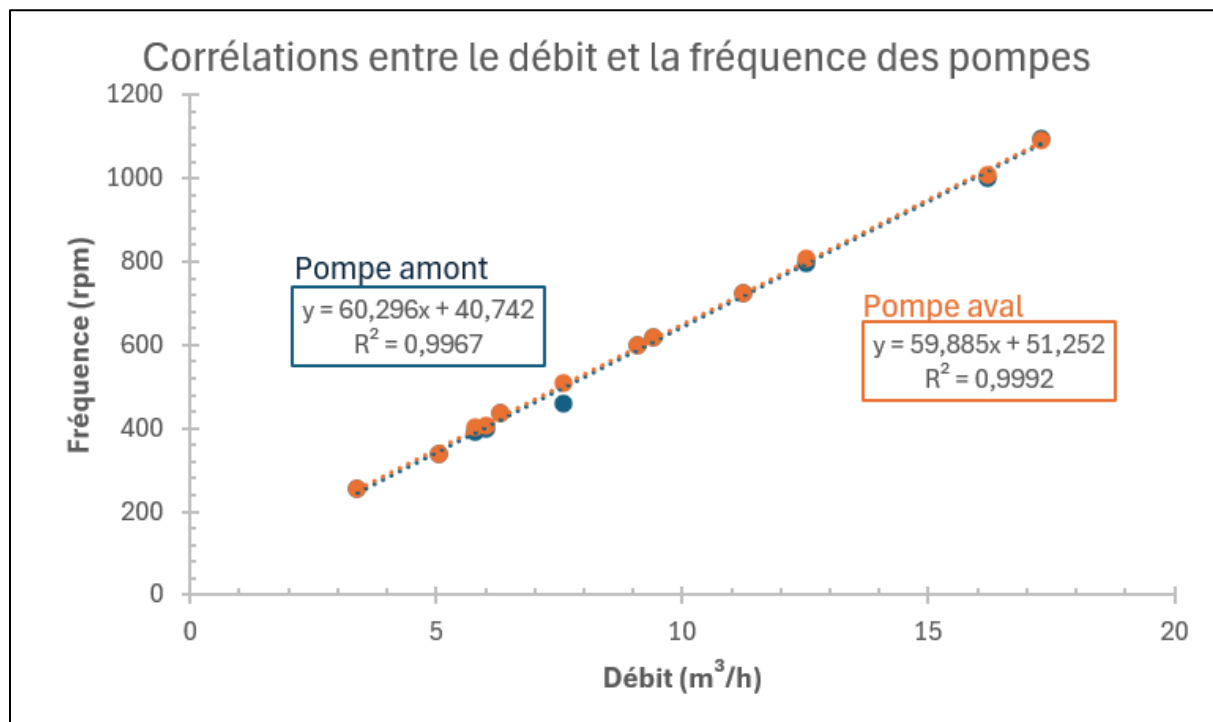


Figure 9 : Corrélations entre la fréquence des pompes et les mesures affichées par le débitmètre.

L'absence de régénération même partielle de la capacité d'infiltration a conduit à l'annulation du colmatage intermédiaire. Le second protocole de curage B (Tableau 1) s'est opéré au moyen d'une troisième buse et d'une pression accrue (Figure 7.C). Les deux valeurs de capacité d'infiltration dans les deux heures suivant ce second protocole donnent respectivement 4,5 m³/h et 5,5 m³/h (Tableau 3), ce qui confirme le résultat du curage A, avec ici aussi un taux de régénération nul.



Figure 10 : Préparation du protocole de nettoyage B.

5.3 Infiltration à travers le tuyau perforé

Le premier ajout de 50 kg de Millisil® au sein du système a provoqué une chute de débit de près de 5 m³/h, soit une diminution bien plus importante que pour le colmatage des caissons SAUL (Tableau 4 ; Figure 11). La suite du colmatage s'est donc opérée par incréments de 25 kg de Millisil®. Rapidement, il est apparu qu'un lit de sable s'est déposé au fond de la chambre de visite. Vu l'incrément moitié moindre que pour les caissons SAUL, la sédimentation de sable le long d'une surface non-infiltrante était susceptible d'impacter le bon déroulement de l'expérience. C'est pourquoi des fluctuations au niveau de la pompe amont ont été causées artificiellement, afin que les variations de courant remobilisent ce sable jusqu'à l'intérieur du tuyau d'infiltration.

Tableau 4 : Compte rendu des résultats numériques des essais de colmatage et nettoyage du tuyau perforé en PP.

Date	Heure	Millisil ajouté (total)	Millisil ajouté (incrément)	Débit	Fréquence pompe amont	Fréquence pompe aval
		kg	kg	m ³ /h	rpm	rpm
<u>Colmatage 1</u>						
17/12/2025	10:30:00	0	0	16,56	1040	1047
17/12/2025	11:00	50	50	11,94	748	758
17/12/2025	11:25	75	25	10,20	649	653
17/12/2025	13:00	100	25	7,02	458	456
17/12/2025	13:45	125	25	5,88	400	390
17/12/2025	14:20	150	25	5,28	361	358
17/12/2025	15:00	200	50	4,86	329	329
18/12/2025	7:30	200	0	4,65	352	326
<u>Curage 1</u>						
18/12/2025	9:15	200	0	9,00	589	585
<u>Colmatage 2</u>						
18/12/2025	9:40	250	50	7,32	399	406
18/12/2025	9:55	300	50	6,30	418	418
18/12/2025	10:25	300	0	5,88	394	394
<u>Curage 2</u>						
18/12/2025	12:10	300	0	9,90	630	632

L'ensemble des mesures de débits sont reprises en Tableau 4, et elles sont ici encore couplées avec les quantités de Millisil® incorporées et avec les fréquences des pompes à l'état stationnaire. Il est observé un premier comportement pseudo-linéaire entre l'état neuf et après chargement de 100 kg de polluant, à raison d'environ -95,4 L/h par kg de Millisil® (Figure 11.A), soit une réactivité trois fois plus importante que pour les caissons SAUL. Les mesures suivantes, à 125 kg, 150 kg puis 200 kg, montrent une décorrélation de cette relation, jusqu'à atteindre un palier à un débit résiduel d'un peu moins de 5 m³/h (29% de la capacité d'infiltration initiale du système ;Figure 11.A). L'expérience a été interrompue avant d'atteindre la valeur de 20%, car l'impact d'une même fraction de sable sur le débit avait significativement diminué. Une mesure supplémentaire a été réalisée le lendemain matin, et a confirmé la dernière valeur de la veille, fixant la valeur de débit résiduel à 28% (Figure 11.A,B). Après la décorrélation, le maintien du débit après une nuit de repos montre une deuxième différence par rapport au colmatage des caissons SAUL, qui eux avaient été témoins d'un léger effet rebond (Figure 8).

Le premier curage du tuyau a directement suivi, selon le protocole C (Tableau 1), et en utilisant la buse de nettoyage représentée en Figure 7.D. Deux allers-retours à travers la longueur du tuyau ont été réalisés, sans difficultés particulières. La capacité d'infiltration après curage est remontée à 9,00 m³/h (taux de régénération $R_{0,28} = +26,3\%$; Figure 11.A).

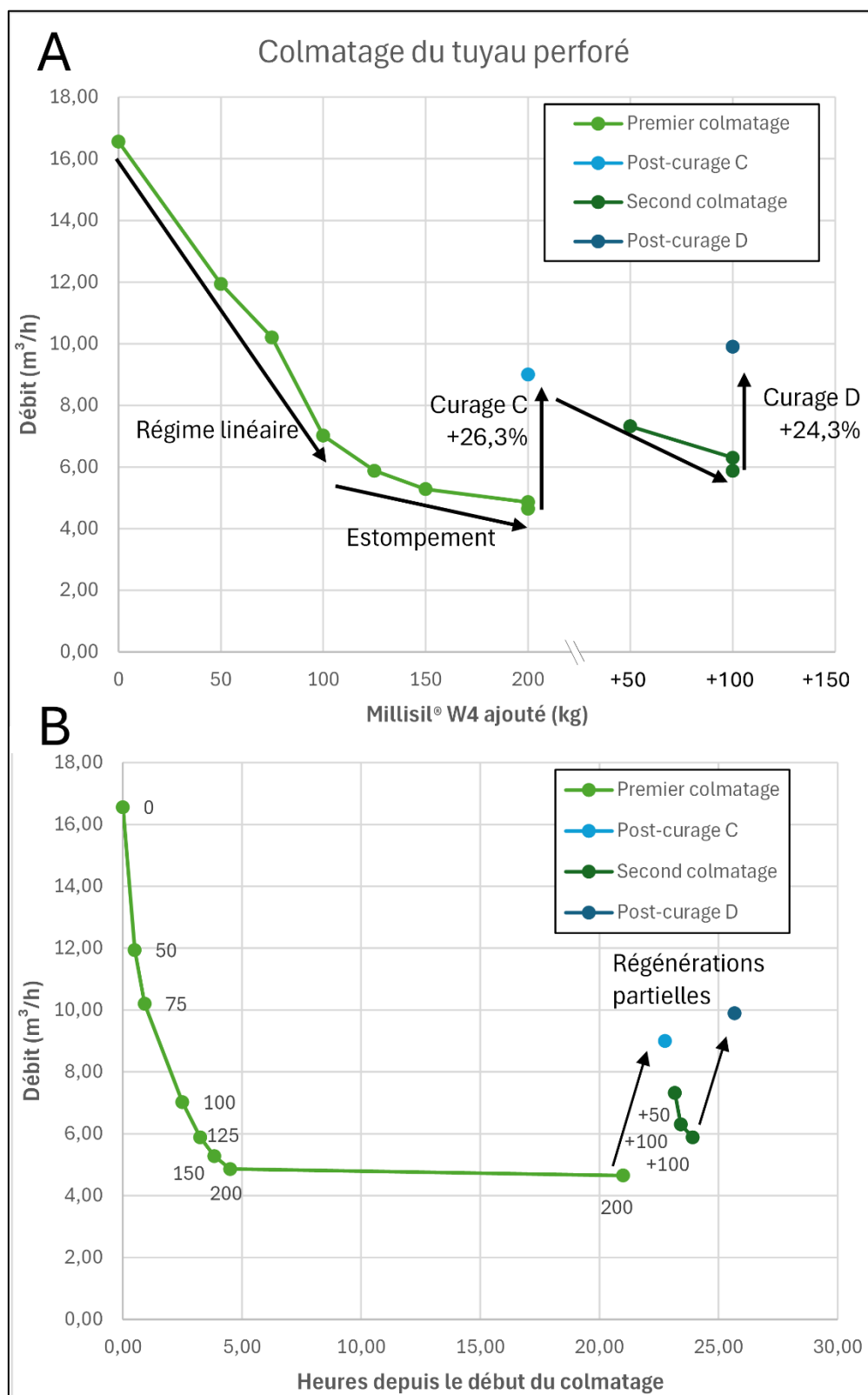


Figure 11 : Evolution de la capacité d'infiltration du tuyau perforé en PP par mesure de débits instantanés au débitmètre inductif. A : mesures exprimées selon la masse totale de polluant ajouté ; B : mesures exprimées selon une échelle de temps, avec en vignettes les masses de polluant, en kg. La quantité de Millisil® retirée au cours des curages étant inconnue, les masses adjointes lors du second colmatage correspondent aux incréments.

Le second colmatage a introduit 100 kg de Millisil® supplémentaires en deux temps. Bien que la masse totale incorporée corresponde à 300 kg, une quantité indéterminée de sable a entre-temps été aspirée du système lors du premier nettoyage, si bien qu'il serait trompeur d'encore désigner les étapes par masses absolues (cf. Figure 11.B). Une seconde mesure à +100 kg a confirmé la perte d'impact du rajout de Millisil®, si bien que le protocole de nettoyage D a été enclenché alors que la capacité d'infiltration du système se situait à 5,88 m³/h (36% de la capacité initiale).

Le protocole de curage D comprenait la buse de nettoyage photographiée en Figure 7.E. Cette buse se différencie des autres par une taille plus imposante qui lui permet pour une même pression d'eau de propulser des débits d'eau plus élevés (Tableau 1). La capacité d'infiltration après ses passages est remontée à 9,90 m³/h (taux de régénération $R_{0,35} = +24,3\%$; Figure 11.A), soit près de 60% du potentiel d'infiltration.

5.4 Inspections visuelles

5.4.1 Inspections visuelles des structures alvéolaires ultra-légères

Les inspections visuelles ont été réalisées par l'intromission d'un robot-caméra spécialisé dans le diagnostic des réseaux d'égouttage. Le robot est déposé au fond de la chambre de visite, puis est piloté à travers le système d'infiltration depuis le poste situé dans la camionnette spécialisée du CRR. Quatre inspections visuelles ont été réalisées au cours de l'expérience sur les caissons SAUL : (i) à l'état neuf, avant que le Millisil® ne soit ajouté au système (Figure 12.A) ; (ii) à l'état colmaté après charriage de 450 kg de Millisil® (Figure 12.B), (iii) après le curage selon le protocole A (Tableau 1), et (iv) après le curage selon le protocole B (Tableau 1).

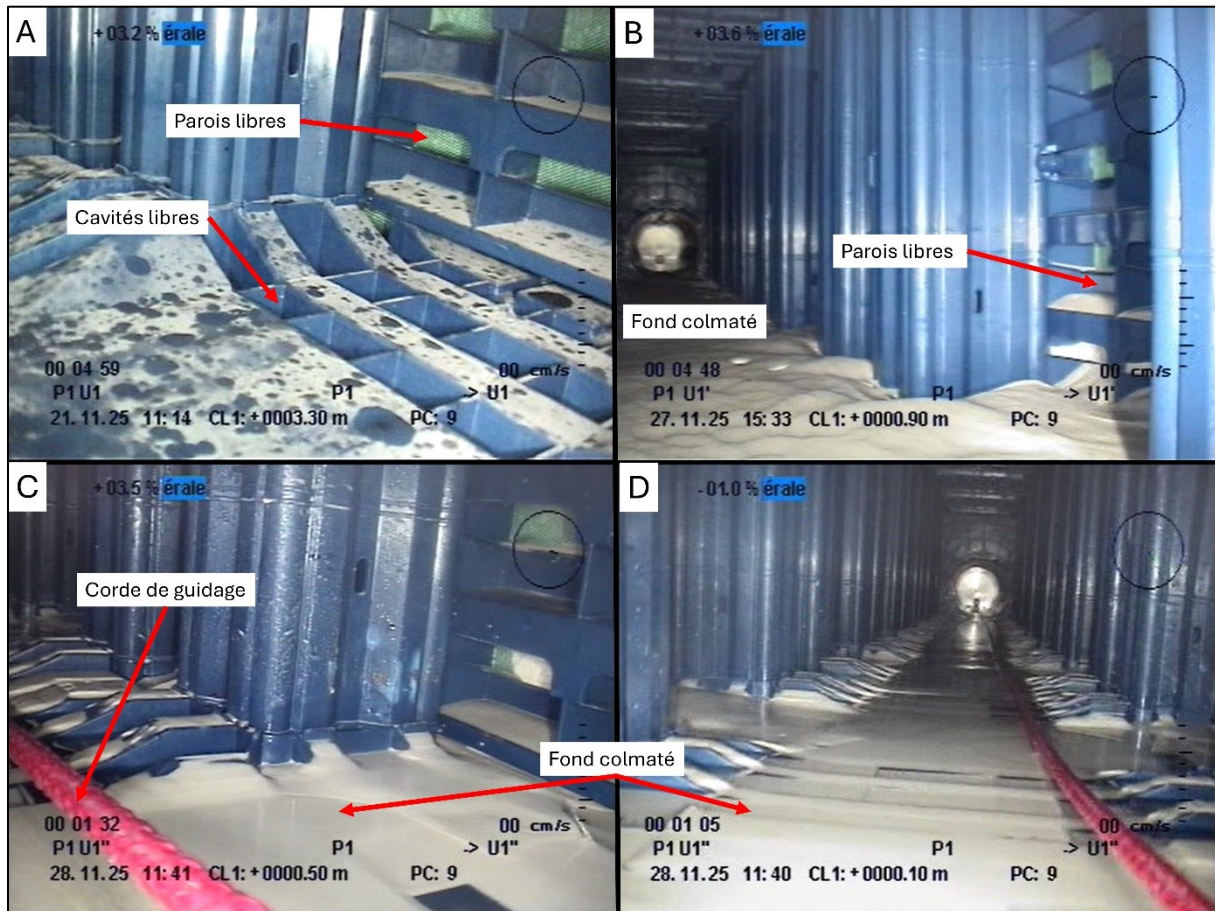


Figure 12 : Images issues des différentes inspections visuelles des structures alvéolaires ultra-légères. A : vue macro d'un pied de la paroi proximale, à l'état neuf ; B : vue macro du même pied, à l'état colmaté ; C : vue macro du même pied, après curage, montrant toujours une masse non-négligeable de polluant ; D : vue de la nef proximale après curage.

Il apparaît très vite que le Millisil® s'est déposé de manière très homogène sur toute la surface des caissons d'infiltration. Les prises de vue le long des bordures des caissons montrent également que les parois et le géotextile restent dégagés passé les premiers centimètres, et que l'épaisseur du dépôt ne semble pas varier à proximité immédiate des bords (Figure 12.A,B). A l'état curé, une partie de l'épaisseur du dépôt de Millisil® a été retirée, en particulier le long de l'axe de passage de la buse de nettoyage (Figure 12.C,D). En revanche, les nombreuses cavités prévues dans les caissons SAUL afin de maximiser les volumes de vide n'ont pas été correctement évidés. C'est particulièrement le cas pour les ouvertures situées en face inférieure (Figure 12.C,D).

La structure elle-même des caissons SAUL possède un impact observable sur la qualité du curage. Le modèle utilisé ici contient deux nefs : l'une dans l'axe des conduites de 400 mm et 300 mm, l'autre en parallèle (section 4.3.2, Figure 3.A,B). La Figure 13 montre des prises de vue comparables à celles présentes en Figure 12, mais cette fois au niveau de la nef latérale.

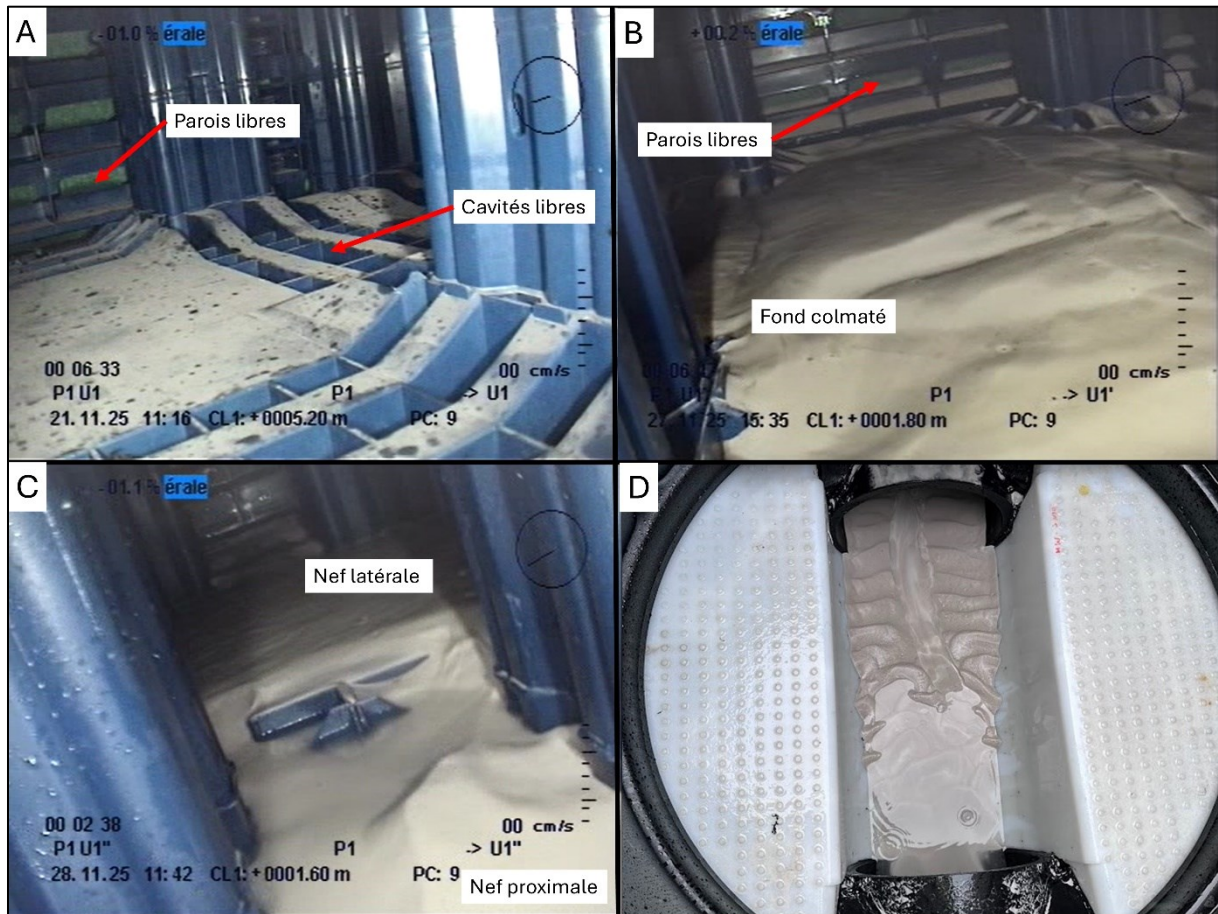


Figure 13 : Images issues des différentes inspections visuelles des structures alvéolaires ultra-légères, suite. A : vue macro d'une partie de la nef latérale, à l'état neuf ; B : vue macro du même emplacement, à l'état colmaté ; C : vue macro du même emplacement après curage, montrant la différence de hauteur du lit de polluant induite par le nettoyage partiel de la buse de nettoyage ; D : vue du dépôt de polluant au fond de la chambre de visite, à l'état colmaté.

Il apparaît nettement que si le dépôt reste homogène d'une nef à l'autre (Figure 13.A,B), le curage n'affecte pas les deux neufs de manière identique (Figure 13.C). Le lit de polluant est resté en place après les passages de la buse, pas ou peu affectés par les jets d'eau pressurisée.

Il est toutefois important de noter que toute la masse de Millisil® ajoutée au poste d'essai n'a pas contribué au colmatage. Un banc de sable a en effet été observé au fond de la chambre de visite (Figure 13.D). Plus étonnant, des quantités non négligeables de Millisil® ont été aperçues lors du démantèlement du système d'infiltration, à la base des SAUL, sous la membrane géotextile (Figure 14). Il est à noter que ce géotextile n'a subi aucun dommage pendant le curage et que ce lit de Millisil® ne peut s'être déposé qu'au cours de l'expérience. A l'inverse, les traces de Millisil® relevées le long des parois verticales restent en comparaison anecdotiques (Figure 14).



Figure 14 : Lit de Millisil® (blanc) déposé sous les caissons SAUL et la membrane géotextile de filtration, et mis au jour lors du démantèlement du système. L'ampleur de la migration horizontale Millisil® observée au-delà du géotextile le long des parois verticales reste minime (voir ellipse rouge).

5.4.2 Inspections visuelles du tuyau perforé

Le même protocole d'inspection visuelle a été respecté pour l'étude du tuyau perforé par rapport aux caissons SAUL. Cette fois, en raison de l'intercalation d'un colmatage intermédiaire, cinq inspections ont été effectuées : (i) à l'état neuf (Figure 15.A,B), (ii) après un premier colmatage impliquant 200 kg de Millisil® (Figure 15.C), (iii) après le curage selon le protocole C (Tableau 1 ; Figure 15.D), (iv) après un second colmatage qui a charrié 100 kg supplémentaires de polluant, et (v) après le curage selon le protocole D (Tableau 1).

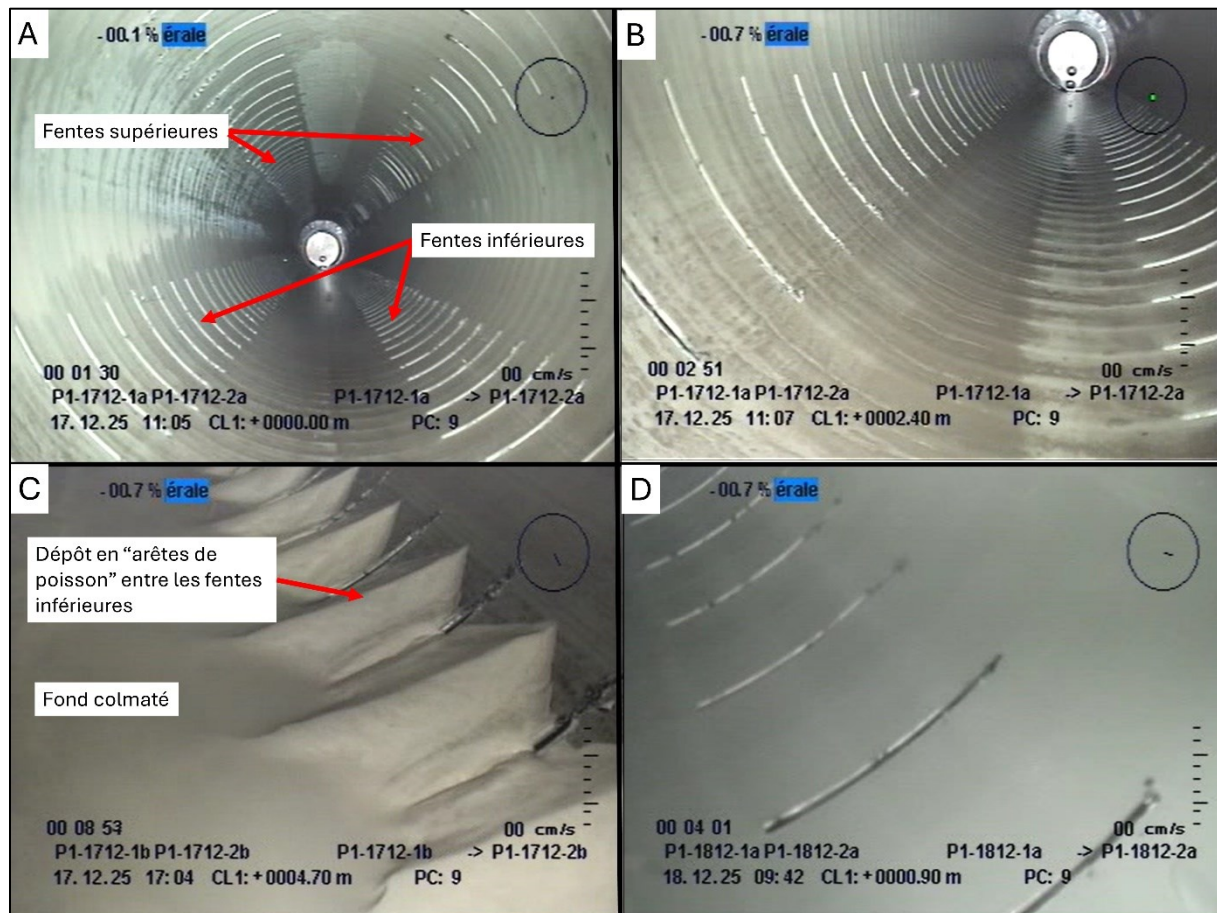


Figure 15 : Images issues des différentes inspections visuelles du tuyau perforé en PP. A : vue générale de l'intérieur du tuyau, à l'état neuf ; B : idem, avec détail sur les fentes d'infiltration inférieures ; C : vue macro du lit de polluant au fond du tuyau à l'état colmaté, et des dépôts en forme de branchies entre les fentes inférieures ; D : macro du même emplacement qu'en C, après curage.

La géométrie du dépôt au sein du tuyau a complètement changé par rapport aux caissons SAUL, s'accommodant de la symétrie circulaire et des rangées de fente (Figure 15.A,B). Il en ressort que le Millisil® est disposé selon une structure semblable à des branchies (Figure 15.C), avec des crêtes intercalées entre les fentes du tuyau. L'état nettoyé après le protocole de curage C montre que tout le Millisil® visible a été aspiré ou remobilisé (Figure 15.D). Les inspections au terme du second colmatage et du curage selon le protocole D livrent des conclusions similaires.

Bien que la quantité absolue de polluant incorporé dans le tuyau perforé soit plus faible que pour les caissons SAUL, un même dépôt y a été observé au fond de la chambre de visite. Comme indiqué en section 5.3, ce dépôt a été autant que possible remobilisé vers le tuyau perforé.

5.4.3 Caractéristiques de l'eau après curage

L'eau du circuit est apparue trouble à plusieurs reprises en aval du conteneur d'infiltration : dans les piézomètres du double fond du conteneur d'infiltration, ainsi que dans le conteneur citerne. Cette eau sale a été similairement observée tant pour l'expérience impliquant les caissons SAUL que le tuyau perforé en PP. De plus, la vidange des conteneurs entre deux remplissages a mis en exergue un fin lit de Millisil® sur toute la surface du double fond du conteneur d'infiltration, tout

comme au fond du conteneur citerne (Figure 14). Les conditions météorologiques n'ont pas permis d'effectuer la vidange du conteneur au terme de l'expérience sur le tuyau perforé. Il n'a dès lors pas encore été possible d'observer si du Millisil® s'était lui aussi déposé au-delà de la membrane géotextile.

6 Discussion

6.1 Contrôle et évolution des débits

6.1.1 Potentiel d'infiltration du sable

Le choix du sable d'infiltration calcaire 0/4 mm lavé reposait sur la nécessité d'offrir une capacité d'infiltration suffisamment élevée, sans pour autant que les débits à la sortie du conteneur d'infiltration ne soient supérieurs à la capacité des pompes. La mesure de laboratoire de la capacité hydraulique à l'OPN renseigne $1,14 \cdot 10^{-4}$ m/s. A l'inverse, les mesures de débits à l'eau claire obtenus pour les deux sols en place font état de $17,28 \text{ m}^3/\text{h}$ et $16,56 \text{ m}^3/\text{h}$, ce qui, compte tenu de la surface du sable dans le conteneur d'infiltration, correspond à des capacités hydrauliques réelles de $3,56 \cdot 10^{-4}$ m/s et $3,41 \cdot 10^{-4}$ m/s, respectivement (Tableau 2). Si des différences entre les valeurs de laboratoire et à l'échelle réelles sont inévitables, un demi-ordre de grandeur semble néanmoins significatif.

L'hypothèse la plus plausible pour justifier cet écart se situerait au niveau de la différence d'énergie moyenne de compactage. L'éprouvette de laboratoire a été compactée à l'Optimum Proctor Normal, sur une surface de l'ordre du dm^2 . Par comparaison, soutenir un tel niveau de compactage à échelle réelle n'est pas réaliste, en témoignent les valeurs de $94 \pm 1\%$ OPN obtenues après un minimum de quatre passages par couche à la plaque vibrante (Figure 4 ; section 11.2). La proximité des valeurs de compactage dans le conteneur témoigne d'une homogénéité dans la mise en œuvre, tandis que des valeurs autour de 95% OPN restent en accord avec les cahiers de charge types (CCT Qualiroutes, 2021/2025).

Cette augmentation permet néanmoins des mesures plus rapides et précises, d'une part par l'intervalle de temps moindre requis que pour atteindre le régime d'état stationnaire, d'autre part car un colmatage sur une plus large gamme de débits diminue les incertitudes.

6.1.2 Modélisation de l'infiltration

Outre les niveaux de compactage, de nombreux autres paramètres influencent la capacité d'infiltration du système. Une modélisation en trois dimensions d'un écoulement depuis un point unique à travers un sol d'infiltration prendrait la forme d'un parapluie. La pression hydrostatique au(x) point(s) d'injection, la forme des granulats et leur niveau de compactage, la température et la saturation du sol sont autant de variables susceptibles de drastiquement influencer sur une mesure de perméabilité. La saturation en eau du sol en particulier est critique ; un sol insaturé présente une fraction volumique d'air, et engendre des forces capillaires qui, pour être prises en compte dans la modélisation, requièrent l'usage de la très complexe formule de Richards. C'est pourquoi dans nos expériences, une attention toute particulière est portée à l'obtention d'un écoulement permanent, ou encore d'un état stationnaire.

L'installation du débitmètre après la sortie du conteneur a permis de simplifier le système, car les débits obtenus correspondent aux moyennes surfaciques instantanées au pied du conteneur, à savoir au niveau de son double fond. Ces débits dépendent directement de la forme du dispositif d'infiltration par-dessus la colonne de sable (*i.e.* la source de « l'écoulement parapluie »), et de sa surface effective, laquelle dépend à son tour de potentielles pertes de performance liées à un colmatage.

La Région wallonne considère que la surface d'infiltration d'un système enterré correspond à sa projection sur l'horizontale (Teller et al., 2023) (Figure 16). A l'inverse, la Région flamande, dans son règlement régional d'urbanisme relatif aux eaux pluviales¹, ne considère dans ses calculs que les surfaces latérales, en prévision d'un colmatage d'une surface inférieure résistant aux entretiens (VLARIO, 2025) (Figure 16). De la sorte, les deux régions sous-estiment la capacité d'infiltration initiale réelle : la Wallonie néglige le potentiel pourtant bien réel d'infiltration latérale, tandis que la Flandre part du principe que la face inférieure d'un système d'infiltration devient intégralement inopérante. Nos observations soutiennent la thèse que le colmatage se concentre sur la partie inférieure d'un dispositif, et que les surfaces latérales assurent ensuite la majeure partie de l'infiltration (voir section 6.3). Toutefois, il serait exagéré de considérer que la face inférieure a perdu toute sa capacité infiltrante, sans quoi une hauteur d'eau permanente se serait maintenue à la base des systèmes colmatés.

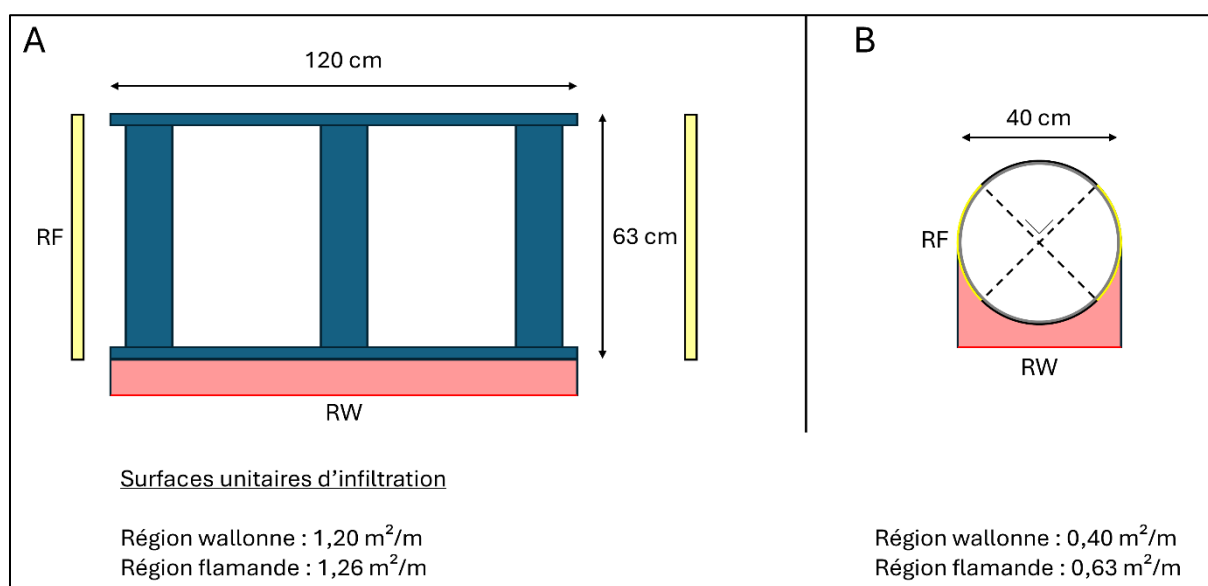


Figure 16 : Schéma explicatif pour le calcul des surfaces d'infiltration en vigueur selon les régions wallonne (RW, projection à l'horizontale, rouge) et flamande (RF, surfaces latérales, jaune), avec comme exemples les deux systèmes d'infiltration testés dans le cadre de ce projet. A : vue frontale d'un caisson SAUL (voir section 4.3.2) ; B : vue frontale du tuyau perforé en PP, redessiné d'après VLARIO (2025) (voir section 4.3.3). Les surfaces renseignées correspondent à un système d'infiltration d'une longueur d'un mètre.

¹ Gewestelijke stedenbouwkundige verordening hemelwater, GSVH, 2023.

6.2 Comportement du Millisil® W4 à travers le poste d'essai

6.2.1 Migration du polluant au-delà du géotextile

Les premières observations de l'eau à travers les niveaux piézométriques et dans le conteneur citerne ont permis de poser l'hypothèse selon laquelle le Millisil® W4 puisse avoir partiellement migré à travers les membranes géotextiles ainsi que le sable d'infiltration. Cette possibilité a été confirmée lors du démantèlement des caissons SAUL par la présence claire d'un lit de Millisil® sous la membrane géotextile de filtration (Figure 14). L'ouverture caractéristique de filtration fait partie des exigences en termes de géotextiles reprises dans le PTV829, la norme NBN EN 13252:2016 et le standard ISO 12956 (COPRO, 2024; NBN, 2016), sous le critère O_{90} . Cet indice exprime, en micromètres, la distance supérieure à l'ouverture de 90% des pores du matériau considéré. Pour les géotextiles de séparation et filtration, cette valeur se situe à $90 \pm 20 \mu\text{m}$. En considérant les valeurs d_{50} et d_{90} du Millisil® W4, de $65 \mu\text{m}$ et $150 \mu\text{m}$ respectivement (Neupert et al., 2021), il n'est dès lors pas étonnant qu'une partie de la masse de sable fin incorporée dans le système d'infiltration se soit accumulée après avoir traversé la membrane géotextile (Figure 14). La quantité de Millisil® retrouvée au fond des deux conteneurs suggère en revanche que le matériau polluant était suffisamment fin que pour également traverser l'épaisseur de sable calcaire d'infiltration 0/4 mm.

6.2.2 Pertinence de ce polluant

Aucun moyen n'a jusqu'à présent été trouvé que pour quantifier la fraction de Millisil® ayant migré au-delà du système d'infiltration. Compte tenu des masses de polluant incorporées (Figure 8, Figure 11), les quantités significatives de Millisil® observées dans le circuit d'eau correspondent en fait à des proportions relativement faibles.

Se pose dès lors la question de la pertinence d'un tel agent polluant pour simuler le colmatage de systèmes d'infiltration enterrés. Les membranes géotextiles de filtration sont caractérisées par une ouverture de filtration caractéristique qui, selon les prescriptions techniques du PTV 829, doivent satisfaire à la règle $O_{90}/d_{90} < 2$ (COPRO, 2024). Les valeurs renseignées à la section 6.2.1 montrent que la membrane est prévue pour traiter des particules de cette granulométrie, d'autant plus que les matériaux les plus fins sont reconnus de longue date pour être les principaux responsables du colmatage des ouvrages enterrés (e.g. F. Boogaard et al., 2015; F. C. Boogaard, 2015; Siriwardene et al., 2007). Le Millisil® W4, avec sa courbe granulométrique standardisée, satisfait donc bel et bien les critères recherchés, malgré les observations lors du démantèlement (Figure 14).

En revanche, le principe même du poste d'essai, qui vise à simuler un vieillissement accéléré de ces systèmes, implique que les concentrations particulières (souvent abrégées *TSS* dans la littérature, pour *Total Suspended Solids*) se situent bien au-delà des concentrations usuelles. F. Boogaard et al. (2015) évoquent une concentration moyenne de $29,5 \text{ mg/L}$ pour divers environnements aux Pays-Bas, avec des maximums de 950 mg/L , toutes classes granulométriques confondues. Dans notre poste d'essai, l'injection de 450 kg de Millisil® au travers des caissons SAUL en présence de 21 m^3 d'eau porte la concentration théorique moyenne à environ 21 g/L , soit près de mille fois la concentration moyenne relevée par F. Boogaard et al. (2015). Cette valeur lisse en réalité des pics de concentrations encore plus élevées,

correspondant aux décharges du contenu de la cuve de mélange dans le circuit d'eau. Une vidange au cours de nos expériences de colmatage apportait une eau dont la TSS instantanées pouvait dépasser 40 g/L². Les systèmes d'infiltration, de même que les membranes géotextiles, ne sont pas prévus pour traiter des TSS instantanées aussi irréalistes.

La migration d'une partie du polluant à travers la membrane géotextile et le sable d'infiltration ne dépend toutefois pas de la concentration à laquelle il y est injecté, mais plutôt de sa masse, et de sa classe granulométrique. Le poste d'essai a permis de simuler en quelques heures l'état d'un système d'infiltration s'il était soumis durant des années à une eau possédant une concentration en TSS plus modérées. Il y a été confirmé que la classe granulométrique 0/0,063 mm, fortement représentée dans la courbe granulométrique du Millisil® W4, contribue le plus lourdement au colmatage des systèmes d'infiltration, tout en étant lessivée au travers d'un sol infiltrant. Cela soutient l'importance d'une inspection et d'un entretien réguliers et appropriés de ces systèmes, pour en désengorger les systèmes affectés, et limiter les pertes de performance à la fois du système d'infiltration et du sol en place.

6.3 Comportement des systèmes d'infiltration lors du colmatage

6.3.1 Modes de colmatage du tuyau perforé

La lecture des figures retraçant l'évolution des débits renseigne des réactions au colmatage distinctes selon le type de système d'infiltration employé (Figure 8 ; Figure 11).

Le tuyau perforé se colmate d'abord selon un régime linéaire, depuis l'état neuf jusqu'à approximativement 40% (7,02 m³/h) de sa capacité d'infiltration initiale (Figure 11A, Tableau 4). En moyenne, il a été calculé que chaque kilogramme de Millisil® ajouté durant ce régime était corrélé à une perte de la capacité d'infiltration de 95 L/h. Passé une masse de 100 kg, la courbe de colmatage s'estompe ; cela implique que la capacité d'infiltration résiduelle tend vers une valeur plateau, ici estimée à entre 25% et 30% de capacité résiduelle ($\approx 4,5$ m³/h) (Figure 11A, Tableau 4). L'impact de l'ajout successif de polluant sur la capacité d'infiltration chute considérablement durant cette période. Le temps n'a que peu d'impact sur les mesures ; les deux mesures réalisées après 200 kg de Millisil® montrent des débits identiques (Figure 11B, Tableau 4).

La régénération partielle de la capacité d'infiltration à la suite du curage C permet de retrouver une capacité d'infiltration interpolée dans le régime linéaire. Toutefois, le second colmatage montre une perte de capacité d'infiltration moyenne de 10 L/h par kilogramme de polluant. Malgré un faible nombre de mesures durant ce second colmatage, cette dernière valeur indique clairement que ce colmatage correspond davantage au second régime de colmatage, avec estompement vers une valeur de débit plateau, plutôt qu'au régime linéaire initial.

Les inspections visuelles réalisées à l'état (re-)colmaté montrent des dépôts de Millisil® en forme de crêtes, ou « branchies », situés entre les fentes inférieures du tuyau, pour leur part moins

² A titre d'exemple, une vidange dans le circuit principal de la cuve de mélange libère 250 L d'eau chargée de 50 kg de Millisil®, en typiquement cinq minutes. Pour un circuit d'eau tournant à 10 m³/h, l'eau qui pénètre dans le système d'infiltration durant ces cinq minutes possède une TSS de 46 g/L.

ensablées (Figure 15.C). La première phase de colmatage – le régime linéaire – correspond probablement à un passage du Millisil® en suspension à travers les fentes du tuyau. La grande majorité du polluant est alors stoppé à l'interface entre le tuyau et le géotextile de filtration, bien qu'une partie ait pu traverser les orifices de la membrane géotextile (Figure 14). Le Millisil® s'y est accumulé au point de colmater la moitié basse de cette interface (Figure 17A,B). Il est dès lors suspecté que le deuxième régime observé en Figure 11A, celui où les valeurs de débits s'estompent, mette en exergue la perte progressive d'efficacité des fentes inférieures du tuyau perforé (Figure 15.A,B). La capacité d'infiltration résiduelle, lorsqu'elle tend vers 4,5 m³/h (Tableau 4, Figure 11), correspondrait dès lors à une infiltration dominée par les fentes supérieures du tuyau (Figure 17C). Les dépôts de sable en branchies sont la probable conséquence du Millisil® en suspension qui n'a pas pu s'infiltrer, et qui se dépose au fond du tuyau lors de la vidange (Figure 17D).

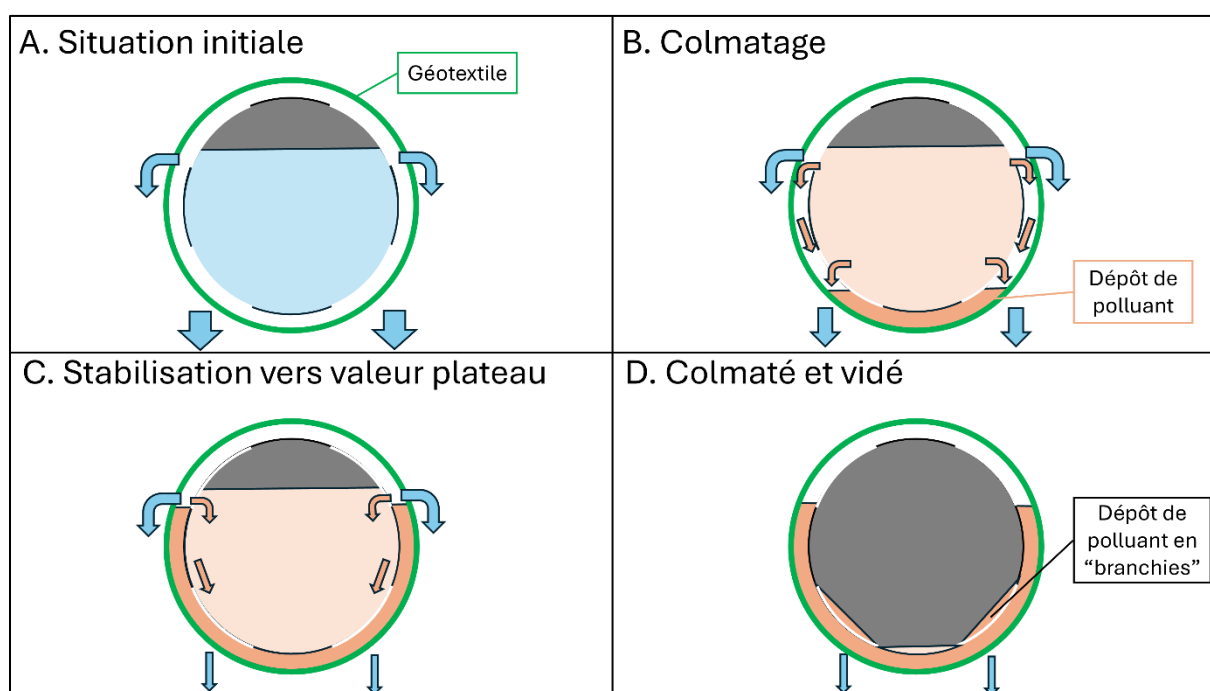


Figure 17 : Mode de colmatage d'un tuyau d'infiltration perforé. A : Infiltration d'eau claire, sans obstruction ; B : Dépôt de polluant à l'interface entre le tuyau et la membrane géotextile ; C : Saturation de l'interface, le polluant ne s'y dépose plus une fois une certaine hauteur atteinte, et un débit stable est atteint par une infiltration majoritairement latérale ; D : Lors de la lente vidange du tuyau, des dépôts en « branchies » se forment entre les fentes inférieures.

6.3.2 Modes de colmatage des caissons SAUL

La courbe de colmatage pour les caissons SAUL semble plus simple (Figure 8A). Le colmatage a été interrompu après avoir atteint la valeur seuil de 20% de capacité d'infiltration résiduelle (3,4 m³/h) (section 4.4.2), et l'intégralité du processus peut être approximé par une régression linéaire doté d'un haut coefficient de corrélation R² (Figure 8A, Tableau 3). Durant ce régime, chaque kilogramme a contribué à une perte moyenne de la capacité d'infiltration du système de 33 L/(h.kg).

Cependant, contrairement au tuyau perforé, la capacité d'infiltration résiduelle varie après une mise au repos du système colmaté. Près de 48 heures après avoir atteint 20% de sa capacité

d'infiltration initiale ($3,4 \text{ m}^3/\text{h}$), le débit était remonté. Malgré un ajout de 50 kg de Millisil® supplémentaires, le débit s'est maintenu à sa nouvelle valeur de $6 \text{ m}^3/\text{h}$ (Tableau 3). Les nombreuses mesures effectuées entre le 26 novembre et le 28 novembre, à 450 kg de Millisil® chargés, confirme le rebond mesuré depuis le débit minimal de 20% ($3,4 \text{ m}^3/\text{h}$), avec une stagnation des valeurs de débits entre $5,0 \text{ m}^3/\text{h}$ et $6,3 \text{ m}^3/\text{h}$. Une analyse des résultats montre qu'un premier rebond avait déjà eu lieu en cours de colmatage des caissons SAUL, lorsque le colmatage a dû être interrompu entre le 21 novembre et le 24 novembre. La première mesure du 24 novembre, à 250 kg de Millisil® n'a renseigné qu'une très faible diminution de débit par rapport à la dernière mesure du 21 novembre, à 200 kg de polluant (Figure 8A, Tableau 3).

Les inspections visuelles au sein des caissons SAUL montre qu'à l'état colmaté, l'ensemble de la surface inférieure est saturé par un tapis sableux épais, et relativement bien colmaté (Figure 12B, Figure 13B). Les faces latérales restent pour leur part dégagées, avec la membrane géotextile de filtration bien visible et propre. L'infiltration d'une eau chargée en polluant, tant qu'elle est réalisée d'une traite, se fait selon une courbe parapluie impliquant les faces inférieure et latérales (Figure 18A), avec le courant sortant amenant les particules contre le géotextile de filtration (Figure 18B). Du fait de la prédominance verticale de l'infiltration, la face inférieure se colmate progressivement, d'où la linéarité de la courbe représentée en Figure 8A. Passé une certaine masse de polluant, la face inférieure est colmatée au point de pouvoir la considérer étanche, et l'infiltration résiduelle est assurée par les parois latérales, moins affectées par le colmatage des pores du géotextile (Figure 18B).

Dès lors, l'acquisition d'un débit minimum avant un rebond partiel pose question. Bien que cela soit encore hypothétique, un minimum a pu être atteint parce que (i) la TSS était suffisamment élevée et (ii) parce que la hauteur d'eau induisait un courant latéral suffisant que pour plaquer les particules en suspension contre la membrane géotextile (Figure 18C). La mise au repos du système le temps d'une nuit minimum a fait chuter le niveau d'eau au sein des caissons SAUL, ce qui a provoqué une chute de ce courant latéral, et la sédimentation des particules incriminées. Tout volume entrant après cette période de repos peut donc s'infiltrer latéralement à travers une membrane géotextile libre (Figure 18D).

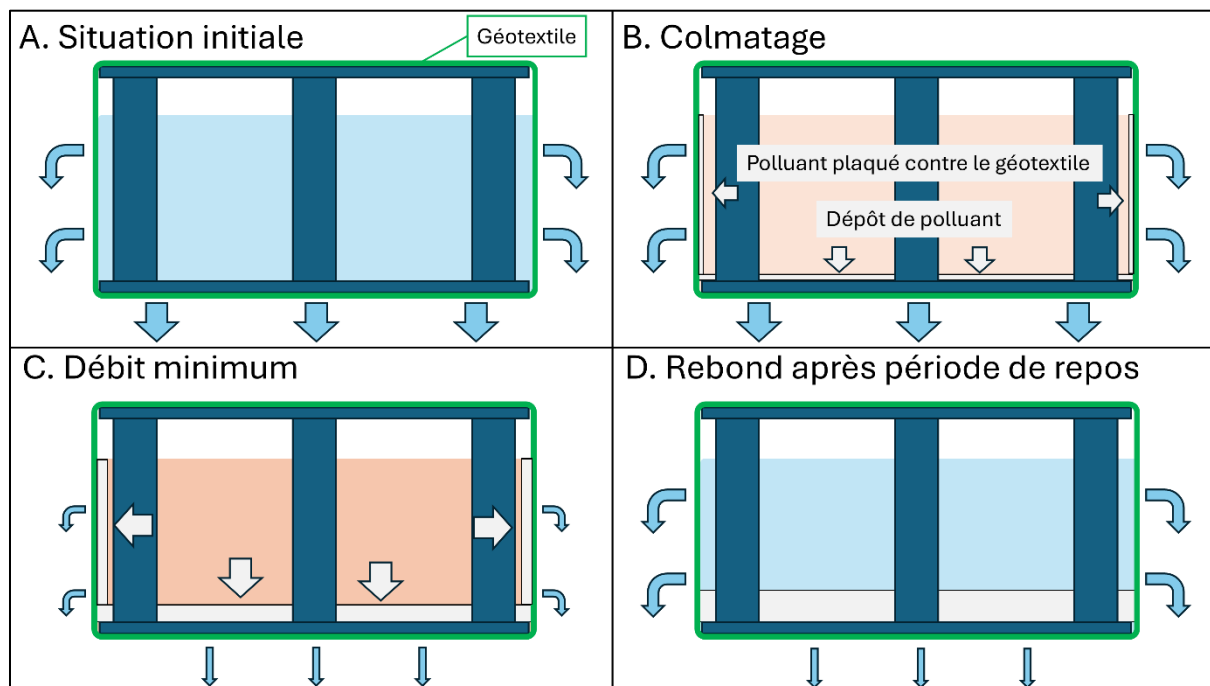


Figure 18 : Mode de colmatage des caissons SAUL. A : Infiltration d'eau claire, sans obstruction ; B : Dépôt de polluant sur la face inférieure ; C : La face inférieure étant colmatée, l'infiltration est majoritairement latérale, plaquant temporairement les particules de polluant en suspension contre la membrane géotextile, et atteinte d'un débit minimum ; D : Après une période de repos et une lente vidange, les particules retombent sur la face inférieure, rendant la capacité d'infiltration latérale, et obtention d'un effet rebond dans la courbe de débit.

6.4 Potentiels de régénération des curages

6.4.1 Performance des protocoles de curage

Les protocoles de curage C et D ont chacun permis de régénérer environ un quart de la capacité d'infiltration initiale. Combiné à la capacité d'infiltration résiduelle avant le curage, cela implique que le système n'est pas remonté au-delà de deux tiers de sa capacité après installation. Puisque les curages ont délogé et aspiré l'intégralité du volume de polluant déposé à l'intérieur du tuyau (Figure 15D), les pertes (définitives) de capacité d'infiltration correspondent au volume de Millisil® piégé à l'interface entre l'extérieur du tuyau et la membrane géotextile. Le protocole D, le plus puissant du fait d'un débit d'eau supérieur (Tableau 1, Figure 7E), ne parvient en effet pas à déloger ce volume de polluant. En revanche, ce postulat implique qu'une fois ce volume inatteignable rempli, l'excédent de polluant restera à l'intérieur du tuyau, et pourra être aspiré au curage, supposément quel que soit le protocole de curage. Des solutions existent pour quantifier la masse de polluant aspirée par filtration de l'eau de curage, mais pour de raisons logistiques, aucune n'a été employée dans le cadre de nos expériences.

En revanche, les deux tentatives de curage des caissons SAUL se sont soldées par un taux de régénération nul. Plusieurs facteurs en sont responsables :

- Lit plane de polluant, épais et relativement cohérent. Les ogives successivement employées (Figure 7A-C) n'ont permis que de déloger la partie supérieure de ce dépôt (Figure 12B-D, Figure 13A-C). La partie inférieure de ce dépôt est restée en place, à cause

de la cohérence élevée entre les particules, et également parce que les cavités présentes dans la plaque inférieure de chaque caisson sont épaisses de plusieurs centimètres (Figure 12A, Figure 13A). Les volumes de polluant qui se déposent dans ces cavités ne peuvent pas être retirés par des protocoles de curage conventionnels.

- Eau propulsée à 360°. En corollaire, les jets d'eau propulsés vers les côtés et le haut d'un tuyau ruissellent sur les flancs et alimentent aussi le courant d'évacuation. Dans des caissons à structure carrée ou rectangulaire, les jets latéraux ou supérieurs ne peuvent pas mobiliser du polluant par ruissellement – uniquement par projections – et ne contribuent dès lors que peu au nettoyage de la partie inférieure.
- Parcours linéaire de l'ogive. La buse de nettoyage fixée à l'extrémité du tuyau progresse dans un système d'infiltration grâce à la pression des jets d'eau rétro-propulsés. Ce mode de fonctionnement ne permet de facto pas de couvrir l'intégralité de la surface des systèmes d'infiltration en chambre (caisses, champs et caves d'infiltration ; Figure 1C,D) (VLARIO, 2025). Ce problème est déjà illustré par les caissons SAUL mis en œuvre dans le cadre de cette étude, puisque la rangée de caissons forme deux nefs, proximale et latérale (Figure 3A,B, Figure 12, Figure 13, section 5.4.1). Le lit de polluant au pied de la nef latérale n'a pas été affecté par l'eau sous pression (Figure 13C). Ce seul problème nécessite dès lors que l'ensemble des cellules d'un tel système d'infiltration puisse être parcouru par la buse, ce qui pose des complications en termes de nombres et de positionnement des chambres de visite, ou de mise en place et coût d'un curage. Les retours d'expérience des systèmes d'infiltration « en chambre » montrent des chambres de visite de diamètre plus réduit, et situées en surplomb des rangées, sans aucune garantie d'en couvrir l'intégralité. Ce positionnement complique non seulement l'accessibilité, mais aussi le captage de la masse de colmatage remobilisée.

Pour finir, le problème mentionné en section 5.2 à propos de l'usage d'une corde pour guider la progression de l'ogive pose la question de la faisabilité du curage de ces structures en conditions réelles.

6.4.2 Cycles colmatages – curages sur le long terme

Selon nos expériences, un tuyau d'infiltration perforé ne fonctionnera au maximum de ses capacités que directement après sa mise en œuvre, puisque les entretiens ne pourront pas déloger une masse fixe de polluant, piégée entre le tuyau et le géotextile (Figure 17C). Les pertes relatives – et définitives – de capacité hydraulique sont dans le cas du tuyau testé estimées à 40%. Cette fraction demeure propre à chaque système, car le sol en place reste le facteur déterminant la capacité hydraulique initiale. Des entretiens réguliers permettent dès lors d'osciller sur le long terme entre un minimum (le débit plateau) et un maximum (le débit post-curage), contraints par le dimensionnement du tuyau perforé.

Pour les caissons d'infiltration, l'inefficacité des méthodes de curage testées contraint leur performance sur le long terme à la capacité d'infiltration assurée uniquement par les parois latérales (Figure 16, Figure 18D). Ces interprétations sont en phase avec les spécifications du règlement régional flamand d'urbanisme relatif aux eaux pluviales (GSVH), qui tient compte du risque de colmatage de la face inférieure.

6.5 Premières préconisations en situations réelles

Les simulations de vieillissement de ces systèmes, aboutissant à des eaux 100 à 1000 fois plus concentrées en TSS que les concentrations usuelles (F. Boogaard et al., 2015), donnent des résultats contrastés. Nous pouvons cependant suggérer des utilisations complémentaires pour chacun de ces types de systèmes d'infiltration enterrés, qui tiennent compte de leurs spécificités.

Les tuyaux d'infiltration offrent une large versatilité, et sont capables de gérer des volumes d'eau de ruissellement faibles à importants, selon le dimensionnement de l'ouvrage. En comparaison d'une rangée de caissons SAUL, leur capacité d'infiltration réagit plus vivement au colmatage, en raison d'un volume spécifique plus faible par unité de longueur. Néanmoins, ils sont plus résilients, car les méthodes de curages habituelles sont conçues pour progresser dans des sections cylindriques. Un entretien régulier leur permet de maintenir un niveau de performance adéquat, pour peu que le dimensionnement prévoie une perte partielle définitive associée au colmatage du volume entre le tuyau et la membrane géotextile. Cette perte ne peut pas être prédéterminée, car elle est proportionnelle à la perméabilité du sol.

Comme vu plus haut, la structure de caissons SAUL rend leur nettoyage très compliqué selon les protocoles actuels sur le marché. En revanche, leur avantage principal sur les tuyaux d'infiltration réside dans les très larges volumes qu'ils peuvent tamponner et infiltrer, en particulier lorsque ces caissons sont juxtaposés sur un certain nombre de rangées, voire même sur plusieurs étages (Figure 1C) (Vanelstraete et al., 2025). De tels volumes justifieraient la mise en place d'un système de filtration en amont, à même de retenir une fraction des particules inférieures à 63 µm et 75 µm. Un tel dispositif garantirait le maintien d'une surface et d'une capacité d'infiltration optimales du système d'infiltration, qui délocaliserait le curage au niveau de la zone d'épuration. Parmi les systèmes plus modulables, les « Sedi Pipes » représentent de prometteuses solutions nettoyables, de par leur aptitude à fixer les particules fines dans leur double fond, en amont du système d'infiltration.

Dans tous les cas, les retours d'expérience mettent en évidence un recours excessif aux trop-pleins. Destinés à reverser dans le réseau d'égouttage le surplus d'un volume d'eau de pluies exceptionnelles, le trop-plein devient de facto le conduit principal lorsque le système d'infiltration est insuffisamment entretenu. Il en résulte un diagnostic plus difficile de l'état réel du système d'infiltration, en plus de sa perte de raison d'être.

6.6 Limites du modèle

Ces premières expériences ont permis de tester la résilience de caissons d'infiltration et de tuyaux perforés face à des cycles de colmatage-curage. Il est à rappeler cependant que la modélisation de cette problématique au sein du poste d'essai a impliqué que certains paramètres soient arbitrairement fixés pour identifier plus efficacement leur rôle au sein du système. Deux de ces paramètres en particulier nécessitent d'être remis en perspective, à savoir la nature du polluant et le régime de circulation d'eau.

Le Millisil® W4 a été choisi certes pour son inertie chimique – la composition chimique de ce sable étant représentée par du quartz à plus de 99%, mais également car sa courbe granulométrique

possède un profil à même de maximiser le colmatage des membranes géotextiles (F. Boogaard et al., 2015; Dierschke et al., 2010; Neupert et al., 2021). Il représente dès lors un excellent proxy des particules issues de la dégradation des routes et pneumatiques, et dans une moindre mesure des métaux lourds associés au trafic routier (Neupert et al., 2021). Toutefois, la densité du quartz ($2,65 \text{ g/cm}^3$) se trouve dans un entre-deux. Si la différence de densité avec les métaux lourds peut être mise de côté sous prétexte que la vitesse de sédimentation sera le seul paramètre impliqué, un sable de quartz ne peut en aucun cas simuler l'impact sur un système d'infiltration de particules de densité $< 1 \text{ g/cm}^3$. Dès lors, ces premières expériences ne permettent pas de mesurer l'impact de composés organiques potentiellement gonflants ainsi que d'hydrocarbures aromatiques polycycliques.

La circulation d'eau a durablement été calibrée sur un état stationnaire au cours des expériences. C'est également sous un tel régime que les valeurs de débits instantanés sont représentatives de la capacité d'infiltration du système. Toutefois, le régime d'état stationnaire ne concorde pas avec les observations des débits de décharges suite à des événements pluviométriques standards, où l'on observe dans les systèmes de collecte des eaux pluviales un pic de débit entrant suivi d'un aplanissement progressif (Sehgal & Drake, 2018). Il a été également démontré qu'un niveau d'eau fluctuant favorisait la vitesse de sédimentation (Siriwardene et al., 2007). Dès lors, un changement de régime de circulation d'eau au sein du poste d'essai pourrait impacter la courbe d'évolution des débits, en particulier par rapport à l'effet rebond observé dans les caissons SAUL.

7 Conclusions

Ce projet de recherche s'est penché sur une thématique encore peu explorée auparavant : comment évoluent les cycles colmatage-curage des systèmes d'infiltration, dans un poste d'essai expérimental qui tienne compte des exigences et recommandations des cahiers de charge type.

L'innovation de ce projet a requis une conception sur mesure, sans aucun référentiel, et en conformité avec les recommandations et exigences dans le domaine de l'infiltration. Les composants, normalement prévus pour une utilisation souterraine, ont ici été délocalisés en surface, amenant une série de difficultés techniques liées à la robustesse et à l'alignement de l'assemblage. Il est également très vite apparu que le potentiel de ce poste d'essai offre de nombreuses perspectives sur le plus long terme (voir section 8). C'est pourquoi une attention toute particulière a été accordée à la durabilité du poste d'essai et à ses finitions.

Les expériences menées ont successivement testé la résilience face à un colmatage par un sable très fin de structures alvéolaires ultra-légères (SAUL) et d'un tuyau perforé en PP, enfouis au sein d'un sable calcaire d'infiltration. Les mesures de débits ont été corrélées avec une succession d'inspections visuelles par caméra robotisée, telles que réalisées dans le domaine de l'égouttage. Ces résultats à la fois qualitatifs et quantitatifs décrivent deux réponses différentes :

- Le tuyau perforé montre un amortissement de la capacité d'infiltration avec le colmatage, qui est partiellement régénérée par les protocoles de curage en vigueur sur le marché. Il en résulte cependant une perte définitive de capacité d'infiltration, mesurée dans notre

cas à 40%. Cette perte correspond au volume de polluant piégé à l'interface entre le tuyau et la membrane géotextile ; un volume inatteignable au curage.

- Les caissons SAUL montrent une décroissance linéaire en réponse au colmatage, suivi d'un effet rebond de la capacité d'infiltration suivant une période de repos du système. La capacité d'infiltration résiduelle stabilisée correspond au flux à travers les surfaces latérales des caissons. Toutefois, les protocoles de curages testés n'ont pas permis de régénérer le potentiel d'infiltration perdu, même partiellement. Nous attribuons ce résultat à l'incompatibilité entre des structures rectangulaires et des buses de nettoyage conçues pour nettoyer des sections circulaires plus exigües. Nous suggérons dès lors que ces systèmes soient réservés pour des larges volumes d'infiltration, si possible en aval d'une zone de prétraitement.

Les résultats des deux expériences soulignent l'importance d'une surveillance et d'un entretien fréquents des systèmes d'infiltration enterrés, quel que soit leur type, afin de maximiser leur efficacité et leur durée de vie.

8 Perspectives

Ce présent rapport met en lumière la pertinence de privilégier une vision qui s'inscrive sur le plus long terme. Chaque variation de paramètres initiaux du poste d'essai pourrait justifier la tenue d'une nouvelle expérience.

Après une analyse du comportement de caissons SAUL et d'un tuyau perforé en PP, la priorité sera de mettre en œuvre un troisième remplissage du conteneur d'infiltration, cette fois autour d'un tuyau en béton poreux. Ce matériau est déjà répandu dans le domaine de l'infiltration, et son installation permettra d'étudier l'impact du colmatage par le Millisil® sur la porosité du matériau.

Comme explicité en section 6.6, un régime d'eau à l'état stationnaire n'est pas représentatif des conditions pluviométriques réelles (Sehgal & Drake, 2018; Sidek et al., 2002; Siriwardene et al., 2007). En parallèle, une variation de hauteur d'eau est reconnue comme un paramètre favorisant la sédimentation des particules en suspension, et donc le colmatage des systèmes d'infiltration. Dans la mesure du possible, les expériences suivantes tenteront de prendre en considération des fluctuations de débit représentatives d'événements pluviométriques.

La nature du polluant sera également appelée à varier. Un sable fin ne permet pas d'à lui seul représenter l'ensemble de la charge solide en suspension d'une voirie ou d'une surface d'infiltration verte. C'est pourquoi d'autres polluants devront être déterminés pour leurs propriétés gonflantes ou flottantes. Une attention toute particulière sera bien sûr portée aux protocoles de nettoyage, mais aussi à la réponse de la capacité d'infiltration face à de tels types de déchets, pour une eau non-traitée, ou qui a subi un prétraitement partiel ou complet.

La versatilité du poste d'essai permet également au CRR d'entrevoir qu'il puisse à l'avenir être mis à disposition dans le cadre de procédures de certification. Les entreprises de curage ou spécialisées en systèmes d'infiltration enterrés qui désireraient obtenir une certification COPRO

pour leurs produits et services pourraient dès lors se tourner vers le CRR, afin que le poste d'essai en évalue les performances. COPRO a par le passé manifesté son intérêt pour un tel partenariat.

Les résultats qui découleront de ce poste d'essai seront promus par la rédaction de rapports et articles ultérieurs, notamment via la newsletter du CRR. Selon la nature des résultats obtenus, le CRR évaluera au moment venu la pertinence de la rédaction d'un guide technique.

9 Remerciements

Nous tenons à chaleureusement exprimer notre gratitude aux entreprises de nettoyage *Group Roefs* et *DSSV – Transpo Daniëls*, pour leur précieuse contribution aux essais de curages réalisés dans notre poste d'essai.

10 Références

Références

- Afrin, T., Kaye, N. B., Khan, A. A., & Testik, F. Y. (2016). Parametric Study of Perforated Pipe Underdrains Surrounded by Loose Aggregate. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(12), Article 04016066, 4016066. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001214](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001214)
- Agentschap Wegen en Verkeer (2025). *Standaardbestek 250*. (5.0). Agentschap Wegen en Verkeer. <https://www.vlaanderen.be/departement-mobiliteit-en-openbare-werken/mobiliteitsinfrastructuur-in-vlaanderen/standaardbestekken/standaardbestek-250>
- Aquafin. (2025). *Infiltrating subfoundation*. Aquafin. <https://www.aquafin.be/en/infiltrating-subfoundation>
- Bhattarai, A., Karna, S., Pandey, S., & Khadka, A. (2025). Study, Design, Fabrication and Testing of Perforated Pipes for Desilting Basin. *International Journal on Engineering Technology*, 2(2), 1–7. <https://doi.org/10.3126/injet.v2i2.78530>
- BlauwGroenVlaanderen. (2022). *Maatregelen : Verticale Infiltratiepaal*. <https://blauwgroenvlaanderen.be/professionals/maatregelen/verticale-infiltratiepaal/>
- Bong, C. H. J., Lim, L. L. P., Ng, C. K., & Chai, S. L. (2023). Detention Properties of Subsurface Stormwater Modules Under Tropical Climate. *International Journal of Integrated Engineering*, 15(6). <https://doi.org/10.30880/ijie.2023.15.06.008>
- Boogaard, F., van de Ven, F., Langeveld, J. G., Kluck, J., & van de Giesen, N. (2015). Removal efficiency of storm water treatment techniques: Standardized full scale laboratory testing. *Urban Water Journal*, 14(3), 255–262. <https://research.hanze.nl/en/publications/removal-efficiency-of-storm-water-treatment-techniques-standardiz>
- Boogaard, F. C. (2015). *Stormwater characteristics and new testing methods for certain sustainable urban drainage systems in The Netherlands* [, Technische Universiteit Delft, Delft, The Netherlands]. DataCite. <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:d4cd80a8-41e2-49a5-8f41-f1efc1a0ef5d>
- BPF PIPES GROUP. (2022). *Maximising the lifespan of plastic geocellular drainage systems*.
- Bruxelles Environnement & Buxelles Mobilité. (2023). *Vademecum sur la gestion des eaux pluviales en milieu urbain : Partie I : Recommandations pour la mise en oeuvre d'une gestion intégrée dans l'espace public*.
- COPRO (2021, 25 février). *Technische voorschriften voor de uitvoering van ondergrondse infiltratievoorzieningen*. (PTV, 8003). COPRO. <https://www.copro.eu/sites/default/files/copro-documents/WEB%20PTV%208003%20v%201.0.pdf>
- COPRO (2024, 8 juillet). *Prescriptions techniques pour Géotextiles : Exigences*. (PTV, 829). COPRO.
- Dierschke, M., Welker, A., & Dierkes, C. (2010). Selection of a reference material for the testing of decentralized stormwater treatment facilities. Dans (p. 1–8). GRAIE, Lyon, France. <https://hal.science/hal-03296310v1>
- Good Urban Practice. (2025). *Ondergrondse infiltratiesystemen : Watershell betonnen infiltratiekelder*. Disaghor-Dockx.

- <https://www.goodurbanpractice.be/nl/producten/buffer-en-infiltratievoorzieningen/infiltratievoorzieningen/ondergrondse-infiltratiesystemen/watershell-betonnen-infiltratiekelder>
- IFSTTAR. (2011). *Les structures alvéolaires ultra-légères (SAUL) pour la gestion des eaux pluviales : Guide technique*. IFSTTAR.
https://www.ifsttar.fr/fileadmin/user_upload/editions/lcpc/GuideTechnique/GuideTechnique-LCPC-TMSALV.pdf
- Lee, M., Huei, L. Y., & Chai, S. (2025). A REVIEW OF STRUCTURAL PERFORMANCE OF GEOCELLULAR PLASTIC MODULE. *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, 16, 37–53. <https://doi.org/10.33736/jcest.6464.2025>
- Liu, H., Zong, Q., Lv, H., & Jin, J. (2017). Analytical equation for outflow along the flow in a perforated fluid distribution pipe. *PLOS ONE*, 12(10), e0185842.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185842>
- Murphy, P. (2013). THE HYDRAULIC PERFORMANCE OF PERFORATED PIPE UNDER-DRAINS SURROUNDED BY LOOSE AGGREGATE. *All Theses*.
https://open.clemson.edu/all_theses/1639
- NBN (2016). *Géotextiles et produits apparentés*. (NBN EN, 13252). NBN.
- NBN (2020). *Plastics piping systems for non-pressure underground drainage and sewerage*. (NBN EN, 13598). NBN.
- Neupert, J. W., Lau, P., Venghaus, D., & Barjenbruch, M. (2021). Development of a New Testing Approach for Decentralised Technical Sustainable Drainage Systems. *Water*, 13(5), 722.
<https://doi.org/10.3390/w13050722>
- Pillaert, R. (2025, octobre 21). *Webinar Infiltratie Hemelwater*. FEBE. FEBE.
<https://www.febe.be/nl/infiltratie/info/>
- Improving Runoff Reduction Potential of Permeable Interlocking Concrete Pavements through Enhanced Detention*. (Twelfth Annual International Conference on Concrete Block Pavement). (2018).
- Cahier de charges type Qualiroutes, Service Public de Wallonie (2021 & rev. 2025).
<https://infrastructures.wallonie.be/pouvoirs-locaux/nos-thematiques/routes/qualite--construction/qualiroutes/cahier-des-charges-type-qualiroutes---version-2021-consolidee-et-ses-adaptations-ulterieures.html#:~:text=Au%201er%20janvier%202012%2C%20le%20CCT%20Qualiroutes%20a,adaptations%20et%20mises%20%C3%A0%20jour%20r%C3%A9alis%C3%A9es%20depuis%202012.>
- Sidek, L. M., Takara, K., & Ab Ghani, Aminuddin. (2002). *Evaluation of infiltration engineering and storage tank systems For improved stormwater management*.
- Siriwardene, N. R., Deletic, A., & Fletcher, T. D. (2007). Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study. *Water Research*, 41(7), 1433–1440.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.12.040>
- Teller, J., Djanaralieva, L., Flas, M., Moulana, M. L., Onan, L., & Privot, J. (2023). *Référentiel : Gestion durable des eaux pluviales*. Service Public de Wallonie.
- Tubobel Group. (2021). *Poreuze buizen*. Tubobel Aqua. <https://aqua.tubobel.group/poreuze-buizen/>

- Vanelstraete, A., Leoskool, L., & Beaumesnil, B. (2025). *Code de bonne pratique pour les solutions de voiries perméables : contexte global et application spécifique aux revêtements bitumineux. Recommandations*. Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw (OCW) = Centre de Recherches Routières (CRR) = Belgian Road Research Centre (BRRC).
- VLARIO. (2025). *Ontwerprichtlijnen Infiltratievoorzieningen*. VLARIO Overleg Platform. <https://www.vlario.be/website/files/downloads/Ontwerprichtlijnen-Infiltratievoorzieningen-17-03-2025.pdf>
- Wong, P. (2020). Design and Construction of Plastic Geocellular Rain Water Harvesting/Stormwater Detention Tanks. *Australian Geomechanics*, 55(3), Article 5. https://geomechanics.org.au/wp-content/uploads/2020/09/55_3_5_wong.pdf

11 Annexes

11.1 Annexe 1 : Fiche Proctor/IPI du sable calcaire lavé 0/4 mm

 <p>Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw Samen voor duurzame wegen</p>	<p>Sterrebeek, 09-09-25</p> <p>Datum van de proef : 02-09-25</p> <p>Monsternummer : 25-0347</p> <p>Pagina : 01/01</p> <p>Norm : NBN EN 13284-2</p> <p>Referentie : GEN 01-35 (rev n°1 : 12/2023)</p>
	<p>Afdeling Betonwegen – Geotechniek – Waterafvoer & Infiltratietechnieken</p> <p>Referentie : Projet H2O</p>

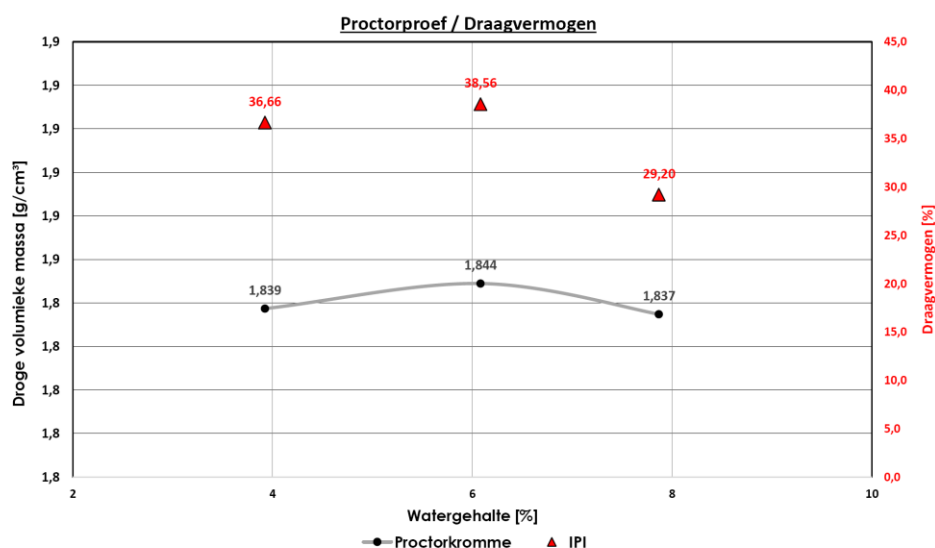
Proctorproef + draagvermogen

Proctor :	normale	Type proef draagvermogen :	IPI
------------------	---------	-----------------------------------	-----

Karakteristieken van de proef :	<p>Aard van het monster : Gewassen kalksteen</p> <p>Massa v/d valhamer : 2,490 kg</p> <p>Valhoogte : 30,5 cm</p> <p>Beproefde fractie : 0/4mm</p> <p>Percentage zeefrest [%] : 0</p>	<p>Aantal slagen per laag : 56 slagen</p> <p>Aantal lagen : 3 lagen</p> <p>Natuurlijk W [%] : 7,14</p> <p>W zeefrest [%] : /</p>
--	---	--

Omstandigheden van de proef :	<p>Mengsels Voor elk watergehalte werd een nieuw mengsel aangemaakt d.m.v. een menger.</p> <p>Verdichting De verdichting in CBR-mallen wordt uitgevoerd met een volautomatische verdichtingsmachine, in geval van een grondverbereiding wordt er een rusttijd (2uur ± 5 minuten) gerespecteerd.</p> <p>Watergehalte Het watergehalte bij verdichten werd bepaald door drogen in een geventileerde droogstoof bij 110°C ± 5°C tot constante massa van een uit het mengsel ontnomen hoeveelheid proefmonster.</p> <p>Stempelproof Na verdichting wordt elk proestuk onderworpen aan een stempelproof onmiddellijk na verdichting. De stempelproof wordt uitgevoerd met een hydraulische testbank (meetbereik 300 kN) en een meetcel (50/250kN)</p>
--------------------------------------	--

Resultaten			Resultaat OPN		
W [%]	ρ [g/cm ³]	IPI [%]	W [%]	ρ [g/cm ³]	IPI [%]
3,92	1,839	36,66	6,08	1,844	38,56
6,08	1,844	38,56			
7,87	1,837	29,20			



11.2 Annexe 2 : Mesures par gammadensimétrie

Les tableaux ci-dessous reprennent, pour le remplissage du conteneur d'infiltration autour de chaque système d'infiltration, les valeurs obtenues par gammadensimétrie après compactage de chaque couche de sable.

Tableau A. 1 : Remplissage 1 (Caissons SAUL).

Couche	Point de mesure	Nombre de passages		Profondeur	Eau	Masse volumique		Compactage
		Pilonneur	Plaque vibrante			humide	sèche	
				cm	%	g/cm ³	g/cm ³	%
1	1	2	0	10	2,6	1,699	1,657	89,9
1	2	2	0	10	2,7	1,712	1,668	90,4
1	3	2	0	10	4,1	1,578	1,643	85,6
1	1	2	2	10	2,8	1,779	1,731	93,9
1	2	2	2	10	2,2	1,783	1,744	94,6
1	3	2	2	10	3,4	1,787	1,728	93,7
1	4	2	2	10	3,8	1,754	1,690	91,7
1	3	2	4	10	2,9	1,789	1,739	94,3
1	4	2	4	10	3,8	1,817	1,750	94,9
2	1	0	2	15	4,5	1,751	1,676	90,9
2	2	0	2	15	4,0	1,772	1,703	92,4
2	3	0	2	15	4,5	1,720	1,646	89,3
2	4	0	2	15	4,5	1,764	1,688	91,5
2	1	0	4	15	4,4	1,805	1,728	93,7
2	2	0	4	15	3,6	1,809	1,747	94,7
2	3	0	4	15	4,6	1,751	1,674	90,8
2	4	0	4	15	4,6	1,809	1,729	93,8
3	1	0	4	15	4,2	1,781	1,709	92,7
3	2	0	5	15	5,5	1,823	1,727	93,7
3	3	0	4	15	5,6	1,896	1,796	97,4
3	4	0	4	15	5,6	1,846	1,749	94,8
4	1	0	4	15	5,2	1,818	1,728	93,7
4	2	0	4	15	4,9	1,909	1,819	98,6
4	3	0	4	15	5,6	1,900	1,800	97,6
5	1	0	4	15	4,6	1,809	1,73	93,8
5	2	0	4	15	5,0	1,795	1,71	92,8
5	3	0	4	15	5,3	1,928	1,832	99,4
6	1	0	4	15	5,1	1,767	1,681	91,2
6	2	0	4	15	5,2	1,876	1,783	96,7
6	3	0	4	15	4,7	1,804	1,723	93,5
7	1	0	4	15	5,3	1,820	1,728	93,7
7	2	0	4	15	6,3	1,811	1,704	92,4
7	3	0	4	15	5,4	1,788	1,696	92
8	1	0	4	15	5,2	1,829	1,738	94,3
8	2	0	4	15	6,1	1,812	1,708	92,6
8	3	0	4	15	4,8	1,826	1,742	94,5

A noter que les points de mesure sur les deux premières couches ont fait l'objet d'essais-erreurs jusqu'à l'obtention d'un nombre de passages aux compacteurs garantissant une valeur de compactage suffisante. Le pilonneur léger a été conservé pour compacter les recoins moins accessibles entre les caissons SAUL et les parois du conteneur d'infiltration.

Tableau A. 2 : Remplissage 2 (Tuyau Perforé).

Couche	Point de mesure	Profondeur	Eau	Masse volumique		Compactage
				humide	sèche	
		cm	%	g/cm ³	g/cm ³	%
1	1	10	3,1	1,770	1,716	93,0
1	2	10	2,0	1,811	1,774	96,2
1	3	10	4,9	1,814	1,729	93,8
2	1	15	7,3	1,824	1,700	92,2
2	2	15	7,5	1,808	1,681	91,2
2	3	15	6,9	1,801	1,685	91,4
3	1	15	7,8	1,822	1,691	91,7
3	2	15	7,3	1,784	1,662	90,2
3	3	15	7,6	1,819	1,689	91,6
4	1	15	8,9	1,970	1,809	98,6
4	2	15	9,6	1,878	1,714	93,0
4	3	15	9,2	1,936	1,773	96,2
5	1	15	9,3	1,900	1,738	94,3
5	2	15	8,5	1,892	1,745	94,6
5	3	15	7,9	1,868	1,730	93,8
6	1	15	7,1	1,831	1,710	92,7
6	2	15	7,1	1,845	1,722	93,4
6	3	15	7,7	1,819	1,689	91,6
7	1	15	6,5	1,863	1,750	94,9
7	2	15	7,1	1,830	1,708	92,6
7	3	15	6,9	1,801	1,685	91,4
8	1	15	7,5	1,796	1,671	90,6
8	2	15	7,3	1,783	1,662	90,1
8	3	15	7,2	1,807	1,685	91,4

Pour le deuxième remplissage, l'intégralité du compactage a été réalisée avec la plaque vibrante, à raison de quatre passages par couche, sans l'intervention du pilonneur.

11.3 Annexe 3 : Mesures post-compaction

Chaque remplissage de conteneur s'est achevé au sommet de la colonne de sol compacté par trois points à la sonde de battage ainsi que trois autres au pénétromètre Panda. Leur localisation pour chacun des deux remplissages se trouve en Figure A. 1.

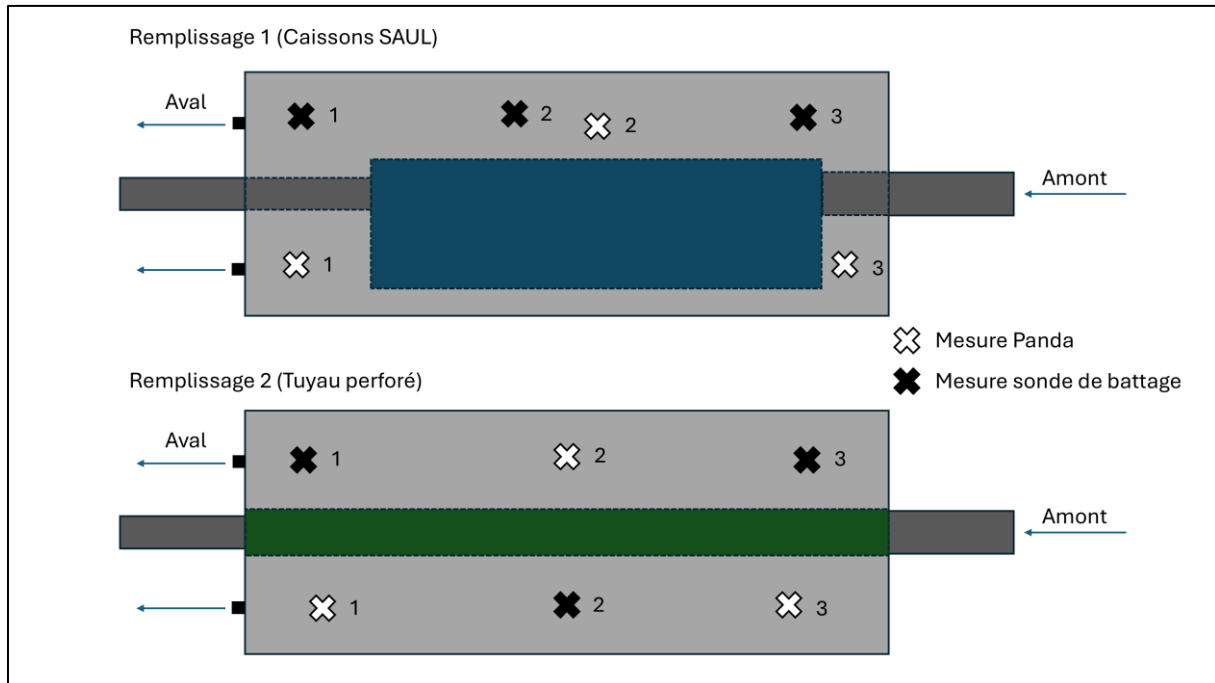


Figure A. 1 : Localisation des points de mesure post-compaction.

11.3.1 Mesures à la sonde de battage

Les tableau et figures ci-dessous reprennent les valeurs obtenues à la sonde de battage après compactage de chaque sol en place. A noter que selon les prescriptions du PTV 8003, les mesures issues des vingt centimètres supérieurs ne sont pas considérées (COPRO, 2021).

Tableau A. 3 : Résultat des essais post-compactage à la sonde de battage.

Container 1 (Caissons SAUL)					Container 2 (Tuyau perforé en PVC)				
Enfoncement (mm)	N	Profondeur mm	Enfoncement mm/coup	CBR	Enfoncement (mm)	N	Profondeur mm	Enfoncement mm/coup	CBR
0	0				0	0			
1	115	3	115	38,3	7,4	1	100	33,3	9,0
2	205	6	205	15	27,7	2	195	13,6	31,7
3	300	6	300	15,8	25,7	3	295	11,1	42,3
4	400	7	400	14,3	29,6	4	395	11,1	42,3
5	500	7	500	14,3	29,6	5	490	6,8	84,4
6	590	7	590	12,9	34,2	6	595	6,2	96,1
7	700	10	700	11	42,8	7	700	6,6	88,0
8	800	9	800	11,1	42,3	8	798	6,5	89,9
9	900	9	900	11,1	42,3	9	898	7,1	79,4
10	990	10	990	9	56,8	10	1000	7,8	69,5
Enfoncement (mm)	N	Profondeur mm	Enfoncement mm/coup	CBR	Enfoncement (mm)	N	Profondeur mm	Enfoncement mm/coup	CBR
0	0				0	0			
1	125	3	125	41,7	6,5	1	120	30	10,4
2	200	5	200	15	27,7	2	199	19,8	18,7
3	290	6	290	15	27,7	3	299	10	49,0
4	395	7	395	15	27,7	4	396	8,8	58,7
5	500	10	500	10,5	45,7	5	490	7,2	77,8
6	610	10	610	11	42,8	6	601	6,9	82,6
7	700	10	700	9	56,8	7	704	6,1	98,3
8	790	15	790	6	100,6	8	809	8,1	65,9
9	890	13	890	7,7	70,8	9	908	7,6	72,1
10	1000	13	1000	8,5	61,6	10	998	7,5	73,5
Enfoncement (mm)	N	Profondeur mm	Enfoncement mm/coup	CBR	Enfoncement (mm)	N	Profondeur mm	Enfoncement mm/coup	CBR
0	0				0	0			
1	105	3	105	35	8,4	1	105	35	8,4
2	205	7	205	14,3	29,6	2	203	14	30,5
3	305	7	305	14,3	29,6	3	303	11,1	42,3
4	402	8	402	12,1	37,4	4	403	10	49,0
5	497	9	497	10,6	45,1	5	496	7,2	77,8
6	600	15	600	6,9	82,6	6	595	6,6	88,0
7	700	14	700	7,1	79,4	7	700	6,2	96,1
8	800	14	800	7,1	79,4	8	807	7,1	79,4
9	907	15	907	7,1	79,4	9	912	9,5	52,7
10	990	9	990	9,2	55,1	10	999	9,7	51,1
11	1020	3	1020	10					

Essai à la sonde de battage légère type C. R. R.

Dossier : CO 8242

Numéro Essai 1

Date : 5/09/25

Site : Wavre

Emplacement : Container H2O

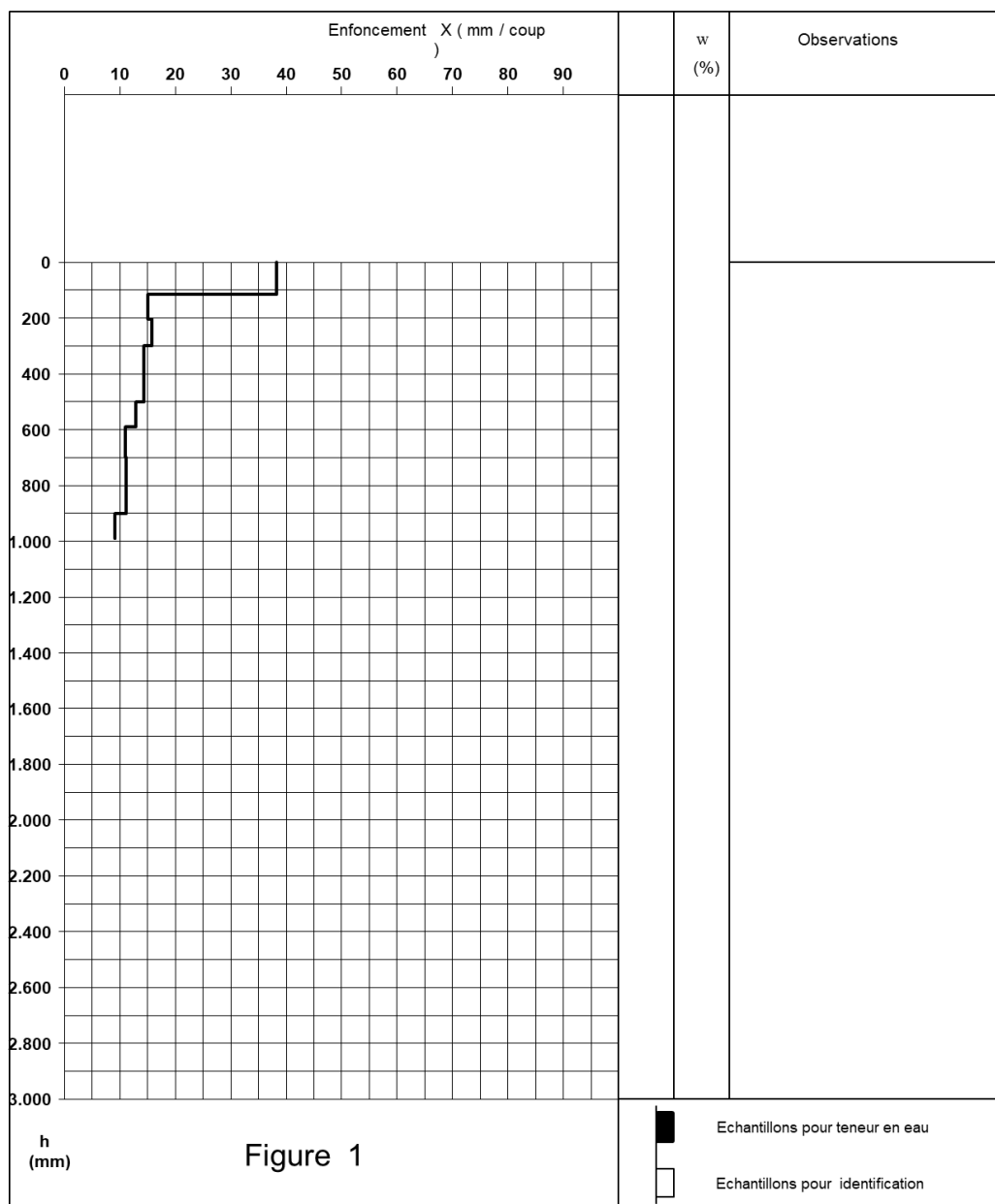


Figure A. 2 : Profil 1 à la sonde de battage, remplissage 1 (Caissons SAUL).

Numéro Essai 2

Site : Wavre

Emplacement : Contain

Emplacement : Container H2O

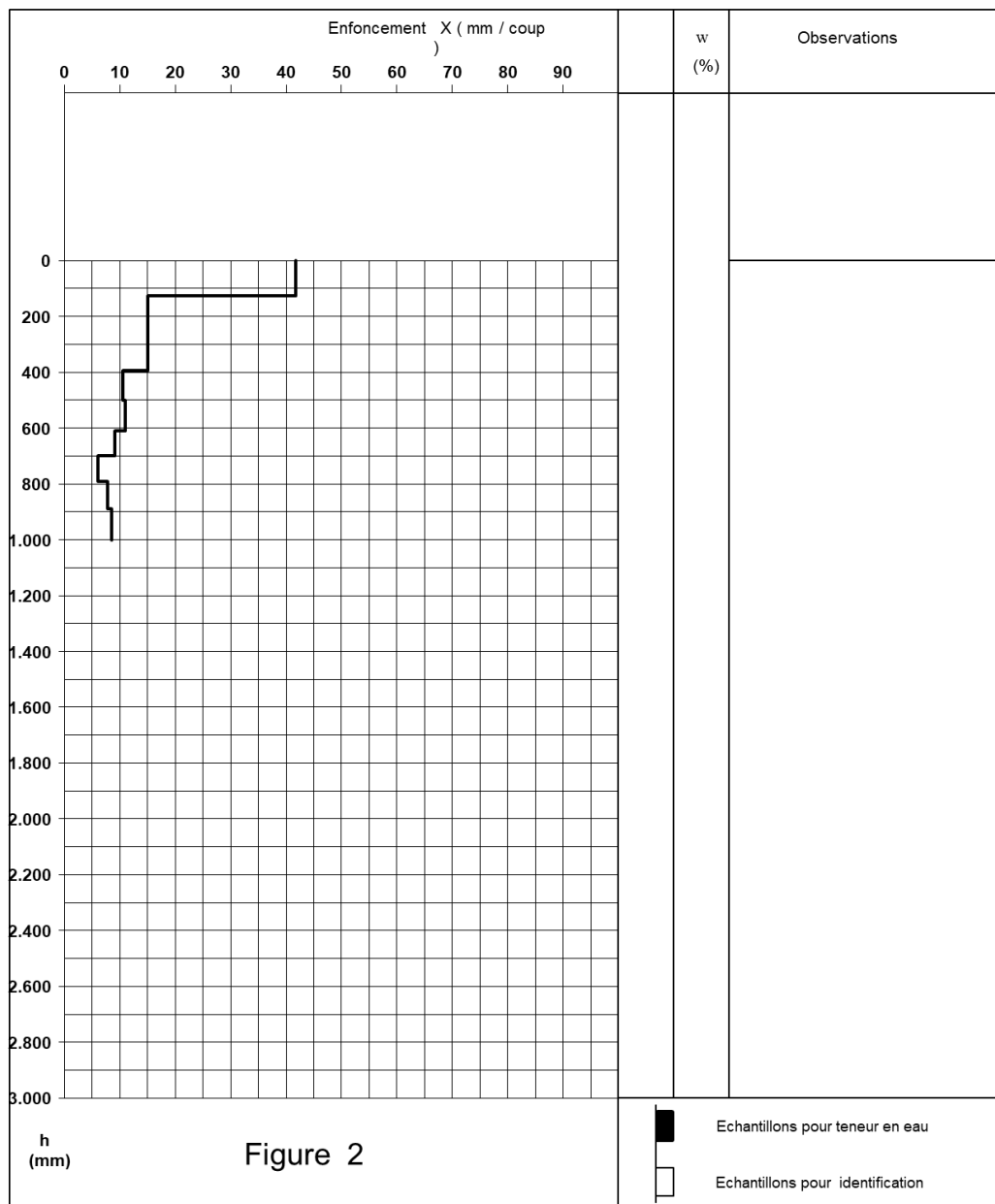


Figure A. 3 : Profil 2 à la sonde de battage, remplissage 1 (Caissons SAUL).

Essai à la sonde de battage légère type C. R. R.

Dossier : **CO 8242**

Numéro Essai 3

Date : 5/09/25

Site : Wavre

Emplacement : Container H2O

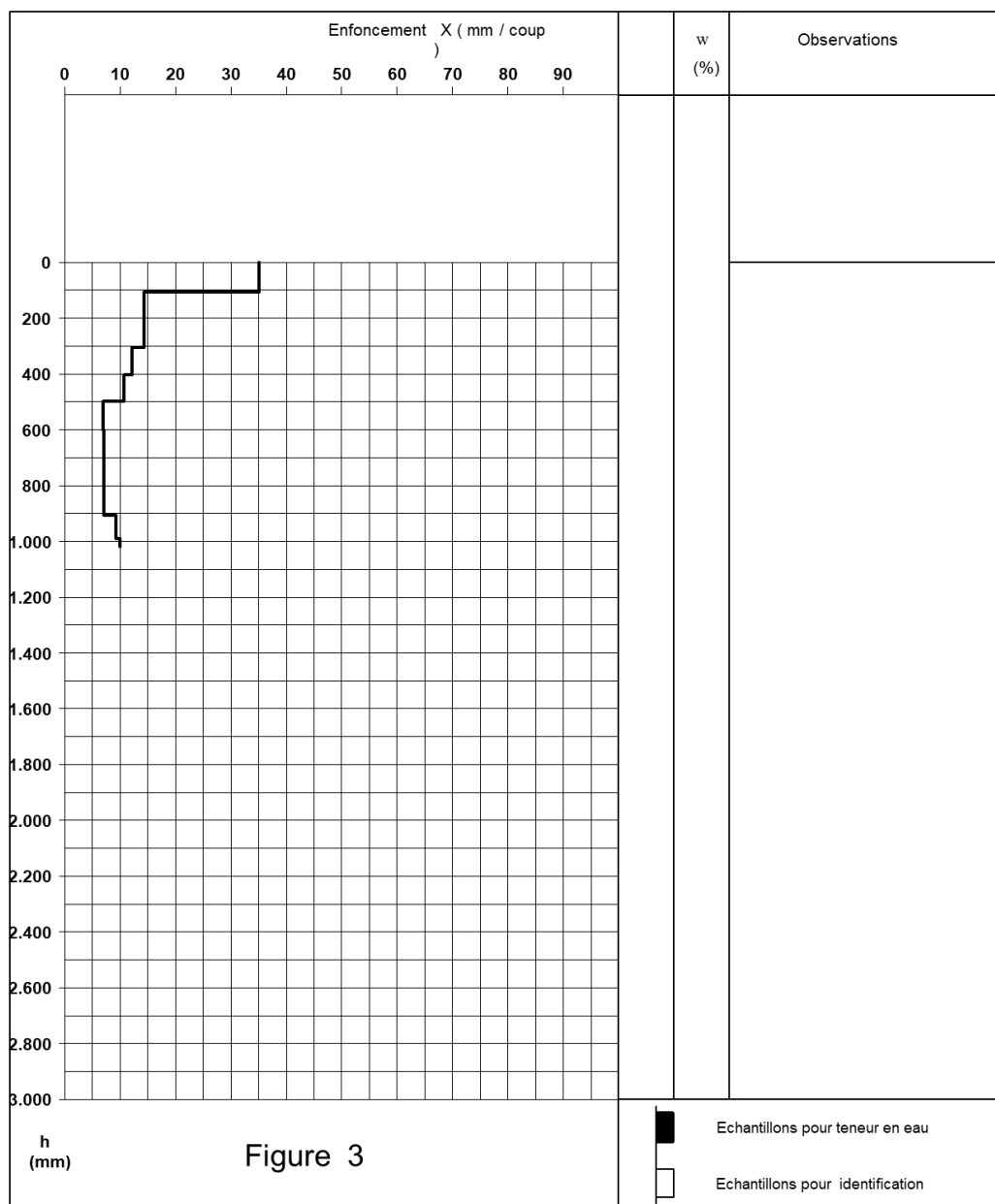


Figure A. 4 : Profil 3 à la sonde de battage, remplissage 1 (Caissons SAUL).

Essai à la sonde de battage légère type C. R. R.

Dossier : **CO 8242**

Numéro Essai 1

Date : 4/12/25

Site : Wavre

Emplacement : Container H2O

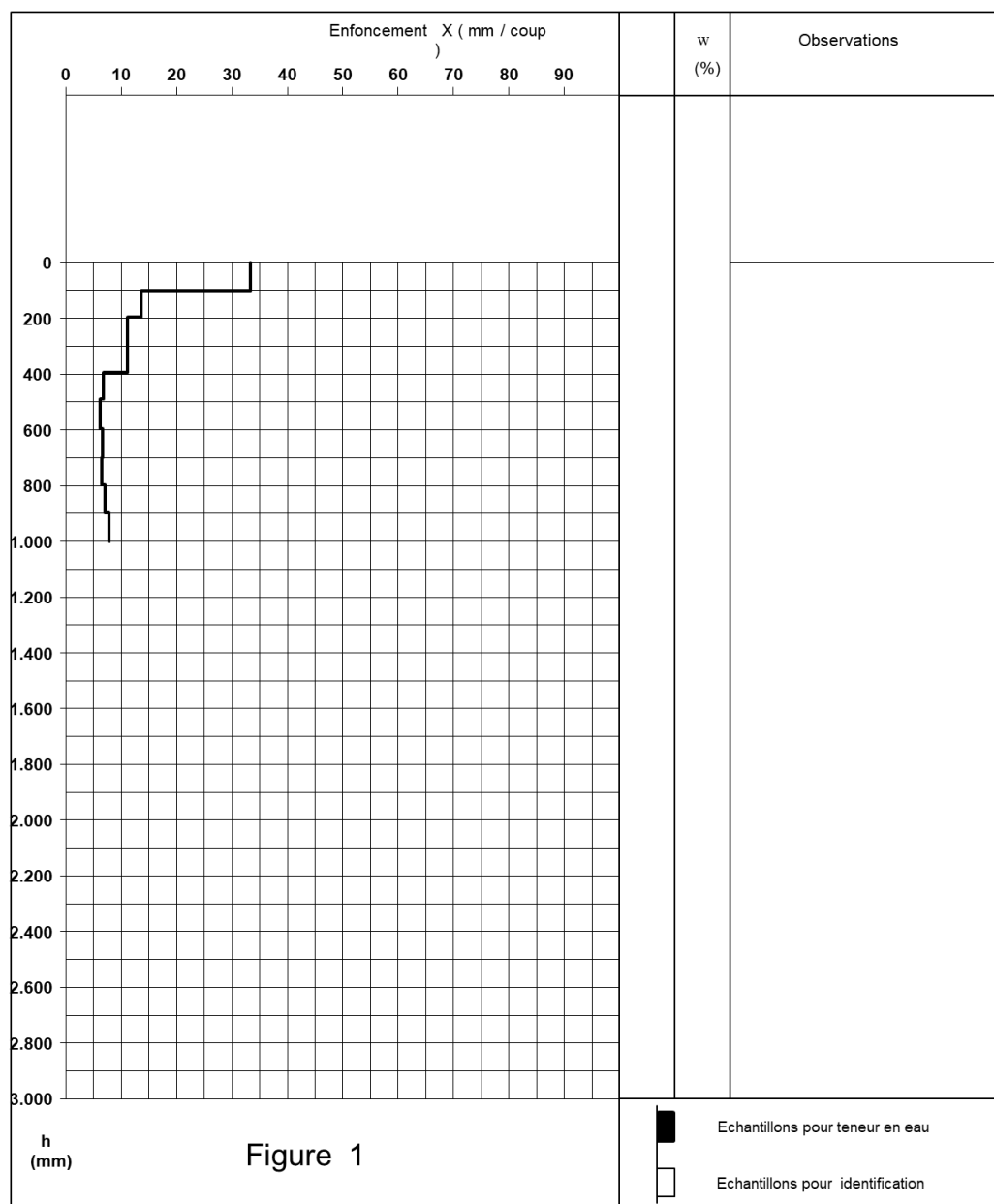


Figure A. 5 : Profil 1 à la sonde de battage, remplissage 2 (Tuyau perforé).

Essai à la sonde de battage légère type C. R. R.

Dossier : CO 8242

Numéro Essai 2

Date : 4/12/25

Site : Wavre

Emplacement : Container H2O

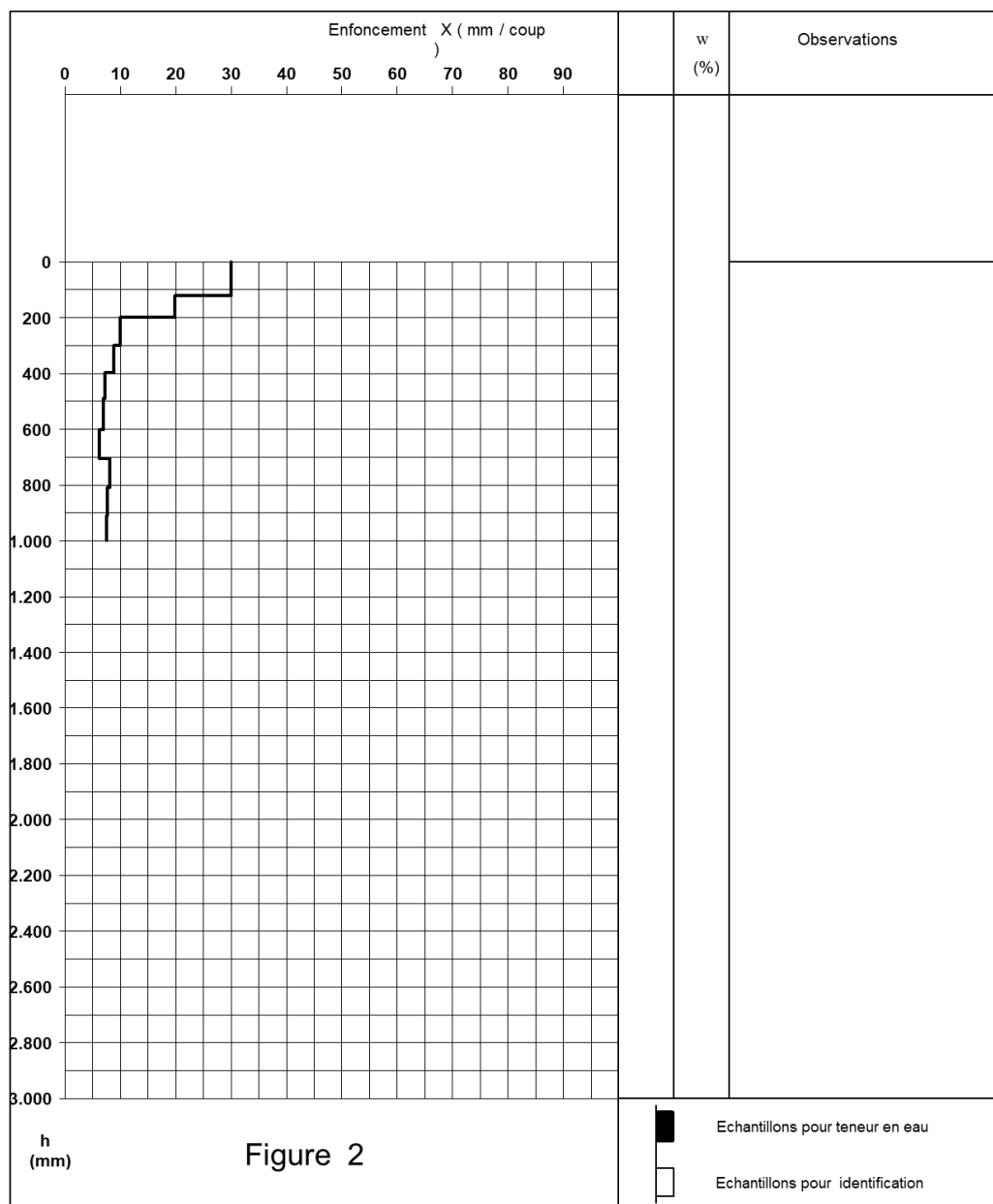


Figure A. 6 : Profil 2 à la sonde de battage, remplissage 2 (Tuyau perforé).

Essai à la sonde de battage légère type C. R. R.

Dossier : **CO 8242**

Numéro Essai 3

Date : 4/12/25

Site : Wavre

Emplacement : Container H2O

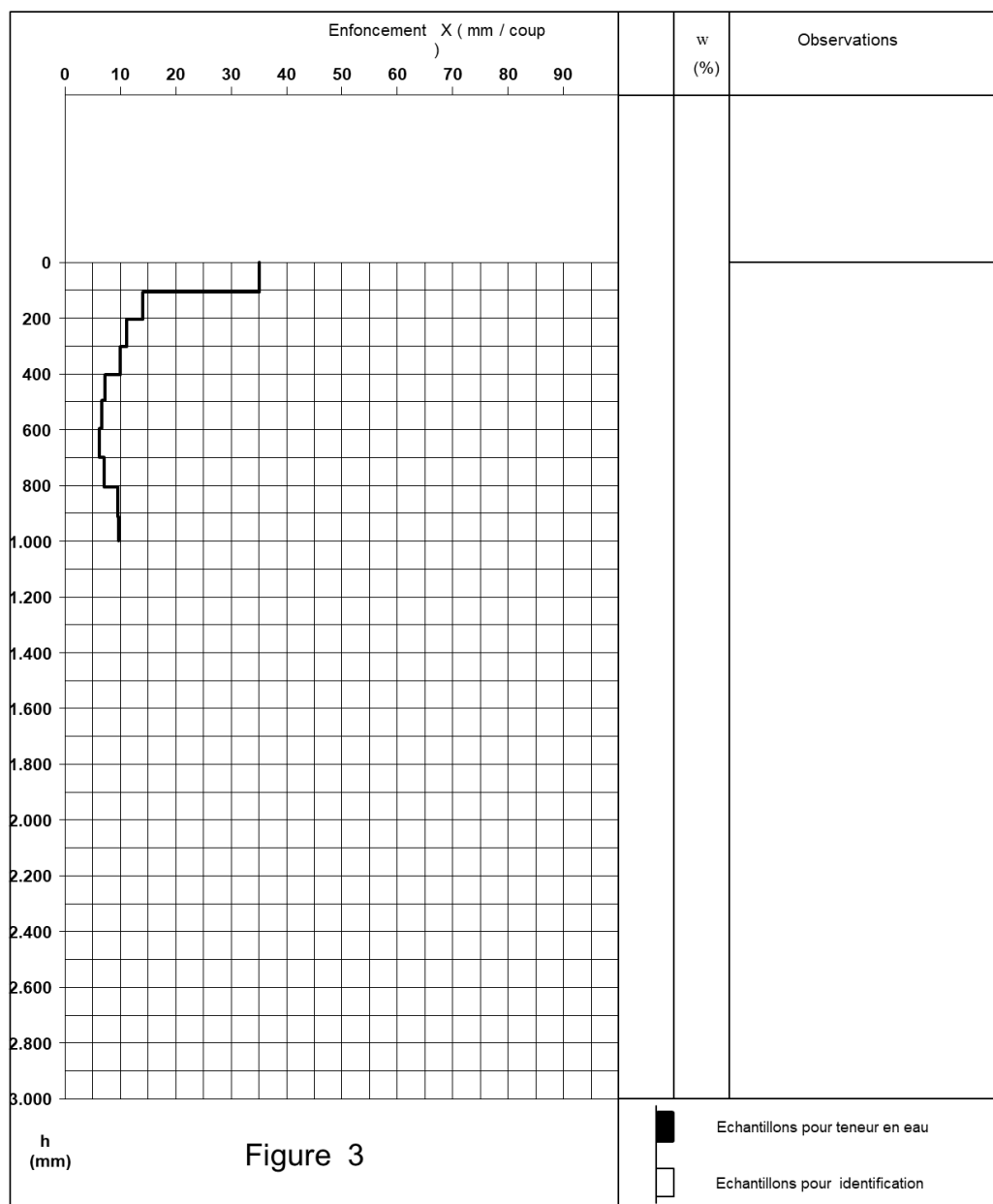


Figure A. 7 : Profil 3 à la sonde de battage, remplissage 2 (Tuyau perforé).



11.3.2 Mesures par pénétromètre Panda

Les diagrammes ci-dessous reprennent les valeurs obtenues au Pénétromètre Panda après compactage de chacun des deux remplissages du conteneur, autour des caissons SAUL et du tuyau en PP perforé, respectivement.

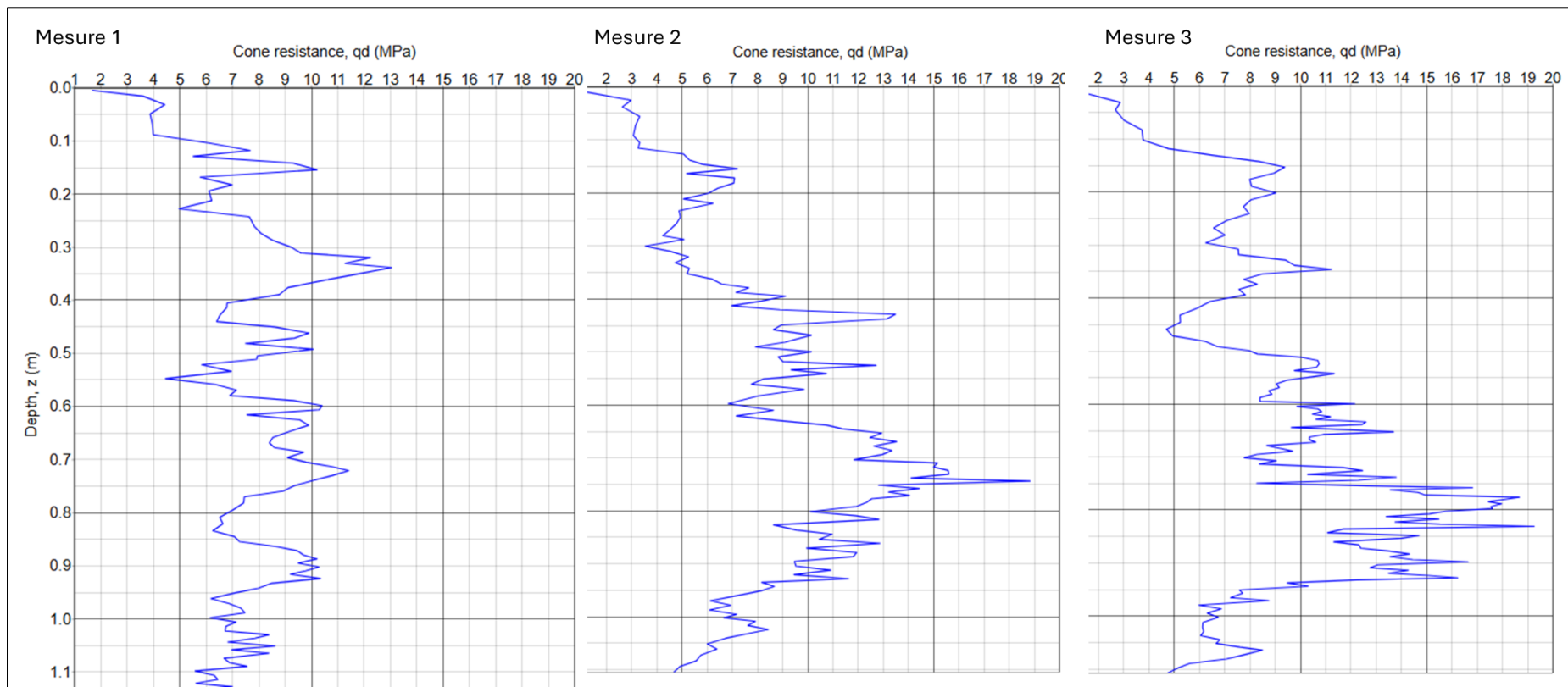


Figure A. 8 : Mesure au pénétromètre Panda, remplissage 1 (Caissons SAUL).



Adresse de correspondance

Boulevard de la Woluwe 42 – B-1200 Bruxelles
T +32 (0)2 775 82 20 – **E** brrc@brrc.be
W www.crr.be – **TVA** BE 0407.571.927

Bureaux

Fokkersdreef 21	Avenue A. Lavoisier 14
B-1933 Sterrebeek	B-1300 Wavre
T +32 (0)2 766 03 00	T +32 (0)10 23 65 00

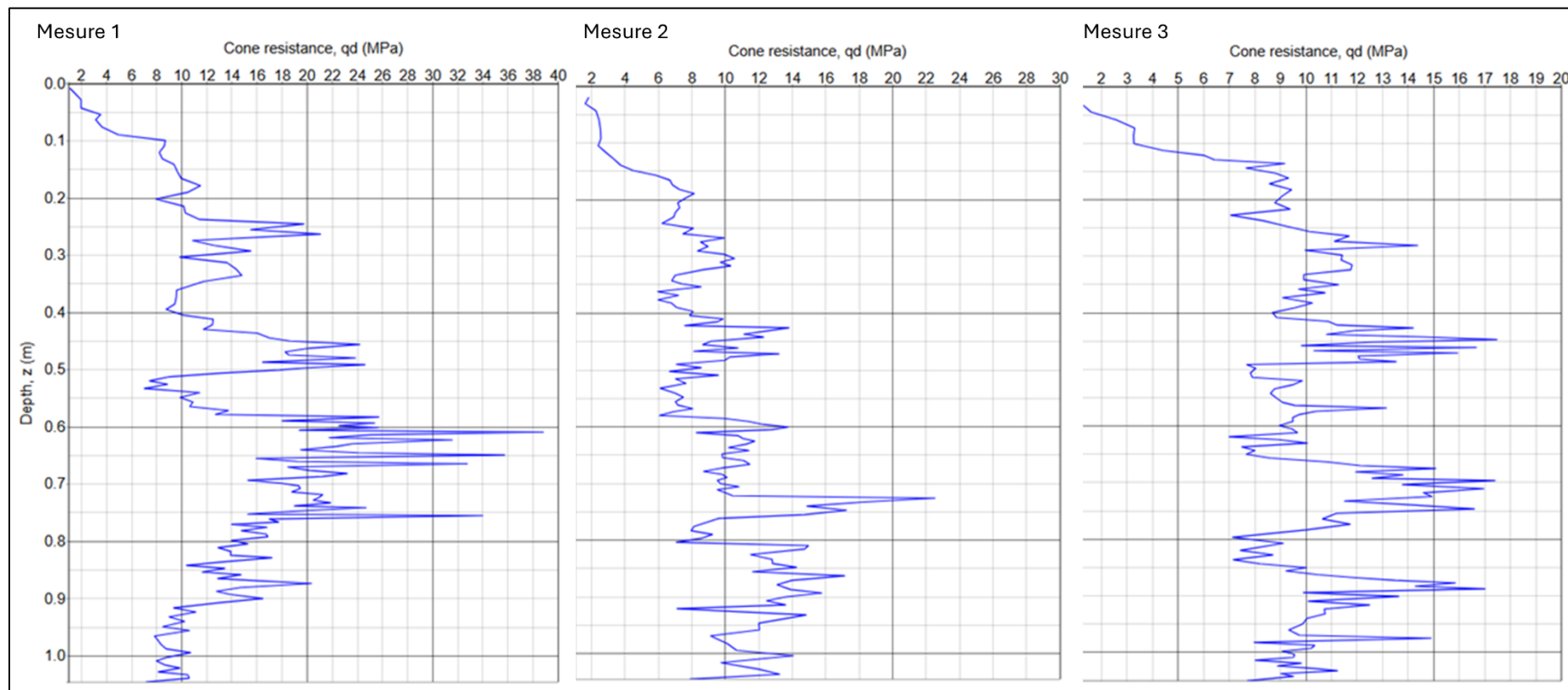


Figure A. 9 : Mesure au pénétromètre Panda, remplissage 2 (Tuyau PP perforé).



Centre de recherches routières
Ensemble pour des routes durables



Adresse de correspondance

Boulevard de la Woluwe 42 – B-1200 Bruxelles
T +32 (0)2 775 82 20 – **E** brrc@brrc.be
W www.crr.be – **TVA** BE 0407.571.927

Bureaux

Fokkersdreef 21
B-1933 Sterrebeek
T +32 (0)2 766 03 00

Avenue A. Lavoisier 14
B-1300 Wavre
T +32 (0)10 23 65 00