

PRODUIT T2.3.1

Rapport sur le suivi de l'efficacité hydraulique et de traitement des infrastructures vertes



Rapporteur: Rudy Rossetto – Scuola Superiore Sant’Anna

Alessandro Lenti – Scuola Superiore Sant’Anna

....-Luca Sebastiani – Scuola Superiore Sant’Anna

.....Laura Ercoli – Scuola Superiore Sant’Anna

.....Alessandra Francini – Scuola Superiore Sant’Anna

31/10/2023

v. 1.0

PRODUIT T2.3. 1

Rapport sur le suivi de l'efficacité hydraulique et de traitement des infrastructures vertes

Ce rapport décrit les résultats de l'activité T2.3 concernant le suivi de l'efficacité hydraulique et traitement de deux infrastructures vertes dans le but d'accroître la confiance des institutions et des citoyens dans lesdites infrastructures pour ensuite favoriser leur diffusion. Dans cette activité, deux infrastructures différentes ont été surveillées : i) un parking perméable constitué d'une grille de drainage en béton herbeux (situé dans la Commune de San Giuliano Terme), ii) un canal végétalisé, dans la zone périurbaine de Pise, qui récupère les eaux de drainage de la zone urbanisée non traitées ou résultant de traitements locaux (fosses Imhoff).

Un suivi a été réalisé sur ces deux infrastructures pour évaluer respectivement l'efficacité hydraulique (parking perméable) et la capacité de traitement, notamment des métaux et des composés pharmaceutiques.

En résumé, les trottoirs perméables (un type de système de drainage durable, *SuDS*) sont conçus pour réduire le volume et le débit de pointe des eaux pluviales sur site, améliorant ainsi la qualité de l'eau infiltrée et aidant à lutter contre l'îlotage de chaleur dans les villes. Dans ce suivi, nous avons testé la capacité d'infiltration d'un revêtement en caillebotis en béton drainant recouvert d'herbe, construit en 2008, à l'aide d'essais infiltrométriques à anneau unique . Nous avons analysé comment divers facteurs, notamment l'emplacement dans le parking, influencent les taux d'infiltration dans la chaussée perméable. Malgré l'absence d'entretien et 15 ans d'exploitation, la capacité d'infiltration de cette infrastructure dépasse toujours la capacité d'infiltration minimale de 1,62 mm/min requise dans de nombreuses régions européennes. Cela peut être dû à la présence de fissures dans le sol et au développement de racines de plantes et à l'activité d'insectes dans les vides de la chaussée. Ce « système vivant » se développe continuellement et contrecarre le phénomène d'envasement (qui tend à réduire la capacité d'infiltration) en réorganisant les premières couches du sol et en interagissant avec le processus de compactage. Cette étude démontre que l'incorporation de chaussées perméables dans les zones urbaines constitue une mesure d'adaptation efficace au changement climatique, même à long terme et avec un entretien limité.

Le suivi de la capacité de traitement d'un canal végétalisé a plutôt permis de vérifier comment ces infrastructures linéaires peuvent contribuer à une réduction de la charge contaminante dans les eaux de surface. En particulier, les contrôles effectués ont démontré comment, sur une longueur d'environ 400 m, une réduction substantielle de la masse des substances polluantes peut être obtenue en période sèche.

1. Les chaussées perméables constituent une méthode efficace pour réduire la génération de ruissellement de surface.

1.1 Introduction

d'infiltrométrie à boucle unique pour étudier comment divers facteurs, y compris l'emplacement dans un seul parking, influencent la capacité d'infiltration. Les objectifs du suivi étaient : i) présenter des données d'infiltration sur un type spécifique de revêtement perméable en saison sèche ; ii) vérifier la robustesse des données collectées grâce à des tests infiltrométriques en boucle unique ; iii) comparer ces données avec les taux d'infiltration de sol végétalisé et d'asphalte au même endroit.

1.2 Matériels et méthodes

Nous avons testé des trottoirs en caillebotis en béton, des parkings en asphalte et des sols végétalisés artificiellement dans un parking situé dans la commune de San Giuliano Terme (Figure 1.1). Il s'agit d'un grand parking desservant une résidence étudiante et une école maternelle, recouvert en grande partie d'asphalte et en partie, sur une superficie limitée, et de places de stationnement constituées de planchers caillebotis (PG). Le parking a été construit en 2008 et depuis lors, les seules opérations d'entretien réalisées sont la tonte de l'herbe, lorsque cela est nécessaire, sans horaire régulier.

Les tests d'infiltration ont été réalisés entre le 18 juillet et le 4 août 2023, pendant la saison sèche, nos données se réfèrent donc à des conditions de sol sèches en été. Pendant la période de test, la température moyenne quotidienne de l'air était de 26°C (avec un maximum de 33,8°C et un minimum de 17,8°C).

La figure 1.2 présente une description schématique de la stratigraphie du site. Dans l'aire de stationnement, au-dessus du terrain naturel (sol limoneux/argileux), la partie artificielle commence par des débris de construction/fragments de roche. Sur celui-ci, un sol limoneux a été posé dans la zone de pavés perméables et d'espaces verts (parterres de fleurs). Les PC sont présents dans 11 onze places de stationnement (Figure 1.1). Dans les zones vertes, pendant la période d'essai, le sol était sec et présentait plusieurs fissures ouvertes (jusqu'à 5 mm de large). La végétation était largement caractérisée par l'herbe dans les parterres de fleurs. La mauve (*Malva sylvestris*) était également présente dans les vides du CGP. Les zones où

l'asphalte manquait ou était usé avaient une épaisseur d'asphalte d'environ 5 cm posée sur un lit de gravier.



Figure 1.1 Localisation géographique de la zone d'essai, emplacement de la station météo TOS01000544 et emplacement des chaussées testées.

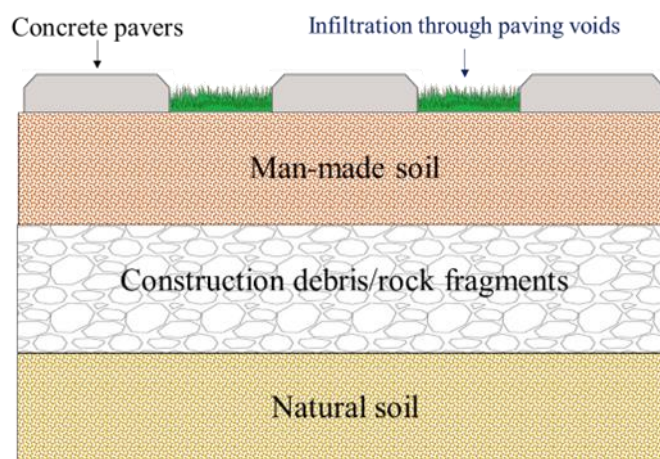


Figure 1.2 Représentation schématique de la stratigraphie du CGP dans le site étudié.

1.2.1 Essai d'infiltration

Le taux d'infiltration a été surveillé à l'aide d'un test d'infiltration à boucle unique, qui est une forme modifiée des méthodes de test d'infiltration à double boucle décrites dans la norme ASTM D 3385. L'équipement expérimental était constitué d'anneaux en acier d'un diamètre interne de 28, 30 et 32 cm (Royal Eijkelkamp, Pays-Bas), un pont de mesure, la tige de mesure avec flotteur et matériau d'étanchéité (Figure 1.3B).

Le test consistait en résumé à sceller l'anneau au sol/chaussée, à le remplir d'eau puis à mesurer la baisse du niveau d'eau sur un temps précis pour évaluer le taux d'infiltration. Bien que le placement de l'anneau sur un sol végétalisé/naturel soit assez simple, le principal défi lié à l'utilisation du test d'infiltration pour évaluer la capacité d'infiltration de l'asphalte/des chaussées perméables est que les anneaux ne peuvent pas pénétrer dans la surface d'essai pour créer un joint étanche. Par conséquent, pour effectuer le test avec précision, il est nécessaire de sceller les anneaux contre la surface de la chaussée à l'aide d'un scellant imperméable. Si de l'eau fuit ou contourne l'anneau, cela peut entraîner des surestimations ou des fluctuations importantes des valeurs d'infiltration mesurées. Pour cette expérience, après avoir testé différentes solutions et matériaux d'étanchéité, nous avons utilisé une approche de double étanchéité. Un premier scellement a été réalisé à l'aide de TEC7^(R), une colle à haut pouvoir adhésif qui adhère aussi bien aux supports humides que secs (Novatech International nv., Belgique). De plus, après le mouillage initial, nous avons distribué de la poudre Lamposilex^(R) (MAPEI, Italie) sur l'extérieur de l'anneau, pour bloquer toute fuite d'eau résiduelle. Grâce à cette approche, une solution d'étanchéité a été obtenue et aucune fuite n'a été observée dans les 30 minutes suivant la mise en œuvre du test. Une fois ce résultat obtenu, les tests ont commencé.

Le tableau 1.1 présente des informations sur les tests effectués. Trois tests d'infiltration ont été réalisés à chaque emplacement du CGP. Le premier essai a été réalisé dans des conditions de sécheresse totale, avec une capacité d'infiltration élevée. Cependant, comme diverses causes lors de l'infiltration peuvent empêcher l'atteinte de la saturation maximale, nous avons répété les tests deux fois de plus au même point dans une à deux heures après la fin du premier test.

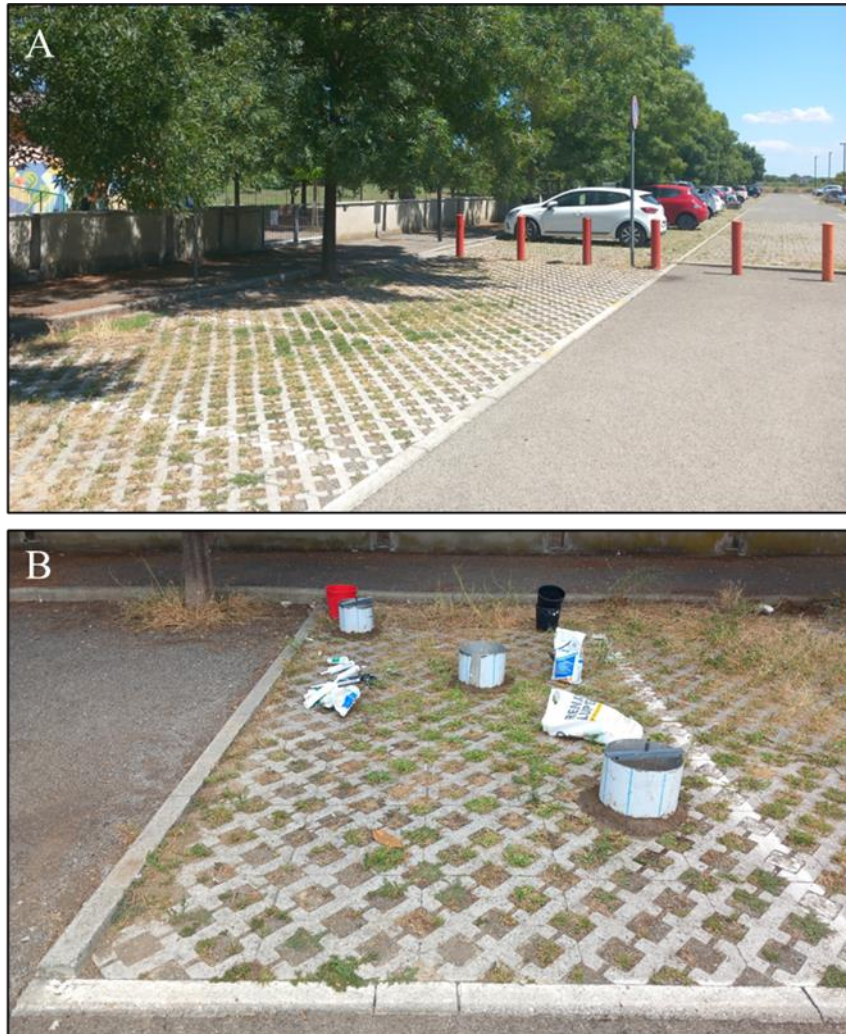


Figure 1.3 Aire de stationnement avec revêtement en grille de béton (A) et installation expérimentale (B).

Chaque test s'est poursuivi jusqu'à ce qu'une valeur d'infiltration relativement constante soit atteinte. La moyenne des résultats des deux tests ultérieurs est appelée « test humide ». Aux points 6A et 6C, un seul essai a été appliqué dans des conditions humides après l'essai sur sec. Pour l'analyse statistique, nous avons inclus une deuxième réplique en supposant que les résultats correspondraient à ceux du premier essai dans des conditions humides. Les essais sur asphalte et terrain végétalisé ont été réalisés uniquement en conditions sèches, soit un essai par emplacement. Parmi les différents essais sur sol végétalisé artificiel, trois seulement ont été réalisés et ont permis d'obtenir des résultats d'infiltration. Cela est dû à la présence des grandes fissures susmentionnées dans le sol, qui, dans de nombreux cas, n'ont

pas permis de créer la charge hydraulique nécessaire dans le cylindre . En pratique, lorsque de l'eau était versée dans l'anneau, elle s'infiltrait presque instantanément à travers les fissures.

Tableau 1.1 Nombre de sites d'essai et d'essais d'infiltration pour chaque type de couverture terrestre

Type de couverture terrestre	Nombre de postes de test	Nombre de tests d'infiltration
Sols perméables	30	90
Asphalte	9	9
Espaces verts	3	6

1.3. Résultats et discussion

Nous présentons les données de 88 tests effectués sur 10 stalles PG. Dans les 10 stalles PG, les taux d'infiltration généraux mesurés dans des conditions pré-sèches et humides variaient de 1,89 à 6,31 mm/min, avec une moyenne de 4,03 mm/min (tableau 1.2), dépassant l'exigence minimale de taux d'infiltration de conception de 1,62 mm./min, comme spécifié par certaines autorités européennes, comme aux Pays-Bas, en Belgique et en Allemagne, pour les revêtements perméables nouvellement installés.

Les taux d'infiltration dans trois places de stationnement asphaltées dans des conditions sèches variaient entre 0,37 et 0,83 mm/min (en moyenne 0,54 mm/min). Les tests réalisés sur des terrains végétalisés artificiellement (espaces verts) indiquent des taux d'infiltration significativement élevés, compris entre 3,93 et 9,87 mm/min, avec une moyenne de 6,36 mm/min (et la valeur la plus élevée de l'écart type). Cependant, en raison de la présence de fissures de dessiccation, en plusieurs points testés, l'infiltration était pratiquement infinie et non mesurable.

Les valeurs du taux d'infiltration pendant la saison sèche sont nettement plus élevées dans les PG par rapport à l'asphalte standard, même après 15 ans de durée de vie des PG. Les valeurs sont inférieures à celles mesurées sur sol végétalisé en raison des conditions du sol en saison sèche.

Tableau 1.2. Statistiques récapitulatives de toutes les surfaces et tests effectués (toutes les valeurs sont exprimées en mm/min)

Couverture terrestre/emplacement	min	maximum	Médian	Moyenne	Écart-type	
1	2,57	5.23	3,57	3,75	0,96	
2	3.01	6.31	4.34	4.41	1.12	
3	3.41	5.71	4.07	4.18	0,84	
4	1,89	3,93	3.04	2,98	0,68	
5	3.32	5,50	4h40	4.42	1.11	
6	2,59	5.22	4.10	4.04	0,84	
Sols perméables	7	3.21	5.26	4.13	4.22	0,73
8	3.04	5,74	4.26	4.23	1.16	
9	2,39	5,82	3,70	3,82	1.19	
dix	3.34	5.19	4.32	4.29	0,83	
Tous les points	1,89	6.31	3,95	4.03	0,98	
Asphalte	0,37	0,83	0,50	0,54	0,18	
Espaces verts	3,93	9,87	6,73	6.36	2.20	

1.4. Conclusions

Cette étude présente les données et résultats d'essais sur le terrain réalisés à Pise (Italie) sur un parking perméable PG pendant la saison estivale sèche. La recherche a évalué le taux d'infiltration grâce à l'application d'une procédure de test simple et économique en boucle unique. La réalisation d'un seul test d'infiltration sur PG dans des conditions sèches peut conduire à une surestimation des taux d'infiltration. Pour obtenir des valeurs d'infiltration quasi stationnaires, au moins deux tests ultérieurs sont nécessaires.

Les valeurs d'infiltration de surface variaient entre un minimum de 1,89 mm/min et un maximum de 6,31 mm/min, avec une moyenne de 4,03 mm/min. Les valeurs du taux

d'infiltration pendant la saison sèche sont nettement plus élevées en PG par rapport à l'asphalte standard, même après 15 ans d'exploitation.

Malgré l'absence de maintenance et 15 ans de fonctionnement, dans notre cas la capacité d'infiltration des CGP dépasse encore la capacité d'infiltration minimale de 1,62 mm/min requise dans de nombreuses régions européennes. Cela peut être dû à la présence de fissures dans le sol et au développement de racines de plantes et d'insectes dans les vides de la chaussée. Ce « système vivant » se développe en permanence et lutte contre l'envasement en réorganisant les premières couches du sol et en interagissant avec le processus de compactage. Notre étude démontre que l'intégration de chaussées perméables dans la conception des zones urbaines constitue une approche potentiellement efficace pour relever les défis émergents associés au changement climatique, même à long terme et avec un entretien limité.

2. Les canaux végétalisés permettent de réduire la charge polluante provenant des zones urbaines.

2.1 Introduction

Le suivi de la capacité de traitement d'un canal végétalisé a plutôt permis de vérifier comment ces infrastructures linéaires peuvent contribuer à une réduction de la charge contaminante dans les eaux de surface. Le suivi a été réalisé sur un canal végétalisé qui collecte les eaux usées de la zone urbanisée non traitées ou résultant de traitements locaux (fosses Imhoff), dans la zone périurbaine de Pise (Figure 2.1).



Figure 2.1. Section de canal étudiée et points surveillés.

Le suivi a été effectué dans des conditions d'étiage, à un point d'entrée (OC_1) puis à 400 m au point OC_2. Des échantillons composites ont été collectés (2 volumes de 0,5 L toutes les 10 minutes représentant environ 20 minutes). L'expérience a été réalisée le 11 octobre 2023. Les vitesses d'écoulement longitudinales moyennes ont été mesurées à l'aide d'un courantomètre numérique acoustique (OTT Messtechnik GmbH, Kempten ; Allemagne). Les échantillons ont été réfrigérés jusqu'à la réalisation des analyses, qui ont eu lieu dans un délai de 15 jours.

Les tableaux 2.1A et 2.1B rapportent les données de terrain collectées lors de l'expérience aux points OC_1 et OC_2 respectivement. L'annexe 2.1 présente les données relatives aux principaux composants en solution.



Figure 2.2. Point d'échantillonnage OC_1 (à gauche) et OC_2 (à droite).

Tableau 2.1 A et B. Conditions expérimentales détectées lors du suivi.

Tabella 2.1A	Time	T(°C)	SpC(μS)	DO(mg/L)	pH	ORP(mV)	Note
OC 1.1	7:20-7:40	17.1	1820	0.45	7.79	-20	3 bottles: 2*1L bottles, 1*0.250L bottle Water is clear Depth less than 0.1m ORP value was still decreasing Sunny weather
OC 1.2	8:50-9:10	17.0	1790	0.50	7.76	-235	
OC 1.3	10:20-10:40	17.8	1800	1.20	7.84	-98	Flow velocity at OC1: max 0.04 m/s, min 0.01m/s Estimated cross sectional area is 1*0.1m Estimated flow : max 4L/s with max v
OC 1.4	11:35-11:55	18.5	1750	0.79	7.88	-24	
OC 1.5	12:50-13:10	19.1	1760	0.83	7.89	6	Flow velocity at OC1: max 0.04 m/s, min 0.01m/s

Tabella 2.1B	Time	T(°C)	SpC(μS)	DO(mg/L)	pH	ORP(mV)	Note
OC 2.1	8:15-8:35	15.5	1740	0.9	7.79	60	
OC 2.2	9:20-9:40	16.0	1750	1.25	7.82	3	Flow velocity at OC1: max 0.1 m/s, min 0.01m/s Estimated cross sectional area is 0.5*0.05m Estimated flow : max 2.5L/s
OC 2.3	11:00-11:20	16.9	1760	0.58	7.85	52	
OC 2.4	12:05-12:25	18.0	1770	1.84	7.89	81	Weather becomes cloudy
OC 2.5	13:30-13:50	19.3	1780	2.32	7.89	82	Flow velocity at OC1: max 0.1 m/s, min 0.01m/s

Le Tableau 3.1 montre les pourcentages de réductions de masse pour les éléments inorganiques à la transition du point OC_1 au point OC_2 (temps de trajet environ 2 heures).

Analiti	Dev. Standard	Abbattimento % medio
Ammonio (NH ₄ ⁺)	3.7	27
Cloruri (Cl ⁻)	4.1	27
Solfati (SO ₄)	1.1	39
Arsenico (As)	2.1	17
Boro (B)	1.1	48
Zinco (Zn)	2.5	39
Litio (Li)	1.9	32
Nichel (Ni)	1.5	17
Rame (Cu)	6.8	27
Stronzio (Sr)	0.4	29
Calcio (Ca)	0.0	25
Potassio (K)	2.1	27
Magnesio (Mg)	1.5	29
Sodio (Na)	2.0	29
Carbonio organico disciolto (DOC)	1.6	36

Le Tableau 3.2 présente les pourcentages de réductions de masse pour les composés pharmaceutiques analysés à la transition du point OC_1 au point OC_2 (temps de trajet environ 2 heures).

	Metformin	Atenolol	Clarithromycin	Naproxen	Ibuprofene
Dev. St.	7.7	18.4	22.1	8.0	16.3
Media % abbattimento	51.1	26.1	41.4	11.7	52.5

L'expérience réalisée démontre qu'un canal végétalisé est capable de décomposer, avec différents degrés de fonctionnalité, tant les analytes inorganiques que les composés organiques présents dans les eaux de surface. Les données présentées sont pertinentes puisque l'expérience est menée dans des conditions de sécheresse donc il n'y a pas d'effet de dilution dans la section étudiée.