

Techniques alternatives de gestion des eaux pluviales urbaines Etude régionale sur la capacité d'infiltration



J. LEDUN
M. SAUNIER
F. DELAMARCHE
JF. OUVRY

Mai 2018

AREAS

Remerciements

L'AREAS tient à remercier :

- Les financeurs du projet : Etat (FNADT), Département de Seine-Maritime, Département de l'Eure
- les Propriétaires des aménagements d'infiltration des eaux pluviales qui nous ont donné leur accord pour réaliser des mesures : Mairie de Saint-Jean-de-Folleville, Mairie d'Allouville-Bellefosse, Métropole Rouen Normandie, Syndicat d'Eau du Plateau du Neubourg (SERPN), Mairie de Foucart, ASL des Bleuets, Mairie d'Yvetot, Mairie de Bosc-Guérard-Saint-Adrien, Mairie de Bouville, Mairie d'Auberville-la-Campagne, Mairie de Paluel, Mairie de Pissy-Pôville,
- la Mairie de St Jean de Folleville également pour son accueil chaleureux lors de la démonstration des méthodes de mesure du 28 juin 2016,
- les Syndicats d'Eau et les exploitants de réseaux d'eau qui nous ont permis de réaliser les mesures par remplissage : SIAEPA de la région de Montville, Caux Seine Agglo, SIEA du Caux Central, Eaux de Normandie, SAUR, Veolia
- les membres du comité de pilotage du projet : Agence de l'Eau Seine Normandie, DDTM de Seine-Maritime, SMBV Austreberthe et Saffimbec, SMSAGE Cailly Aubette Robec, SMBV Pointe de Caux Etretat, SBV Saône Vienne Scie, Infraservices, ADOPTA,
- et tous ceux qui ont contribué au projet de près ou de loin (recensement des aménagements, collecte d'information sur les aménagements...) : Syndicats de bassins versants et Intercommunalités de Seine-Maritime et de l'Eure, Mairie de la Rue-Saint-Pierre, Cabinet Craquelin, Les Terres à Maisons, GE360...

Ce projet a été financé par



Résumé

En Normandie, le ruissellement, qu'il soit d'origine agricole ou urbaine, a des impacts forts en termes d'inondation et de dégradation de la qualité des eaux souterraines et des cours d'eau. Les techniques alternatives de gestion des eaux pluviales par infiltration (noues d'infiltration, bassins paysagers...) permettent de limiter le ruissellement d'origine urbaine. Ce mode de gestion des eaux pluviales présente aussi d'autres avantages : contribution à la recharge de la nappe, introduction de la nature et de la biodiversité en ville...

Pour aider au développement des techniques alternatives basées sur l'infiltration, un programme de mesures a été réalisé pour acquérir des références précises sur la capacité d'infiltration réelle d'objets existants depuis plusieurs années (noues et bassins d'infiltration) sur les sols limoneux profonds de la région.

Les principaux enseignements de ce travail sont :

- Méthodologie : différentes techniques de mesure de l'infiltration dans des aménagements existants ont été comparées dans les noues et les bassins d'infiltration. Il en ressort qu'il faut privilégier les méthodes de mesure globales de l'infiltration à l'échelle de l'aménagement, qui sont plus fiables que les mesures locales.
- Résultats des mesures : les vitesses d'infiltration globales mesurées tendent vers des valeurs comprises entre 1 et 50 mm/h environ, avec des variations selon les aménagements testés.
- Valorisation des résultats : les données acquises lors des mesures ont permis de modéliser le fonctionnement d'aménagements d'infiltration sur des chroniques de pluie de 10 ans, afin d'évaluer notamment leur fréquence de débordement.

Ces connaissances sur le fonctionnement des techniques alternatives existantes devraient permettre d'optimiser la conception et le dimensionnement des aménagements futurs.

Sommaire

REMERCIEMENTS	1
RESUME	2
INTRODUCTION	5
PARTIE 1 TYPOLOGIE DES AMENAGEMENTS DE GESTION DES EAUX PLUVIALES ET CONNAISSANCES SUR LEURS CAPACITES D'INFILTRATION	6
1. TYPOLOGIE DES AMENAGEMENTS D'INFILTRATION DES EAUX PLUVIALES RENCONTRES	6
1.1. BASSIN D'INFILTRATION	6
1.2. NOUE DE TRANSFERT	6
1.3. NOUE D'INFILTRATION	7
1.4. NOUE DRAINEE	8
1.5. ESPACE VERT CREUX	9
1.6. TRANCHEE DRAINANTE	9
2. COMBINAISONS D'AMENAGEMENTS	10
2.1. BASSIN D'INFILTRATION ET CANALISATIONS ENTERREES	10
2.2. NOUES DE TRANSFERT ET BASSIN D'INFILTRATION	10
2.3. NOUES D'INFILTRATION (AVEC OU SANS BASSIN D'INFILTRATION)	10
2.4. ESPACES VERTS CREUX (GESTION INTEGREE)	11
3. REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES SITES RECENSES	12
4. SYNTHESE DES CONNAISSANCES SUR LES CAPACITES D'INFILTRATION DES TECHNIQUES ALTERNATIVES	13
4.1. INTERET DE L'INFILTRATION DES EAUX PLUVIALES ET INTERROGATIONS	13
4.2. METHODES DE MESURE D'INFILTRATION	16
4.3. RESULTATS DES ESSAIS D'INFILTRATION REALISES DANS LE CADRE DE PROJETS D'AMENAGEMENTS DANS LA REGION	19
PARTIE 2 EVALUATION DES CAPACITES D'INFILTRATION D'AMENAGEMENTS EXISTANTS	21
1. METHODES UTILISEES POUR EVALUER LA CAPACITE D'INFILTRATION DES AMENAGEMENTS TESTES	21
1.1. METHODE DOUBLE ANNEAU OUVERT A CHARGE VARIABLE (LOCALE)	22
1.2. METHODE PAR REMPLISSAGE (GLOBALE)	23
1.3. METHODE PAR MESURE EN CONTINU (GLOBALE)	24
1.4. CRITERES DE CHOIX DES SITES DE MESURE	25
2. DESCRIPTION DES SITES TESTES	26
3. RESULTATS	28

3.1. RESULTATS DES MESURES SUR LES BASSINS D'INFILTRATION	28
3.2. RESULTATS DES MESURES SUR LES NOUES D'INFILTRATION	33
3.3. RESULTATS DES MESURES SUR LES NOUES DRAINEES	40
3.4. BILAN DES MESURES D'INFILTRATION SUR DES AMENAGEMENTS EXISTANTS	45

PARTIE 3 ENSEIGNEMENTS PRATIQUES **47**

1. ETUDES PREALABLES	47
2. DIMENSIONNEMENT ET CONCEPTION DES TECHNIQUES ALTERNATIVES POUR FAVORISER L'INFILTRATION	48
2.1. METHODE D'EVALUATION DE L'EFFICACITE D'INFILTRATION PAR MODELISATION BASEE SUR UNE LONGUE CHRONIQUE DE PLUIES	48
2.2. ENSEIGNEMENTS POUR LE DIMENSIONNEMENT ET LA CONCEPTION DES TECHNIQUES ALTERNATIVES	61
3. REALISATION DES TECHNIQUES ALTERNATIVES	62
3.1. REALISATION	62
3.2. CONTROLE APRES REALISATION	63
4. GESTION ET ENTRETIEN	64

CONCLUSION **66**

PERSPECTIVES **67**

BIBLIOGRAPHIE **69**

Introduction

Le territoire concerné par l'étude couvre les départements de la Seine-Maritime et de l'Eure, et plus particulièrement les plateaux limoneux. En effet, il manque des références sur l'infiltration des eaux pluviales sur ce type de sol.

Le travail présenté dans ce rapport vise 2 objectifs :

- Acquérir des références régionales sur l'infiltration in-situ des eaux pluviales dans des aménagements existants depuis plusieurs années,
- Diffuser les résultats à l'ensemble des acteurs de l'aménagement et de la gestion de l'eau pour favoriser le développement de ces techniques dans la région.

L'AREAS s'est appuyée notamment sur son expérience en matière de mesure d'infiltration dans les sols pour mettre au point une méthode d'étude en 3 phases :

- Recensement des sites d'infiltration des eaux pluviales de la région, sélection des sites potentiels de mesure et demandes d'autorisation aux propriétaires,
- Mise au point des méthodes de mesures globales et locales, et réalisation des mesures d'infiltration sur les sites retenus,
- Exploitation des résultats, synthèse et enseignements pour aider à dimensionner et concevoir les aménagements futurs.

Dans ce rapport, toutes les vitesses d'infiltration seront exprimées en mm/h. Pour mémoire, $3,6\text{mm/h} = 10^{-6}\text{m/s}$.

Attention : ce document n'est pas un guide de réalisation des aménagements d'infiltration des eaux pluviales, mais un retour d'expérience sur le fonctionnement des aménagements existants dans la région.

PARTIE 1 Typologie des aménagements de gestion des eaux pluviales et connaissances sur leurs capacités d'infiltration

1. Typologie des aménagements d'infiltration des eaux pluviales rencontrés

Les aménagements recensés en Seine-Maritime et dans l'Eure peuvent être classés en 6 catégories.

1.1. Bassin d'infiltration

Bassin en déblai, à ciel ouvert, qui recueille les eaux de ruissellement par des ouvrages de transfert (canalisations, noues), et qui se vidange au moins en partie par infiltration dans le sol.



Figure 1 : bassins d'infiltration

Les bassins d'infiltration recensés ont des caractéristiques variables : forme, volume, profondeur, végétation, mode de collecte des eaux de ruissellement, mode de vidange...

Certains bassins sont équipés d'un débit de fuite positionné au-dessus du fond, de sorte qu'une partie de l'eau s'infiltré, alors que le reste est rejeté en surface à débit régulé.



Figure 2 : bassin qui se vidange par infiltration pour les petites pluies puis par rejet à débit régulé lorsque la hauteur d'eau dépasse 30cm

1.2. Noue de transfert

La noue de transfert est une sorte de fossé évasé dont le rôle est de collecter les eaux de ruissellement et de les évacuer vers l'aval. Cependant, une partie des eaux peut s'infiltrer lors du trajet.

Les noues de transfert sont parfois séparées par des redents avec un débit de fuite pour ralentir l'écoulement.



Figure 3 : Noues de transfert

Les noues sont souvent positionnées le long des voiries pour en collecter les eaux de ruissellement.

1.3. Noüe d'infiltration

A la différence de la noüe de transfert, la noüe d'infiltration est conçue pour retenir l'eau de ruissellement et l'évacuer par infiltration dans le sol en place.



Figure 4 : Noues d'infiltration

Les noues d'infiltration sont constituées de plusieurs tronçons successifs qui peuvent déborder les uns dans les autres par des surverses aménagées. Ces tronçons peuvent être séparés par des redents enherbés, des entrées de parcelles profilées, parfois même par des cloisons béton...

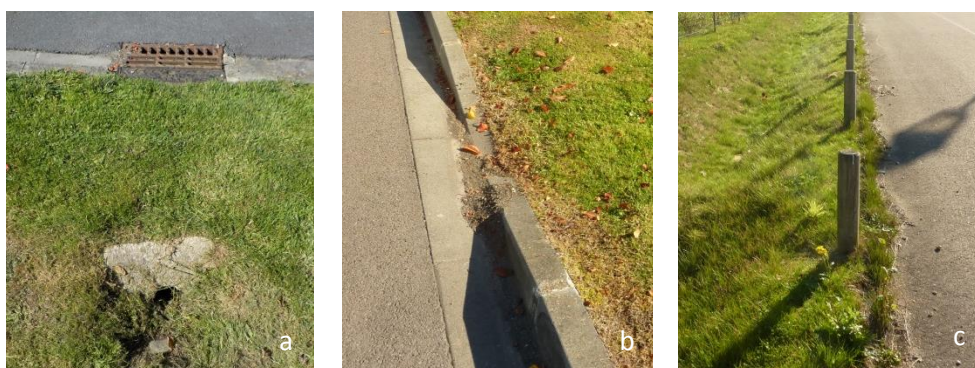


Figure 5 : Différents modes d'alimentation des noues en bordure de voirie : a) Avaloir et canalisation – b) caniveau et « Bateau » - c) ruissellement direct

Il existe plusieurs modalités d'alimentation des noues, qui concentrent plus ou moins les eaux de ruissellement.

1.4. Noue drainée

Les noues drainées disposent d'un volume de rétention en surface, comme les noues d'infiltration, mais reposent sur des massifs drainants connectés entre eux. Elles sont conçues pour retenir l'eau de ruissellement, la filtrer à travers une couche de sol superficiel, puis la renvoyer vers un exutoire en surface.



Figure 6 : a) Noue drainée – b) Massif drainant affleurant sous géotextile déchiré – c) rejet des eaux issues des massifs drainants dans un regard en aval

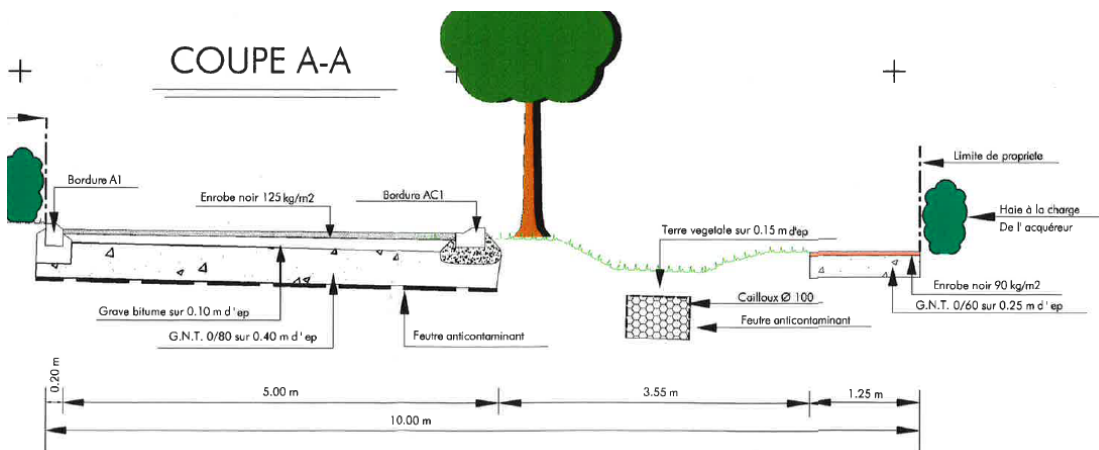


Figure 7 : Coupe transversale de noue drainée

1.5. Espace vert creux

Un espace vert creux concilie une fonction paysagère et une fonction de gestion des eaux pluviales « à la source », qui peut se faire par infiltration.



Figure 8 : Espaces verts creux

1.6. Tranchée drainante

Une tranchée drainante est un dispositif souterrain de stockage et d'infiltration des eaux de ruissellement, généralement rempli de cailloux.



Figure 9 : a) Tranchée drainante – b) grille de collecte avec filtre – c) regard sur tranchée avec drain traversant et cloison

Elle peut être alimentée directement par ruissellement ou via un système de collecte, avec éventuellement un filtre pour limiter le risque de colmatage. Une partie de l'eau stockée peut être rejetée en surface par surverse.

Ce type d'aménagement reste assez rare sur le domaine public. Il est plus répandu en domaine privé pour la gestion des eaux pluviales à la parcelle.

2. Combinaisons d'aménagements

Plusieurs types d'aménagements sont souvent combinés au sein d'une même opération. Ces combinaisons sont apparues successivement au cours du temps : d'abord des systèmes centralisés avec un aménagement d'infiltration en aval, puis une gestion des eaux pluviales à la source, intégrée dans l'espace public.

2.1. Bassin d'infiltration et canalisations enterrées

Dans ce cas, le bassin d'infiltration est positionné à l'exutoire d'un réseau de collecte des eaux pluviales par canalisations enterrées. Il est généralement séparé de l'espace public par une clôture.



Figure 10 : bassins alimentés par un réseau de canalisations enterrées

2.2. Noues de transfert et bassin d'infiltration

Les canalisations peuvent être remplacées par des noues de transfert, qui collectent les eaux pluviales vers un bassin d'infiltration situé en aval.



Figure 11 : Noues de transfert des eaux pluviales vers un bassin

2.3. Noues d'infiltration (avec ou sans bassin d'infiltration)

L'infiltration peut se faire dès la collecte des eaux de ruissellement, dans les noues. Dans ce cas, un bassin est souvent prévu en plus en aval en cas de débordement des noues.



Figure 12 : Noues d'infiltration avec bassin en aval

2.4. Espaces verts creux (gestion intégrée)

La gestion des eaux pluviales peut être intégrée dans des espaces végétalisés multifonctionnels, qui sont creusés pour recueillir et infiltrer les eaux pluviales « à la source ». Il n'y a plus de clôture pour séparer la gestion des eaux pluviales de l'espace public.



Figure 13 : a) Espace vert creux intégré dans l'espace public – b) Mare tampon collectant les eaux de surverse

En cas de débordement des espaces verts creux, l'eau peut être dirigée vers une mare tampon plutôt qu'un bassin.

3. Répartition géographique des sites recensés

Nous avons recensé près de 80 sites avec infiltration partielle ou totale des eaux pluviales, en Seine-Maritime et Eure.

Localisation des sites de gestion des eaux pluviales par infiltration recensés par l'AREAS (juin 2017)

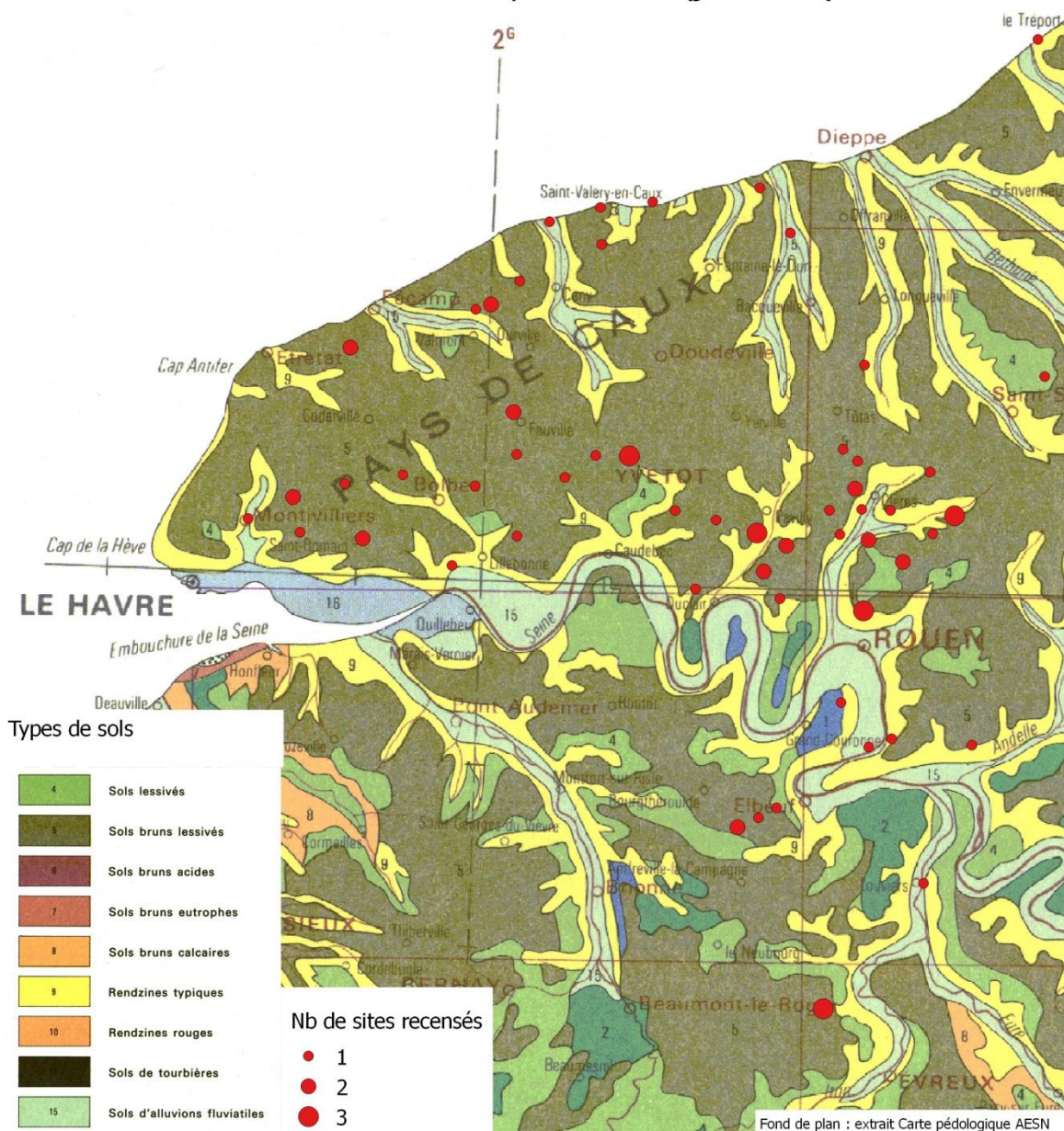


Figure 14 : Localisation des sites de gestion des eaux pluviales par infiltration recensés par l'AREAS
(le point est placé au centroïde de la commune)

Nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux sites localisés sur les plateaux limoneux, où se posent des questions sur la capacité d'infiltration des sols.

La plupart des sites recensés sont situés à proximité des grandes agglomérations ou des villes moyennes, dans des zones en cours d'urbanisation.

Il s'agit essentiellement d'opérations d'aménagement complètes : création d'un lotissement (72%), d'un équipement public (9%), d'une zone commerciale (7%), d'activités (4%), ou mixte (4%). Très peu d'aménagements d'infiltration recensés ont été réalisés dans le cadre d'une opération de réhabilitation d'une zone urbaine existante (4%).

Il n'y a pas de lien évident entre type de gestion des eaux pluviales et type d'opération. Les « espaces verts creux » ont été rencontrés uniquement dans zones d'habitat, mais ils sont peu nombreux.

Au final, beaucoup de sites recensés présentent une part d'infiltration plus ou moins importante, combinée avec un rejet en surface pour les pluies extrêmes.

Ce recensement ne porte que sur la gestion des eaux pluviales des espaces publics, et non des parcelles privées pour des questions d'accessibilités. Pour autant, des retours d'expérience sur ces dispositifs privés seraient utiles car des questions se posent, notamment sur leur durabilité.

4. Synthèse des connaissances sur les capacités d'infiltration des techniques alternatives

4.1. Intérêt de l'infiltration des eaux pluviales et interrogations

Un contexte favorable à l'infiltration des eaux pluviales

La politique de gestion des eaux pluviales tend aujourd'hui à privilégier les techniques alternatives et en particulier l'infiltration, afin de réduire les volumes d'eau potentiellement polluée rejetés au milieu naturel.

Ainsi, le SDAGE 2016-2021 du bassin Seine-Normandie (AESN, 2015) préconise l'infiltration de l'eau de pluie au plus près de l'endroit où elle tombe. Même sur des terrains peu perméables, l'évacuation des volumes ruisselés par évapotranspiration et/ou infiltration est possible voire recommandée pour les pluies courantes (AESN, 2011). De nombreuses règles locales privilégient également l'infiltration, à travers les Plans Locaux d'Urbanisme et les zonages pluviaux.

Les principaux avantages attendus sont les suivants :

- Limite l'impact des rejets pluviaux sur la qualité des milieux aquatiques ;
- Contribue à la recharge de la nappe ;
- Permet la dépollution des eaux pluviales par les couches superficielles du sol (Leroy, 2015);
- Réduit les risques d'inondation dans les zones urbaines en aval ;
- Evite des investissements dans les réseaux de collecte et d'évacuation.

Des interrogations sur la pérennité des aménagements d'infiltration

Cependant des questions se posent sur la pérennité des aménagements d'infiltration des eaux pluviales, notamment vis-à-vis du colmatage. Ces interrogations peuvent constituer un frein au développement de ces techniques.

Le colmatage est défini comme une diminution de la conductivité hydraulique ou de la porosité d'un sol (Programme ECOPLUIES, 2009). Il est lié à 2 phénomènes :

- dépôt de particules en surface et dans les interstices du sol,
- développement d'un biofilm de surface constitué principalement d'algues et de bactéries.



Figure 15 : a) Colmatage du fond d'un bassin d'infiltration (Programme ECOPLUIES, 2009) – b) Biofilm sur le fond d'un bassin d'infiltration

Les cas de colmatage recensés dans la bibliographie concernent certains types d'ouvrages d'infiltration :

- bassin d'infiltration collectant les eaux de ruissellement d'un bassin versant urbanisé de surface importante (Gonzalez-Merchan, 2012),
- tranchée d'infiltration enterrée (Proton, 2008).

Ce phénomène affecte-t-il de la même façon tous les types d'aménagement d'infiltration des eaux pluviales ?

Plusieurs paramètres semblent influencer le colmatage (Le Coustumer, 2008) :

- le sol : granulométrie et porosité,
- le volume d'eau qui va transiter dans l'aménagement (dépendant du rapport surface d'infiltration / surface active et du climat),
- la charge en matières en suspension (MES) apportée au système, ainsi que le diamètre des particules et la quantité de matière organique,
- les cycles de sollicitation : l'alternance des périodes de temps sec et de mouillage permet de restaurer en partie la conductivité hydraulique des systèmes,
- la température, par son effet sur l'activité biologique (dégradation de la matière organique, formation du biofilm),

- la végétation...

Une influence de la végétation sur l'infiltration

La végétation peut avoir un effet positif sur la capacité d'infiltration du sol :

- par l'action mécanique des racines et de la partie aérienne (effet du vent),
- par l'action des organismes vivants associés, en particuliers les vers de terre,
- par l'ombrage des surfaces (qui empêche la création du biofilm)...

En contrepartie, le dépôt de litière (feuilles mortes) peut réduire l'infiltration.

Les expérimentations menées notamment par l'AREAS sur le ruissellement agricole sur des sols limoneux en Normandie, montrent que la végétation a un impact favorable sur la vitesse d'infiltration dans le sol :

- Sol nu avec croûte de battance : 2 à 5 mm/h,
- bande enherbée et tassée : environ 10 mm/h,
- bande enherbée non tassée : > 100 mm/h (Ouvry, et al., 2012),
- haie dense : jusqu'à 400 mm/h (Ouvry, Richet, Bricard, Lhériveau, Bouzid, & Saunier, 2012).

Des méthodes de dimensionnement qui cherchent à prendre en compte le risque de colmatage

Selon les pays, les hypothèses de dimensionnement des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales diffèrent sur la prise en compte du colmatage et des surfaces d'infiltration (Barraud, et al., 2006) :

- Fond colmaté, infiltration sur la moitié de la hauteur, et coefficient de sécurité sur la valeur de la perméabilité (USA, Suède, Pays Bas),
- Fond colmaté, infiltration sur la moitié de la hauteur (Royaume Uni, Danemark),
- Infiltration par le fond et sur la moitié de la hauteur des parois (Allemagne, Suisse),
- Toute la surface participe à l'infiltration (Japon).

En France, le CERTU (aujourd'hui CEREMA) préconise de prendre en compte la totalité de la surface horizontale de l'ouvrage, à condition que le fond de l'ouvrage soit protégé de la sédimentation des matières en suspension et contre les apports en matière organique. De plus, la capacité d'infiltration du sol mesurée sera corrigée par un facteur de sécurité égal à ½ (CERTU, 2003).

Localement, des collectivités locales peuvent émettre des préconisations spécifiques. Ainsi, la Communauté Urbaine de Bordeaux (2014) distingue :

- les ouvrages d'infiltration à ciel ouvert : toute la surface participe à l'infiltration,
- les ouvrages d'infiltration enterrés (tranchées, puits) : il est considéré que la surface du fond de l'ouvrage est rapidement colmatée et ne permet plus l'infiltration.

Il apparaît que les méthodes de conception des ouvrages d'infiltration sont à l'heure actuelle basées sur des méthodes simplifiées, dont la limite reste la définition de lois de vidange réalistes

qui prennent en compte le vieillissement. Des mesures d'infiltration sont nécessaires pour mieux quantifier le fonctionnement des ouvrages d'infiltration sur le long terme (Moura, 2008).

Un besoin de retours d'expérience locaux par des mesures d'infiltration in situ

En résumé, la performance des ouvrages ou aménagements d'infiltration dépend de nombreux paramètres (type de sol, d'ouvrage, mode d'alimentation, présence de végétation...), et elle peut évoluer dans le temps, notamment par colmatage.

Il nous paraît donc indispensable de disposer de retours d'expériences locaux, prenant en compte le contexte pédologique et climatique. Pour cela, des mesures d'infiltration in situ, réalisées sur un panel d'aménagements d'infiltration existants, permettraient de tester différents modes de conceptions (notamment système centralisé / gestion à la source).

Les résultats de ces mesures devraient aider à définir des préconisations régionales de conception et de dimensionnement pour les aménagements d'infiltration des eaux pluviales de demain.

4.2. Méthodes de mesure d'infiltration

L'infiltration peut être définie comme la pénétration de l'eau à travers les pores du sol sous l'effet notamment de la gravité (Chossat, 2005). La capacité d'infiltration dépend des caractéristiques du sol (texture, porosité, teneur en eau...), et elle peut varier au sein d'un même sol (en fonction des horizons, de l'hétérogénéité du sol).

La capacité d'un sol à laisser passer l'eau est représentée par sa conductivité hydraulique, qui peut s'exprimer en m/s ou en mm/h. On parle de conductivité hydraulique à saturation lorsque tous les pores du sol sont remplis d'eau.

K (m/s)	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
Types de sols	Gravier sans sable ni éléments fins			Sable avec gravier, Sable grossier à sable fin		Sable très fin Limon grossier à limon argileux			Argile limoneuse à argile homogène		

Figure 16 : Ordres de grandeur de la conductivité hydraulique dans différents sols (Barraud, et al., 2006)
 10^{-6} m/s = 3,6 mm/h

La vitesse d'infiltration est fonction de la conductivité hydraulique du sol et du gradient de charge hydraulique (lié notamment à la gravité).

Il existe une multitude de méthodes de mesures de la conductivité hydraulique d'un sol en place, développées pour différentes applications et différents types de sol. Certaines s'appliquent à la surface du sol, d'autres en profondeur.

Méthodes courantes de mesure de la conductivité hydraulique d'un sol en place

Nom de la méthode	Zone testée	Charge	Quantité d'eau nécessaire	Temps de mesure	Avantages	Inconvénients
Simple anneau ou méthode de Müntz	Surface du sol	Constante (3 cm)	10 à 200 L	30 min à quelques heures	- méthode référencée dans de nombreux pays	- infiltration verticale et latérale - valeurs non généralisables : uniquement pour comparer des sols - pas adapté aux sols secs - sur sol plat
Double anneau ouvert	En surface	Constante (3 cm)	jusque 200 L	1 à 5h	- Infiltration verticale - méthode largement utilisée	- durée de l'essai - sur sol plat
Porchet	Dans un trou de tarière	Constante ou variable	faible	2 jours (6 essais)	- norme	- faible précision - au moins 6 essais par sol
Matsuo	En tranchée	Constante	Très importante : plusieurs m ³	très long en sol peu perméable	- essai concerne un grand volume de sol	- nécessite beaucoup d'eau et du matériel lourd - exploitation simpliste - risque de colmatage en cours d'essai

Figure 17 : Tableau de synthèse de quelques méthodes de mesure de l'infiltration couramment utilisées (Chossat, 2005) – tableau complet en annexe ?

La méthode du simple anneau ouvert est une méthode de terrain simple et rustique, pour laquelle il existe de nombreuses références. Cependant, elle ne distingue pas l'infiltration verticale de l'infiltration horizontale.

La méthode du double anneau permet de pallier à cet inconvénient, grâce à l'anneau de garde qui maintient un flux vertical dans l'anneau de mesure central. Ces deux méthodes sont des méthodes locales en surface, qui ne peuvent être utilisées que sur sol plat.

La méthode Porchet est une autre méthode locale, souvent utilisée par les bureaux d'études en amont de la conception des aménagements d'infiltration des eaux pluviales, mais aussi pour l'assainissement individuel. Elle se distingue des 2 précédentes car elle est réalisée en profondeur (30 à 70cm) dans un trou de tarière.

D'un point de vue général, ces méthodes locales ne permettent pas d'atteindre un état de saturation du sol. La valeur de conductivité obtenue n'est généralement pas la conductivité à saturation.

La méthode Matsuo permet la mesure de la conductivité hydraulique d'un sol au travers d'un trou de grande dimension. Elle présente l'avantage de concerner un grand volume de sol, et se rapproche du fonctionnement d'une noue d'infiltration. Malgré une mise en œuvre plus lourde, elle est fréquemment utilisée par les bureaux d'études pour dimensionner les aménagements d'infiltration des eaux pluviales.

Comment mesurer l'infiltration de l'eau dans un aménagement existant ?

Sur des ouvrages importants de type bassin d'infiltration, il est possible de mesurer le débit d'entrée et la hauteur d'eau pendant la décrue suivant un évènement pluvieux. Des relevés topographiques fins permettent d'associer à une hauteur d'eau un volume stocké et une surface d'infiltration (Barraud, et al., 2006).

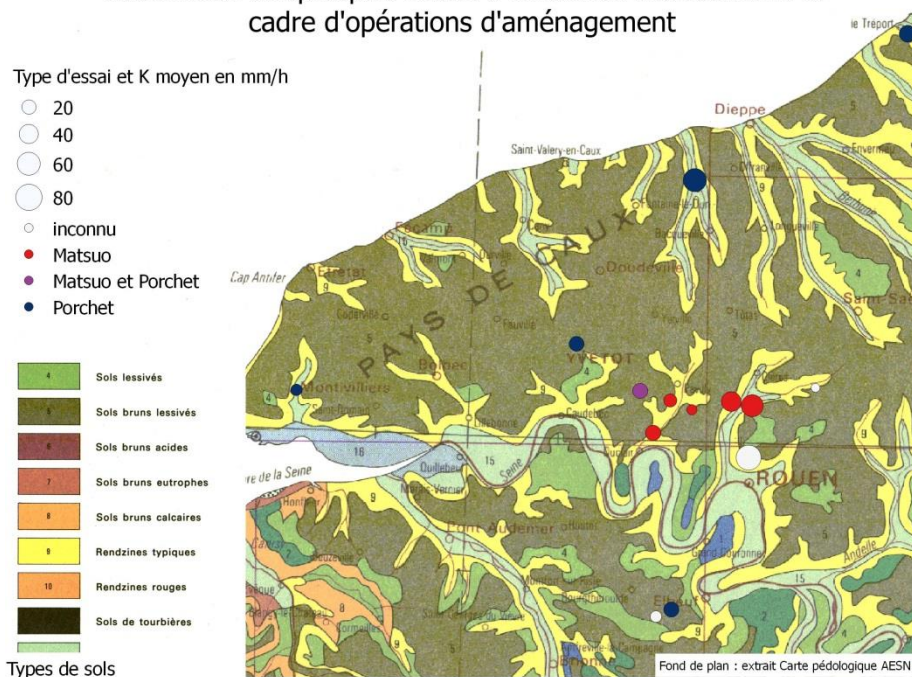
Sur des ouvrages à la source comme des tranchées ou des noues, des suivis de la conductivité hydraulique ont été réalisés à l'aide d'un infiltromètre de surface (méthode de l'anneau ouvert). Des mesures en plusieurs points d'un ouvrage ont été nécessaires du fait de la variabilité spatiale (Programme ECOPLUIES, 2009).

Proton (2008) a étudié l'infiltration à partir de mesures de hauteur d'eau dans un modèle de tranchée de 12ml alimentée par de l'eau de ruissellement. De plus, il a suivi la résistance hydraulique du fond et des parois de l'ouvrage. La résistance hydraulique représente la durée nécessaire à une quantité d'eau pour traverser une couche de sol colmatée. Elle peut être évaluée par la méthode de Bouwer, qui suppose notamment qu'il existe en surface une couche fine dont la conductivité hydraulique est inférieure à celle du sol sous-jacent. Dans ce cas, il montre que la résistance hydraulique de la paroi reste constante sur les 6 premières années simulées alors que la résistance hydraulique du fond de la tranchée augmente pour devenir presque complètement étanche.

En résumé, il existe de nombreuses méthodes de mesure de la capacité d'infiltration d'un sol, qui concernent un volume de sol plus ou moins important. Le choix de la méthode dépend de l'objectif recherché et des contraintes de mise en œuvre.

4.3. Résultats des essais d'infiltration réalisés dans le cadre de projets d'aménagements dans la région

Localisation de quelques essais d'infiltration réalisés dans le cadre d'opérations d'aménagement



Commune	Situation	Profil de sol	Type d'essai	Nb essais	Date	Profondeur	K mini mm/h	Prof (K mini)	K maxi mm/h	Prof (K maxi)	Moyenne mm/h
Barentin	coteau	Argile limoneuse ou	Matsuo	47	2012	0,6 à 0,7m	0,3	0,6m	47	0,6m	9
Barentin	coteau	Limon argileux	Matsuo	5	2012	0,6 à 0,7m	14	0,6m	212	0,7m	86
La Rue-Saint-Pierre	rebord de plateau	inconnu	inconnu								5
Bosc-Guerard-Saint-Adrien	rebord de plateau	Limon rebord de plateau silex à 0,40m 1 venue d'eau à 1,50m	Matsuo	5	24/11/2005	0,7 à 1,5m	12	1,5m	137	0,7m	65
Montivilliers	sur le plateau	inconnu	Porchet	4	2010	0,6m	8	0,6m	13	0,6m	11
Thil-Manneville	sur le plateau	inconnu	Porchet	8	2012	0,5 à 0,7m	27		101		61
Yvetot	sur le plateau	inconnu	Porchet	8	01/10/2012	0,6 à 0,8m	2		47		6
Bois-Guillaume	sur le plateau	inconnu	inconnu								72
Le Thuit-Signol	sur le plateau	inconnu	inconnu								11
Saint-Pierre-de-Varengeville	sur le plateau	Limon > 2m qqs silex entre 0,2 et 0,6m	Matsuo	6	15/10/2015	1,7 à 2m	9	2m	79	1,7m	24
Le Thuit-Anger	sur le plateau	limon argileux	Porchet	2	10/2009	1,5 à 1,6m	21	1,5m	25	1,6m	23
Bosc-Guerard-Saint-Adrien	sur le plateau	Limon fin > 2m	Matsuo	7	15/11/2006	0,95 à 1,5m	7	1,5m	180	0,95m	47
Montville	sur le plateau	Limon fin > 2m	Matsuo	7	16/11/2006	0,7 à 1,5m	4	1,5m	133	0,7m	43
Bouville	sur le plateau	Limon fin >2m	Matsuo	5	16/01/2006	0,8 à 1,1m	6	1,1m	58	0,8m	25
Bouville	sur le plateau	Limon fin >2m	Porchet	4	16/01/2006	0,7m	15	0,7m	30	0,7m	21
Pissy-Poville	sur le plateau	Limon Limon argileux éventuel Argile à silex à profondeur variable (1m à >3m)	Matsuo	8	11/10/2011	1 à 2m	3		13		8
Eu	sur le plateau	Terre végétale, limon sur 1m env. puis limon argileux	Porchet	6	03/11/2015	0,7 à 2m	20	1m	40	1m	30

Figure 18 : Carte de localisation et détails des résultats de quelques essais d'infiltration réalisés dans le cadre d'opérations d'aménagements

Les moyennes des résultats des essais d'infiltration recensés dans la région sont comprises entre **5mm/h** ($1,4 \cdot 10^{-6}$ m/s) et **86mm/h** ($2,4 \cdot 10^{-5}$ m/s).

2 méthodes d'essai (Matsuo : 8 sites et Porchet : 6 sites) sont utilisées dans la région. Les essais sont généralement réalisés au mois d'octobre ou novembre (1 site au mois de janvier). Les valeurs moyennes des essais Porchet (29mm/h sur 6 sites) et Matsuo (38mm/h sur 8 sites) sont proches (sur des sites différents cependant).

Les essais recensés sont principalement localisés sur plateau, sur des sols de limons épais. 4 sites d'essai sont situés en rebord de plateau ou sur coteau : il s'agit de limons peu épais sur une couche d'argile à silex. Les valeurs moyennes de conductivité hydraulique (K) mesurées sur limons épais sont toutes supérieures à 20mm/h, alors qu'elles sont très variables sur limons peu épais.

Cependant, d'autres paramètres que le type de sol peuvent influencer le résultat. Les profondeurs des essais sont très variables, de 0,6 à 2m (autant pour les Porchet que les Matsuo). Il semble que sur un même site, les valeurs mini sont obtenues sur les profondeurs les plus élevées, alors que les valeurs maxi sont enregistrées sur les profondeurs les plus faibles.

PARTIE 2 Evaluation des capacités d'infiltration d'aménagements existants

L'objectif de cette étude est d'acquérir des références locales sur la capacité d'infiltration d'aménagements existants depuis plusieurs années. Pour cela, nous avons adapté des méthodes de mesure d'infiltration in situ, que nous avons utilisées sur un panel d'aménagements.

1. Méthodes utilisées pour évaluer la capacité d'infiltration des aménagements testés

3 méthodes de mesures de l'infiltration à la surface d'aménagements existants ont été utilisées. Elles sont présentées en détail dans les paragraphes suivants.

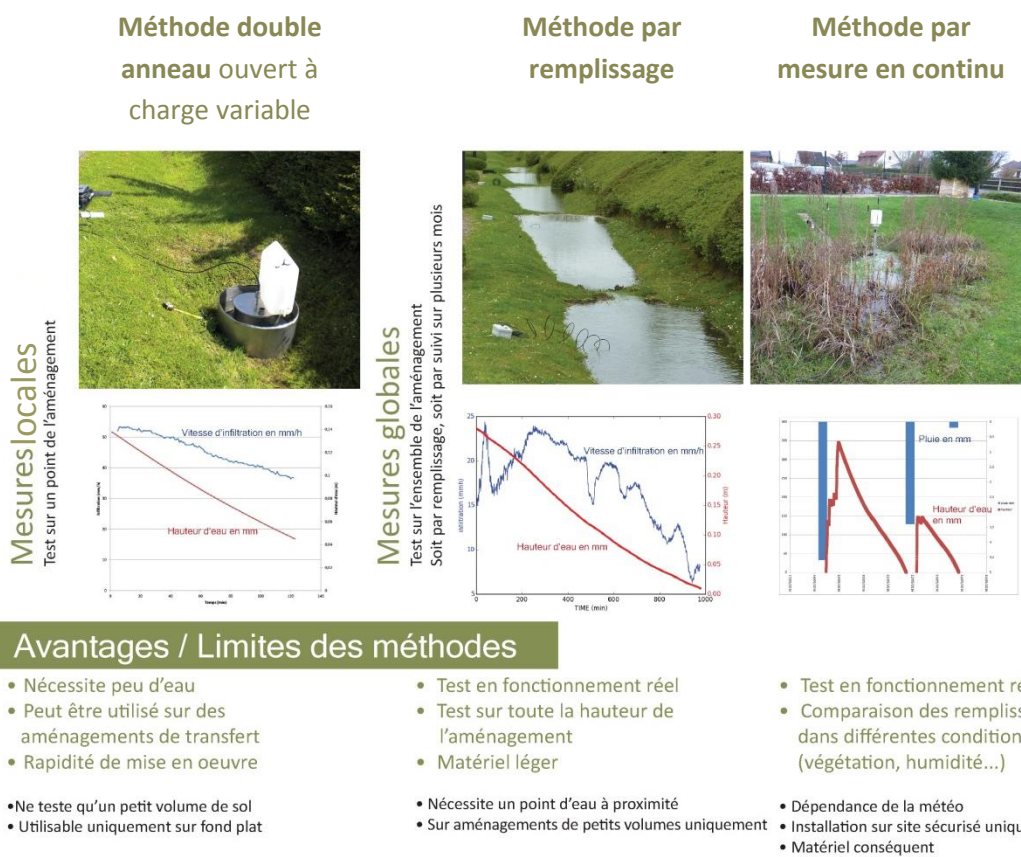


Figure 19 : Présentation des méthodes de mesure d'infiltration utilisées sur des aménagements existants

Ces 3 méthodes se distinguent des méthodes Porchet et Matsuo, qui mesurent la conductivité hydraulique d'un sol en profondeur.

De plus, afin de représenter le fonctionnement réel des aménagements d'infiltration lors de leur vidange, nous avons fait le choix de réaliser ces mesures à charge variable. Comme nous ne connaissons pas le gradient de charge hydraulique appliqué à chaque instant à travers le sol, il n'est pas possible de calculer une conductivité hydraulique. Nous parlerons donc de vitesse d'infiltration observée (en mm/h).

1.1. Méthode double anneau ouvert à charge variable (locale)

Conditions d'utilisation

La méthode du double anneau peut être utilisée sur des aménagements qui ne sont pas conçus pour stocker l'eau (noues de transfert par exemple). C'est une méthode locale, qui permet de mesurer la vitesse d'infiltration verticale à travers un petit volume de sol. Elle est limitée au fond plat des aménagements.

Matériel

- 2 anneaux métalliques de diamètre 32 et 64cm
- Sonde de mesure de niveau par flotteur avec enregistreur (précision 0,01mm)
- Bidons d'eau (> 50L)

Protocole

Les 2 anneaux sont enfoncés de 3 à 5cm dans le sol, puis remplis d'eau jusqu'à une hauteur de 15cm environ. Le niveau de l'anneau extérieur est maintenu au même niveau que dans l'anneau intérieur. La mesure de hauteur d'eau se fait dans l'anneau intérieur à pas de temps régulier.

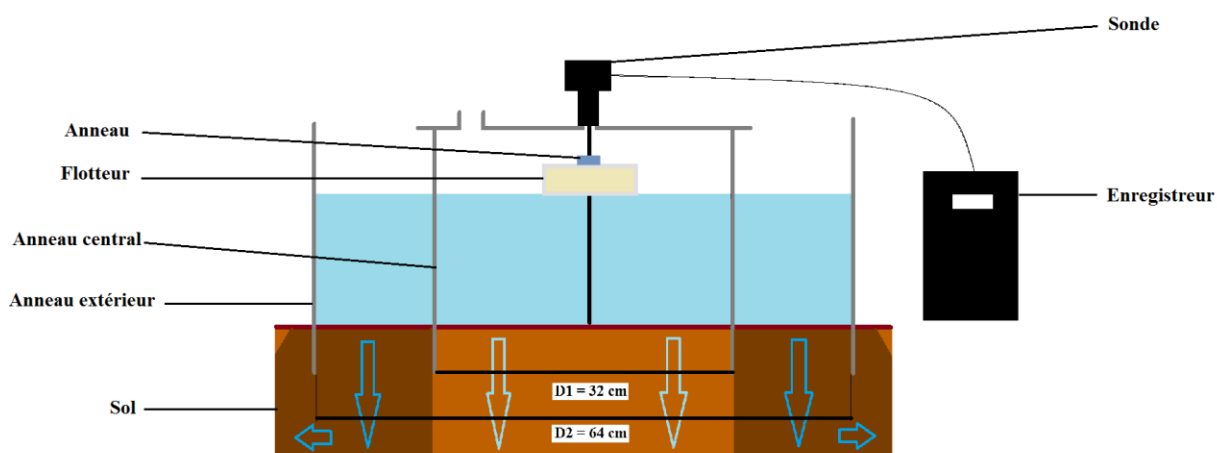


Figure 20 : Schéma de principe de la méthode du double anneau ouvert à charge variable

Durée de mesure

La durée moyenne de mesure est de l'ordre de 4h par répétition, avec 2 répétitions par essai. Lorsque la vitesse d'infiltration est faible (<30mm/h), la mesure est arrêtée avant la vidange complète, car il n'est pas possible de laisser le matériel en place sans surveillance sur un site non clôturé.

Relevés complémentaires

Sondage et prélèvement de sol (1 échantillon par horizon) pour analyse granulométrique

Exploitation des données

La vitesse d'infiltration est donnée directement par la différence de hauteur mesurée entre deux pas de temps.

1.2. Méthode par remplissage (globale)

Conditions d'utilisation

La méthode par remplissage peut être utilisée sur de petits aménagements de stockage et d'infiltration (noues d'infiltration par exemple), à condition que la hauteur d'eau maximale soit suffisante (de l'ordre de 15cm). C'est une méthode globale, qui reproduit le fonctionnement réel de l'aménagement.

Matériel

- Sonde de mesure de niveau (piézomètre) avec enregistreur (précision 3mm)
- Source d'eau à proximité immédiate : 1 à 4 m³/essai (noues d'infiltration)

Protocole

La sonde de mesure de niveau est positionnée au point bas de l'aménagement. L'aménagement est rempli d'eau jusqu'à la surverse. La hauteur d'eau est enregistrée à pas de temps régulier pendant la vidange de l'aménagement.

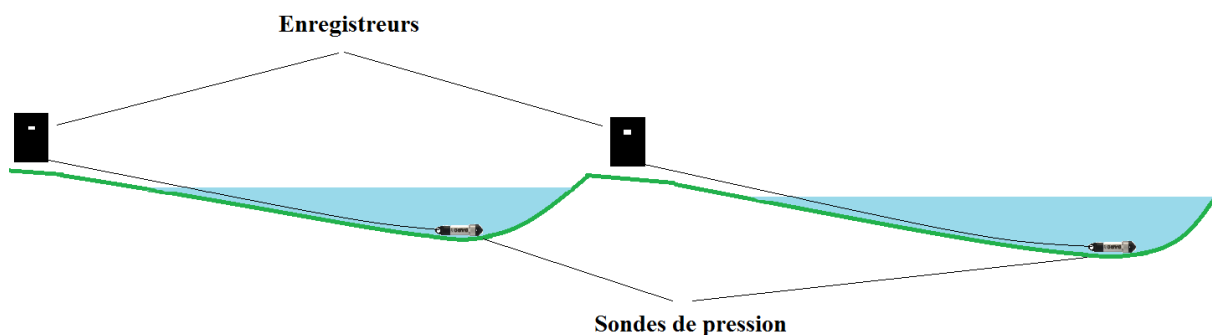


Figure 21 : Schéma de principe de la méthode par remplissage (sur 2 noues d'infiltration en cascade)

Durée de mesure

La durée de mesure dépend du volume de l'aménagement et de la vitesse d'infiltration. Elle peut aller de quelques heures à plus de 24h. Il peut être nécessaire d'arrêter la mesure avant la fin de la vidange si le site n'est pas sécurisé.

Relevés complémentaires

Levé topographique fin de toute la surface de l'aménagement (en moyenne 4 points / m²)
Sondage et prélèvement de sol (1 échantillon par horizon) pour analyse granulométrique

Exploitation des données

Les relations hauteur-volume et hauteur-surface de l'aménagement sont déterminées à partir des données topographiques. La vitesse d'infiltration est calculée à partir du volume d'eau infiltré à travers une surface entre deux pas de temps.

1.3. Méthode par mesure en continu (globale)

Conditions d'utilisation

La méthode par mesure en continu est adaptée à des aménagements de taille importante, qui ne peuvent pas être remplis manuellement (bassin d'infiltration par exemple), et où le matériel peut être laissé sans risque de vol ni de dégradation. C'est une méthode globale de mesure en situation réelle, à condition d'observer des remplissages significatifs pendant la période de mesure.

Matériel

- Sonde de mesure de niveau de type piézomètre (précision de l'ordre de 0,1mm)
- Pluviomètre à auget
- Enregistreur 2 voies

Protocole

La sonde de mesure de niveau est positionnée au point bas de l'aménagement. La sonde et le pluviomètre sont raccordés à l'enregistreur, positionné dans un coffret étanche.

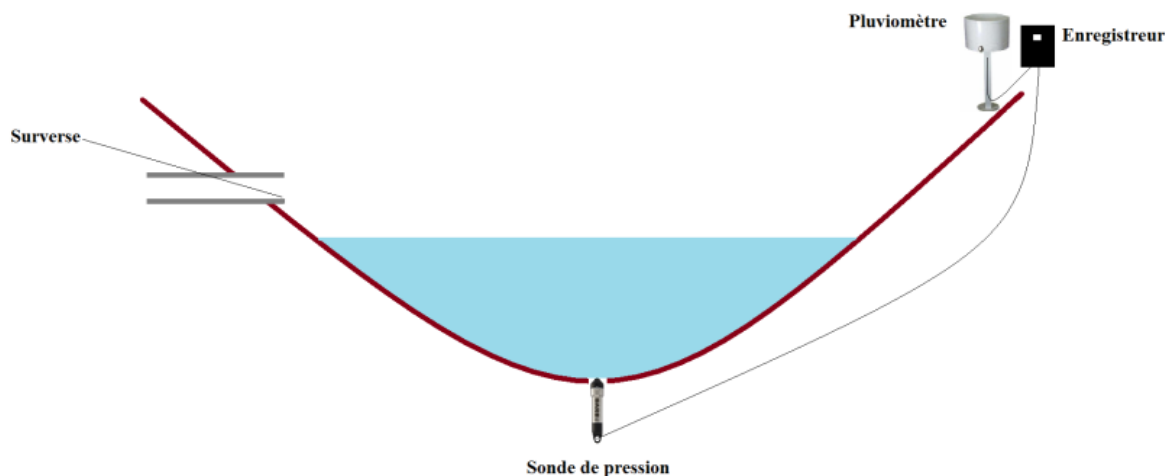


Figure 22 : Schéma de principe de la méthode par mesure en continu

Durée de mesure

La période de mesure dure plusieurs mois afin d'enregistrer des épisodes de remplissage significatifs.

Relevés complémentaires

Levé topographique fin de toute la surface de l'aménagement

Sondage et prélèvement de sol (1 échantillon par horizon) pour analyse granulométrique

Exploitation des données

Les relations hauteur-volume et hauteur-surface de l'aménagement sont déterminées à partir des données topographiques. On isole les épisodes de vidange de l'aménagement à partir du moment où il n'y a plus de ruissellement entrant. La vitesse d'infiltration pendant la vidange est calculée à partir du volume d'eau infiltré à travers une surface variable entre deux pas de temps.

1.4. Critères de choix des sites de mesure

Le choix des sites de mesure a été fortement contraint par les critères de sélection suivants :

Méthode de mesure	Par remplissage		Mesure en continu	Double anneau
Types d'aménagements concernés	Noues d'infiltration ou noues drainées	Tranchée d'infiltration	Bassin d'infiltration	Aménagements de surface : noues et bassins
Contraintes techniques	<ul style="list-style-type: none"> - Présence d'une source d'eau à proximité (poteau incendie par exemple) - Volume pas trop important - Profondeur suffisante 	<ul style="list-style-type: none"> - Accessible (présence d'un regard de visite) - Volume limité et dimensions précises connues - Possibilité de mesurer le niveau d'eau - Absence de connexion entre les tranchées 	<ul style="list-style-type: none"> - Site protégé (clôturé par exemple) - Dans l'idéal adapté à l'installation d'un pluviomètre (peu d'arbres à proximité notamment) 	<ul style="list-style-type: none"> - Fond plat - Point d'eau à proximité
Contraintes administratives	Accord du propriétaire du site pour la réalisation des mesures			
Informations nécessaires	Dans l'idéal, plan de récolement, tests d'infiltration préalables et notes de calcul de dimensionnement disponibles			

Figure 23 : Critères de sélection des sites de mesure d'infiltration in-situ

2. Description des sites testés

Parmi tous les sites recensés ayant une gestion des eaux pluviales par infiltration (environ 80), une minorité s'est révélée adaptée pour la réalisation de mesures d'infiltration in-situ :

Sites de mesure d'infiltration in-situ sur des aménagements existants de gestion des eaux pluviales AREAS - novembre 2015 à janvier 2018

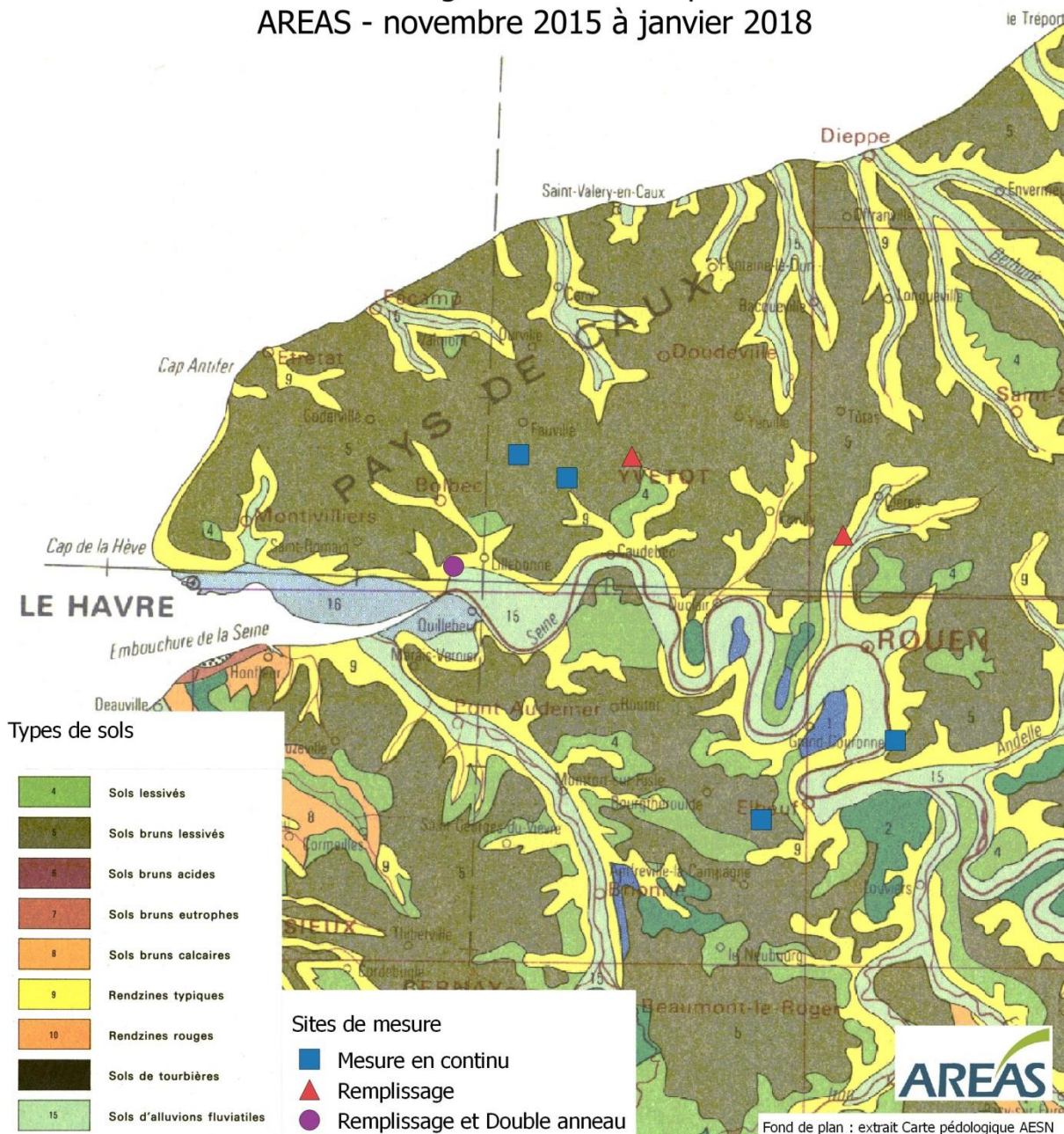


Figure 24 : Carte de localisation des sites de mesure in-situ sur des aménagements existants de gestion des eaux pluviales (le point est placé au centroïde de la commune)

Commune / Dpt		Type aménagt testé	Méthode(s) de mesure	Végétation des aménagements testés	Année de création	Essais infiltration initiaux K moyen	Sol avant travaux	Analyse sol aménagt	Dates mesure
St-Jean de Folleville	76	Noues d'infiltration	Par remplissage + Double anneau	Herbe	2001			Limon sur argile peu profond	25 au 27/04/2016 et 26/05/2016
Montville	76	Noues d'infiltration	Par remplissage	Herbe ou sol nu	2006 (DLE)	43 mm/h	Limon fin > 2m	Limon	16 au 18/05/2017
Yvetot	76	Noues drainées	Par remplissage	Herbe	2003 (DLE)	22 mm/h			04/2016
Ymare	76	Bassin d'infiltration	Mesure en continu	Herbe	2009 ou 2010			Limon argileux	03/12/2015 au 05/08/2016
Allouville-Bellefosse	76	Bassin d'infiltration	Mesure en continu	Végétation de zone humide (massettes, iris...)	2013			limon sur limon argileux	17/12/2015 au 05/08/2016
Thuit-Anger	27	Bassin d'infiltration	Mesure en continu	Herbe	2013 (DCE)	23 mm/h	"limon argileux marron"	Limon	29/04/2016 au 29/01/2018
Foucart	76	Bassin d'infiltration	Mesure en continu	Herbe + saules dans le fond	2006			Limon	17/05/2016 au 29/01/2018

Figure 25 : Liste des sites de mesure d'infiltration in-situ sur des aménagements existants de gestion des eaux pluviales

L'AREAS a réalisé des mesures d'infiltration in-situ sur 3 sites avec des noues (noues d'infiltration ou noues drainées) et 4 bassins d'infiltration, entre novembre 2015 et janvier 2018. Il s'agit uniquement de sites publics.

Tous ces sites sont situés sur le plateau ou en rebord de plateau, sur des sols de limons plus ou moins épais. Pour les 3 sites avec des tests d'infiltration avant travaux connus, les valeurs moyennes de conductivité hydraulique vont de 22 à 47 mm/h. L'âge des aménagements est compris entre 2 et 15 ans (au moment des mesures). La plupart des surfaces d'infiltration sont recouvertes d'herbe. Aucune mesure n'a pu être réalisée sur un aménagement d'infiltration enterré (en dehors des noues drainées).

3. Résultats

Dans cette partie sont présentés les résultats des mesures par type d'aménagement : bassins d'infiltration, noues d'infiltration et noues drainées.

3.1. Résultats des mesures sur les bassins d'infiltration

Synthèse des résultats

Bassin	Ymare	Allouville-Bellefosse	Thuit-Anger	Foucart
Date	2009	2013	2013 (DCE)	2006 (DLE)
Type sol	Limon argileux	Limon	Limon	Limon
K min initial	-	-	21 mm/h	-
K moy initial	-	-	23 mm/h	-
K max initial	-	-	25 mm/h	-
Profondeur	1,74 m	0,30 m	1,48 m	0,47 m
Volume	805 m ³	41 m ³	56 m ³	16 m ³
Surface max	856 m ²	205 m ²	70 m ²	72 m ²
Surface active	?*	1 600 m ²	300 m ²	500 m ²
Surf _{max} /Surf _{active}	-	13 %	23 %	14 %
Volume/S _{active}	-	26 mm	187 mm	32 mm
Vol _{max} /Surf _{max}	940 l/m ²	200 l/m ²	800 l/m ²	220 l/m ²
Vol _{mes} /Surf _{mes}	40 l/m ²	200 l/m ²	280 l/m ²	220 l/m ²
Végétation	Herbe	Plantes zone humide	Herbe	Herbe +saules
Méthode mesure	Mesure en continu	Mesure en continu	Mesure en continu	Mesure en continu
Durée	8 mois	7 mois	20 mois	20 mois
Nb vidanges	12	10	25	21
Résultats :				
Hauteur max	0,14 m	0,30 m	0,41 m	0,47 m
Tps vid. max	-	> 10 j	2 j	7,5 j
Vmin saturé	1 mm/h	1 mm/h	5 mm/h	2 mm/h
Vmax saturé	10 mm/h	3 mm/h	10 mm/h	5 mm/h
Vmax insat.	30 mm/h	3 mm/h	10 mm/h	15 mm/h

Figure 26 : Caractéristiques des bassins d'infiltration et résultats de mesure

- *K min initial / K moy initial / K max initial* : Valeurs de perméabilité mesurées lors des études de conception de l'aménagement lorsqu'elles sont disponibles
- *Profondeur* : Profondeur mesurée à partir du niveau de surverse ou de débit de fuite s'il y en a
- *Surface BV* : Surface totale du bassin versant amont de l'aménagement
- *Surface active* : Surface active contribuant au ruissellement entrant dans l'aménagement. La surface active est calculée par le rapport entre le volume entrant dans l'aménagement et la hauteur de pluie mesurée (moyenne pour plusieurs remplissages significatifs).

*Pour le bassin d'Ymare, les volumes entrants mesurés ne sont pas suffisants pour estimer correctement la surface active.

- *Ratio S_{max}/S_{active}* : Rapport entre la surface d'infiltration maximale et la surface active exprimé en %
- *Ratio Volume/S_{active}* : Rapport entre le volume maximal du bassin et la surface active exprimée en mm (ou l/m²)

- $Ratio Vol_{max}/S_{max}$: Rapport entre le volume maximal du bassin et la surface maximale d'infiltration exprimé en l/m^2
- $Ratio Vol_{mes}/S_{mes}$: Rapport entre le volume maximal mesuré dans le bassin et la surface d'infiltration correspondante exprimé en l/m^2
- Nb vidanges : Nombre de vidanges enregistrées au cours des mesures
- Hauteur max : Hauteur maximale mesurée dans l'aménagement au cours des mesures
- Tps vid. Max : Temps de vidange correspondant au remplissage maximal constaté
- V_{min} saturé : Vitesse d'infiltration minimale mesurée à saturation
- V_{max} saturé : Vitesse d'infiltration maximale mesurée à saturation
- V_{max} insat. : Vitesse d'infiltration maximale mesurée avant saturation

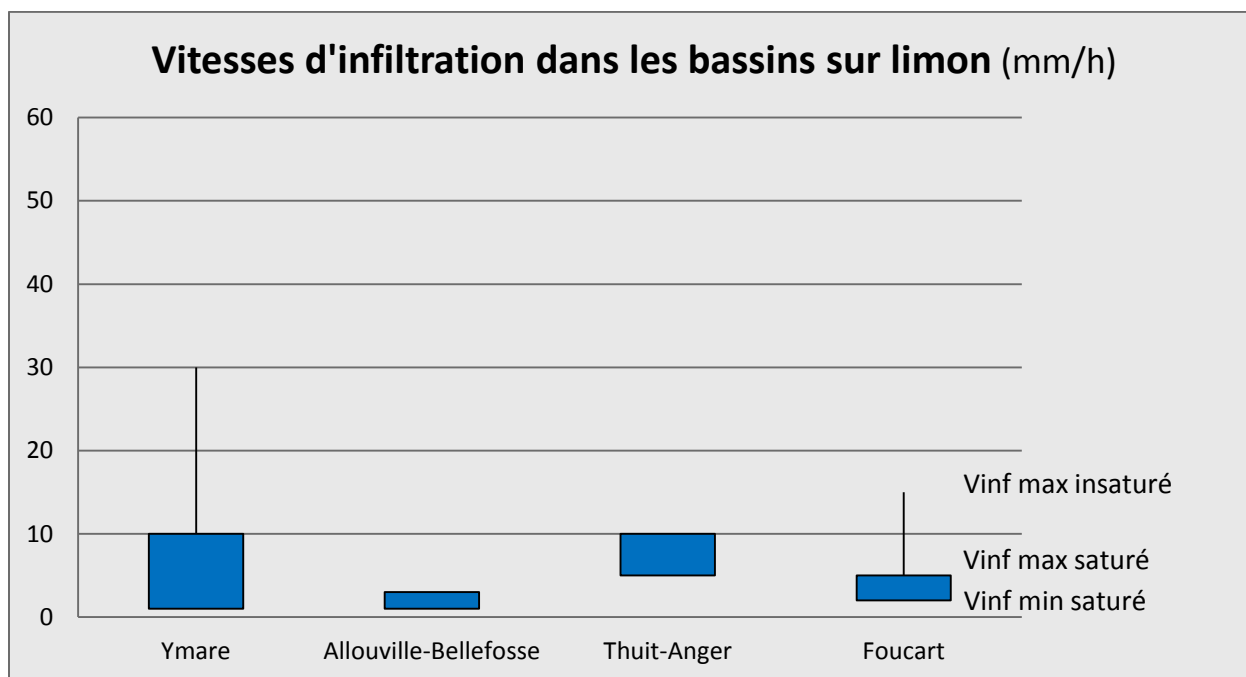


Figure 27 : Vitesses d'infiltration mesurées dans les bassins sur limon

Les vitesses d'infiltration mesurées à saturation sont comprises entre 1 et 10 mm/h pour l'ensemble des bassins sur des sols de limon et limon argileux. Ces résultats sont obtenus à partir de 68 mesures réalisées sur 4 bassins pendant près de 2 ans.

Pour une même hauteur d'eau, la vitesse d'infiltration n'est pas toujours identique. Des vitesses d'infiltration initiales plus élevées correspondent à des remplissages suivant plusieurs jours sans pluie. Après une phase initiale de saturation du sol, la vitesse d'infiltration diminue pour se stabiliser dans une fourchette de valeurs toujours identique (entre « Vinf min saturé » et « Vinf max saturé »).

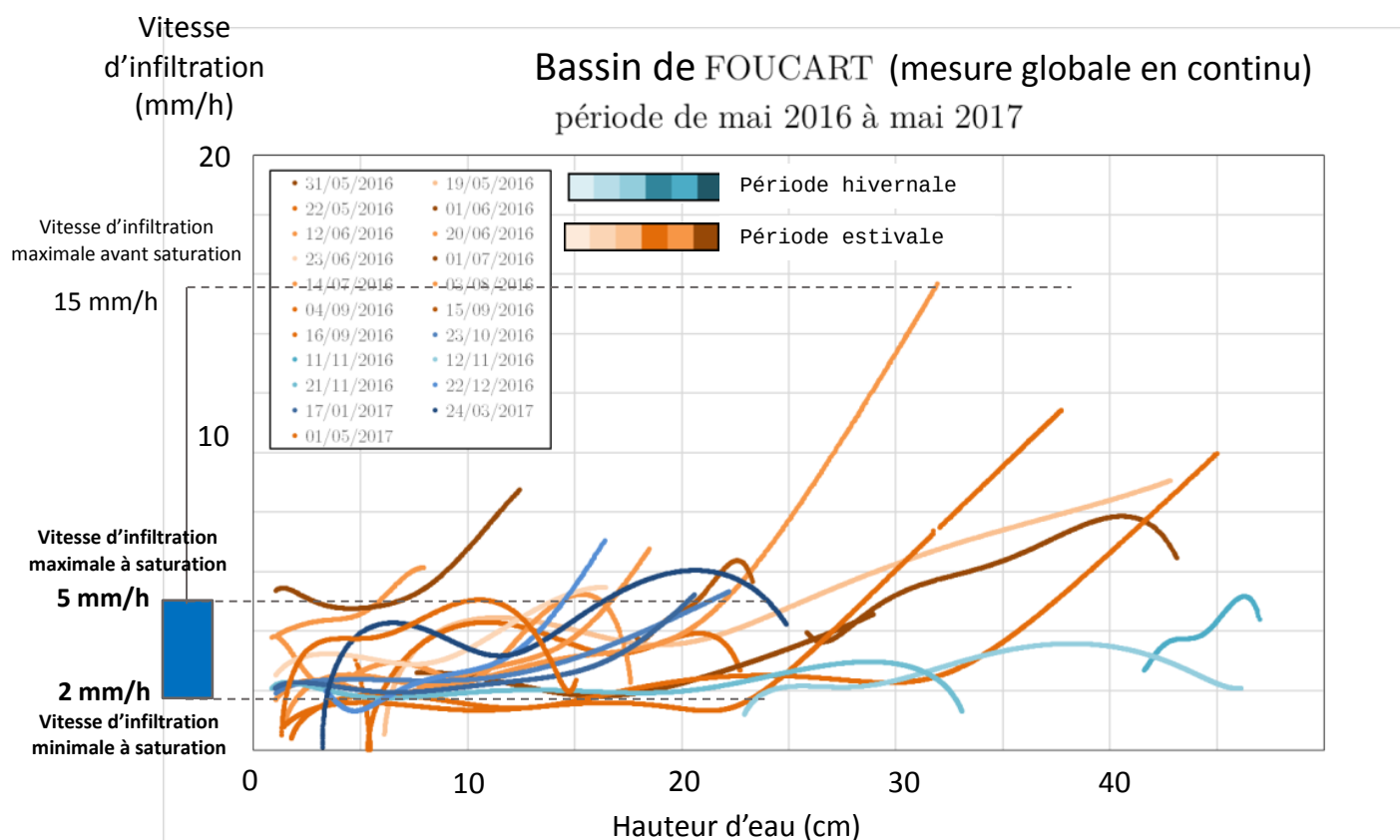


Figure 28 : Vitesse d'infiltration en fonction de la hauteur d'eau (bassin de Foucart)

La vitesse d'infiltration initiale avant saturation peut atteindre jusqu'à 30 mm/h pour le bassin de Foucart et 15 mm/h pour le bassin d'Ymare. Pour le bassin de Foucart, la durée pour atteindre la saturation est variable, et au maximum d'environ 40h. Pour le bassin d'Ymare, qui s'est très peu rempli (niveau le plus élevé mesuré 0,14 m sur 1,74 m niveau max avant surverse) pendant la période de mesure, la durée de saturation maximale est de l'ordre de 3h, mais cela ne concerne qu'un petit volume dans le fond de l'ouvrage. Cette durée de saturation ne tient pas compte de la phase de remplissage du bassin, pendant laquelle on ne peut pas mesurer la vitesse d'infiltration. Dans le cas du bassin de Thuit-Anger, la vitesse d'infiltration est presque toujours constante au cours de la vidange (niveau le plus élevé mesuré 0,35 m sur 1,48 m niveau max avant surverse). Le sol semble être déjà saturé à la fin du remplissage de l'ouvrage.

La vitesse d'infiltration à saturation du bassin de Thuit-Anger (5 à 10mm/h) est inférieure à la vitesse d'infiltration mesurée lors de la phase de conception de l'aménagement (20 à 25 mm/h). Ces essais ont été réalisés à la même profondeur mais pas exactement au même endroit. Pour les autres bassins, aucun autre résultat d'essai d'infiltration avant travaux n'a été retrouvé.

La vitesse d'infiltration dans le bassin d'Allouville-Bellefosse reste toujours très faible. Bien que présentant un débit de fuite surélevé par rapport au fond du bassin, il est possible que ce bassin

n'ait pas été conçu pour infiltrer. Ce point n'a pas pu être vérifié car les études de conception de cet aménagement n'étaient pas disponibles.

Influence des caractéristiques des bassins sur la vitesse d'infiltration

Malheureusement, le faible nombre d'aménagements instrumentés ne permet pas de faire une analyse statistique sur l'influence des caractéristiques des bassins. Il est difficile de distinguer les effets des différents paramètres : âge, type de sol, végétation, forme du bassin...

Il ressort cependant que les vitesses d'infiltration à saturation de ces 4 bassins d'infiltration sont toutes du même ordre de grandeur, comprises entre 1 et 10 mm/h, quelques soient leurs caractéristiques (sol, forme, dimensionnement, végétation, âge).

Par ailleurs, d'autres paramètres dont nous n'avons pas connaissance peuvent aussi avoir un effet sur la vitesse d'infiltration, et notamment les conditions de réalisation des travaux (compactage du sol éventuel).



Figure 29 : Instrumentation d'un bassin d'infiltration : pluviomètre, enregistreur (dans le regard) et sonde piézométrique dans le fond du bassin pour mesurer le niveau d'eau (bassin d'Ymare)



Figure 30 : Bassin instrumenté en cours de vidange par infiltration (bassin d'Allouville-Bellefosse)

Bilan des mesures sur les **bassins d'infiltration** sur sols de limon / limon argileux :

- 68 mesures réalisées sur 4 bassins pendant près de 2 ans
- Vitesses d'infiltration à saturation comprises entre 1 et 10 mm/h
- Vitesses d'infiltration proches quelques soient les caractéristiques des bassins

3.2. Résultats des mesures sur les noues d'infiltration

Comparaison des méthodes de mesure locale (double anneau) et globale (remplissage)

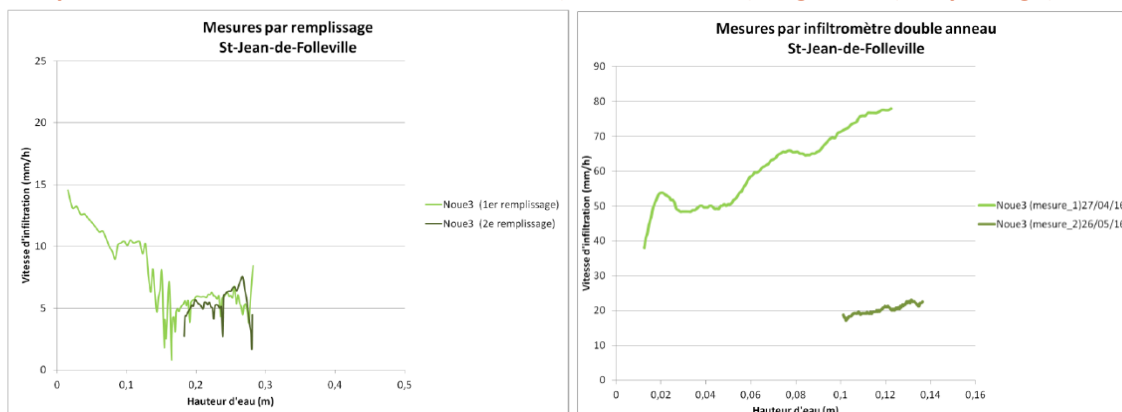


Figure 31 : Résultats de mesures d'infiltration par méthode globale (remplissage) et locale (double anneau) – Saint-Jean-de-Folleville - Noue 3

Les mesures d'infiltration globales par remplissage tendent toujours vers la même fourchette de valeurs, quelle que soit la vitesse d'infiltration initiale dépendant des conditions d'humidité du sol au début de la mesure.

Par contre, on peut voir sur l'exemple de Saint-Jean-de-Folleville (noue 3), qu'une mesure d'infiltration par la méthode du double anneau répétée au même endroit à 2 dates espacées dans le temps (27/04 et 26/05/2016), donc dans des conditions initiales différentes, donne des valeurs très différentes (40 mm/h puis 20 mm/h). Cette méthode de mesure ne permet pas d'atteindre l'état de saturation du sol de l'aménagement.

Ce résultat montre que les résultats des mesures locales sont très dépendantes des conditions initiales d'humidité du sol.

Par conséquent, l'analyse des résultats de mesure sur les noues portera uniquement sur la méthode globale par remplissage.



Figure 32 : Vidange d'une noue (méthode par remplissage)

Synthèse des résultats des mesures globales sur noues d'infiltration (remplissage)

Site	Saint-Jean-de-Folleville				Montville				
Date réalisation	2001				2006 (DLE)				
Type sol	Limon sur argile peu profond				Limon				
K min initial (mm/h)	-				4				
K moy initial (mm/h)					43				
K max initial (mm/h)					133				
Méthode mesure	Remplissage				Remplissage				
Dates	25 au 26/04/2016				16 au 22/05/2017				
Noue d'infiltration	N3	N4	N5	N6	N1	N3	N4	N6	N7
Longueur	12 m	12 m	13 m	13 m	11 m	20 m	20 m	20 m	20 m
Profondeur	29 cm	28 cm	41 cm	30 cm	28 cm	25 cm	30 cm	30 cm	30 cm
Volume	1,3 m ³	1,4 m ³	2,9 m ³	1,6 m ³	1,6 m ³	2,8 m ³	2,3 m ³	3,9 m ³	4 m ³
Surface d'infiltration max	10 m ²	12 m ²	17 m ²	13 m ²	13 m ²	31 m ²	22 m ²	27 m ²	29 m ²
Volume / longueur (l/ml)	108	117	223	123	145	140	115	195	200
Surface active	120 m ²	120 m ²	280 m ²	120 m ²	200 m ²	240 m ²	230 m ²	220 m ²	250 m ²
Ratio S_{max}/S_{active}	8 %	10 %	6 %	11 %	7 %	13 %	10 %	12 %	12 %
Ratio Volume/ S_{active}	11 mm	12 mm	16 mm	13 mm	8 mm	12 mm	10 mm	18 mm	16 mm
Volume/ S_{max} (l/m ²)	130	120	170	120	120	90	100	140	140
Végétation	Herbe Fond nu	Herbe	Herbe Fond nu	Herbe	Herbe	Herbe	Herbe arbre	Herbe	Sol nu Bâche tissée
Nb répétitions	2	2	2	1	1	2	2	2	3
Résultats									
Temps vidange max	39 h	13 h	>>40 h	13 h	16 h	>12 h	30 h	22 h	24 h
Vmin saturé (mm/h)	4	8	2	9	10	10	5	2	2
Vmax saturé (mm/h)	13	23	8	13	15	20	10	10	5
Vmax insat. (mm/h)	13	23	8	22	40	110	20	30	20

Figure 33 : Caractéristiques des noues d'infiltration et résultats de mesure

- K_{min} initial / K_{moy} initial / K_{max} initial : Valeurs de perméabilité mesurées lors des études de conception de l'aménagement lorsqu'elles sont disponibles
- Profondeur : Profondeur mesurée à partir du niveau de surverse ou de débit de fuite s'il y en a
- Surface BV : Surface totale du bassin versant amont de l'aménagement
- Surface active : Surface active contribuant à l'alimentation en eau de la noue. Cette surface est estimée par la somme de la surface imperméabilisée qui ruisselle vers la noue et de la surface d'emprise de la noue. A noter qu'en cas de surverse, une noue peut recevoir aussi des eaux provenant de noues situées en amont.
- Ratio S_{max}/S_{active} : Rapport entre la surface d'infiltration maximale et la surface active exprimé en %
- Ratio Volume/ S_{active} : Rapport entre le volume de la noue et la surface active exprimée en mm (ou l/m²)
- Ratio Volume/ S_{max} : Rapport entre le volume maximal de la noue et la surface maximale d'infiltration exprimé en l/m²
- Nb répétitions : Nombre de répétitions de la mesure au même endroit sur le même aménagement
- Temps vidange Max : Temps de vidange correspondant au remplissage maximal constaté
- Vmin saturé : Vitesse d'infiltration minimale mesurée à saturation
- Vmax saturé : Vitesse d'infiltration maximale mesurée à saturation
- Vmax insat. : Vitesse d'infiltration maximale mesurée avant saturation

Remarque : Les noues de ces 2 sites n'ont pas été conçues pour infiltrer la pluie centennale. A Montville, un bassin final collecte les surverses des noues. A Saint-Jean-de-Folleville, les noues ont été réalisées dans le cadre d'un réaménagement de voirie avec pour objectif de réduire les volumes d'eaux pluviales rejetés au réseau.

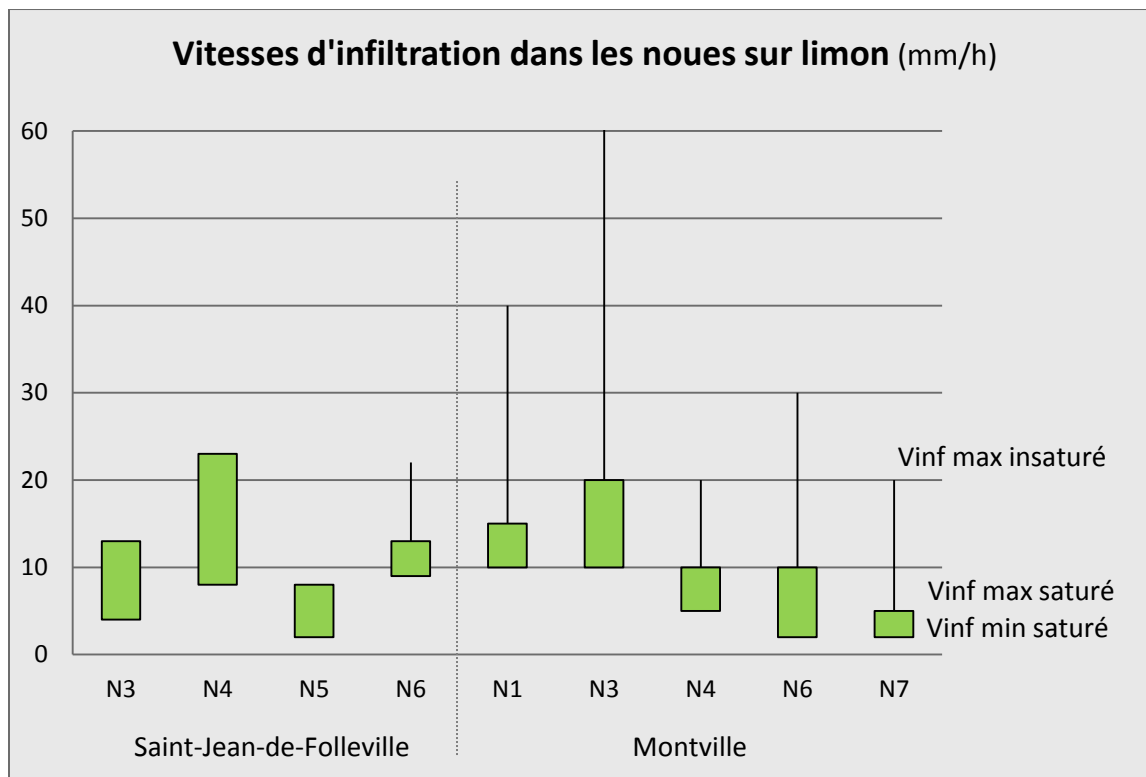


Figure 34 : Vitesses d'infiltration mesurées dans les noues sur limon

Les vitesses d'infiltration à saturation dans les noues sur sol de limon sont toutes comprises entre 2 et 23 mm/h. Ces résultats proviennent de 17 mesures par remplissage réalisées sur 9 noues réparties sur 2 sites.

La fourchette de vitesses d'infiltration à saturation est la même sur les 2 sites de Saint-Jean-de-Folleville et Montville. On observe cependant des différences entre les noues d'un même site.

La vitesse d'infiltration initiale avant saturation est comprise entre 20 et 110 mm/h sur le site de Montville. La durée pour atteindre la saturation est comprise entre 2 et 5 h selon les noues. Cette durée de saturation ne tient pas compte de la phase de remplissage de la noue, pendant laquelle on ne peut pas mesurer la vitesse d'infiltration. Sur le site de Saint-Jean-de-Folleville, même si la vitesse d'infiltration peut varier au cours de la mesure, on n'observe généralement pas de phase de saturation initiale. Seule la noue N6 présente une vitesse d'infiltration initiale supérieure (22 mm/h). Comme il s'agit de noues en cascade, le remplissage des noues N4 à N6 s'est fait par surverse depuis la noue N3. Les noues N3 à N5 sont donc restées plus longtemps en eau, ce qui a pu saturer le sol avant le début de la mesure.

La durée totale de vidange est comprise entre 12 h et plus de 40 h selon les noues. La durée moyenne est un peu plus courte sur Montville que sur Saint-Jean-de-Folleville.

Influence du type de sol sur la vitesse d'infiltration

Les types de sol des 2 sites sont différents :

- Limon peu épais sur argile à Saint-Jean-de-Folleville
- Limon profond à Montville

Les vitesses d'infiltration mesurées sur ces 2 types de sol sont toutes dans la même fourchette (2 à 23 mm/h).

Par contre, les résultats sont différents entre les noues d'un même site.

Influence des caractéristiques des noues sur la vitesse d'infiltration

Les mesures portent sur 9 noues réparties sur 2 sites, ce qui est insuffisant pour faire une analyse statistique solide sur l'influence des caractéristiques des noues. On observe cependant des variations significatives de vitesses d'infiltration sur des noues voisines, qui pourraient être liées à l'influence de certaines caractéristiques.

Influence de la forme de la noue

Les vitesses d'infiltration mesurées à saturation semblent être corrélées avec les paramètres de forme de la noue.

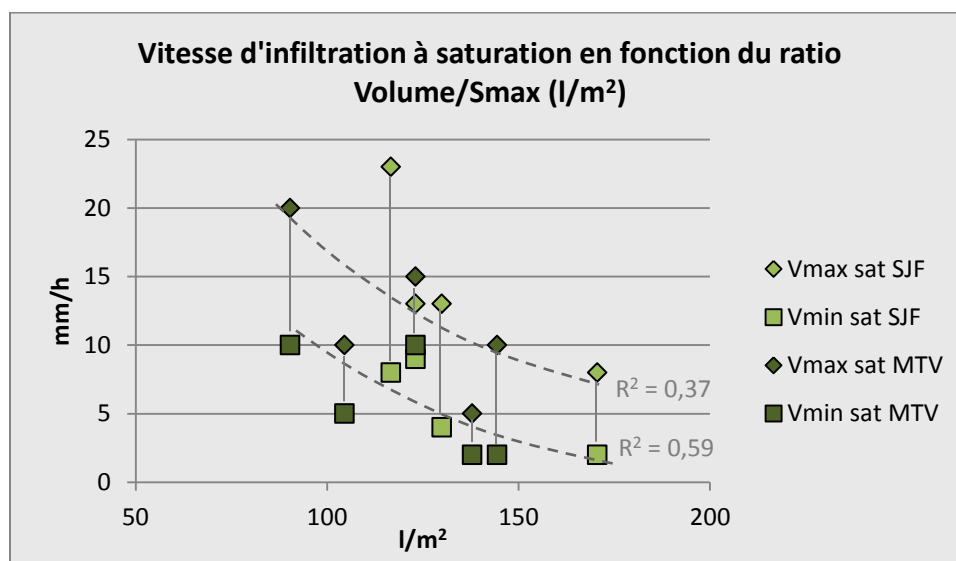


Figure 35 : Vitesses d'infiltration mesurées à saturation dans les noues en fonction du ratio Volume / Surface d'infiltration maximale (SJF = Saint-Jean-de-Folleville ; MTV = Montville)

On observe notamment un lien entre les vitesses d'infiltration (min et max) mesurées et le ratio « Volume / Surface maximale d'infiltration », qui représente la hauteur d'eau (ou charge) maximale moyennée sur la surface de la noue.

Pour simplifier, plus la noue est évasée, et meilleure est la capacité d'infiltration à saturation.

Influence du dimensionnement de la noue

Contrairement à ce qu'indique la bibliographie, on n'observe sur ces 2 sites **pas de corrélation significative** entre le rapport « Surface d'infiltration / Surface active » et les vitesses d'infiltration mesurées à saturation dans les noues.

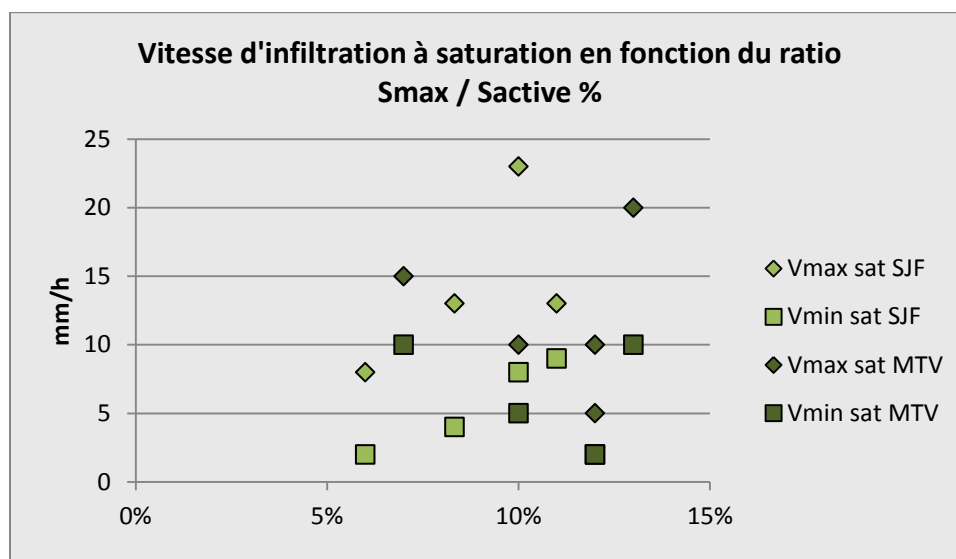


Figure 36 : Vitesses d'infiltration mesurées à saturation dans les noues en fonction du ratio Surface d'infiltration maximale / Surface active (SJF = Saint-Jean-de-Folleville ; MTV = Montville)

Influence du couvert végétal

Les couverts végétaux des noues d'infiltration testées sont tous de type herbacé, plus ou moins développé. Nous n'avons malheureusement pas trouvé de noues d'infiltration sur sol en place avec d'autres types de couverts végétaux.

A Saint-Jean-de-Folleville, le fond des noues N3 et N5 est peu végétalisé. Ces 2 noues sont également celles qui présentent les vitesses d'infiltration les plus faibles. Mais est-ce l'absence de couvert qui limite l'infiltration, ou plutôt la présence fréquente d'eau liée à la faible infiltration qui empêche l'herbe de se développer dans le fond ?



Figure 37 : Noue 3 (à gauche) et noue 4 (à droite) à Saint-Jean-de-Folleville

A Montville, la noue 7 sur sol nu est celle qui a la vitesse d'infiltration la plus faible. Il y a cependant aussi une bâche tissée sur un côté qui peut contribuer à limiter la vitesse d'infiltration.



Figure 38 : Noue 7 à Montville

Bilan des mesures sur les **noues d'infiltration** sur sols de limon :

- 17 mesures réalisées sur 9 noues réparties sur 2 sites
- Vitesses d'infiltration à saturation comprises entre 2 et 20 mm/h
- Paramètres pouvant influencer la vitesse d'infiltration à saturation :
 - Forme de la noue (rapport volume / surface)
 - Couvert végétal

3.3. Résultats des mesures sur les noues drainées

Synthèse des résultats des mesures globales sur noues drainées (remplissage)

Site	Yvetot						
Date réalisation	2003 (DLE)						
Type sol	Limon peu profond sur argile						
K min initial (mm/h)	2						
K moy initial (mm/h)	6						
K max initial (mm/h)	47						
Méthode mesure	Remplissage						
Date	Avril 2016						
Noue drainée	Nd1	Nd2	Nd3	Nd4	Nd5	Nd6	Nd7
Longueur	11 m	12 m	9 m	20 m	25 m	25 m	20 m
Profondeur	33 cm	36 cm	26 cm	33 cm	25 cm	35 cm	37 cm
Volume	3,6 m ³	3,3 m ³	1,1 m ³	5,5 m ³	4,3 m ³	5,8 m ³	4,6 m ³
Surface d'infiltration max	17 m ²	19 m ²	10 m ²	28 m ²	34 m ²	33 m ²	25 m ²
Volume / longueur (l/ml)	330	175	120	275	170	230	230
Surface active	300 m ²	175 m ²	Surverse Nd2	175 m ²	280 m ²	190 m ²	190 m ²
Ratio S_{max}/S_{active}	6 %	11 %	-	16 %	12 %	17 %	13 %
Ratio Volume/ S_{active}	12 mm	19 mm	-	31 mm	15 mm	31 mm	24 mm
Volume/ S_{max} (l/m ²)	210	170	110	200	130	180	180
Végétation	Herbe	Herbe Fond nu	Herbe Fond nu	Herbe	Herbe	Herbe	Herbe
Nb répétitions	2	2	2	2	2	2	2
Résultats							
Temps vidange max	25 h	30 h	6 h	17 h	10 h	13 h	16 h
Vmin saturé (mm/h)	10	5	15	15	20	15	15
Vmax saturé (mm/h)	15	10	40	30	50	50	50
Vmax insat. (mm/h)	20	10	30	30	180	30	35

Figure 39 : Caractéristiques des noues drainées et résultats de mesure

- K_{min} initial / K_{moy} initial / K_{max} initial : Valeurs de perméabilité mesurées lors des études de conception de l'aménagement lorsqu'elles sont disponibles
- Profondeur : Profondeur mesurée à partir du niveau de surverse ou de débit de fuite s'il y en a
- Surface BV : Surface totale du bassin versant amont de l'aménagement
- Surface active : Surface active contribuant à l'alimentation en eau de la noue. Cette surface est estimée par la somme de la surface imperméabilisée qui ruisselle vers la noue et de la surface d'emprise de la noue. A noter qu'en cas de surverse, une noue peut recevoir aussi des eaux provenant de noues situées en amont.
- Ratio S_{max}/S_{active} : Rapport entre la surface d'infiltration maximale et la surface active exprimé en %
- Ratio Volume/ S_{active} : Rapport entre le volume de la noue et la surface active exprimée en mm (ou l/m²)
- Ratio Volume/ S_{max} : Rapport entre le volume maximal de la noue et la surface maximale d'infiltration exprimé en l/m²
- Vmin saturé : Vitesse d'infiltration minimale mesurée à saturation
- Vmax saturé : Vitesse d'infiltration maximale mesurée à saturation
- Vmax insat. : Vitesse d'infiltration maximale mesurée avant saturation

Les noues drainées ne sont pas des aménagements d'infiltration au sens strict, puisque les eaux drainées sont ensuite rejetées en surface (au moins en partie). Ces noues drainées présentent malgré tout l'intérêt de filtrer et de tamponner les eaux pluviales urbaines.

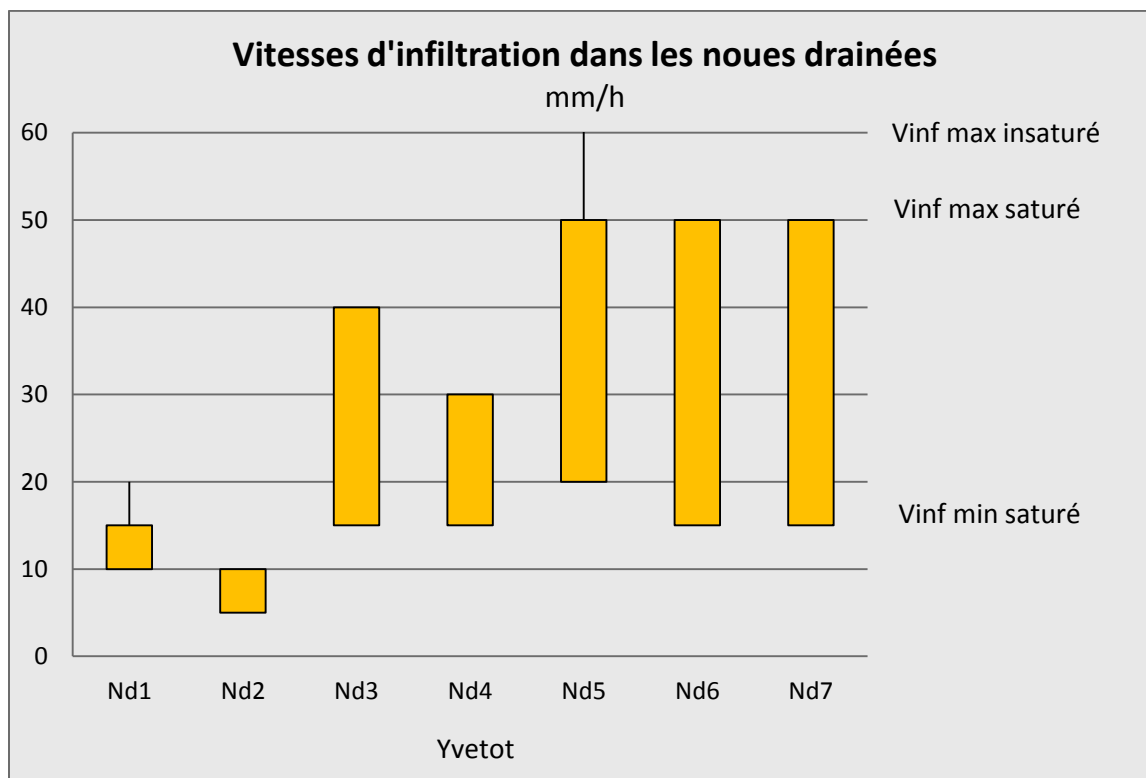


Figure 40 : Vitesses d'infiltration mesurées dans les noues drainées

Les vitesses d'infiltration à saturation dans les noues drainées sont comprises entre 5 et 50 mm/h. Ces résultats sont issus de 14 mesures par remplissage réalisées sur 7 noues réparties sur 1 site.

Le groupe de noues drainées 1 à 4 présente des vitesses d'infiltration à saturation plus variables et plus faibles que celles du groupe 5 à 7.

Par ailleurs, nous avons remarqué pendant les mesures qu'une variation de niveau dans une noue drainée peut avoir une influence sur le niveau dans les noues voisines. En effet, les massifs drainants situés sous les noues sont reliés par des canalisations de petit diamètre. Il n'a pas été possible d'étudier dans le détail le fonctionnement des massifs drainants car ils ne sont pas accessibles et car nous n'avons pas d'information sur leur conception ni leur dimensionnement.

Particularité du fonctionnement des noues drainées

La vitesse d'infiltration globale en fonction de la hauteur d'eau présente un profil particulier dans les noues drainées.

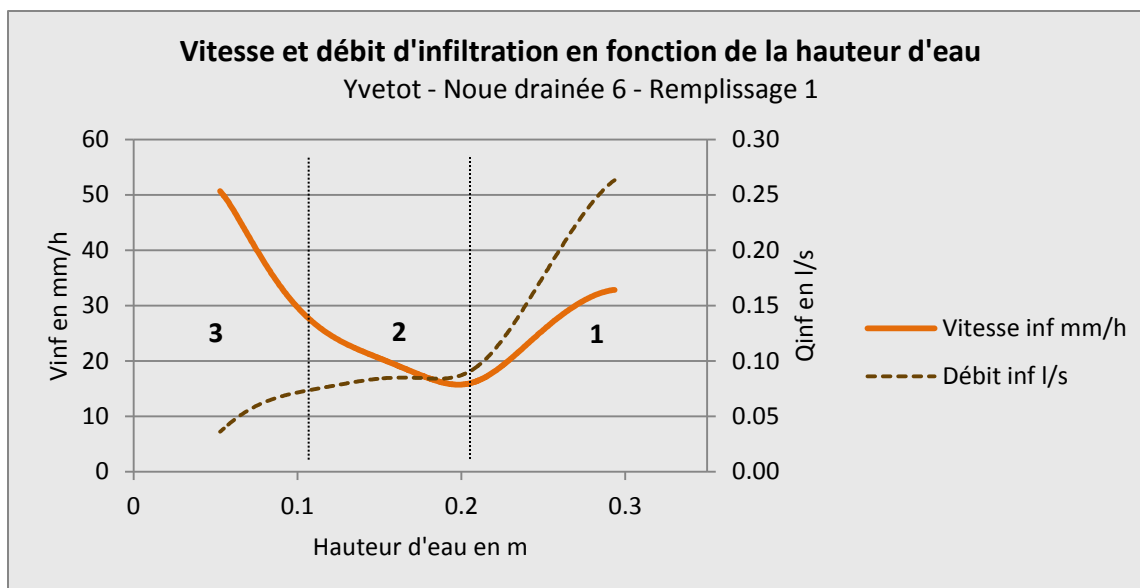


Figure 41 : Evolution de la vitesse et du débit d'infiltration dans une noue drainée en fonction de la hauteur d'eau (Noue 6 Yvetot Remplissage n°1)

On distingue 3 phases :

- 1) Une première phase de saturation en eau du sol caractérisée par une diminution rapide de la vitesse d'infiltration lorsque la hauteur d'eau est élevée,
- 2) Une deuxième phase où la vitesse d'infiltration atteint un minimum
- 3) Une troisième phase pendant laquelle la vitesse d'infiltration remonte lorsque la hauteur d'eau devient faible,

Ceci semble indiquer que **le fond de la noue infiltre mieux que les parois**. C'est effectivement au fond de la noue que l'épaisseur de sol au-dessus du massif filtrant est la plus faible.

Influence des caractéristiques des noues drainées sur la vitesse d'infiltration

Les noues drainées testées sont toutes sur le même site. Il n'est donc pas possible d'étudier l'effet de certains paramètres comme l'âge des aménagements. De même, la végétation est assez homogène sur toutes ces noues drainées (herbe).

Influence de la forme de la noue drainée

Le ratio « Volume / Surface maximale d'infiltration », qui représente la hauteur d'eau (ou charge) maximale moyennée sur la surface d'infiltration de la noue, n'a visiblement pas d'influence sur la vitesse d'infiltration à saturation, contrairement au cas des noues d'infiltration sur sol en place.

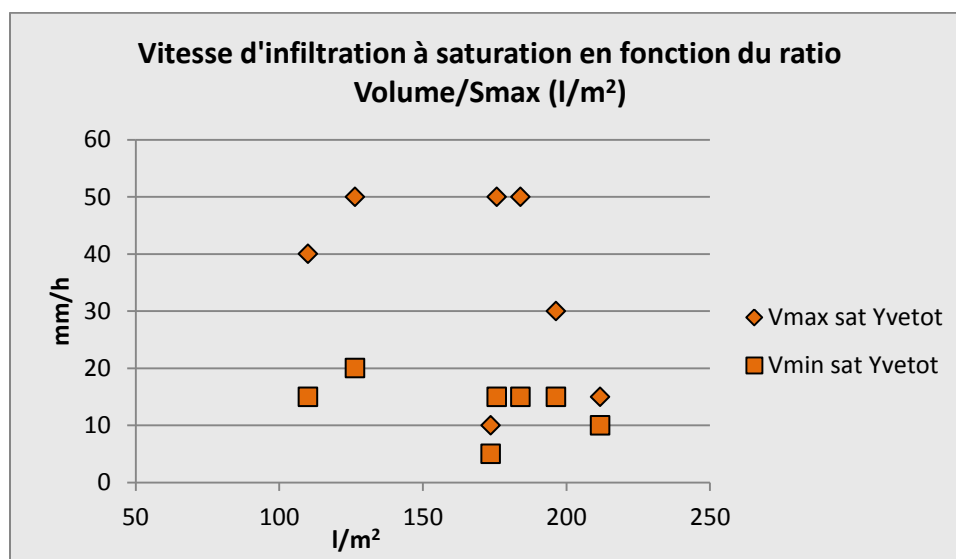


Figure 42 : Vitesses d'infiltration mesurées à saturation dans les noues drainées en fonction du ratio Volume / Surface d'infiltration maximale

Influence du dimensionnement de la noue drainée

De même que pour les noues d'infiltration, on n'observe pas sur ces noues drainées de corrélation significative entre le rapport « Surface d'infiltration / Surface active » et les vitesses d'infiltration mesurées à saturation.

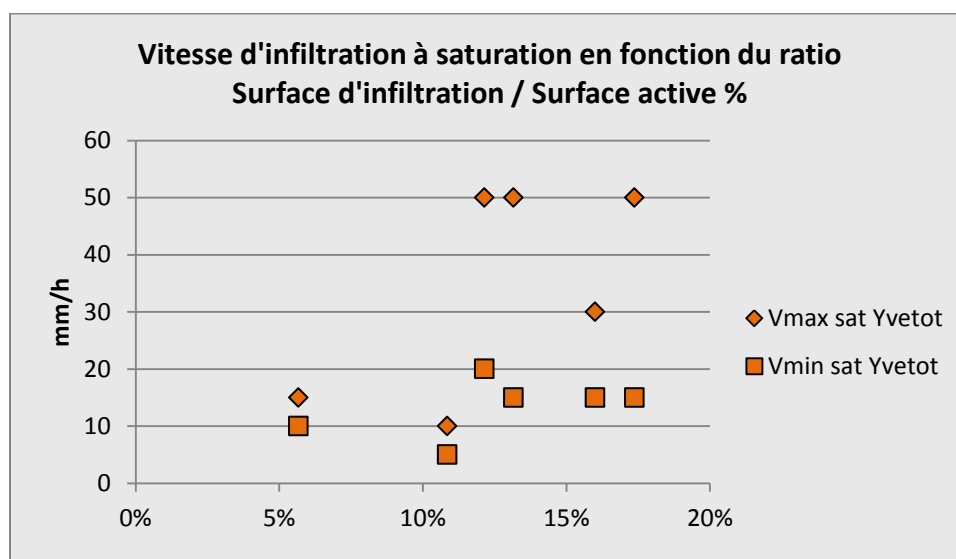


Figure 43 : Vitesses d'infiltration mesurées à saturation dans les noues drainées en fonction du ratio Surface d'infiltration maximale / Surface active

Il est probable que la vitesse d'infiltration à saturation à travers les noues drainées soit principalement contrôlée par le massif drainant.

Bilan des mesures sur les **noues drainées** :

- 14 mesures réalisées sur 7 noues réparties sur 1 site
- Vitesses d'infiltration à saturation comprises entre 5 et 50 mm/h
- Vitesse d'infiltration principalement contrôlée par le massif drainant sous-jacent

3.4. Bilan des mesures d'infiltration sur des aménagements existants

Les vitesses d'infiltration globales mesurées à saturation sur différents types d'aménagements de la région sont **comprises entre 1 et 50 mm/h**. En moyenne, elles sont plus élevées dans les noues d'infiltration que dans les bassins d'infiltration. Les noues drainées présentent les vitesses d'infiltration apparentes les plus élevées, bien que ce ne soit pas des aménagements d'infiltration au sens strict, puisque les eaux drainées sont ensuite rejetées en surface.

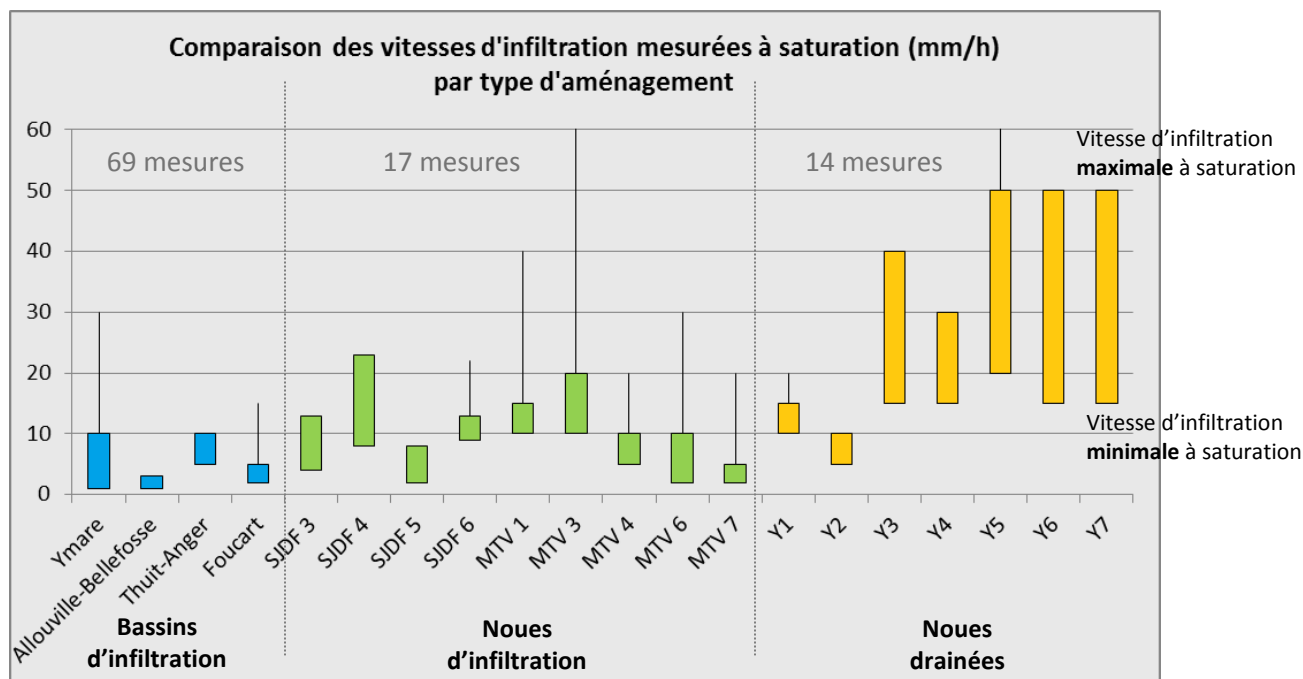


Figure 44 : Comparaison des vitesses d'infiltration mesurées à saturation par type d'aménagement et par site (SJDF : Saint-Jean-de-Folleville ; MTV : Montville ; Y : Yvetot)

Il apparaît que les effets des paramètres des aménagements diffèrent selon le type d'aménagement. Pour les aménagements d'infiltration « stricte », la forme de l'aménagement conditionne la vitesse d'infiltration. La végétation semble être également un paramètre important, mais la faible diversité des couverts testés ne permet pas de conclure. Enfin, on n'observe pas de diminution des vitesses d'infiltration avec l'âge des aménagements.

Type d'aménagement	Bassins d'infiltration	Noues d'infiltration	Noues drainées
Vitesses d'infiltration à saturation	1 – 10 mm/h	2 – 23 mm/h	5 – 50 mm/h
Paramètres influençant la vitesse d'infiltration à saturation	<i>Nb d'aménagements testés insuffisant</i>	Forme de la noue Végétation	Massif drainant sous-jacent

Figure 45 : Tableau de synthèse des résultats de mesures d'infiltration sur différents types d'aménagements (résultats valables uniquement pour les sites testés et non extrapolables pour d'autres contextes notamment pédologiques)

Remarque sur l'influence de l'évaporation sur les résultats

L'évaporation, qui est de l'ordre de quelques mm/j dans notre région, est négligeable par rapport à l'infiltration mesurée (au minimum 1 mm/h). On ne distingue d'ailleurs pas de différence de vitesse de vidange des aménagements en fonction de la saison.

Comparaison entre les mesures avant travaux et les mesures sur des aménagements existants

Cette comparaison est très délicate pour plusieurs raisons : faible de nombre de sites testés, méthodes de mesures différentes (avant travaux : Porchet, Matsuo ; après travaux : méthodes par remplissage ou suivi en continu), grande variabilité des résultats avant travaux sur un même site, non coïncidence des points de mesure avant / après travaux.

Type d'aménagement	Bassin d'infiltration	Noues d'infiltration	Noues drainées
Site	Thuit-Anger	Montville	Yvetot
Type de tests d'infiltration initiaux	2 essais Porchet	7 essais Matsuo	8 essais Porchet
Profondeur des tests initiaux	1,5 à 1,6 m	0,7 à 1,5 m	0,6 à 0,8 m
Résultats des tests initiaux (moyenne)	21 - 25 mm/h (23 mm/h)	4 - 133 mm/h (43 mm/h)	2 - 47 mm/h (6 mm/h)
Profondeur de l'aménagement	1,5 m	0,25 à 0,3 m	0,25 à 0,4 m
Vitesse d'infiltration à saturation sur aménagement existant	5 – 10 mm/h	2 – 20 mm/h	5 – 50 mm/h <i>Pas infiltration au sens strict</i>

Figure 46 : Tableau de comparaison des résultats de mesures avant travaux et sur des aménagements existants (pour les mêmes sites)

Au mieux on peut dire que les ordres de grandeur des mesures réalisées avant travaux et des mesures sur des aménagements existants sont équivalents.

PARTIE 3 Enseignements pratiques

1. Etudes préalables

La comparaison des résultats de nos mesures sur des aménagements existants avec les résultats des tests d'infiltration réalisés avant aménagement (pour les sites où ils sont disponibles : Thuit-Anger, Montville, Yvetot) ne montre pas de corrélation entre les deux, même si les ordres de grandeur restent comparables. De plus, on observe pour un même site des écarts importants à la moyenne, à la fois pour les tests préalables et les mesures sur des aménagements existants.

Cela ne signifie pas pour autant que les tests préalables sont inutiles. Une bonne connaissance du sol et de ses caractéristiques reste indispensable pour tout projet de gestion des eaux pluviales par infiltration. Les essais de type Matsuo sont certainement plus robustes que les essais Porchet, car ils concernent un plus grand volume de sol. La profondeur de réalisation des essais est aussi un paramètre important, qui doit être ajusté par rapport au niveau du fond des aménagements prévus.

Des levés topographiques fins sont également nécessaires pour bien positionner et dimensionner les aménagements par rapport à l'écoulement de l'eau.

On peut soulever aussi la question du risque d'ouverture de cavités en lien avec l'infiltration des eaux pluviales. Au final, sur les 80 sites en infiltration totale ou partielle recensés dans le cadre de cette étude, seuls 2 cas d'ouverture de cavité ont été reportés. Ils semblent être liés à la présence de puits ou de marnière pré-existant sous l'aménagement d'infiltration, plutôt qu'à la création de bétoire.

Le risque d'apparition de bétoire est probablement plus important sur des bassins centralisés, ou des ouvrages de rétention avec des hauteurs d'eau plus élevées.



Figure 47 : Exemple de cavité en entrée d'un bassin de gestion des eaux pluviales centralisé

2. Dimensionnement et conception des techniques alternatives pour favoriser l'infiltration

2.1. Méthode d'évaluation de l'efficacité d'infiltration par modélisation basée sur une longue chronique de pluies

Des simulations sur de longues chroniques de pluies réelles permettent de mieux comprendre les différents modes de fonctionnement de ces systèmes en fonction des différents types d'évènements (Barraud, et al., 2006).

Les ouvrages d'infiltration sont souvent dimensionnés sur la base d'une pluie de projet d'une période de retour donnée. Or, comme il est précisé dans *l'Infiltration en questions* (Programme ECOPLUIES, 2009), « les ouvrages vont fonctionner la plupart du temps pour des évènements plus faibles et la simulation sur de longues périodes fournit des informations précieuses sans demander forcément des données très sophistiquées (mises à part des séries longues de pluies). Elle peut donner par exemple la répartition statistique des temps de séjour » ou la période de retour d'insuffisance d'un ouvrage, qui est différente de la période de retour de la pluie.

Méthode de modélisation

La modélisation est basée sur un calcul du volume stocké à chaque pas de temps par bilan entrées-sorties :

$$V \text{ stocké } (t) = V \text{ stocké } (t-1) + V \text{ entré } (t) - V \text{ infiltré } (t) - V \text{ surversé } (t)$$

Le volume entré correspond au volume ruisselé en provenance du BV amont et à la pluie qui tombe directement sur l'aménagement.

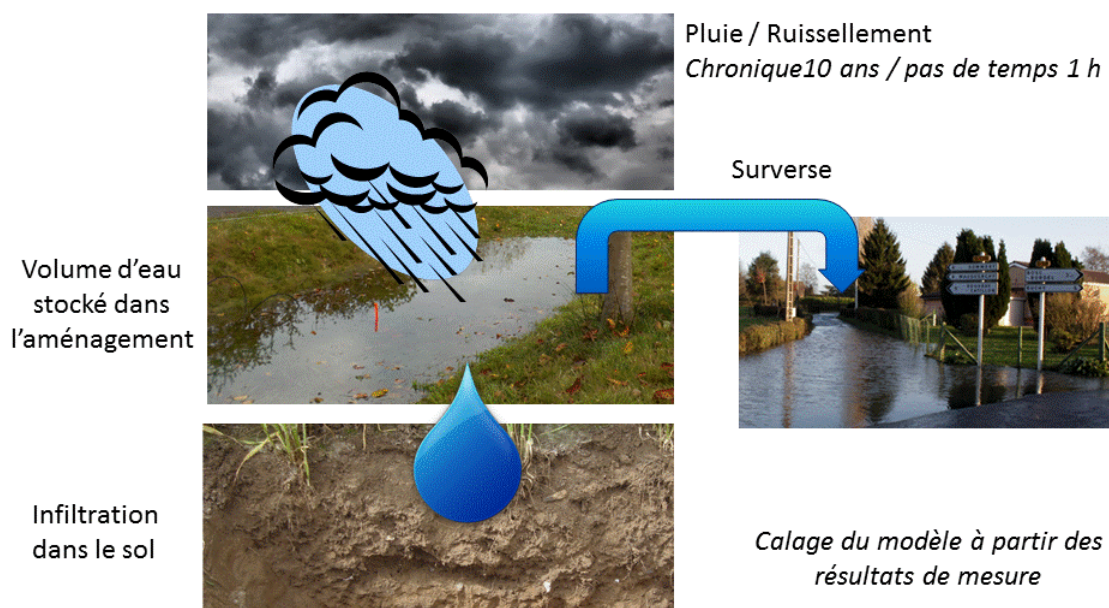


Figure 48 : Schéma de principe du modèle de fonctionnement d'un aménagement d'infiltration des eaux pluviales

Aménagements modélisés

Nous avons choisi de tester le modèle avec 2 types d'aménagements pour lesquels nous disposons de résultats de mesure, et qui ne sont pas soumis à des objectifs réglementaires d'efficacité :

- Bassin d'infiltration (Foucart),
- Noues d'infiltration (noues 3 et 4 de Saint-Jean-de-Folleville).

Données d'entrée du modèle

Géométrie de l'aménagement

Les fonctions Volume = f(Hauteur) et Surface d'infiltration = f(Hauteur) sont ajustées à partir de levés topographiques fins (en moyenne 4 points / m²).

Vitesse d'infiltration

La fonction Vitesse d'infiltration = f(Hauteur) est calée à partir des mesures d'infiltration. La forme de la relation est de type linéaire : $V_{inf} = a.H + b$.

Paramètres hydrologiques

Dans le cas du bassin de Foucart, la réponse du bassin versant amont est ajustée à partir des volumes entrés dans le bassin pour plusieurs hauteurs de pluies mesurées. La fonction Volume entrant = f(Pluie) comporte 2 paramètres : surface active (en m²) et pertes initiales (en mm, cumulées sur 24h).

Dans le cas des noues de Saint-Jean-de-Folleville, la surface active prise en compte correspond à la surface imperméabilisée connectée à la noue (voirie et trottoir). Les pertes initiales sont fixées par hypothèse à 1mm.

Chronique de pluie sur 10 ans

La chronique de pluie utilisée provient du pluviomètre de Bourville (76) géré par l'AREAS, dont les données sont enregistrées au pas de temps de 6 minutes, sur la période du 1^{er} septembre 2005 au 6 avril 2014, soit 3 140 jours.

Répartition mensuelle de la pluie

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	total	Nb jours de pluie	% Données manquantes
2005									54	70	72	82			2.5%
2006	33	79	63	24	86	52	55	96	35	115	55	110	802	195	5.5%
2007	43	108	81	2	63	116	46	3	85	65	46	122	779	178	8.5%
2008	64	33	135	34	139	15	52	72	70	94	79	86	872	207	0.0%
2009	50	47	33	32	23	58	44	12	21	61	226	92	698	166	5.5%
2010	45	101	31	11	33	45	21	86	87	82	126	51	717	177	0.0%
2011	59	33	26	11	4	7	66	98	94	27	25	177	629	154	0.0%
2012	56	10	31	111	20	123	97	41	53	201	70	162	974	244	2.0%
2013	49	42	52	28	76	23	43	71	102	136	166	93	880	222	2.3%
2014	90	101	18												0.1%
Moyenne	54	61	52	32	55	55	53	60	67	95	96	108	794	193	

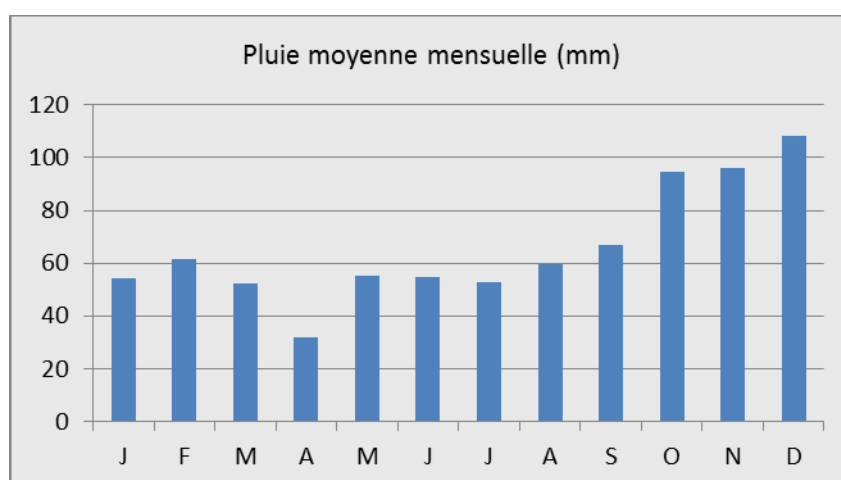


Figure 49 : Pluie moyenne mensuelle au pluviomètre de Bourville (76) de septembre 2005 à mars 2014

La pluie est en moyenne bien répartie tout au long de l'année (66mm/mois), avec une période plus arrosée entre octobre et décembre (100mm/mois).

Evènements pluvieux significatifs

- Pluie journalière maximale :
 - Le 18 mai 2008 : 68,6mm en 24h (période de retour T 100ans) dont 43,8mm en 1h (intensité horaire maximale de la chronique T>100ans)
- Autres évènements notables :
 - Les 10 et 11 octobre 2006 : 93,8mm sur 2j consécutifs
 - Le 10/10/2006 : 42,8mm en 24h (T 5ans) dont 28mm en 1h (T 20ans)
 - Le 11/10/2006 : 51mm en 24h (T 10ans) dont 26,4mm en 1h (T>10ans)
 - Du 1^{er} au 6 novembre 2009 : 122mm répartis sur 5j dont
 - Le 04/11/2009 : 34,6mm en 24h (T 2ans)

Vérification du calage du modèle

Les résultats du modèle sont comparés aux mesures de hauteur d'eau réalisées sur le bassin de Foucart du 17 mai au 21 juillet 2016, période pendant laquelle nous avons enregistré 140 mm de pluie.

Pendant cette période, le bassin s'est rempli 2 fois à une hauteur de 0,35m (surverse à 0,47m), correspondant à un peu plus de 50% de son volume total.

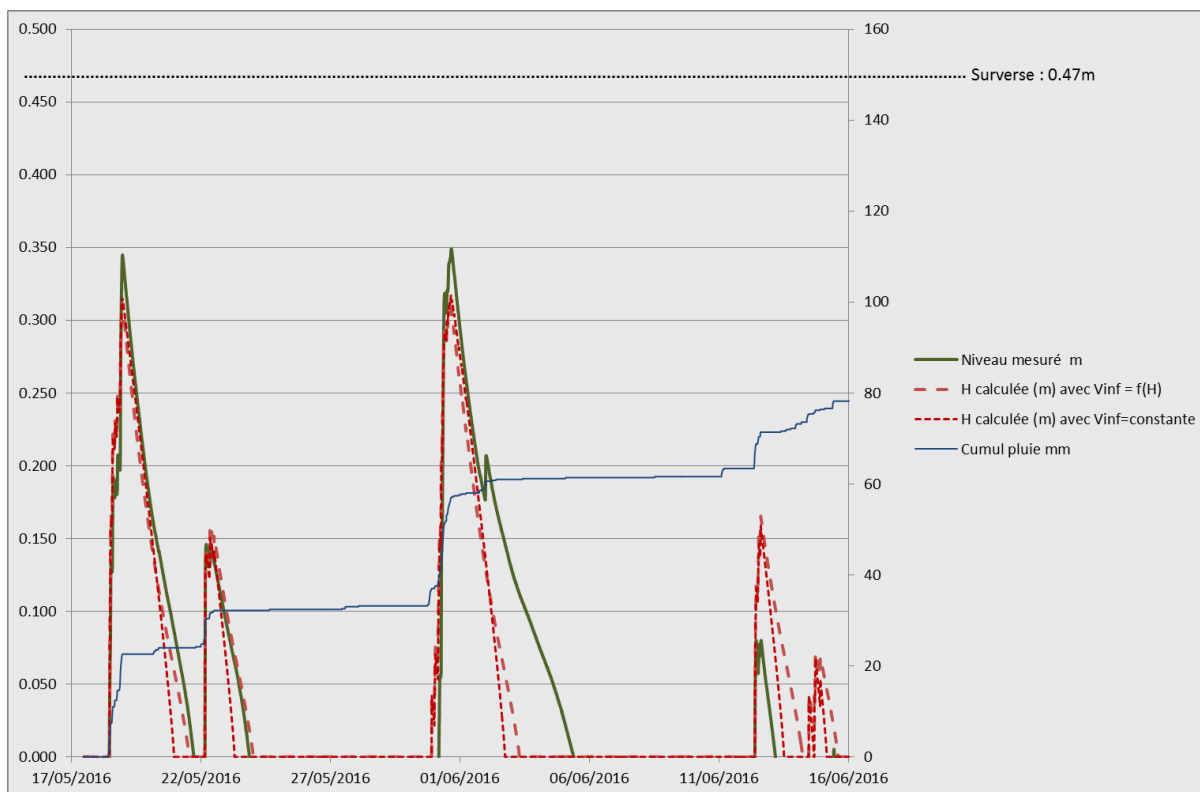


Figure 50 : Graphique de comparaison des résultats du modèle avec les données mesurées sur le bassin de Foucart (extrait du 17 mai au 16 juin 2016)

Le modèle représente globalement bien le fonctionnement du bassin de Foucart, en particulier pour les pluies les plus importantes.

Cependant, certaines simplifications nécessaires pour le modèle peuvent entraîner des écarts avec les données mesurées pour de petites pluies :

- Sur l'évènement du 1^{er} juin, la petite pluie qui arrive en cours de vidange ne génère pas de ruissellement dans le modèle car elle est inférieure aux pertes initiales. Dans la réalité, les pertes initiales ne sont pas identiques quel que soit l'évènement.
- Au contraire, la hauteur de remplissage du 12 juin est surestimée. Cela peut s'expliquer à la fois par la surface active, qui peut être moins importante pour une petite pluie, et par la vitesse d'infiltration initiale, qui peut être supérieure dans la réalité (sol non saturé).

Nous avons aussi testé un modèle simplifié, avec une vitesse d'infiltration qui ne dépend pas de la hauteur d'eau. En prenant la vitesse d'infiltration moyenne de l'aménagement, la perte de précision est peu importante et s'exprime surtout par une fin de vidange plus rapide : vidange totale en 48h au lieu de 60h pour l'évènement du 18 mai. Cela peut conduire à sous-estimer le risque de débordement pour des évènements rapprochés.

Choix du pas de temps de calcul

Pour la simulation de la chronique de pluie sur 10 ans, nous utilisons un pas de temps de calcul de 1h, qui permet de réduire le temps de calcul sans dégrader significativement les résultats.

Sensibilité du modèle

Pour tester la sensibilité du modèle, on fait varier chaque paramètre d'entrée du modèle de +/- 10% et on calcule l'effet sur les principales variables résultats : nombre de remplissages, nombre de surverses, volume total surversé, % du temps en eau et temps de vidange moyen.

Il apparaît que :

- Le volume surversé et le nombre de surverses sont sensibles à la surface active et au volume, et dans une moindre mesure à la vitesse d'infiltration,
- Les autres variables résultats du modèle sont peu sensibles à une petite variation de vitesse d'infiltration,
- Le nombre de remplissages et le % du temps en eau sont peu sensibles aux variables d'entrée,
- Le temps de vidange moyen est sensible à la surface d'infiltration et au volume de l'ouvrage.

Résultats du modèle

Résultats pour des aménagements modélisés inspirés d'aménagements réels non soumis à des objectifs réglementaires d'efficacité

Type d'aménagement	Bassin	Noues d'infiltration	
	Foucart	SJF 3	SJF 4
Site			
Paramètres d'entrée			
Vinf (H=0) (mm/h)	3	5	15
Vinf (Hmax) (mm/h)	11	5	22
Surface active BV (m ²)	495	156	156
Pertes initiales BV (mm)	3,6	1	1
Profondeur (cm)	47	29	28
Volume (m ³)	16,7	1,34	1,45
Surface max (m ²)	72	11	12
Ratio S_{max}/S_{active}	15 %	7 %	8 %
Paramètres de simulation			
Durée simulation (jours)	3 140	3 140	3 140
Pas de temps (minutes)	60	60	60
Cumul de pluie (mm)	6 838	6 838	6 838
Pluviométrie moyenne mensuelle (mm)	66	66	66
Pluie journalière max (mm/j)	68,6	68,6	68,6
Résultats du modèle			
Ruissellement			
Volume total ruisselé (m ³)	2 254	956	956
Lame d'eau ruisselée (mm)	4 551	6 130	6 130
Part eau de pluie ruisselée	67%	90%	90%
Remplissage / vidange			
Nombre de remplissages	288	340	518
Fréquence moy de remplissage (nb/an)	33	40	60
Volume total infiltré (m ³)	2 233	749	898
Volume infiltré / Volume ruisselé (%)	99%	78%	94%
Temps en eau (j)	943	1 272	549
% temps en eau	30.0%	40.5%	17.5%
Tps vidange moyen (j)	3.27	3.74	1.06
Surverse			
Nombre de surverse	3	140	58
Fréquence moy de surverse (nb/an)	0.35	16.27	6.74
Période de retour moyenne de surverse	3 ans	3 sem.	2 mois
Volume surversé (m ³)	22	207	59
Volume surversé / Volume ruisselé (%)	1%	22%	6%

Période de retour de surverse et taux d'infiltration

Les aménagements modélisés sont inspirés d'aménagements réels qui ne sont pas soumis à des objectifs réglementaires d'efficacité.

La période de retour moyenne de surverse du bassin de Foucart est de l'ordre de 3 ans sur la période simulée. C'est assez faible au regard des niveaux d'efficacité généralement fixés pour la gestion des eaux pluviales dans le cadre d'opérations d'aménagements (10 ans voire 100 ans en Seine-Maritime). Cela suffit pourtant pour infiltrer 99% des volumes ruisselés qui rentrent dans le bassin.

La période de retour de surverse est beaucoup plus courte pour les noues 3 et 4 de Saint-Jean-de-Folleville, respectivement 3 semaines et 2 mois. Les taux d'infiltration sur la période atteignent tout de même 78% et 94%.

Saisonnalité des surverses

On observe une saisonnalité marquée des surverses de la noue 4 de Saint-Jean-de-Folleville, qui correspondent principalement à des pluies orageuses de printemps/été avec des hauteurs d'eau importantes sur des durées courtes (de une à quelques heures) :

- Période 1^{er} avril – 31 octobre : 44 surverses pour un volume de 53 m³ (moyenne : 1,2 m³/surverse ; max : 7,7 m³).
- Période 1^{er} novembre – 31 mars : 14 surverses pour un volume de 6 m³ (moyenne : 0,4 m³/surverse ; max : 0,9 m³)

Les surverses de printemps/été sont cependant un peu surestimées, car on ne prend pas en compte dans le modèle la phase initiale de saturation du sol pendant laquelle la vitesse d'infiltration est plus élevée.

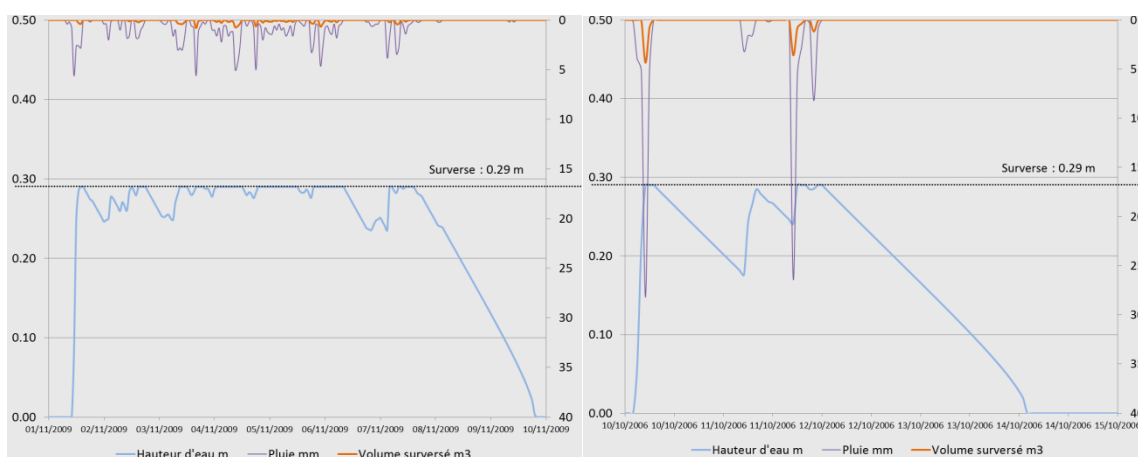


Figure 51 : Effet des caractéristiques des pluies sur la surverse d'une noue (SJM 3) – à gauche : nombreuses surverses successives liées à de petites pluies régulières (01/11 au 10/11/2009) ; à droite : surverses importantes liées à 2 pluies orageuses (10 et 11/10/2006)

La fréquence de surverse de la noue 3 est quasi constante au long de l'année car même des pluies peu intenses peuvent la faire déborder. Le volume débordé moyen pendant la période «

1^{er} avril – 31 octobre » reste cependant supérieur de 29% à celui de la période « 1^{er} novembre – 31 mars ».

Les surverses du bassin de Foucart se produisent seulement les 10 et 11 octobre 2006 (pluies journalières de périodes de retour T 5 et 10 ans), et le 18 mai 2008 (T 100 ans).

Durée de présence de l'eau dans l'aménagement

Le bassin de Foucart et la noue 3 de Saint-Jean-Folleville, restent en eau de 30 à 40% du temps. La noue 4, qui diffère de la noue 3 essentiellement par sa vitesse d'infiltration supérieure, ne reste que 18% du temps en eau.

On peut aussi relier ces résultats à la durée moyenne de vidange qui est seulement de 1 jour pour la noue 4, contre plus de 3 jours pour les 2 autres aménagements modélisés.

Test de l'influence de paramètres de conception et de dimensionnement sur les résultats de modélisation

Un des intérêts de la modélisation est de faire varier les paramètres de conception et de dimensionnement des aménagements pour trouver les valeurs optimales

Vitesse d'infiltration

Les noues 3 et 4 ont des géométries très proches, elles sont situées l'une à côté de l'autre, par contre elles n'ont pas la même vitesse d'infiltration.

	Vitesse infiltration mm/h		Volume max	Surface infiltr. max	% Volume infiltré	% Tps en eau	Tps vidange moyen	Nb surverse moy/an	Vol max surversé
	min	max							
Noue 3	5mm/h	5mm/h	1,34 m ³	11,3 m ²	78%	41%	3,7 j	16	9,2 m ³
Noue 4	15mm/h	22mm/h	1,45 m ³	12,2 m ²	94%	18%	1,1 j	7	7,7 m ³

Figure 52 : Comparaison des résultats de noues 3 et 4 de Saint-Jean-de-Folleville

Leurs performances sont très différentes en termes de % du volume ruisselé infiltré, de fréquence de surverse, et de temps de vidange.

La noue 3 déborde plus fréquemment, notamment pour des petites pluies successives (cf Figure 51). Pour autant, la noue 3, dont la vitesse d'infiltration peut être qualifiée de faible, permet quand même d'infiltrer près de 80% du volume ruisselé.

Dans cet exemple, en multipliant la vitesse d'infiltration par 3, on ne réduit le volume surversé pour la pluie centennale du 18/05/2008 que de 1,5m³ (15% du volume ruisselé). Traduit en termes de lame d'eau, la noue 3 gère 10mm alors que la noue 4 en gère 20mm (sur 69mm de pluie).

Ratio Surface d'infiltration / Surface active

En faisant varier dans le modèle la surface active alimentant la Noue 4 de Saint-Jean-de-Folleville (Surface d'infiltration max = 12,2 m² ; Volume total = 1,45 m³), on peut tester l'effet du ratio Surface d'infiltration / Surface active sur l'efficacité de la noue.

Remarque : La surface d'infiltration représente la surface maximale en contact avec l'eau. La surface d'emprise au sol de l'aménagement est de l'ordre de 24m² pour la noue 4, soit le double de la surface d'infiltration.

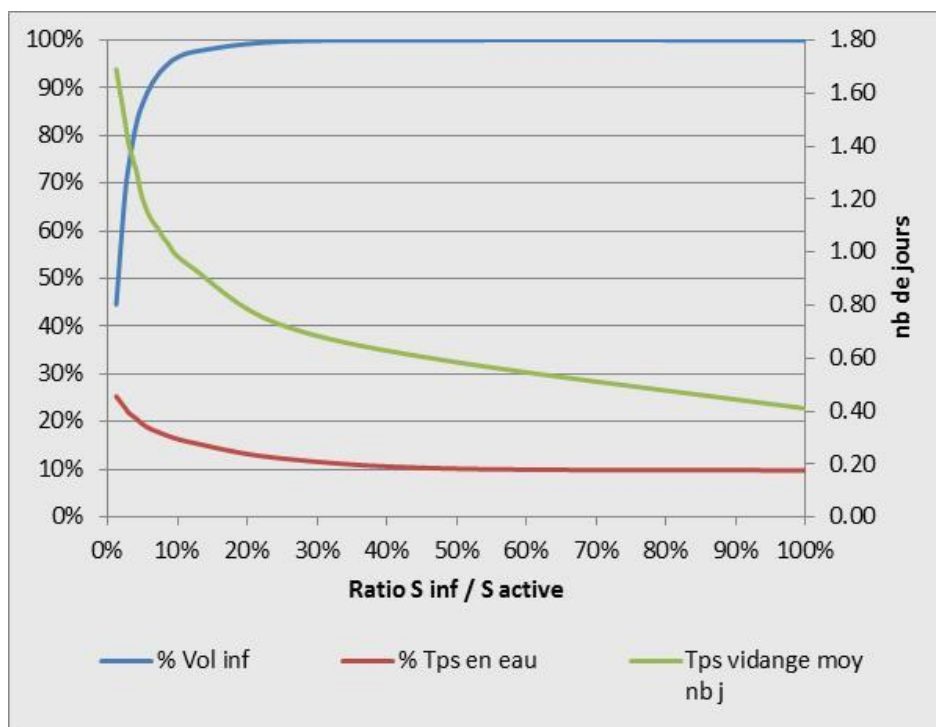


Figure 53 : Influence du ratio Surface d'infiltration / Surface active sur les résultats du modèle (% du volume infiltré, % du temps en eau et temps de vidange moyen) pour la noue 4 de Saint-Jean-de-Folleville

Dans cet exemple, un ratio de 10% permet d'infiltrer 96% du volume ruisselé (sur près de 10 ans), avec un temps de vidange moyen de 1 jour. Dans ce cas, la fréquence moyenne de surverse est de 4/an (moyenne : 0,9m³/surverse ; max T 100ans : 5,7 m³). Un ratio de 6% permet encore d'infiltrer 90% du volume ruisselé, avec une fréquence moyenne de surverse de 10/an.

Pour atteindre la même efficacité avec une vitesse d'infiltration divisée par 3 (Noue 3 de Saint-Jean-de-Folleville), il faut un ratio Surface d'infiltration / Surface active de 12%.

Peut-on gérer une pluie décennale ou centennale par infiltration ?

A quelles conditions les aménagements d'infiltration sur sols limoneux peuvent-ils remplir les objectifs réglementaires d'efficacité pour la gestion des eaux pluviales urbaines ?

L'étude porte ici sur 2 aménagements existants dont le fonctionnement est bien connu : le bassin d'infiltration de Foucart et la noue 4 de Saint-Jean-de-Folleville. **Remarque : Les résultats ne sont pas directement extrapolables à d'autres aménagements de caractéristiques différentes (forme, vitesse d'infiltration).**

Période de retour	Pluie décennale	Pluie centennale
Caractéristiques de la pluie	51 mm / 24h 26,4 mm / 1h	69 mm / 24h 43,8 mm / 1h

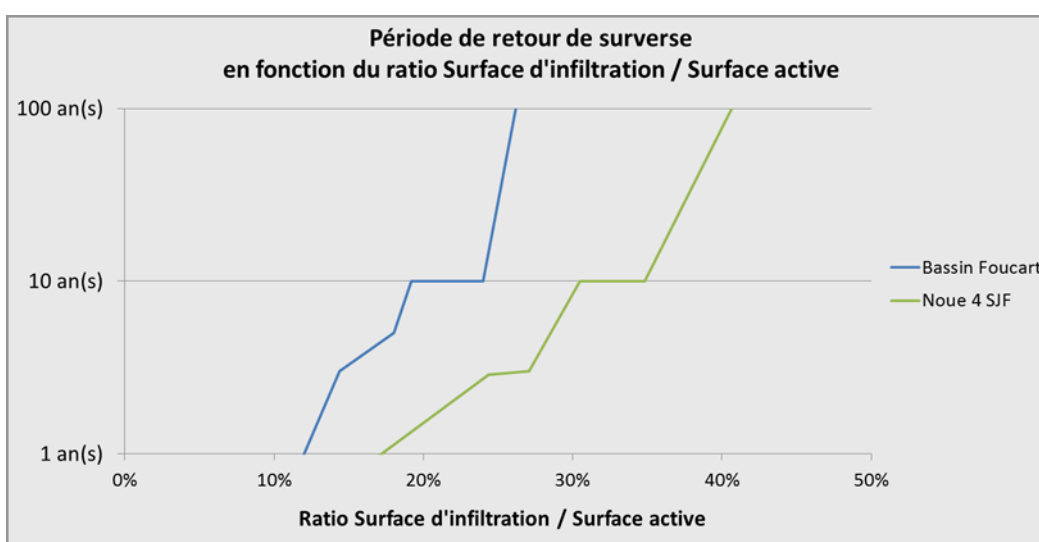


Figure 54 : Influence du ratio Surface d'infiltration / Surface active sur la période de retour de surverse (Bassin de Foucart et Noue 4 de Saint-Jean-de-Folleville)

Pour gérer la pluie décennale, la surface d'infiltration doit représenter au moins 19% de la surface active pour le bassin de Foucart. Elle doit être d'au moins 30% pour la noue 4 de Saint-Jean-de-Folleville.

La question peut aussi être traduite ainsi : **Quelle serait la surface d'infiltration nécessaire pour gérer la pluie décennale ou centennale qui tombe sur 100 m² imperméabilisés ?**

	Surface d'infiltration nécessaire		Volume de stockage correspondant		Vitesse d'infiltration (pour rappel)
	T 10 ans	T 100 ans	T 10 ans	T 100 ans	
Bassin de Foucart	≈ 20 m ²	≈ 30 m ²	≈ 5 m ³	≈ 7 m ³	3 – 11 mm/h
Noue 4 SJF	≈ 40 m ²	≈ 60 m ²	≈ 5 m ³	≈ 7 m ³	15 – 22 mm/h

Il apparaît que **c'est principalement le volume de stockage de l'aménagement qui détermine sa période de retour de surverse**, plutôt que sa vitesse d'infiltration. Comme le ratio Volume de stockage / Surface d'infiltration est plus important dans le cas du bassin de Foucart, la surface d'infiltration, et donc l'emprise, nécessaire pour gérer une pluie décennale (ou centennale), est moins grande que dans le cas de la noue 4 de Saint-Jean-de-Folleville. Ce résultat est en partie lié aux caractéristiques des pluies retenues, qui sont de type orageuses, avec une intensité maximale très forte sur un pas de temps court.

Cependant, les résultats des mesures sur les noues d'infiltration (paragraphe 3.2) ont montré que lorsque le ratio Volume / Surface d'infiltration augmente, la vitesse d'infiltration diminue. **Un dimensionnement basé sur le seul critère du volume centennal peut conduire à des vitesses d'infiltration très faibles :**

- Un volume important à infiltrer sur une petite surface conduit à une immersion prolongée du fond de l'aménagement,
- La végétation ne peut plus se développer dans le fond (en dehors des massettes, joncs, saules...), et la porosité du sol diminue,
- L'aménagement reste longtemps en eau et risque de déborder pour des pluies rapprochées.



Figure 55 : Exemples d'aménagements avec un temps de séjour élevé, en lien avec une disparition de la végétation herbacée, et un développement de végétation de zone humide, voire un colmatage de la surface d'infiltration

Le dimensionnement d'un aménagement d'infiltration consiste donc à rechercher le ratio Volume / Surface d'infiltration optimal, afin de préserver la vitesse d'infiltration tout en permettant un stockage suffisant, dans une perspective de limitation de l'emprise au sol.

Prise en compte de la répartition des aménagements dans l'espace – exemple de noues en cascade

La modélisation peut aussi permettre d'étudier la répartition des aménagements dans l'espace et son effet sur l'efficacité globale des aménagements de gestion des eaux pluviales.

Par exemple, dans le cas de 2 noues en cascade, la noue la plus efficace peut-elle compenser la noue moins efficace, et si oui dans quelle mesure ?

Disposition des noues	% Volume infiltré	Nb surverse moyen /an	Volume max surversé (T 100 ans)
N3 / N4 séparées	86%	16	16,9m ³
N3 / N4 en cascade	89%	10	16,7m ³

Figure 56 : Gain de performance dans le cas de noues en cascades (exemple des noues 3 et 4 de Saint-Jean-de-Folleville – Cas de la noue la moins efficace en amont)

Une association de noues en cascade permet de compenser un peu le manque d'efficacité de certaines noues. La noue plus performante située en aval peut stocker la surverse de la noue moins efficace, mais uniquement pour les événements où elle-même ne déborde pas déjà. Dans le cas d'un événement extrême, comme toutes les noues débordent, le gain est quasi nul, en dehors du ralentissement lié au parcours de l'eau (non modélisé).

Evidemment, dans le cas où la noue la moins performante est située en aval, ou si les 2 noues ont la même efficacité, il n'y a pas d'effet de compensation.

Conclusion sur l'intérêt de la modélisation

La modélisation basée sur une chronique de pluie réelle (10 ans) permet d'apprécier le fonctionnement des aménagements d'infiltration des eaux pluviales sur le long terme.

L'intérêt particulier des modèles présentés ici sur des noues et sur un bassin d'infiltration est qu'ils sont calés sur des mesures de terrain en conditions réelles.

La modélisation fournit des indicateurs d'efficacité des aménagements d'infiltration, notamment :

- Période de retour de surverse, qui est un indicateur de l'efficacité de l'aménagement en termes de réduction des inondations. Elle dépend en particulier de la forme de l'aménagement ;
- Taux d'infiltration moyen (Volume infiltré / Volume ruisselé total), qui est un indicateur de l'efficacité de l'aménagement en termes de réduction du ruissellement et de recharge de la nappe. Ce taux atteint au moins 80%, même pour des petits aménagements de type noue avec une vitesse d'infiltration faible (5 mm/h).

Enfin, la modélisation présente un intérêt pour la conception et le dimensionnement des aménagements d'infiltration. Il apparaît que le critère principal est le ratio Volume / Surface d'infiltration. **Le dimensionnement d'un aménagement résultera d'un compromis entre la surface d'infiltration et le volume de stockage, afin de préserver la capacité d'infiltration tout en limitant la fréquence de surverse.**

2.2. Enseignements pour le dimensionnement et la conception des techniques alternatives

Le principal enseignement de cette étude est que **l'infiltration des eaux pluviales urbaines est possible dans notre région, sur des sols de limons des plateaux**. Les vitesses d'infiltration observées varient de quelques mm/h à quelques dizaines de mm/h.

De plus, pour des aménagements bien conçus, la **vitesse d'infiltration ne semble pas diminuer avec le temps**.

Critères de dimensionnement

Forme de l'aménagement

Les résultats des mesures réalisées sur les noues d'infiltration semblent indiquer qu'un profil évasé est plus favorable à l'infiltration. D'un autre côté, le volume de stockage est déterminant pour gérer des événements pluvieux extrêmes.

Dans un contexte urbain où la surface disponible est limitée, **le dimensionnement d'un aménagement résultera d'un compromis entre la surface d'infiltration et le volume de stockage, afin de préserver la capacité d'infiltration sur le long terme tout en limitant la fréquence de surverse**.

Surface d'infiltration

Le rapport Surface d'infiltration / Surface active est un critère important pour optimiser les performances de l'aménagement, en particulier en termes de part d'eau de pluie infiltrée sur le long terme.

Volume

Le volume de stockage est le paramètre principal déterminant l'efficacité de l'aménagement en termes de prévention des inondations. Le volume à gérer est fonction de la surface active et de la période de retour de dimensionnement retenue.

Cependant, un dimensionnement basé sur le seul critère du volume peut conduire à des vitesses d'infiltration très faibles. Comme indiqué précédemment, le rapport volume / surface d'infiltration ne doit pas être trop élevé, afin de limiter le temps de séjour de l'eau dans l'aménagement et ainsi préserver la capacité d'infiltration sur le long terme.

Types d'aménagement et répartition dans l'espace

Les aménagements d'infiltration peuvent être combinés avec d'autres types d'aménagements de gestion des eaux pluviales, au sein d'une même opération. C'est d'ailleurs une stratégie couramment utilisée.

Des aménagements complémentaires, avec éventuellement plusieurs fonctionnalités (par exemple une mare tampon avec une double fonction : hydraulique et biodiversité), peuvent être mis en place pour gérer les volumes excédentaires lors des événements extrêmes.

Les noues drainées apparaissent également comme des solutions intéressantes du point de vue de la vitesse d'infiltration. Même si l'eau est rejetée en surface, elle est préalablement filtrée et tamponnée dans les noues. Les noues drainées peuvent nécessiter également la mise en place d'un aménagement complémentaire pour gérer les événements extrêmes. Elles sont aussi utilisées dans certains pays pour filtrer l'eau avant réutilisation (FAWB Monash University, 2009).

Rôle de la végétation

La présence de végétation semble voir un effet bénéfique sur la vitesse d'infiltration. Les racines et les organismes associés participent au maintien de la porosité du sol. Dans le cadre de cette étude, il n'a malheureusement pas été possible de comparer l'effet de différents types de végétation (herbacée, arbustive...), avec des formes racinaires et des profondeurs d'enracinement différentes.

Perspectives

Les modes de gestion des eaux pluviales ont beaucoup évolué depuis 10 ou 20 ans. Cette étude permet de faire le point sur le fonctionnement des aménagements passés à l'échelle régionale, et d'en tirer quelques enseignements. Les « techniques alternatives » sont encore jeunes, et ont certainement besoin de mûrir. Ce serait donc une erreur de figer une fois pour toute des règles de conception.

Par contre, il est nécessaire de **continuer à évaluer sur le long terme** ces nouveaux modes de conception.

Enfin, d'autres solutions de gestion des eaux pluviales peuvent émerger, comme la **réduction des surfaces imperméabilisées**, en association avec des aménagements d'infiltration.

3. Réalisation des techniques alternatives

3.1. Réalisation

Même s'il n'a pas été possible de le vérifier à travers les mesures réalisées, les données bibliographiques (Ouvry, et al., 2012) et des retours d'expérience indiquent qu'un tassement du sol entraîne une forte diminution de la vitesse d'infiltration. Il apparaît donc primordial de **protéger les surfaces dédiées à l'infiltration vis-à-vis du tassement** par les engins de chantier.

Le positionnement des autres réseaux et des organes annexes (regards, coffrets) doit tenir compte de l'extension de la surface immergée lors du remplissage des aménagements d'infiltration. A noter qu'en cas de débordement de l'aménagement, le niveau de l'eau dépasse la cote de surverse de quelques cm.



Figure 57 : regard de branchement d'eaux usées dans une noue (à gauche), coffret électrique dans l'emprise de la zone immergée lors de la surverse d'une noue (à droite)

Des dépôts de limon dans les aménagements d'infiltration peuvent se produire lors des travaux, en cas de ruissellement sur des surfaces en terre. Si ce phénomène peut réduire la vitesse d'infiltration, il n'est pas sûr que cet effet persiste une fois la végétation développée.



Figure 58 : dépôt de limon dans une noue lors de travaux de construction de maisons dans un lotissement neuf

3.2. Contrôle après réalisation

Comme pour d'autres types d'équipements de gestion de l'eau (réseaux d'assainissement, stations d'épuration...), il serait nécessaire de contrôler le fonctionnement des aménagements de gestion des eaux pluviales après réalisation.

Pour contrôler les aménagements d'infiltration, il est possible d'utiliser les méthodes de mesure globales mises en œuvre dans le cadre de cette étude. Elles ont pour objectif de mesurer la vitesse d'infiltration moyenne sur l'ensemble d'un aménagement, qui pourra être comparée à la valeur prise en compte pour le dimensionnement. De plus, ces méthodes nécessitent de réaliser un levé topographique fin pour mesurer notamment le volume de stockage, qui pourra ainsi également être contrôlé.

4. Gestion et entretien

D'autres questions se posent sur la pérennité des aménagements d'infiltration des eaux pluviales, notamment sur leur entretien et leur devenir dans le temps.

Comme indiqué précédemment, une végétation bien développée, associée à un sol vivant, favorise l'infiltration de l'eau. On peut d'ailleurs se demander s'il est nécessaire de tondre le fond d'un aménagement d'infiltration, ou si une fauche annuelle par exemple serait préférable du point de vue de l'infiltration, tout en allégeant les contraintes d'entretien.



Figure 59 : Différents modes d'entretien de la végétation sur des noues d'un même site

Les sites concernés par cette étude sont généralement entretenus par la collectivité, mais parfois aussi par les riverains, dans le cas de lotissements privés. C'est aussi le cas des aménagements de gestion des eaux pluviales à la parcelle, qui n'ont pas été étudiés dans le cadre de ce travail.

Cela pose la question de l'appropriation de ces « techniques alternatives » par les usagers. Les échanges avec les riverains rencontrés lors des mesures de terrain ont parfois montré leur méconnaissance du rôle et du fonctionnement des aménagements de gestion des eaux pluviales de leur propre rue.



Figure 60 : Exemples de noues d'infiltration « court-circuitées »

Ce manque d'information conduit dans quelques cas à la dégradation des aménagements d'infiltration situés sur le domaine public, la présence d'eau sur la durée pouvant inquiéter les riverains.

Les aménagements d'infiltration sont parfois modifiés, à l'occasion d'un réaménagement de l'espace public, par exemple lors de la création d'une nouvelle entrée de parcelle. Cela peut conduire à une réduction de la surface d'infiltration et du volume de rétention disponible.



Figure 61 : Exemple de création d'une entrée de parcelle sur une noue existante

Cette problématique est encore plus présente dans le cas des aménagements d'infiltration dans les parcelles privées, dont la connaissance peut être perdue à l'occasion d'un changement de propriétaire.

Au final, même si l'entretien est assez simple, il nécessite de sensibiliser les gestionnaires et les riverains au rôle et au fonctionnement des aménagements d'infiltration des eaux pluviales. De plus, la pérennité de ces aménagements sur le long terme implique de conserver la mémoire de leur emplacement et de leur fonction.

Conclusion

Le principal objectif de ce travail est d'acquérir des références sur l'infiltration des eaux pluviales sur les sols limoneux des plateaux de Seine-Maritime et de l'Eure, par des mesures in-situ dans des aménagements existants.

Près de 80 sites d'infiltration totale ou partielle ont été recensés dans le cadre de cette étude. Ces sites comportent chacun un ou plusieurs aménagements, qui peuvent être de différents types : bassin d'infiltration, noue d'infiltration, noue drainée, tranchée drainante.

Des mesures d'infiltration in-situ ont été réalisées sur 3 sites avec des noues (noues d'infiltration ou noues drainées) et 4 bassins d'infiltration, entre novembre 2015 et janvier 2018. Il s'agit uniquement de sites publics, situés sur des sols de limons plus ou moins épais, et âgés de 2 à 15 ans au moment des mesures.

Du point de vue méthodologique, sur les 3 méthodes de mesure mises en œuvre, il apparaît que les mesures globales sur toute la surface d'un aménagement sont les plus fiables, car elles dépendent peu des conditions initiales de teneur en eau du sol.

Les vitesses d'infiltration mesurées à saturation sont comprises entre 1 et 10 mm/h dans les bassins, entre 2 et 20 mm/h dans les noues d'infiltration, et entre 5 et 50mm/h dans les noues drainées. Ces dernières ne sont cependant pas des aménagements d'infiltration au sens strict, puisque les eaux drainées sont ensuite rejetées en surface.

Pour les aménagements d'infiltration « stricte », la forme de l'aménagement conditionne la vitesse d'infiltration. La végétation semble être également un paramètre important, mais la faible diversité des couverts testés ne permet pas de conclure. Enfin, on n'observe pas de diminution des vitesses d'infiltration avec l'âge des aménagements.

La modélisation basée sur une chronique de pluie réelle (10 ans) permet d'apprécier le fonctionnement des aménagements d'infiltration des eaux pluviales sur le long terme. L'intérêt particulier des modèles présentés ici sur des noues et sur un bassin d'infiltration est qu'ils sont calés sur des mesures de terrain en conditions réelles. La modélisation fournit des indicateurs d'efficacité des aménagements d'infiltration existants, et présente un intérêt pour la conception et le dimensionnement des aménagements d'infiltration futurs.

Il apparaît que le critère de dimensionnement principal est le ratio Volume / Surface d'infiltration. Le dimensionnement d'un aménagement résultera d'un compromis entre la surface d'infiltration et le volume de stockage, afin de préserver la capacité d'infiltration tout en limitant la fréquence de surverse.

Les méthodes de mesure globales mises en œuvre dans le cadre de cette étude peuvent également être utilisées pour contrôler le fonctionnement des aménagements d'infiltration après réalisation.

Perspectives

Dans le cadre de ce travail, des mesures d'infiltration ont été réalisées spécifiquement sur des noues et des bassins sur sols de limons. Des mesures complémentaires pourraient être menées afin de tester d'autres modalités :

- Différents types de couverts végétaux (herbacée, arbustive...), avec des formes racinaires et des profondeurs d'enracinement différentes,
- Des aménagements d'infiltration enterrés (tranchées drainantes),
- Des sols autres que des limons.

Pour cela, il serait cependant nécessaire de trouver des sites qui disposent des caractéristiques recherchées et qui soient adaptés pour ce type de mesures.

D'un point de vue opérationnel, les résultats de ce travail fournissent des pistes pour la conception et le dimensionnement des aménagements d'infiltration dans le contexte régional sur sols de limons. L'outil de modélisation développé et calé à partir des mesures de terrain, pourrait être utilisé sur d'autres sites. Il s'agirait de tester notamment d'autres formes d'aménagements (volume de stockage / surface d'infiltration), et de rechercher le meilleur compromis entre fréquence de surverse et surface d'emprise.

Enfin, une autre piste pour optimiser le fonctionnement des aménagements d'infiltration consiste à réduire la surface contribuant au ruissellement.



Figure 62 : Exemple d'espace public peu imperméabilisé dans une zone résidentielle (source : Agence de l'Eau Artois Picardie)

Des solutions alternatives à l'imperméabilisation des sols existent déjà, mais cette approche devrait être intégrée dans tous les projets d'urbanisation ou de réhabilitation de zones urbaines.



Figure 63 : Exemple de désimpermeabilisation d'une zone urbaine existante (Métropole de Starsbourg, dans Vers la ville perméable, comment désimpermeabiliser les sols, Bassin Rhône Méditerranée, mars 2017)

Pour finir, les échanges avec les riverains rencontrés lors des mesures de terrain ont parfois montré leur méconnaissance du rôle et du fonctionnement des aménagements de gestion des eaux pluviales de leur propre rue. Ceci peut conduire à un entretien inadapté voire à une dégradation de ces dispositifs. L'appropriation par les riverains conditionne la pérennité des aménagements d'infiltration des eaux pluviales, sur le domaine public et encore plus dans les parcelles privées.

Bibliographie

- AESN. (2011). *Document d'orientation pour une meilleure maîtrise des pollutions dès l'origine du ruissellement.*
- AESN. (2015). *Le SDAGE 2016-2021 du bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands.*
- Barraud, Le Coustumer, Perrodin, Delolme, Winiarski, Bedell, et al. (2006). *Guide technique : Recommandations pour la faisabilité, la conception et la gestion des ouvrages d'infiltration en milieu urbain.*
- CERTU. (2003). *La ville et son assainissement.*
- Chossat. (2005). *La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols. Choix des méthodes.*
- Communauté Urbaine de Bordeaux. (2014). *Les solutions compensatoires d'assainissement pluvial. Guide de conception/réalisation à l'usage des professionnels.*
- FAWB Monash University. (2009). *Adoption Guidelines for Stormwater Biofiltration Systems.*
- Flanagan, K., Tedoldi, D., Branchu, P., & Gromaire, M.-C. (2017, Juin). Caractérisation du fonctionnement d'un ouvrage de gestion à la source du ruissellement de voirie : approche par modélisation hydrologique et par cartographie de la contamination du sol. *La Houille Blanche.*
- Gonzalez-Merchan. (2012). *Amélioration des connaissances sur le colmatage des systèmes d'infiltration d'eaux pluviales.*
- Le Coustumer. (2008). *Colmatage et rétention des éléments traces métalliques dans les systèmes d'infiltration des eaux pluviales. Thèse.*
- Leroy, M.-C. (2015). *Etude intégrée de l'abattement en contaminants dans un système Eau/Sol/Plante. Problématique des aménagements de voiries urbaines. Thèse.*
- Moura. (2008). *Méthode d'évaluation des performances des systèmes d'infiltration des eaux de ruissellement en milieu urbain. Thèse .*
- Ouvry, Coufourier, Richet, Lhériveau, Pivain, Martin, et al. (2012). *Maîtrise du ruissellement et de l'érosion des sols en Haute-Normandie. Expérimentations sur les pratiques culturales 2001-2010.*
- Ouvry, Richet, Bricard, Lhériveau, Bouzid, & Saunier. (2012). *Fascines et haies pour réduire les effets du ruissellement érosif. Caractérisation de l'efficacité et conditions d'utilisation.*
- Programme ECOPLUIES. (2009). *L'infiltration en questions - Recommandations pour la faisabilité, la conception et la gestion des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain.*
- Proton. (2008). *Etude hydraulique des tranchées de rétention/infiltration. Thèse.*

