

353E_v2 - FÉVRIER 2017

ÉTUDES ET RECHERCHES

ÉLÉMENTS MODULAIRES
EN BÉTON POUR REVÊTEMENT
DES OUVRAGES D'INFILTRATION
DES EAUX PLUVIALES : Référentiel
technique

JENNIFER FALEYEUX





■ Études et Recherches
JFX/CM
DC009 / Diffusion des connaissances scientifiques

Eléments modulaires en béton pour revêtement des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales : référentiel technique



353.E V2

par
Jennifer FALEYEUX

Avant-propos

Ce rapport est articulé en deux parties :

- la première partie est destinée au lecteur qui souhaite apprécier très rapidement si l'étude évoquée le concerne, et donc si les méthodes proposées ou si les résultats indiqués sont directement utilisables pour son entreprise ;
- la deuxième partie de ce document est plus technique ; on y trouvera donc tout ce qui intéresse directement les techniciens de notre industrie.

© 2015 CERIB – CS 10010 – 28233 Epernon Cedex

ISSN 0249-6224 – EAN 9782857552529

353.E – novembre 2015/353.E V2 – février 2017

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction
par tous procédés réservés pour tous pays.

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de son article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon exposant son auteur à des poursuites en dommages et intérêts ainsi qu'aux sanctions pénales prévues à l'article L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle.

Sommaire

1. Synthèse générale de l'étude	5
1.1. Contexte et résultats	5
1.1.1. Contexte sur les eaux pluviales en France	5
1.1.2. Référentiel sur les produits drainants en béton	5
1.1.3. Résultats de l'étude	6
1.2. Référentiel technique	7
1.2.1. Objet et domaine d'application	7
1.2.2. Références normatives	8
1.2.3. Prescriptions relatives aux matériaux	8
1.2.4. Prescriptions relatives aux produits	8
1.3. Protocole de mesure de la capacité d'infiltration des surfaces en produits en béton préfabriqué	16
1.3.1. Principe	16
1.3.2. Appareillage	16
1.3.3. Préparation de l'essai	20
1.3.4. Mode opératoire	21
1.3.5. Détermination du coefficient de perméabilité	22
1.3.6. Compte-rendu d'essai	22
2. Dossier de l'étude	25
2.1. Introduction / Généralités	25
2.1.1. Législation des eaux pluviales	25
2.1.2. Impacts de l'urbanisation /enjeux de l'infiltration des eaux pluviales	27
2.1.3. Concept de surface drainante : fonctions visées	28
2.1.4. Possibilités de mise en œuvre d'ouvrages d'infiltration	31
2.1.5. Principe du dimensionnement hydraulique	32
2.1.6. Applications visées en béton préfabriqué	32
2.2. Solutions en béton préfabriqué	34
2.2.1. Pavés poreux et dalles poreuses	34
2.2.2. Pavés à joints larges	35
2.2.3. Pavés à ouvertures de drainage (Pavés évidés ou perforés)	36
2.2.4. Dalles drainantes	37
2.3. Conception des ouvrages	38
2.3.1. Dimensionnement hydraulique	38
2.3.2. Dimensionnement mécanique	51
2.4. Caractéristiques des différentes solutions et réponses aux exigences fonctionnelles	52
2.4.1. Infiltration des eaux pluviales	52
2.4.2. Tenue au trafic et durabilité	61
2.4.3. Résistance aux sollicitations climatiques	65
2.4.4. Esthétique	66
2.4.5. Sécurité des utilisateurs	67

2.5. Bonnes pratiques de mise en œuvre et d'entretien	68
2.5.1. Principes de pose	68
2.5.2. Entretien	70
2.6. Conclusion	72
Bibliographie	73
Annexes	77
Annexe 1 – Eléments de choix du matériau de jointoiement/remplissage	77
Annexe 2 – Eléments Statistiques	81
Index des figures	83
Index des tableaux	84

1. Synthèse générale de l'étude

1.1. Contexte et résultats

1.1.1. Contexte sur les eaux pluviales en France

Dans le cadre de la *Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/EC)*, des orientations de gestion équilibrée et durable de la ressource en eau, ainsi que des objectifs de qualité et de quantité des eaux sont définis sur les grands bassins hydrographiques. Les collectivités définissent ensuite des zonages pluviaux, c'est-à-dire des prescriptions de limitation de l'imperméabilisation et du ruissellement sur différentes zones, afin de gérer les eaux pluviales.

Dans le cas de nouvelles constructions, les autorités peuvent fixer des valeurs limites de débit à rejeter au réseau, ou refuser le raccordement au réseau, il est alors nécessaire de recueillir (par exemple par infiltration) et de stocker éventuellement les eaux pluviales avant rejet dans le réseau ou au milieu naturel.

Ainsi il est de plus en plus fait usage de revêtements perméables, qui permettent une gestion des eaux pluviales à la parcelle. Les revêtements perméables infiltrent les eaux qui tombent directement sur la surface des produits, mais peuvent aussi infiltrer les eaux de ruissellement de surfaces imperméables proches, selon leur perméabilité.

L'utilisation de cette « technique alternative » peut contribuer à :

- Renouveler les eaux souterraines et de remonter les niveaux des nappes phréatiques ;
- Eviter une saturation des réseaux existants ou des milieux naturels en cas de nouvelle imperméabilisation, ce qui diminue les risques d'inondations ;
- Eviter la concentration en polluants par le ruissellement des eaux pluviales ;
- Conserver un air humide et donc de diminuer les îlots de chaleur en ville, mais aussi d'alimenter la végétation présente.

1.1.2. Référentiel sur les produits drainants en béton

Les normes européennes existantes (**NF EN 1338** [1] pour les pavés et **NF EN 1339** [2] pour les dalles) n'intègrent pas les spécificités des revêtements perméables. En France, il n'existe pas de recommandation spécifique sur les produits en béton pour les revêtements drainants.

Cependant, la Belgique dispose de la prescription technique **PTV 121** [40] sur les dalles drainantes, ainsi que de la prescription technique **PTV 122** [41] sur les revêtements perméables en béton. De la même manière, la norme allemande **DIN 18507** [42] traite des pavés en béton poreux, et les recommandations « BGB-Richtlinie Nicht genormte Betonprodukte » [43] donnent quelques indications sur les dalles drainantes.

Cette étude visait à définir un référentiel technique professionnel français sur ces familles de produits. Trois familles ont été retenues : les pavés poreux, les pavés à joints larges, ainsi que les dalles drainantes.

1.1.3. Résultats de l'étude

Sur la base notamment d'essais de caractérisation des revêtements, l'étude a permis de rédiger un référentiel technique pour la profession, spécifique aux produits en béton pour l'infiltration des eaux pluviales. Ce référentiel est présenté en 1.2.

Ce référentiel détermine les caractéristiques fonctionnelles des pavés et dalles en béton drainants et formule les exigences auxquelles ces produits de pavage doivent satisfaire : caractéristiques géométriques, résistance à l'abrasion, résistance mécanique, perméabilité...

De plus, un essai de perméabilité a été développé afin de pouvoir mesurer le coefficient de perméabilité du revêtement d'ouvrages d'infiltration. Le protocole est détaillé en 1.3.

Le coefficient de perméabilité déterminé par cet essai constitue alors un élément de dimensionnement nécessaire pour les concepteurs d'ouvrages d'infiltration. Le protocole d'essai pourrait être introduit dans un futur référentiel de certification.

Note : La capacité d'infiltration, ou perméabilité d'un revêtement est son aptitude à se laisser traverser par un fluide de référence sous l'effet d'un gradient de pression. Cette aptitude est mesurée par un coefficient de perméabilité ou conductivité hydraulique, exprimé en mètres par secondes.

Cet essai permet de mesurer le coefficient de perméabilité de l'ensemble « produits et matériaux de jointoiement ou de remplissage des vides ». Il ne prend pas en compte l'influence du lit de pose et des couches de fondations.

Cet essai est réalisé en grandeur réelle compte tenu que :

- Des essais antérieurs de perméabilité sur pavés poreux ont montré une grande dispersion des résultats, en raison de la sensibilité des mesures à la composition du béton et aux paramètres de fabrication ;
- Il est nécessaire de prendre en compte la contribution des joints, afin d'être représentatif des conditions de service ;
- Il est nécessaire d'assurer une infiltration verticale, ce qui ne pourrait pas être réalisé avec un essai à échelle réduite d'un tube à essai placé sur un produit seulement.

La méthode de conception hydraulique des ouvrages est aussi détaillée au paragraphe 2.3.1. Cette méthode permet de déterminer le coefficient de perméabilité requis pour le revêtement de l'ouvrage d'infiltration en fonction :

- De la pluie type à infiltrer définie par le maître d'ouvrage : durée de la pluie, période de retour...
- Des caractéristiques du projet : surfaces dont on veut récupérer les eaux pluviales, coefficients de Montana applicables sur le lieu du projet...
- D'un coefficient de colmatage ou d'un coefficient de sécurité.

Les bonnes pratiques de mise en œuvre et d'entretien sont également rappelées en 2.5.

1.2. Référentiel technique

1.2.1. Objet et domaine d'application

Ce référentiel détermine les caractéristiques des pavés et dalles en béton drainants et formulent les exigences auxquelles ces produits = doivent satisfaire.

Les produits concernés sont les produits drainants destinés aux revêtements de sol permettant l'infiltration des eaux pluviales dans le sous-sol et qui sont appropriés pour la circulation de véhicules légers.

Les produits d'infiltration en béton préfabriqué peuvent être classés en plusieurs catégories :

- Les pavés poreux : produits de pavage en béton poreux à granulométrie ouverte, conçus de manière à avoir une très grande porosité connectée. Ainsi l'eau s'écoule principalement à travers le produit. Les joints entre produits contribuent également à l'infiltration des eaux pluviales.
- Les pavés à joints larges : pavés en béton usuel, séparés par des écarteurs intégrés ou rapportés, créant des joints élargis de 5 mm à 30 mm, qui représentent généralement aux alentours de 10 % de la surface revêtue. Pour ces revêtements, l'écoulement de l'eau se fait à travers les joints, dont le matériau de remplissage doit donc permettre cette infiltration. Pour cela, on utilise un matériau comportant peu de fines.
- Les pavés à ouvertures de drainage : les pavés évidés ou perforés sont des pavés en béton usuel qui comportent des ouvertures dans leur épaisseur, en partie courante ou sur leur pourtour. L'eau s'infiltre par ces cavités dont le matériau de remplissage doit satisfaire des exigences de perméabilité.
- Les dalles drainantes : dalles comportant de larges réservations dans le sens de l'épaisseur, qui laissent s'infiltrer l'eau. Le pourtour des dalles est parfois muni d'un profil qui forme également des cavités lors de la pose, ou permet l'emboîtement des dalles. Les ouvertures peuvent être soit engazonnées, soit remplies de gravillons ou de sable grossier.

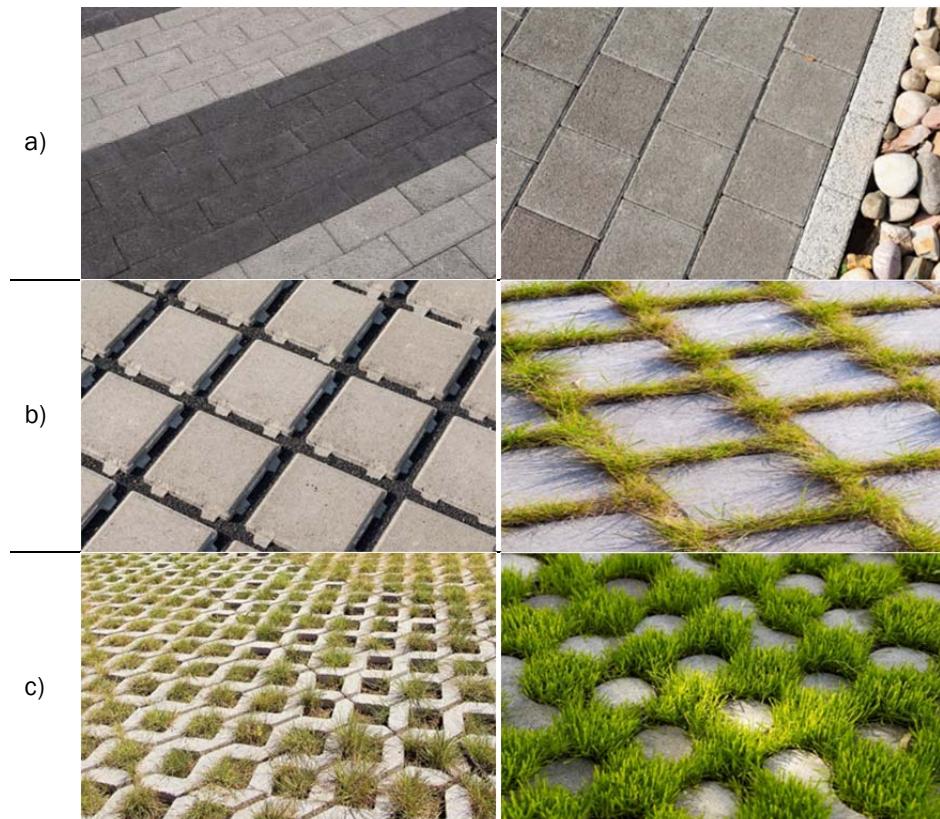


Figure 1 – Produits étudiés : pavés poreux (a), pavés à joints larges (b), et dalles drainantes (c)

Ce référentiel se réfère aux dispositions appropriées des normes usuelles **NF EN 1338** [1] pour les pavés et **NF EN 1339** [2] pour les dalles, ainsi que **NF P 98-335** [3] pour la mise en œuvre.

Note : Les produits de pavage poreux sont classés en pavés ou en dalles, en cohérence avec les dispositions des normes NF EN 1338 [1] et NF EN 1339 [2] :

- Si la longueur hors-tout divisée par l'épaisseur est inférieure ou égale à quatre, alors le produit est considéré comme un pavé ;
- Si la longueur hors-tout divisée par l'épaisseur est supérieure à quatre, alors le produit est considéré comme une dalle.

1.2.2. Références normatives

NF EN 1338 : Pavés en béton - Prescriptions et méthodes d'essai, AFNOR, Février 2004.

NF EN 1339 : Dalles en béton - Prescriptions et méthodes d'essai, AFNOR, Février 2004.

NF P 98-335 : Chaussées urbaines - Mise en œuvre des pavés et dalles en béton, des pavés en terre cuite et des pavés et dalles en pierre naturelle, AFNOR, Mai 2007.

1.2.3. Prescriptions relatives aux matériaux

Les dispositions des normes **NF EN 1338, § 4** pour les pavés en béton et **NF EN 1339, § 4** pour les dalles en béton s'appliquent.

1.2.4. Prescriptions relatives aux produits

1.2.4.1. Généralités

Les dispositions des **NF EN 1338, § 5.1** pour les pavés en béton et **NF EN 1339, § 5.1** pour les dalles en béton s'appliquent.

1.2.4.2. Caractéristiques géométriques

Les dispositions des **NF EN 1338, § 5.2** pour les pavés en béton et **NF EN 1339, § 5.2** pour les dalles en béton s'appliquent.

1.2.4.3. Caractéristiques physiques et mécaniques

1.2.4.3.1. Généralités

Les dispositions sont basées sur les normes **NF EN 1338, § 5.3** pour les pavés en béton et **NF EN 1339, § 5.3** pour les dalles en béton. Le cas échéant, elles sont complétées ou modifiées par les dispositions suivantes.

1.2.4.3.2. Résistance aux agressions climatiques

- Méthode d'essai

Les dispositions des **NF EN 1338, § 5.3.2.1** pour les pavés en béton et **NF EN 1339, § 5.3.2.1** pour les dalles en béton s'appliquent, à savoir que la résistance aux agressions climatiques est déterminée à l'aide d'essais conformes aux Annexes D (résistance au gel-dégel) ou aux Annexes E (absorption d'eau) des normes **NF EN 1338** et **NF EN 1339**.

- Performance

Les produits doivent être conformes aux prescriptions suivantes :

- La résistance aux agressions climatiques correspond à une absorption d'eau inférieure à 6,5 % en masse. Cette exigence n'est pas applicable sur les produits poreux.
- Lorsqu'il existe des conditions spécifiques, comme le contact fréquent des surfaces avec des sels de dé verglaçage en cas de gel, les conditions suivantes doivent être remplies pour les produits drainants non poreux : la perte de masse par unité de surface après l'essai de gel-dégel doit être inférieure à 1 kg/m² en moyenne, avec aucun résultat individuel supérieur à 1,5 kg/m². Cette exigence n'est pas applicable sur les produits poreux.

1.2.4.3.3. Résistance mécanique

- Méthode d'essai

Les dispositions des **NF EN 1338, § 5.3.3.1** pour les pavés en béton et **NF EN 1339, § 5.3.3.1** pour les dalles en béton s'appliquent, à savoir que la résistance caractéristique à la rupture doit être déterminée à l'aide d'essais réalisés conformément aux Annexes F des normes **NF EN 1338** (traction par fendage) ou **NF EN 1339** (flexion).

Pour les pavés à joints larges et les pavés à ouvertures de drainage (évidés ou perforés), l'essai décrit dans l'Annexe F de la norme **NF EN 1338** est applicable, sous réserve que le calcul de la résistance à la rupture par fendage s'effectue par :

$$T = 0,637 * k * P/S$$

Avec :

- T la résistance en MPa ;
- P la charge de rupture mesurée en N ;
- k un facteur de correction d'épaisseur du pavé ;
- S la surface de rupture en mm², $S = l * t$;
- l la moyenne des deux mesurages de la longueur de rupture, en mm, l'un réalisé en haut l1 et l'un réalisé en bas l2 : $l = \frac{l_1+l_2}{2}$;
- t l'épaisseur en mm moyenne du pavé au niveau du plan de rupture sur trois valeurs t1, t2 et t3 : $t = \frac{t_1+t_2+t_3}{3}$.

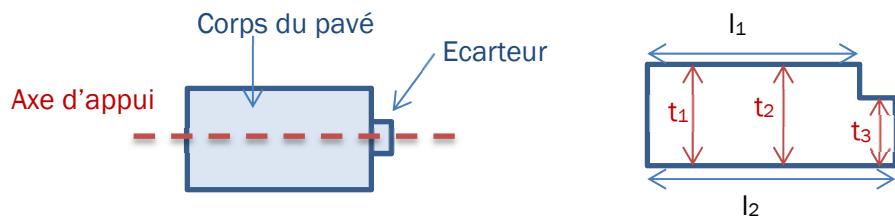


Figure 2 – Vue du dessus et vue de côté d'un pavé avec écarteur

Note : Même lorsque les axes des appuis coïncident avec l'axe des écarteurs, il est sécuritaire de calculer la surface du plan de rupture avec les moyennes des longueurs et des épaisseurs.

Pour les dalles drainantes, l'essai de flexion décrit dans l'Annexe F de la norme **NF EN 1339** est applicable, sous réserve que le calcul de la résistance à la rupture en flexion s'effectue par :

$$T = \frac{3 * P * L}{2 * b * t^2}$$

Avec :

- T la résistance en MPa ;
- P la charge de rupture mesurée en N ;
- L la distance entre supports en mm ;
- b la largeur de la dalle au niveau du plan de rupture en mm ;
- t la hauteur de la dalle au niveau du plan de rupture en mm.

À la rupture des dalles drainantes, on observe plusieurs sections de rupture du fait de leur géométrie. On calcule alors b comme la somme des différentes largeurs des sections de rupture, et t comme la moyenne des différentes épaisseurs des sections de rupture.



Figure 3 – Rupture d'une dalle drainante

Avec :

$$b = b_1 + b_2 + b_3$$

$$t = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{3}$$

Les classes de résistance sont ensuite déterminées en cohérence avec les tableaux 5 et 7 de la norme **NF EN 1339** :

Classe	Marquage	Valeur caractéristique MPa	Valeur minimale MPa
1	S	3,5	2,8
2	T	4,0	3,2
3	U	5,0	4,0

Tableau 1 – Tableaux de détermination des classes de résistance à la flexion (selon **NF EN 1339** tableau 5) applicables pour les dalles drainantes

Identification de la classe	Marquage	Charge de rupture caractéristique kN	Charge de rupture minimale kN
30	3	3,0	2,4
45	4	4,5	3,6
70	7	7,0	5,6
110	11	11,0	8,8
140	14	14,0	11,2
250	25	25,0	20,0
300	30	30,0	24,0

NOTE Pour des considérations de conception, il convient de faire particulièrement attention aux conditions de charge possibles sur les dalles dépassant 600 mm.

Tableau 2 – Tableaux de détermination des classes de charges de rupture à la flexion (selon **NF EN 1339** tableau 7) applicables pour les dalles drainantes

- Performance

Les produits doivent être conformes aux prescriptions suivantes :

- Pour les pavés en béton poreux la résistance caractéristique à la rupture en traction par fendage n'est pas inférieure à 3,0 MPa, conformément aux exigences du Fascicule 70 titre II [4].
- Pour les pavés à joints larges ou les pavés à ouvertures de drainage (évidés ou perforés), la résistance en traction par fendage doit être supérieure ou égale à 3,6 MPa, aucun test individuel ne doit être inférieur à 2,9 MPa, et aucune charge de rupture ne doit être inférieure à 250 N/mm.
- Pour les dalles drainantes, la charge de rupture caractéristique doit être déclarée en se référant aux valeurs définies pour les classes de la norme **NF EN 1339**.

1.2.4.3.4. Résistance à l'abrasion

- Méthodes d'essais

Les dispositions des **NF EN 1338, § 5.3.4.1** pour les pavés en béton et **NF EN 1339, § 5.3.4.1** pour les dalles en béton s'appliquent.

L'essai de référence d'abrasion au Disque Large est décrit aux Annexes G des normes **NF EN 1338** et **NF EN 1339**.

- **Performance**

Les classes de résistance à l'abrasion doivent être exprimées conformément aux **§ 5.3.4.1** des normes **NF EN 1338** et **NF EN 1339**.

Les produits essayés doivent avoir une résistance à l'abrasion correspondant au moins à la classe 3 (marquage H), c'est-à-dire aucune empreinte d'abrasion au disque large supérieure à 23 mm.

1.2.4.3.5. Résistance à la glissance

Les dispositions des **NF EN 1338**, **§ 5.3.5.1** pour les pavés en béton et **NF EN 1339**, **§ 5.3.5.1** pour les dalles en béton s'appliquent, à savoir que les pavés et dalles en béton sont supposés présenter une résistance satisfaisante à la glissance ou au dérapage, sous réserve que l'intégralité de leur surface supérieure n'ait pas été meulée et/ou polie pour obtenir une surface très lisse.

Si dans un cas exceptionnel une valeur est exigée pour la résistance à la glissance ou au dérapage, les essais au pendule de frottement décrits en Annexe I de la norme **NF EN 1338** pour les pavés et en Annexe I de la norme **NF EN 1339** pour les dalles sont applicables.

1.2.4.3.6. Perméabilité à l'eau

- **Méthodes d'essais**

Le protocole d'essai pour la mesure du coefficient de perméabilité est donné en 1.3.

Le but de l'essai est de mesurer la quantité d'eau qui s'infiltre au cours d'un certain temps sur une surface de 1 m² de revêtement perméable, sous une charge constante de 1 cm d'eau réglée à l'aide d'un trop-plein.

- **Performance**

Le revêtement perméable constitué des produits en béton et d'un matériau de jointoiement ou de remplissage des vides représentatif des matériaux préconisés par le fabricant doit être testé de manière à déterminer le coefficient de perméabilité.

1.2.4.4. Caractéristiques visuelles

Les dispositions des **NF EN 1338**, § 5.4 pour les pavés en béton et **NF EN 1339**, § 5.4 pour les dalles en béton s'appliquent.

1.2.4.5. Synthèse des exigences

1.2.4.5.1. Pavés poreux

Le tableau suivant présente une synthèse des caractéristiques que les pavés poreux doivent respecter pour satisfaire les différentes exigences fonctionnelles. Il précise les exigences fonctionnelles visées, les références des méthodes d'essais et le cas échéant les classes de performances de la norme **NF EN 1338** retenues.

SPÉCIFICATIONS GÉNÉRALES :			
Caractéristiques		Spécifications	Modalités d'essai
Infiltration des eaux pluviales	Coefficient de perméabilité	Selon la pluie visée	Essai CERIB
Caractéristiques visuelles (esthétique)	Aspect, texture et couleur	§ 5.4 de NF EN 1338	Annexe J de NF EN 1338
Caractéristiques géométriques (esthétique, facilité de mise en œuvre)	Épaisseur de la couche de parement	≥ 4 mm	Annexe C de NF EN 1338
	Longueur et largeur	<ul style="list-style-type: none"> – pour les pavés d'épaisseur < 100 mm : ± 2 mm – pour les pavés d'épaisseur ≥ 100 mm : ± 3 mm 	
	Épaisseur	<ul style="list-style-type: none"> – pour les pavés d'épaisseur < 100 mm : ± 3 mm – pour les pavés d'épaisseur ≥ 100 mm : ± 4 mm 	
	Différence entre 2 mesurages de l'épaisseur sur un même pavé	≤ 3 mm	
	Planéité et courbure si longueur et/ou largeur > 300 mm	Tableau 3 de NF EN 1338	
	Pour les diagonales > 300 mm	Différence entre 2 diagonales ≤ 3 mm (classe K de NF EN 1338)	
Résistance mécanique (tenue au trafic)	Résistance à la rupture en traction par fendage (MPa)	Valeur caractéristique : 3,0	Annexe F de NF EN 1338
	Charge de rupture	Aucun résultat < 250 N/mm	
Résistance aux agressions climatiques (pérennité)	Absorption d'eau	PND	Annexe E de NF EN 1338
Résistance à l'abrasion (esthétique, pérennité, tenue au trafic)	Essai au disque large	PND ou ≤ 23 mm (Classe H de NF EN 1338)	Annexe G de NF EN 1338
PERFORMANCE OPTIONNELLE :			
Résistance à la glissance et au dérapage (sécurité)	Uniquement pour les produits polis ou meulés	Déclaration de la valeur obtenue par l'essai	Annexe I de NF EN 1338
Résistance renforcée au gel/dégel avec sels de dé verglaçage (résistance aux agressions climatiques)		PND	Annexe D de NF EN 1338

PND : Performance Non Déterminée

1.2.4.5.2. Pavés à joints larges et pavés à ouvertures de drainage (évidés ou perforés)

Le tableau suivant présente une synthèse des caractéristiques que les pavés à joints larges et pavés à ouvertures de drainage (évidés ou perforés) doivent respecter pour satisfaire les différentes exigences fonctionnelles. Il précise les exigences fonctionnelles visées, les références des méthodes d'essais et le cas échéant les classes de performances de la norme **NF EN 1338** retenues.

SPÉCIFICATIONS GÉNÉRALES :			
Caractéristiques		Spécifications	Modalités d'essai
Infiltration des eaux pluviales	Coefficient de perméabilité	Selon la pluie visée	Essai CERIB
Caractéristiques visuelles (esthétique)	Aspect, texture et couleur	§ 5.4 de NF EN 1338	Annexe J de NF EN 1338
Caractéristiques géométriques (esthétique, facilité de mise en œuvre)	Épaisseur de la couche de parement	≥ 4 mm	Annexe C de NF EN 1338
	Longueur et largeur	<ul style="list-style-type: none"> – pour les pavés d'épaisseur < 100 mm : ± 2 mm – pour les pavés d'épaisseur ≥ 100 mm : ± 3 mm 	
	Épaisseur	<ul style="list-style-type: none"> – pour les pavés d'épaisseur < 100 mm : ± 3 mm – pour les pavés d'épaisseur ≥ 100 mm : ± 4 mm 	
	Différence entre 2 mesurages de l'épaisseur sur un même pavé	≤ 3 mm	
	Planéité et courbure si longueur et/ou largeur > 300 mm	Tableau 3 de NF EN 1338	
	Pour les diagonales > 300 mm	Différence entre 2 diagonales ≤ 3 mm (classe K de NF EN 1338)	
Résistance mécanique (tenue au trafic)	Résistance à la rupture en traction par fendage (MPa)	Valeur caractéristique : 3,6 Borne : 2,9	Annexe F de NF EN 1338
	Charge de rupture	Aucun résultat < 250 N/mm	
Résistance aux agressions climatiques (pérennité)	Absorption d'eau	$\leq 6,5$ % en masse (révision NF EN 1338)	Annexe E de NF EN 1338
Résistance à l'abrasion (esthétique, pérennité, tenue au trafic)	Essai au disque large	≤ 23 mm	Annexe G de NF EN 1338
PERFORMANCE OPTIONNELLE :			
Résistance à la glissance et au dérapage (sécurité)	Uniquement pour les produits polis ou meulés	Déclaration de la valeur obtenue par l'essai	Annexe I de NF EN 1338
Résistance renforcée au gel/dégel avec sels de dé verglaçage (résistance aux agressions climatiques)		Perte de masse gel/dégel + sel $\leq 1,0$ kg/m ² en moyenne avec aucun résultat individuel $> 1,5$ kg/m ²	Annexe D de NF EN 1338

1.2.4.5.3. Dalles drainantes

Le tableau suivant présente une synthèse des caractéristiques que les dalles drainantes doivent respecter pour satisfaire les différentes exigences fonctionnelles. Il précise les exigences fonctionnelles visées, les références des méthodes d'essais et le cas échéant les classes de performances de la norme **NF EN 1339** [2] retenues.

SPÉCIFICATIONS GÉNÉRALES :			
Caractéristiques		Spécifications	Modalités d'essai
Infiltration des eaux pluviales	Coefficient de perméabilité	Selon la pluie visée	Essai selon protocole CERIB décrit au paragraphe 1.3 du présent rapport
Caractéristiques visuelles (esthétique)	Aspect, texture et couleur	§ 5.4 de NF EN 1339	Annexe J de NF EN 1339
Caractéristiques géométriques (esthétique, facilité de mise en œuvre)	Épaisseur de la couche de parement	≥ 4 mm	Annexe C de NF EN 1339
	Longueur et largeur	<ul style="list-style-type: none"> – pour les dalles de longueur ou largeur ≤ 600 mm : ± 2 mm – pour les dalles de longueur ou largeur > 600 mm : ± 3 mm 	
	Épaisseur	± 3 mm	
	Différence entre 2 mesurages de la longueur, de la largeur ou de l'épaisseur d'une même dalle	≤ 3 mm	
	Planéité et courbure si longueur et/ou largeur > 300 mm	Tableau 3 de NF EN 1339	
	Pour les diagonales > 300 mm	Différence entre 2 diagonales ≤ 3 mm (classe K de NF EN 1339)	
Résistance mécanique (tenue au trafic)	Résistance à la rupture en flexion (MPa)	Déclaration des valeurs obtenues par l'essai	Annexe F de NF EN 1339
	Charge de rupture		
Résistance aux agressions climatiques (pérennité)	Absorption d'eau	$\leq 6,5$ % en masse (classe B de NF EN 1339)	Annexe E de NF EN 1339
Résistance à l'abrasion (esthétique, pérennité, tenue au trafic)	Essai au disque large	PND	Annexe G de NF EN 1339
PERFORMANCE OPTIONNELLE :			
Résistance à la glissance et au dérapage (sécurité)	Uniquement pour les produits polis ou meulés	Déclaration de la valeur obtenue par l'essai	Annexe I de NF EN 1339
Résistance renforcée au gel/dégel avec sels de dé verglaçage (résistance aux agressions climatiques)		Perte de masse gel/dégel + sel $\leq 1,0$ kg/m ² en moyenne avec aucun résultat individuel $> 1,5$ kg/m ²	Annexe D de NF EN 1339

PND : Performance Non Déterminée

1.3. Protocole de mesure de la capacité d'infiltration des surfaces en produits en béton préfabriqué

Le présent protocole décrit les méthodes de préparation et de réalisation des essais d'évaluation de la capacité d'infiltration d'eau au travers de revêtements réalisés en produits de voirie en béton préfabriqué.

Il s'applique aux pavés poreux et dalles poreuses, pavés à joints larges, pavés à ouvertures de drainage (pavés évidés ou perforés) et dalles drainantes et à leur matériau de jointoientement ou de remplissage des vides.

1.3.1. Principe

Sur une surface de 1 m² de revêtement perméable constitué de produits en béton et de leur matériau de jointoientement ou de remplissage des vides, sous une charge constante de 1 cm d'eau, l'essai consiste à mesurer la quantité d'eau qui s'infiltra en un temps donné. Le schéma de principe est le suivant :

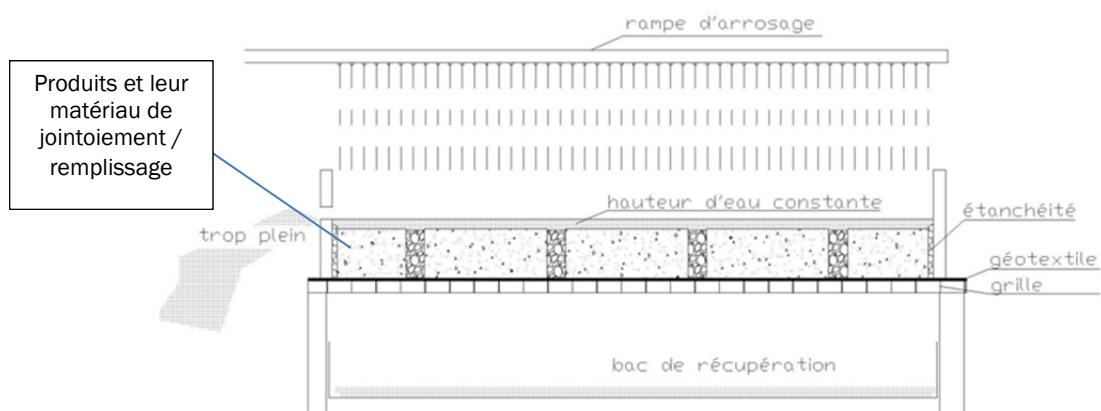


Figure 4 – Schéma de principe de l'essai de détermination du coefficient de perméabilité

Note : Une fois l'essai terminé, les produits peuvent être utilisés pour d'autres essais de caractérisation (ex : mécanique)

1.3.2. Appareillage

1.3.2.1. Bâti d'essai

- Grille : Une grille de dimensions supérieures à 1 m * 1 m (de maille 5 cm par exemple) permet d'installer le revêtement perméable. Cette grille doit être horizontale et située à une hauteur suffisante pour insérer le bac de récupération sous la surface d'essai (Une hauteur de 60 cm est considérée suffisante).



Figure 5 – Préparation d'un essai d'infiltration

- Cadre et trop-plein : le cadre destiné à entourer la surface testée doit assurer l'étanchéité sur la circonference de la surface testée en supprimant les chemins privilégiés de l'eau le long du cadre et il doit assurer un écoulement vertical dans la surface utile durant l'essai. Un dispositif de trop-plein doit être prévu pour limiter la hauteur d'eau à 10 mm de la surface supérieure des produits une fois le revêtement en place. La hauteur d'eau effective sera mesurée lors de l'essai.

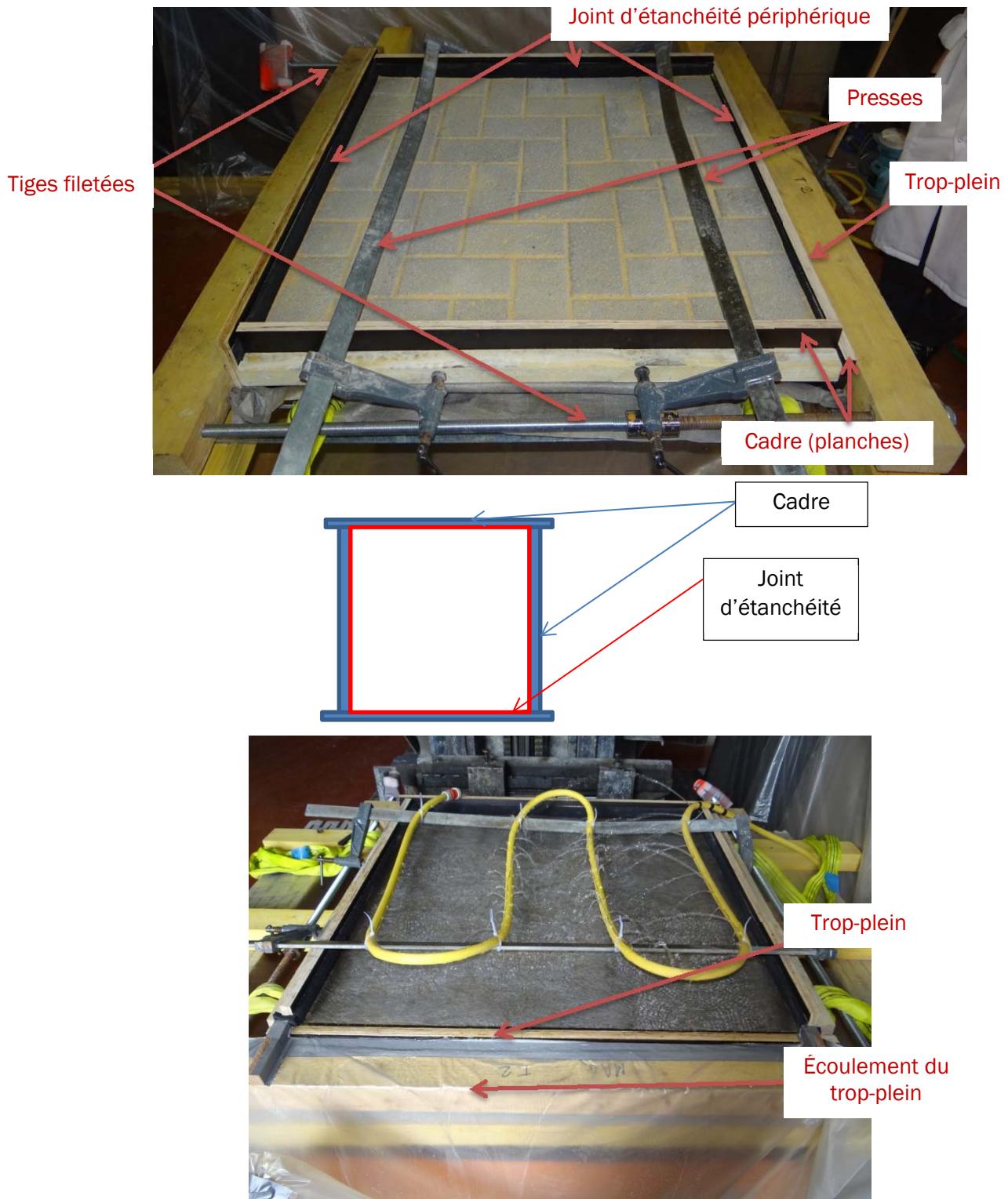


Figure 6 – Vue d'un montage pour déterminer la capacité d'infiltration

- Géotextile : le géotextile doit présenter un coefficient de perméabilité suffisamment élevé pour ne pas modifier les résultats de l'essai et doit présenter des ouvertures de filtration en cohérence avec le matériau de jointoient ou de remplissage prévu. Le géotextile doit être interposé entre la grille et le revêtement.
- Bac de récupération : le bac doit avoir un volume suffisant pour permettre de récupérer les eaux infiltrées. Ce bac doit pouvoir être vidangé et inséré sous le dispositif.

- Arrivée d'eau et rampe d'arrosage : une arrivée d'eau munie d'une rampe d'arrosage doit être installée à quelques centimètres au-dessus de la surface d'infiltration, de manière à simuler une pluie.



Figure 7 – Géotextile installé sur la grille pour les essais d'infiltration

1.3.2.2. Corps d'épreuve

- Produits : les produits drainants en béton.
- Matériau de jointoientement ou de remplissage des vides : le matériau de jointoientement/remplissage est celui choisi par le demandeur, ou recommandé par le fabricant.

1.3.2.3. Dispositifs de mesure

- Débitmètre : un débitmètre adapté à la plage de mesure doit être utilisé pour mesurer le débit d'alimentation de la rampe d'arrosage.
- Appareil de mesure de la quantité d'eau infiltrée, par exemple un peson de précision 1 kg.
- Chronomètre : un chronomètre doit être utilisé pour repérer les différents horaires d'essai.

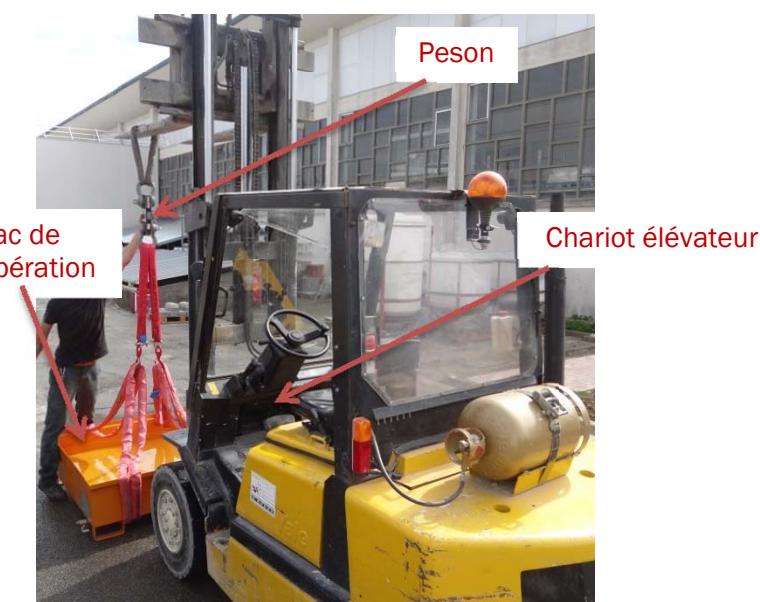


Figure 8 – Pesée du bac de récupération à l'aide du chariot élévateur

1.3.3. Préparation de l'essai

- Les produits sont installés sur le bâti (après découpes éventuelles des produits de rives), de manière à ce que la surface d'essai soit centrée. Les produits sont posés directement sur la grille recouverte du géotextile, sans lit de pose.

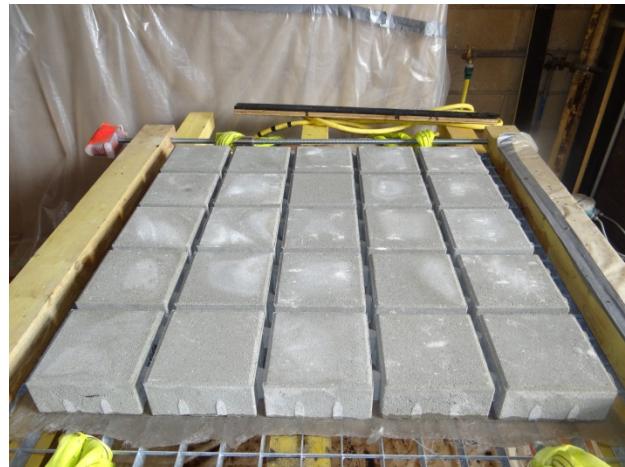


Figure 9 – Installation des produits sur le bâti

- Le cadre est installé (voir schéma de principe), puis étanché.
- La portion de surface drainante (produit béton et matériau de jointolement ou de remplissage) est mise en œuvre sur le bâti horizontal : les joints ou ouvertures de drainage sont remplis à refus du matériau de jointolement/remplissage préconisé. La mise en œuvre s'effectue selon les préconisations de pose (compactage, balayage, tassement...).



Figure 10 – Remplissage des ouvertures de drainage

- Un géotextile doit être disposé sur les produits, de manière à répartir la pluie et éviter que des trous ne se forment dans le matériau de remplissage et les joints sous l'action de la pression de l'eau.
- Une rampe d'arrosage équipée d'un débitmètre doit simuler une pluie répartie régulièrement sur le revêtement.



Figure 11 – Préparation de l'essai d'infiltration – géotextile de surface et rampe d'arrosage

1.3.4. Mode opératoire

Le chronomètre est enclenché lorsque l'arrivée d'eau est ouverte. On note la valeur du débit lue au débitmètre.

On mesure l'horaire à partir duquel l'infiltration est effective h_1 .

La rampe d'arrosage simule une pluie répartie régulièrement sur le revêtement. Le débit d'eau est augmenté progressivement jusqu'à ce que le niveau d'eau soit maintenu constant à la hauteur du trop-plein (situé à 10 mm au-dessus de la surface d'essai). La mesure ne commence que lorsque les produits sont saturés en eau, et le débit est constant. Les conditions d'essai sont maintenues constantes durant toute la durée de l'essai (débit et température). L'horaire d'établissement du trop-plein h_2 est noté.

Après quelques minutes, le débit est constant, et le bac de récupération est placé sous le dispositif à l'aide du chariot élévateur. On note alors l'horaire de début d'essai h_3 .



Figure 12 - Insertion du bac de récupération sous la surface d'essai

Suivant le coefficient de perméabilité attendu et le volume du bac de récupération, on en déduit une durée théorique d'essai. On peut retenir 10 minutes pour les pavés poreux et les dalles drainantes remplies de mélange terre-sable, et 2 à 3 minutes pour les pavés à joints larges.

On note l'horaire de fin d'essai h_4 lorsque le bac est enlevé.

On coupe l'arrivée d'eau, en notant l'horaire h_5 , puis on note l'horaire h_6 lorsque le trop-plein est évacué. Enfin, on relève l'horaire h_7 lorsque l'infiltration est terminée.

A partir des horaires notés, on peut déduire les différentes durées de l'essai :

- Durée de début d'infiltration (h_1) ;
- Durée d'établissement du trop-plein (h_2) ;
- Durée d'essai ($h_4 - h_3$) ;
- Durée d'évacuation du trop-plein ($h_6 - h_5$) ;
- Durée d'arrêt d'infiltration ($h_7 - h_5$).

Le bac rempli d'eau infiltrée est pesé grâce au peson.

1.3.5. Détermination du coefficient de perméabilité

Après récupération des eaux infiltrées pendant une durée t , il est possible de faire un calcul de coefficient de perméabilité. La soustraction de la masse du bac rempli d'eau et de la masse du bac à vide permet d'évaluer la quantité d'eau infiltrée pendant la durée déterminée par le chronomètre. La valeur lue sur le débitmètre permet une vérification.

Pour chaque surface, le coefficient de perméabilité verticale K (ou conductivité hydraulique) est calculé avec la formule :

$$K = \frac{m}{\rho St} \frac{h}{h + h_w} \text{ [m/s]}$$

Avec :

- m : masse d'eau = $m(\text{bac} + \text{eau}) - m(\text{bac vide})$ [kg]
- ρ : masse volumique de l'eau [kg/m³] : $\rho = 1\ 000\ kg/m^3$
- S : surface d'essai [m²]. La surface à prendre en compte pour le calcul du coefficient de perméabilité est déterminée par mesures. Elle correspond à la surface totale intérieure du cadre de 1 m² moins la surface occupée par les joints d'étanchéité sur les bords du cadre.
- t : durée totale de l'essai [s]
- h : hauteur d'infiltration (épaisseur du produit) [m]
- h_w : hauteur d'eau (constante réglée par la hauteur du trop-plein) [m]

Les essais sont répétés 3 fois.

Les mesures doivent être effectuées sur un échantillon saturé et stabilisé (tassemement des matériaux de jointoient ou de remplissage). Une aspersion préalable peut alors être nécessaire.

Si les mesures présentent un écart de plus de 20 %, il est préférable de réitérer l'essai.

La valeur du coefficient de perméabilité du montage est alors la valeur moyenne entre les différents essais.

1.3.6. Compte-rendu d'essai

Le compte rendu d'essai doit contenir les informations suivantes :

- La date de l'essai ;
- Le nom des produits ;
- L'épaisseur des produits (cm) ;
- La nature et la quantité du matériau de remplissage/jointoient (kg) ;
- La masse du bac vide (kg) ;
- Les numéros des essais ;

- L'horaire à partir duquel l'infiltration est effective h_1 (min) ;
- L'horaire d'établissement du trop-plein h_2 ;
- Le débit mesuré sur le débitmètre (L/s) ;
- L'horaire du début d'essai h_3 (min) ;
- L'horaire de fin d'essai h_4 (min) (enlèvement du bac) ;
- L'horaire de la fermeture de l'arrivée d'eau h_5 (min) ;
- L'horaire d'évacuation du trop-plein h_6 (min) ;
- L'horaire de fin d'infiltration h_7 (min) ;
- La masse mesurée du bac rempli de l'eau infiltrée (kg) ;
- Les remarques éventuelles sur le protocole d'essai ;
- Le calcul du coefficient de perméabilité du revêtement.

Exemple de minute d'essai :

Date de l'essai				
Nom des produits				
Epaisseur des produits (cm)				
Nature du matériau remplissage/jointoiement				
Matériau remplissage (kg)				
Masse bac vide (kg)				
N° d'essai	1	2	3	4
h_1 début d'infiltration (min)				
h_2 établissement du trop-plein (min)				
Débit (L/s)				
h_3 début d'essai (min)				
h_4 fin d'essai (min) (enlèvement bac)				
h_5 fermeture de l'arrivée d'eau (min)				
h_6 évacuation du trop-plein (min)				
h_7 fin d'infiltration (min)				
Masse bac + eau infiltrée (kg)				
Remarques éventuelles				
Calcul du coefficient de perméabilité				

2. Dossier de l'étude

2.1. Introduction / Généralités

2.1.1. Législation des eaux pluviales

Dans le cadre de la mise en œuvre de la *Directive Cadre sur l'Eau (DCE)* du 23 octobre 2000 [18], les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) ont été mis en place à l'échelle des grands bassins hydrographiques en France. L'article L212-1 du *Code de l'Environnement* [21] précise que chaque bassin est doté d'un ou de plusieurs SDAGE qui fixent les orientations générales d'une « gestion équilibrée » et « durable » de la ressource en eau et des objectifs de qualité et de quantité des eaux.

À l'échelle du bassin versant, les SDAGE sont déclinés en SAGE (Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux) codifiés par les articles *L212-3 à L212.11 du Code de l'Environnement* [21]. Les SAGE sont adaptés au contexte local, avec des prescriptions plus détaillées en ce qui concerne la gestion des eaux pluviales. (Par exemple : « Sauf impossibilité, les eaux pluviales doivent être infiltrées. Dans le cas où les eaux pluviales ne pourraient pas être infiltrées, le débit de fuite de l'aménagement est limité, soit à la valeur du débit de fuite du terrain naturel avant aménagement, soit à Y l/s si le projet se situe en zone urbaine ». Ces valeurs Y de débit de fuite sont alors fixées par les collectivités.)

L'article *L.1331-1 du Code de la Santé Publique* [24] indique que «la commune peut fixer des prescriptions techniques pour la réalisation des raccordements des immeubles au réseau public de collecte des eaux usées et des eaux pluviales». Ainsi la collectivité peut refuser le raccordement des eaux pluviales, fixer des valeurs limites de débits à rejeter au réseau (rétention) ou fixer un rejet zéro au réseau (infiltration) à la parcelle.

Les collectivités doivent définir un zonage pluvial, comme décrit par l'article *L.2224-10 du Code Général des Collectivités Territoriales (CGCT)* [26] en détaillant «les zones où des mesures doivent être prises pour limiter l'imperméabilisation des sols et pour assurer la maîtrise du débit et de l'écoulement des eaux pluviales et de ruissellement» mais aussi «les zones où il est nécessaire de prévoir des installations pour assurer la collecte, le stockage éventuel et, en tant que de besoin, le traitement des eaux pluviales et de ruissellement lorsque la pollution qu'elles apportent au milieu aquatique risque de nuire gravement à l'efficacité des dispositifs d'assainissement». Ce zonage est soumis à enquête publique.

En fonction des insuffisances qualitatives (pollution du milieu naturel) et/ou quantitatives (inondations) mises en évidence, et en tenant compte de la vulnérabilité de secteurs identifiés, le territoire concerné est donc découpé en zones sur lesquelles sont fixés des seuils de limitation des débits et où sont positionnés d'éventuels dispositifs de rétention, de stockage et de traitement des eaux pluviales.

Ce zonage doit être annexé ou intégré au Plan Local d'Urbanisme (PLU) d'après l'article *L.123-1-5 du Code de l'Urbanisme* [23] avant le 1^{er} janvier 2015 pour les communautés ayant la compétence assainissement, et est soumis à évaluation environnementale (*art. R.122-17 du Code de l'Environnement* [21]).

Les limitations de débit de fuite fixées par les collectivités correspondent le plus souvent à la capacité d'infiltration du sol avant imperméabilisation, et varient généralement de 1 à 20 litres par seconde et par hectare. Voici quelques exemples de limitations fixées par les règlements (Schéma directeur d'assainissement pluvial) de quelques agglomérations :

- Le Plan Local d'Urbanisme de Toulouse fixe que le rejet des eaux pluviales et de ruissellement ne doit pas excéder un débit équivalent à 10 l/s/ha.
- À Lyon, les débits de rejet sont traditionnellement fixés à 5 l/s/ha en cas d'autorisation de rejet au réseau d'assainissement collectif.
- À Bordeaux, le PLU impose sur certaines zones que le débit rejeté soit inférieur à celui correspondant à un taux d'imperméabilisation de 35 à 55 % ou impose un rejet limité à 3 l/s/ha si l'imperméabilisation est supérieure à 55 %.

La loi portant engagement national pour l'environnement dite **Grenelle II du 12 juillet 2010** [19] renforce les objectifs des Schémas de Cohérence Territoriale (SCOT), ainsi que des Plans Locaux d'Urbanisme (PLU) et cartes communales notamment en ce qui concerne la trame verte et bleue et l'environnement.

Note : La possibilité pour les communes d'inciter à la gestion des eaux pluviales et à la mise en place de techniques alternatives via l'instauration d'une taxe sur l'imperméabilisation a été supprimée par la loi de finances de 2015.

Certains IOTA (Installations, Ouvrages, Travaux et Activités) doivent être déclarés ou autorisés auprès des services de la police de l'eau et des milieux aquatiques depuis la **Loi sur l'Eau de 1992** [20]. La liste en est définie dans le **Code de l'Environnement article R214-1** [21]. La rubrique 2.1.5.0 de la nomenclature IOTA relative aux rejets d'eaux pluviales dispose : « Rejet d'eaux pluviales dans les eaux douces superficielles ou sur le sol ou dans le sous-sol : la surface totale du projet, augmentée de la surface correspondant à la partie du bassin versant naturel dont les écoulements sont interceptés par le projet, étant :

- supérieure ou égale à 20 ha : IOTA soumis à autorisation (A) ;
- supérieure à 1 ha, mais inférieure à 20 ha : IOTA soumis à déclaration (D) ».

Tout maître d'ouvrage, public ou privé, doit élaborer un dossier Loi sur l'Eau si le projet d'aménagement concerné dépasse les seuils présentés ici.

Dans le dossier doivent figurer :

- le nom et adresse du demandeur ;
- l'emplacement sur lequel les IOTA doivent être réalisés ;
- un document précisant la nature, consistance, volume et objet des IOTA, rubriques de la nomenclature ;
- des documents d'incidences (Analyse de l'état initial du site et de son environnement, évaluation des incidences du projet, sites NATURA 2000, compatibilité SDAGE et SAGE, mesures correctrices ou compensatoires envisagées) ;
- un document présentant les moyens de surveillance et d'intervention en cas d'accident ou d'incident ;
- des éléments graphiques, plans ou cartes utiles à la compréhension du dossier.

2.1.2. Impacts de l'urbanisation /enjeux de l'infiltration des eaux pluviales

L'urbanisation croissante entraîne une imperméabilisation des surfaces et des effets négatifs :

- Les eaux pluviales ne s'infiltrent pas dans le sol, donc les nappes phréatiques ne sont pas rechargées et leur niveau est en baisse.
- Le ruissellement des eaux pluviales entraîne un écoulement rapide et de plus en plus important dans les canalisations (une surface imperméabilisée restitue de 4 à 20 fois plus d'eau par ruissellement qu'une surface naturelle). Le raccordement de nouvelles zones imperméables engendre donc un investissement non négligeable de redimensionnement des réseaux et de surdimensionnement des diamètres, ou entraîne une saturation ou une surcharge des réseaux existants et des milieux naturels (rivières, lacs...), ce qui cause aussi des crues plus fréquentes.
- Lors du ruissellement, les eaux pluviales se chargent en polluants accumulés par temps sec (matières en suspension (MES), métaux lourds..). Ces polluants présents dans l'atmosphère et sur le sol, les chaussées, ou les toitures sont dus aux transports, aux activités industrielles, au chauffage... Le ruissellement concentre ces polluants, et peut porter atteinte aux milieux récepteurs et menacer les usages de l'eau.
- L'eau ne s'évapore pas, donc l'air est moins humide, et cela contribue à l'augmentation des îlots de chaleurs en ville, d'autant plus que les revêtements imperméables s'échauffent au soleil. La vie des espaces verts est aussi affectée par ce climat urbain sec et chaud et l'absence d'infiltration d'eau.

Longtemps, l'objectif en terme d'assainissement pluvial était de collecter et d'évacuer les eaux le plus rapidement et le plus loin possible, via des réseaux enterrés, mais le « tout à l'égout » a des limites.

Afin de limiter les inondations et pollutions, des techniques alternatives en matière de gestion des eaux pluviales ont vu le jour. La gestion intégrée des eaux pluviales vise à gérer les eaux sur une plus petite surface (gestion à la parcelle), et au plus près du cycle hydrique naturel de l'eau, en créant pour l'eau des cheminements comparables à ceux qu'elle empruntait avant l'urbanisation : les eaux pluviales et de fonte des neiges peuvent pénétrer dans le sol, s'évaporer par les plantes et le sol, et s'infiltrer jusqu'à la nappe phréatique.

L'objectif est donc de limiter le ruissellement (en limitant la proportion d'espaces imperméabilisés et en aménageant des espaces à faible coefficient de ruissellement comme des espaces verts ou des surfaces drainantes), de favoriser l'infiltration directe et l'évaporation des eaux pluviales (via des ouvrages perméables ou des végétaux) et d'évacuer les eaux pluviales de manière différée, après rétention si nécessaire.

En créant des stockages provisoires pour retarder l'arrivée de l'eau aux exutoires tels que les réseaux d'assainissement, le débit sortant est écrété, comme sur la figure ci-après. Ainsi, on évite le surdimensionnement des réseaux.

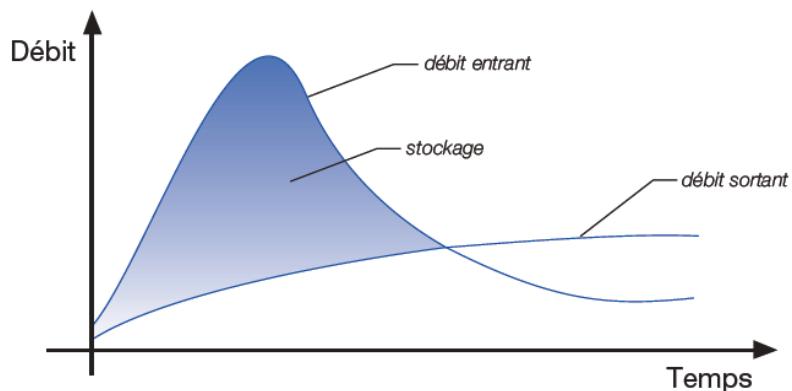


Figure 13 – Débits d'eaux pluviales entrants et sortants d'un dispositif de stockage provisoire

Cette gestion globale des eaux pluviales, pensée par tous les acteurs urbains (assainissement, urbanisme, voirie, paysager...) doit permettre de gérer les eaux pluviales sans aggraver les écoulements et pollutions en aval.

2.1.3. Concept de surface drainante : fonctions visées

2.1.3.1. Fonctions principales

Les techniques alternatives ou compensatoires ont pour but de compenser les effets du ruissellement, et remplissent trois fonctions principales de nature hydraulique :

- un rôle de collecte et d'introduction de l'eau dans le dispositif ;
- éventuellement un stockage temporaire in situ ;
- une restitution par infiltration ou à débit régulé vers l'aval.

Elles peuvent compléter les systèmes d'assainissement classiques (techniques compensatoires), ou s'y substituer (techniques alternatives).

Le but des ouvrages d'infiltration en éléments modulaires est de permettre aux eaux pluviales de s'infiltrer au plus proche de l'endroit où elles tombent, en limitant le ruissellement de surface. Les revêtements perméables des ouvrages d'infiltration forment une couche perméable, soit par leur structure propre (pavés de béton poreux par exemple), soit par leur mode d'assemblage (par exemple : pavés à joints larges, pavés à ouvertures de drainage (évidés ou perforés), dalles drainantes...). L'eau s'infiltra soit par les éléments modulaires eux-mêmes dans le cas d'éléments poreux, soit par les joints ou ouvertures garnis de sable, de gravillons, ou engazonnés.

Les eaux pluviales infiltrées peuvent être stockées temporairement dans la couche de fondation des ouvrages d'infiltration, et s'infiltrer ensuite dans le sol support. Si les capacités d'infiltration du sol en place sont insuffisantes, il peut être nécessaire de coupler l'infiltration avec un exutoire, et d'évacuer les eaux pluviales présentes dans la fondation, comme sur les schémas ci-après (Figure 14).

Les ouvrages d'infiltration permettent donc la collecte des eaux pluviales, la rétention et l'infiltration de celles-ci, l'évapotranspiration et le transfert du ruissellement.

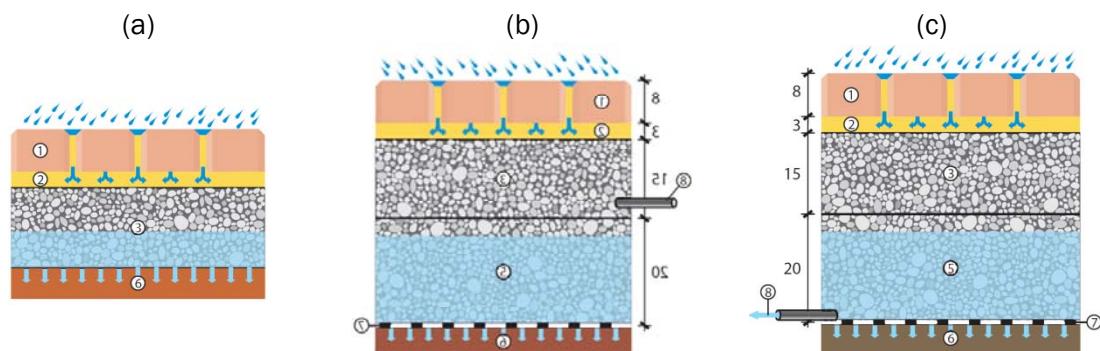


Figure 14 – Schéma de chaussées à structure réservoir : (a) infiltration directe, (b) infiltration et exutoire, (c) exutoire

L'intérêt des surfaces drainantes est donc, par temps de pluie, de réguler les débits dans les réseaux et les sous-sols. Les réseaux ne sont plus saturés, et les investissements pour les évacuations des eaux pluviales sont moindres. L'eau s'infiltra dans le sol et réduit la fréquence des inondations, tout en réalimentant les nappes phréatiques.

2.1.3.2. Fonctions additionnelles

2.1.3.2.1. Dépollution

Par temps de pluie, les surfaces drainantes piègent les polluants par infiltration, et évitent le lessivage des chaussées. Elles agissent donc comme un filtre dépollueur avant la nappe phréatique ou les exutoires, et limitent ainsi la pollution des milieux récepteurs.

Une étude allemande [38] sur des revêtements en pavés à joints larges garnis de différents matériaux de remplissage (gravillons 1/3 mm, gravillons 2/5 mm...) a montré que l'efficacité de rétention de pollution après une simulation de 18 années de service est de plus de 99 % pour le plomb et le cadmium, de plus de 98 % pour le cuivre, et entre 94 et 96 % pour le zinc.

Une seconde étude allemande [39] a montré que les pavés poreux retiennent plus de 94 % des métaux lourds en moyenne, d'après des tests en laboratoire.

2.1.3.2.2. Esthétique et sécurité

Lors de fortes pluies, l'eau s'infiltra directement dans la surface et ne stagne pas comme sur des revêtements imperméables. On évite alors les flaques d'eau peu esthétiques, les projections éventuelles, et même les risques d'aquaplanage sur la chaussée par exemple.

2.1.3.2.3. Développement durable

Par temps sec, les eaux pénétrées en surface peuvent s'infiltrer et réalimenter la nappe phréatique. L'eau s'évapore aussi plus facilement comme elle ne ruisselle plus, et permet de conserver une atmosphère humide, moins chaude et étouffante que dans des espaces complètement imperméabilisés, les surfaces drainantes améliorent ainsi l'environnement urbain et réduisent les îlots de chaleur.

Les surfaces d'infiltration contribuent au développement durable, d'une part en limitant les inondations, mais aussi puisqu'en interceptant les eaux pluviales au plus proche de leur lieu de chute, les rejets au milieu naturel sont moins pollués.

2.1.3.2.4. Stockage ou structure réservoir

Une chaussée à structure réservoir est une chaussée qui permet de gérer le cycle de l'eau en milieu urbain, en absorbant les événements pluvieux intenses, les stockant temporairement dans la structure même de la chaussée, puis en restituant ce volume à un débit faible, soit directement dans le sol en place (ex : infiltration), soit par un collecteur (ex :réseau), soit par une combinaison des deux possibilités, voir Figure 15 et Figure 16.

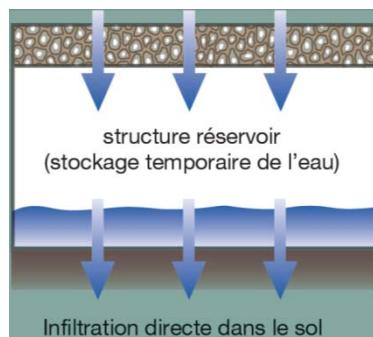


Figure 15 – Exemple de chaussée à structure réservoir avec restitution par infiltration dans le sol

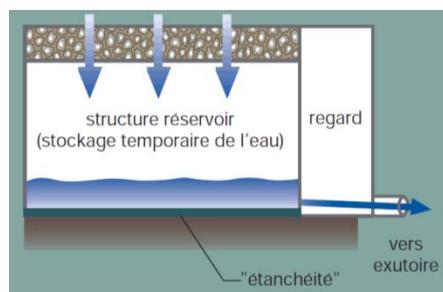


Figure 16 – Exemple de chaussée à structure réservoir avec restitution vers un exutoire

Comme une chaussée classique, les chaussées à structure réservoir doivent assurer aussi la tenue mécanique au trafic. Le principe des chaussées à structure réservoir s'inspire des conceptions originelles de voiries qui combinaient une fonction de circulation avec une fonction d'assainissement. Ce concept avait été abandonné pour les eaux usées pour des raisons d'hygiène, mais est tout à fait approprié pour les eaux pluviales.

Une chaussée à structure réservoir est une chaussée dont au moins une couche du corps de chaussée est constituée d'un matériau poreux ou drainant. L'entrée d'eau dans la structure est répartie à travers un revêtement drainant, et/ou ponctuelle via des puits d'infiltration ou caniveaux [29]. Dans le présent document, nous ne traiterons que du cas d'alimentation par un revêtement drainant.

Un complément à l'infiltration totale directe dans le sol (évacuation via des drains, raccordement au réseau via un orifice) est à mettre en place si le coefficient de perméabilité du sol support est trop faible ($K < 10^{-6} \text{ m/s}$). En cas de sous-sol imperméable, ou de risque de pollution de la nappe, on utilise uniquement une évacuation vers exutoire, sans aucune infiltration.

Note : En plus de l'eau qui ruisselle sur la chaussée, il est possible de stocker l'eau des toitures ou des voiries étanches proches selon la capacité du réservoir. Nous ne traiterons pas de ces cas particuliers.

2.1.4. Possibilités de mise en œuvre d'ouvrages d'infiltration

Chaque projet est différent, et il est nécessaire d'étudier les conditions de site avant d'installer des ouvrages d'infiltration.

On veillera à évaluer :

- La topographie du site (pentes, obstacles, exutoires possibles) et son contexte urbain du site (voies, réseaux, encombrement...) qui déterminent les vitesses et direction des écoulements naturels gravitaires.
- Le contexte géotechnique et hydrologique : la perméabilité des sols en place, leur capacité de rétention, la possibilité de créer des ouvrages souterrains, la présence et le niveau piézométrique de la nappe phréatique, les divers écoulements...
- Les conditions climatiques du site, à savoir les intensités, durées et périodes de retour des événements pluvieux à prendre en compte ; de manière à calculer les débits et volumes utiles pour le projet.
- Les exigences et prescriptions applicables sur le site (SDAGE, PLU, zonage pluvial, CCTP de marché...) en ce qui concerne les eaux pluviales.

2.1.4.1. Conditions sur la perméabilité du sol en place

La capacité d'infiltration des revêtements ou des sols est caractérisée par un coefficient de perméabilité ou conductivité hydraulique K (en m/s) correspondant à la vitesse d'infiltration d'un volume d'eau par unité de temps et par unité de surface.

D'après les « recommandations pour la faisabilité, la conception et la gestion des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain » [6], un sol dont le coefficient de perméabilité serait supérieur à 10^{-6} m/s serait envisageable pour une infiltration d'eaux pluviales de ruissellement. Sous cette limite, les volumes importants sur un court laps de temps lors d'une pluie d'orage ne seraient pas infiltrés.

A l'inverse, un sol trop perméable avec un coefficient de perméabilité élevé ($> 10^{-2}$ m/s par exemple) risque de polluer les sous-sols rapidement, et n'est donc pas recommandé, sauf en présence de filtre, prétraitement ou dispositif d'épuration.

Le coefficient de perméabilité du sol en place peut être estimé via des ordres de grandeur selon la nature du sol, comme ci-dessous, ou bien déterminé par un essai de type Porchet ou Guelph comme indiqué dans les normes **NF P 98-335** [3] et **NF DTU 64.1** [10].

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						
Possibilités d'infiltration	Excellent	Bonnes	Moyennes à faibles	Faibles à nulles							

Tableau 3 – Ordres de grandeur de la conductivité hydraulique dans différents sols
(Musy & Soutter, 1991)

2.1.4.2. Conditions sur l'environnement proche du projet

Les revêtements perméables ne sont pas adaptés dans les zones d'eau protégées, à cause de la pollution accidentelle possible par infiltration (périmètre de protection de captage d'eau potable, zone de Plan de Prévention de Risques, Zone Naturelle d'Intérêt Écologique...). De même, il est important de vérifier que le sol est propice à la présence d'eau (pollution directe par propagation dans des fissures, problèmes de dissolution des sols, problèmes de retrait-gonflement...).

Il est à noter que les surfaces d'infiltration ne peuvent pas être mises en œuvre si le niveau de la nappe phréatique est situé moins de deux mètres sous la base de la zone d'infiltration (nappe affleurante ou sub-affleurante), et que toute injection directe dans la nappe phréatique est proscrite, quelle que soit la nature des eaux ou le type de sol.

Dans les zones de forte utilisation de sels de dé verglaçage, l'usage de revêtements poreux est fortement déconseillé, à cause du risque de pollution de la nappe, et de dégradation éventuelle des produits.

2.1.5. Principe du dimensionnement hydraulique

Le dimensionnement hydraulique du revêtement d'une surface d'infiltration nécessite la connaissance :

- de la pluie type à infiltrer (définie par le maître d'ouvrage) ;
- des caractéristiques des surfaces dont on veut récupérer les eaux pluviales.

À partir de ces données, on détermine le coefficient de perméabilité requis du revêtement de la surface d'infiltration, en intégrant un coefficient de sécurité.

2.1.6. Applications visées en béton préfabriqué

Les produits préfabriqués en béton peuvent servir de revêtement de surface drainant sur les chaussées à faible trafic, telles que :

- Les parkings et zones de stationnement : parkings d'entreprises, de centres commerciaux ou supermarchés, emplacements de stationnements...
- Les voies faiblement circulées : zones 30, rues d'habitation, places et rues piétonnes, pistes cyclables et trottoirs.
- Les voiries de parcs, les aires de jeux, les allées et accès, les terrasses...



Accès de la caserne de pompiers, Colmar



Parking de la place Saint-Etienne devant la cathédrale, Auxerre



Parking vélo/moto, Bordeaux



Emplacements de parking, St Grégoire



Emplacements de parking, Lyss (Suisse)



Parking de l'Observatoire des énergies renouvelables, Oberhausbergen

Figure 17 – Exemples d'utilisation de produits en béton pour l'infiltration des eaux pluviales

Suivant leur capacité d'infiltration, ils peuvent aussi infiltrer les eaux ruisselées des surfaces adjacentes imperméables.

2.2. Solutions en béton préfabriqué

Les ouvrages d'infiltration en béton préfabriqué peuvent être classés en plusieurs catégories :

- les pavés poreux ou dalles poreuses ;
- les pavés à joints larges ;
- les pavés à ouvertures de drainage (évidés ou perforés) ;
- les dalles drainantes.

Ces pavés et dalles en béton drainants sont spécialement conçus pour permettre l'infiltration des eaux pluviales, et participent donc aux « techniques d'assainissement alternatives ». De plus, ces revêtements perméables peuvent permettre l'implantation d'une chaussée à structure réservoir.

Outre le concept inhérent à chaque produit, la variété des produits porte aussi sur :

- la géométrie (dimensions, formes, appareillages, calepinage) ;
- le jeu des couleurs et teintes (couleur des granulats, ajout de pigments, couleur du ciment) ;
- les textures via des traitements de surface sur béton frais (brossé, strié, lavé) ou sur béton durci (désactivé, acidé, gommé, sablé, bouchardé, poncé, grisé, poli, flammé, grenaillé, vieilli...).

Ces produits peuvent être mis en œuvre sur des chantiers neufs, ou lors d'une réhabilitation.

2.2.1. Pavés poreux et dalles poreuses

Les produits de pavage poreux sont classés en pavés ou en dalles, en cohérence avec les dispositions des normes **NF EN 1338** [1] et **NF EN 1339** [2] :

- Si la longueur hors-tout divisée par l'épaisseur est inférieure ou égale à quatre, alors le produit est considéré comme un pavé ;
- Si la longueur hors-tout divisée par l'épaisseur est supérieure à quatre, alors le produit est considéré comme une dalle.

Les pavés poreux et dalles poreuses sont des produits de pavage en béton poreux à granulométrie ouverte, conçus de manière à avoir une très grande porosité connectée. Ainsi l'eau s'écoule principalement à travers le produit. Les joints entre produits contribuent également à l'infiltration des eaux pluviales.



Figure 18 – Exemples de pavés poreux

2.2.2. Pavés à joints larges

Les revêtements de pavés à joints larges sont constitués de pavés en béton usuel, séparés par des écarteurs intégrés ou rapportés, créant des joints élargis de 5 mm à 30 mm, dont la surface représente généralement aux alentours de 10 % de la surface revêtue.

Pour ces revêtements, l'écoulement de l'eau se fait à travers les joints, dont le matériau de remplissage doit donc permettre cette infiltration. Pour cela, on utilise un matériau comportant peu de fines.



Figure 19 – Exemples de pavés à joints larges

2.2.2.1. Pavés à joints larges avec écarteur intégré

Les faces latérales des pavés sont pourvues de tenons d'écartements et/ou d'encoches afin de créer un joint élargi lors de la pose.



Figure 20 – Exemple de pavés à joints larges avec écarteurs intégrés

2.2.2.2. Pavés à joints larges avec écarteurs rapportés

Il est possible de poser des pavés usuels avec des écarteurs rapportés, en béton ou en plastique par exemple.

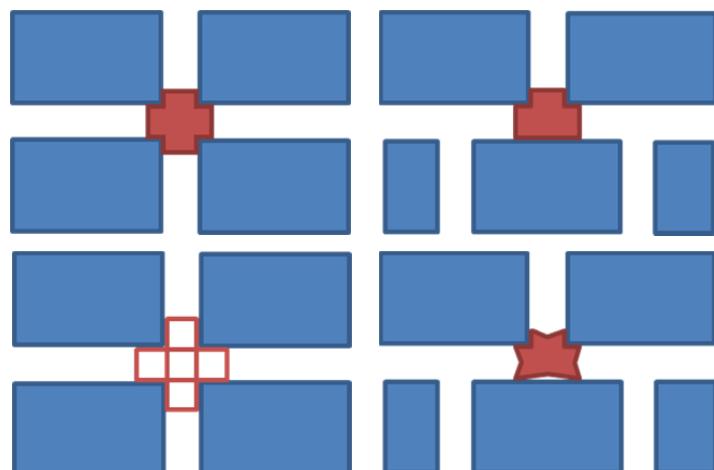


Figure 21 – Quatre exemples de calepinage de pavés (bleus) posés avec des écarteurs rapportés (rouges)

2.2.3. Pavés à ouvertures de drainage (Pavés évidés ou perforés)

Les pavés évidés ou perforés sont des pavés en béton usuel qui comportent des ouvertures dans leur épaisseur, en partie courante ou sur leur pourtour. L'eau s'infiltre par ces cavités dont le matériau de remplissage doit satisfaire des exigences de perméabilité.



Figure 22 – Exemples de pavés évidés ou perforés

2.2.4. Dalles drainantes

Les dalles drainantes comportent de larges réservations dans leur épaisseur, afin de laisser s'infiltrer l'eau. Le pourtour des dalles est parfois muni d'un profil qui forme également des cavités lors de la pose, ou permet l'emboîtement des dalles.

Les ouvertures peuvent être soit engazonnées, soit remplies de gravillons ou de sable grossier, par exemple de granulométrie 2/5 mm.



Figure 23 – Exemples de dalles drainantes

2.3. Conception des ouvrages

2.3.1. Dimensionnement hydraulique

2.3.1.1. Événements pluvieux

La capacité d'infiltration requise pour un projet d'ouvrage d'infiltration dépend notamment de la pluviométrie du lieu d'implantation. Cette pluviométrie est définie par des événements pluvieux.

Un événement pluvieux peut être caractérisé par plusieurs paramètres :

- sa durée totale (en minutes ou en heures) ;
- sa hauteur totale (en mm) ;
- ses hauteurs précipitées sur différentes durées (en mm) ;
- ses intensités maximales sur différentes durées (en mm/h) ;
- les périodes de retour de ces intensités (en mois ou en années).

2.3.1.1.1. Période de retour

La période de retour est le délai statistique entre des événements pluvieux. Elle s'exprime par le risque de défaillance et traduit le degré de protection vis-à-vis des débordements.

La circulaire interministérielle **INT 77-284** [5], actuellement en révision, précise que « le degré de protection à assurer résultera d'un nécessaire compromis entre l'aspiration à une protection absolue pratiquement irréalisable et le souci de limiter tant le coût de l'investissement que les sujétions d'exploitation. » « Il est souvent admis a priori qu'il est de bonne gestion de se protéger du risque de fréquence décennale. » « Dans les quartiers fortement urbanisés et dépourvus de relief, le maître d'ouvrage n'hésitera pas à calculer les collecteurs principaux en vue d'absorber des débits de période de retour 20 ans, voire 50 ans... ».

La norme européenne **NF EN 752** [9], relative à la conception des réseaux d'assainissement à l'extérieur des bâtiments, fixe, en l'absence de spécification locale particulière, des objectifs de protection des personnes et des biens contre les inondations sur la base du tableau suivant :

Lieu d'installation	Fréquence de calcul des inondations	
	Période de retour (1 sur «n» années)	Probabilité de dépassement pour 1 année quelconque
Zones rurales	1 sur 10	10 %
Zones résidentielles	1 sur 20	5 %
Centres ville/zones industrielles/zones commerciales	1 sur 30	3 %
Métro/passages souterrains	1 sur 50	2 %

Tableau 4 – Fréquences de calcul recommandées à utiliser avec des méthodes de conception complexes, tableau 3 de la norme **NF EN 752** [9]

En milieu urbain, on retient généralement une période de retour de 30 ans ou plus.

2.3.1.1.2. Hyéogramme

En représentant statistiquement les séries de pluies, et en calculant les différentes fréquences d'apparitions de ces événements, il est possible de déduire les abaques Intensité-Durée-Fréquence (IDF) et Hauteur-Durée-Fréquence (HDF). À l'aide de ces graphiques, on peut déterminer l'intensité maximale ou la hauteur maximale d'un événement pluvieux, suivant la durée totale de la pluie D et la période de retour T choisie pour le dimensionnement.

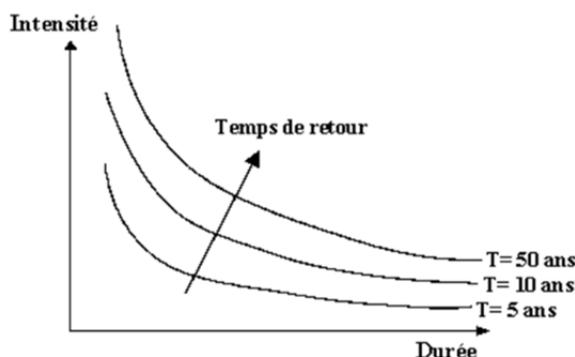


Figure 24 – Représentation schématique des courbes IDF

Une pluie de projet synthétique est ensuite définie par un hyéogramme type, diagramme de l'intensité de l'orage en fonction du temps. Ce hyéogramme est construit à partir des courbes IDF des pluies.

La pluie de projet est définie par sa période de retour T, sa durée D, et sa forme qui peut être :

- Un rectangle d'intensité constante i_{moy} correspondant à l'intensité maximale i_{max} ($i_{moy} = i_{max}$) ;

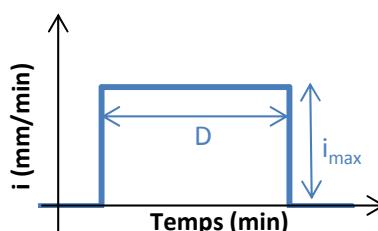


Figure 25 – Représentation d'une pluie de projet rectangulaire

- Un hyéogramme « simple triangle » de même intensité moyenne i_{moy} , mais dont l'intensité maximale i_{max} est le double de la valeur moyenne. (D : durée totale de la pluie (mn), t_p : instant du pic (mn), i_{max} : intensité maximale de la pluie (mm/mn)) ;

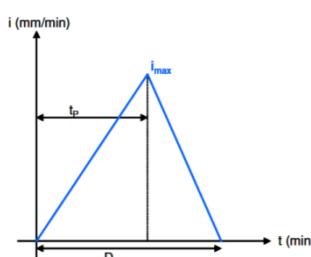


Figure 26 – Représentation d'une pluie de projet simple triangle

- Un hyéogramme double-triangle, symétrique ou asymétrique. D'autres paramètres sont alors nécessaires : la durée totale de la pluie, la durée de pluie intense, et l'intensité qui correspond à chacune de ces durées. (D_1 : durée totale de la pluie (mn), D_2 : durée de l'épisode intense (mn), t_p : instant du pic (mn), i_i : intensité maximale avant le pic intense (mm/mn), $i_{2\max}$: intensité maximale de la pluie intense (mm/mn)) ;

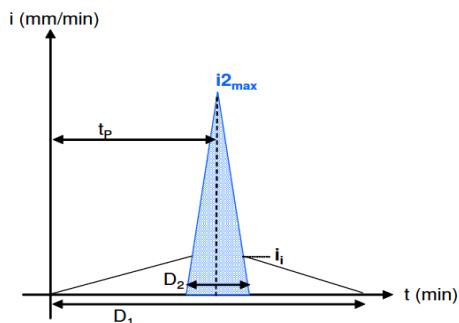


Figure 27 – Représentation d'une pluie de projet double triangle

- Un hyéogramme plus compliqué construit sous forme d'histogramme.

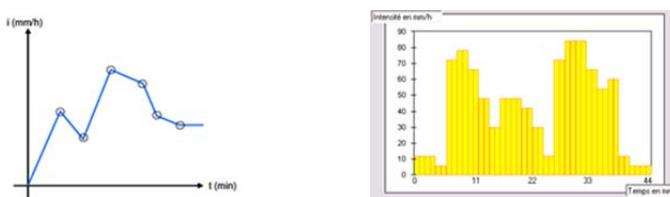


Figure 28 – Représentation de pluies de projet complexes

2.3.1.2. Calcul des intensités de l'événement pluvieux (méthode de Montana)

Les formules les plus utilisées pour établir les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) et Hauteur-Durée-Fréquence (HDF) sont celles de Montana :

$$I(D, T) = a(D, T) * D^{b(D, T)}$$

$$H(D, T) = D * I(D, T) = a(D, T) * D^{1+b(D, T)}$$

Avec :

- $a(D, T)$ et $b(D, T)$ les coefficients de Montana ;
- $I(D, T)$ l'intensité pluviale en mm/min pour une durée D (en min) et pour une période de retour T ;
- $H(D, T)$ la hauteur de pluie (en mm).

Les paramètres de Montana sont établis par les météorologues ; ils dépendent de la période de retour T de l'événement pluvieux, mais aussi de la durée D de la pluie.

Ainsi, les coefficients de Montana permettent de caractériser une pluie.

Pour une période de retour donnée, les coefficients a et b sont différents suivant la durée de la pluie. Généralement, un premier couple de valeurs s'applique pour des durées courtes de 6 minutes à 1 heure voire 2 heures, et un deuxième couple caractérise les pluies plus longues de 2 heures à 24 heures. Extrapoler les coefficients pour un intervalle de durée différent peut entraîner des dimensionnements non réalistes.

La circulaire interministérielle **INT 77-284** [5], actuellement en révision, prescrit les méthodes de conception des systèmes d'assainissement. Elle découpe la France en 3 zones, supposées de pluviométrie homogène, en fonction de la période de retour considérée et donne les coefficients de Montana pour ces zones, pour des durées de pluie inférieures à deux heures.

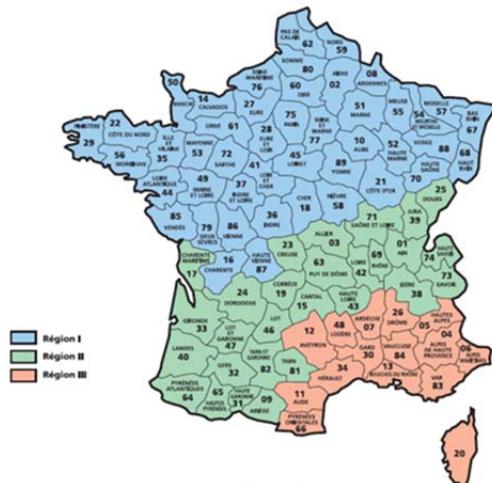


Figure 29 – Découpage de la France en 3 régions de pluviométrie homogène – **INT 77-284** [5]

Périodes de retour $T = 1/F$	Paramètres	
	$a(F)$	$b(F)$
Région 1		
10 ans	5.9	-0.59
5 ans	5.0	-0.61
2 ans	3.7	-0.62
1 an	3.1	-0.64
Région 2		
10 ans	6.7	-0.55
5 ans	5.5	-0.57
2 ans	4.6	-0.62
1 an	3.5	-0.62
Région 3		
10 ans	6.1	-0.44
5 ans	5.9	-0.51
2 ans	5.0	-0.54
1 an	3.8	-0.53

Figure 30 – Coefficients de Montana suivant les régions, selon **INT 77-284** [5] pour une fréquence de dépassement F. Cas d'une durée de pluie comprise entre 5 minutes et 120 minutes

Cependant les cartographies d'intensité pluviométriques à l'échelle de la France ne sont pas adaptées au dimensionnement d'un système de gestion des eaux pluviales, car elles ne tiennent pas compte des disparités locales. Il est recommandé d'utiliser des données pluviométriques locales pour le dimensionnement de tels ouvrages.

Les coefficients de Montana sont disponibles auprès de la météorologie nationale pour un bassin versant (prestation payante en 2014) pour des périodes de retour et pour des tranches de durées de pluie, par exemple :

- 15 mn – 6 heures pour les fortes pluies ;
- 6 mn – 30 mn pour les pluies d'orage ;
- 6 mn – 2 heures ;
- 2 heures – 24 heures.

Note : Certaines grandes collectivités peuvent aussi communiquer ces données, lorsqu'elles disposent d'une station pluviométrique locale, et de données en quantité suffisante pour une exploitation statistique.

Le tableau suivant, extrait du **fascicule FD P84-204-3/A1 Août 2007** [8] (DTU 43.1) donne quelques valeurs de coefficients de Montana, issues de relevés pluviométriques locaux, pour une période de retour de 10 ans :

Région	Ville	Durée des averses			
		6 mn à 30 mn		15 mn à 360 mn	
		a	b	a	b
Alsace	Mulhouse	5,17	0,689	5,17	0,689
	Strasbourg	4,25	0,481	13,22	0,849
Aquitaine	Agen	4,75	0,411	12,00	0,709
	Biarritz	4,02	0,340	6,82	0,513
Bordeaux	Bordeaux	6,53	0,510	18,25	0,831
	Cazaux	6,32	0,635	7,90	0,596
Dax	Dax	4,55	0,530	5,23	0,562
	Mont-de-Marsan	5,02	0,411	13,38	0,724
Auvergne	Pau	4,95	0,511	11,00	0,757
	Clermont-Ferrand	4,10	0,451	10,67	0,754
Bourgogne	Auxerre	3,42	0,421	8,70	0,716
	Château-Chinon	9,85	0,719	9,95	0,734
Centre	Dijon	3,90	0,431	9,23	0,700
	Mont-Saint-Vincent	2,92	0,361	8,17	0,697
Bretagne	Rostrenen	3,10	0,506	4,17	0,610
Champagne	Reims	4,70	0,527	8,80	0,728
Centre	Chartres	3,52	0,496	6,78	0,704
	Orléans	3,77	0,475	7,53	0,680
Franche-Comté	Belfort	2,68	0,355	7,12	0,664
Limousin	Limoges	3,30	0,440	6,12	0,628
Languedoc	Carcassonne	4,32	0,384	13,67	0,751
	Montpellier	5,17	0,362	9,92	0,563
Lorraine	Nîmes	3,32	0,198	14,68	0,666
	Perpignan	3,90	0,356	5,42	0,456
Lorraine	Metz	5,45	0,617	7,28	0,705
Midi-Pyrénées	Gourdon	3,60	0,418	5,12	0,528
	Millau	5,03	0,514	8,05	0,665
Normandie	Ossun	6,07	0,550	15,73	0,853
	Toulouse	5,45	0,494	9,05	0,645
Nord	Lille	5,38	0,499	15,42	0,826
Normandie	Alençon	5,97	0,599	8,03	0,700
	Caen	5,33	0,542	8,20	0,683
Pays-de-Loire	Rouen	4,02	0,425	13,63	0,823
	Angers	4,88	0,520	9,00	0,726
Pays-de-Loire	Le Mans	3,50	0,441	6,53	0,657
	Nantes	2,15	0,352	5,63	0,654
Picardie	Abbeville	4,20	0,489	11,45	0,792
	Saint-Quentin	4,10	0,492	7,03	0,668
Poitou-Charentes	Angoulême	4,95	0,511		
	Cognac	4,03	0,431	11,77	0,759
Provence-Côte d'Azur	Poitiers	4,53	0,437	9,15	0,659
	Ajaccio	4,97	0,376	17,38	0,765
Provence-Côte d'Azur	Bastia	4,85	0,308	10,75	0,570
	Marignane	2,65	0,257	6,00	0,515
Région Parisienne	Nice	3,60	0,240	7,38	0,474
	Salon	5,03	0,349		
Région Parisienne	Brétigny	3,77	0,499	7,88	0,746
	Paris-Montsouris	6,03	0,491	20,48	0,875
Rhône-Alpes	Challes-les-Eaux	4,75	0,489	8,53	0,858
	Grenoble	4,55	0,397	12,80	0,716
Rhône-Alpes	Lyon	5,18	0,436	8,73	0,799
	Montélimar	4,15	0,379	7,28	0,561

Tableau 5 – Valeurs locales de coefficients de Montana, pour une période de retour de 10 ans, extrait du FD P84-204-3/A1 Août 2007 [8]

Pour obtenir un ordre de grandeur des intensités correspondant à une période de retour supérieure à dix ans :

- Soit on utilise des coefficients de Montana locaux de période de retour supérieure à dix ans ;
- Soit, d'après l'instruction technique **INT 77-284** [5] on multiplie l'intensité de période de retour égale à dix ans par un facteur f de valeur :
 - $f = 1,25$ pour $T = 20$ ans ;
 - $f = 1,40$ pour $T = 30$ ans (par interpolation linéaire) ;
 - $f = 1,60$ pour $T = 50$ ans ;
 - $f = 2,00$ pour $T = 100$ ans.

2.3.1.3. Dimensionnement hydraulique du revêtement

On ne peut pas dimensionner le revêtement en termes d'objectif de premiers millimètres de pluie à infiltrer. Il n'est pas possible d'infiltrer les 10 premiers millimètres (par exemple) de tous les types de pluie puisque l'intensité de la pluie et donc la quantité d'eau à infiltrer dépend de la durée de celle-ci. Par exemple une pluie courte qui serait très intense demanderait une vitesse d'infiltration supérieure à la capacité du revêtement, et pourtant les hauteurs d'eau précipitées seraient faibles.

On dimensionne donc le revêtement drainant en déterminant un coefficient de perméabilité minimal selon les pluies types à infiltrer, pour assurer l'infiltration immédiate et l'absence de flaques sur le revêtement.

Pour effectuer ce dimensionnement, il est nécessaire de connaître :

- les caractéristiques de l'événement pluvieux ;
- les caractéristiques des surfaces à considérer ;
- le coefficient de sécurité ou de colmatage à prendre en compte.

2.3.1.3.1. Evénement pluvieux

L'événement pluvieux est caractérisé comme explicité au paragraphe 2.3.1.1.

Les données utiles pour le dimensionnement sont :

- la période de retour de la pluie à infiltrer ;
- la durée de la pluie à infiltrer ;
- la localisation du projet (pour sélectionner les coefficients de Montana adaptés, de préférence locaux, voir paragraphe 2.3.1.2).

La norme **NF EN 752 - Clause 8.4.3.3** [9] préconise d'utiliser une pluie décennale pour le calcul, c'est-à-dire une pluie de période de retour de 10 ans. Cependant, il appartient aux maîtres d'ouvrage de choisir cette donnée d'entrée, ainsi que la durée de la pluie de dimensionnement. C'est donc le maître d'ouvrage qui définit les objectifs de « protection » souhaités, et cela a donc une influence sur les événements pluvieux à considérer (par exemple uniquement les premiers millimètres d'une pluie donnée).

Il est important de souligner que :

- plus la période de retour est élevée, plus la pluie sera intense ;
- plus la durée de la pluie sera élevée, moins la pluie sera intense.

2.3.1.3.2. Caractéristiques des surfaces à considérer

Avec un revêtement très perméable, il est possible d'infiltrer les pluies qui ont ruisselé sur les surfaces adjacentes, c'est-à-dire de concentrer les flux.

La connaissance du projet implique alors pour le dimensionnement :

- de connaître les aires (superficies) des différentes surfaces mises en jeu ;
- de déterminer les coefficients de ruissellement des différentes surfaces adjacentes ;
- de déduire un coefficient d'apport sur la surface drainante sollicitée.

Ce coefficient d'apport représente le ratio surface contributive/surface d'infiltration. Sur les surfaces adjacentes, la pluie peut soit s'infiltrer, soit former des flaques, soit s'évaporer, soit ruisseler jusqu'à la surface drainante dimensionnée. Pour prendre en compte ces phénomènes, un coefficient de ruissellement C_r , compris entre 0 et 1, est appliqué. Ce coefficient représente la part de la pluie qui ruisselle effectivement ; la valeur 1 représentant une surface totalement imperméable. Le coefficient d'apport C_a traduit alors le rendement global de la pluie, c'est-à-dire la fraction supplémentaire de la pluie qui parvient à la surface drainante considérée compte tenu de ce qui a ruisselé sur les surfaces adjacentes.

Le coefficient d'apport global est déterminé par :

$$C_a = (\sum C_{r_i} * S_i + 1 * S) / S$$

Avec

- C_{r_i} : coefficient de ruissellement de la surface homogène adjacente n° i
- S_i : aire de la surface adjacente n° i
- S : aire de la surface d'infiltration

Type de surface	Coefficient de ruissellement (Cr) compris entre
Zone d'activités tertiaires centres villes autres	0,70 / 0,95 0,50 / 0,70
Zone résidentielle pour 1 pavillon ensemble de pavillons détachés ensemble de pavillons attachés	0,30 / 0,50 0,40 / 0,60 0,60 / 0,75
Zone industrielle	0,50 / 0,90
Cimetières - Parcs	0,10 / 0,25
Zone de jeux	0,25 / 0,35
Rue et trottoirs asphalte béton pavé	0,95 0,95 0,85
Pelouse (sol sablonneux) pente < 2 % 2 % < pente < 7 % pente > 7 %	0,05 / 0,10 0,10 / 0,15 0,15 / 0,25
Pelouse (sol terreux) pente < 2 % 2 % < pente < 7 % pente > 7 %	0,13 / 0,17 0,18 / 0,22 0,25 / 0,35

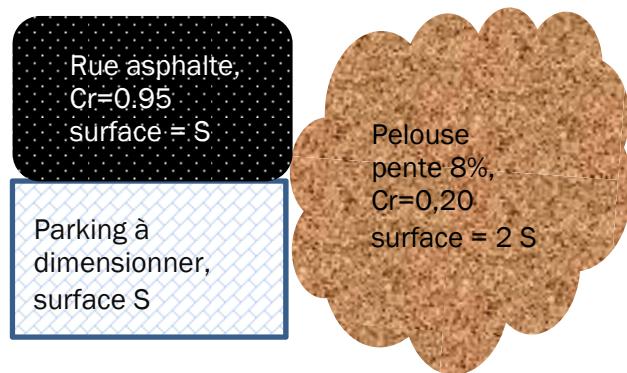
Valeurs des coefficients de ruissellement en fonction du type de surface

Nature de la zone raccordée	Coefficient de ruissellement C	Commentaires
Zones imperméables et toits à forte pente a)	0,9 à 1,0	En fonction du stockage dans les zones de dépression
Grands toits plats	0,5	Plus de 10 000 m ²
Petits toits plats	1,0	Moins de 100 m ²
Zones perméables	0,0 à 0,3	En fonction de la pente et du revêtement du terrain

a) Les zones imperméables peuvent être augmentées de 30 % des grandes surfaces verticales.

Tableau 6 – Coefficients de ruissellement pour le calcul des eaux de ruissellement pour des petits projets d'aménagements, selon tableau E3 de la norme **NF EN 752** [9]

Exemple de calcul :



$$C_a = \frac{(0,95 * S + 0,20 * 2S + 1 * S)}{S} = 2,35$$

Cela revient à considérer une pluie 2,35 fois plus intense sur la surface du parking pour le calcul de celui-ci :

$$I_{calcul}(D, T) = C_a * a(D, T) * d^{b(D, T)}$$

2.3.1.3.3. Coefficient de sécurité

Le coefficient de sécurité ou de colmatage peut être pris en compte par le maître d'ouvrage. Ce coefficient prend en compte d'une part le changement climatique, qui prédit des pluies de plus en plus courtes, mais plus intenses, et d'autre part le colmatage des surfaces d'infiltration.

Le colmatage, dû à une accumulation de particules en surface et dans les interstices, entraîne une forte diminution du coefficient de perméabilité d'une surface dans le temps. Ce phénomène de colmatage affecte aussi bien les produits poreux que le sable des joints ou les matériaux de remplissage. Les éléments colmatants sont des particules solides en suspension (M.E.S) et des polluants fixés sur ces M.E.S ; ils proviennent de l'usure du revêtement, des pneumatiques des véhicules, du ruissellement de la pluie sur les surfaces... et s'agglomèrent en surface jusqu'à former une couche relativement imperméable. En fonction des surfaces drainées (voies, parkings...) et de la zone de drainage (campagne, ville, zone industrielle...), la quantité et la composition des polluants diffèrent. Cela influe sur la perte de perméabilité et donc la valeur du coefficient de sécurité qu'il convient d'adopter.

On note que le colmatage évolue rapidement les premières années, diminuant ainsi les valeurs du coefficient de perméabilité, puis la situation se stabilise, comme l'illustre la figure ci-après. La valeur du coefficient de perméabilité au bout de dix ans représente sur ce graphique environ 18 % de la valeur initiale du coefficient de perméabilité.

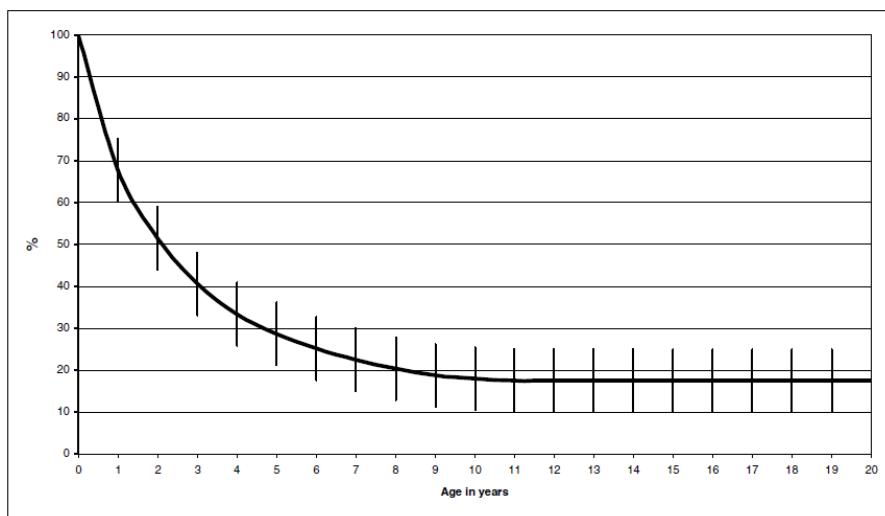


Figure 31 – Diminution du coefficient de perméabilité dans le temps due au colmatage (« long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement », Dr. Soenke Borgwardt [31])

D'après le guide Interpave [33] (guide to the design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements), les expériences française et allemande recommandent que le coefficient de perméabilité utilisé pour le dimensionnement soit égal à 10 % du coefficient de perméabilité initial pour prendre en compte l'effet du colmatage sur une période de service de 20 ans sans maintenance.

Le coefficient de sécurité peut donc être forfaitairement pris égal à 10 pour intégrer le changement climatique et le colmatage du revêtement.

2.3.1.3.4. Détermination du coefficient de perméabilité requis du revêtement

En considérant un coefficient d'apport Ca et un coefficient de sécurité Cs , alors le coefficient de perméabilité minimal requis (K en mm/min) pour infiltrer la totalité de la pluie définie par le maître d'ouvrage est :

$$K(D, T, Ca, Cs) = Ca * Cs * a(D, T) * D^{b(D, T)}$$

Ce coefficient de perméabilité est celui requis pour le revêtement, c'est-à-dire pour l'ensemble « produits en béton et matériau de jointoiement et/ou de remplissage ».

Il est possible d'exprimer ce coefficient de perméabilité dans d'autres unités plus usuelles comme le m/s ou le l/s/ha :

$$1 \frac{mm}{min} = \frac{1}{60 * 1000} \frac{m}{s} = \frac{1}{60 * 1000} \frac{m^3}{s m^2} = \frac{10 000 * 1000}{60 * 1000} \frac{L}{s ha} = \frac{10000}{60} \frac{L}{s ha}$$

Inversement,

$$1 \frac{l}{s * ha} = 1 * 10^{-7} \frac{m}{s} = 1 * 0.006 \frac{mm}{min}$$

Quelques exemples de calculs sont donnés ci-après :

INT 77-284 - période de retour T = 10 ans	REGION	Durée de pluie (min)	Intensité maximale de la pluie (l/s/ha)	Hauteur de pluie h (mm)	Coefficient d'apport Ca	Coefficient de perméabilité minimal requis (m/s)	Coefficient de perméabilité requis (m/s) avec un coefficient de sécurité Cs=10
	1	5	380,46	11,41	1	3,80E-05	3,80E-04
	2	5	460,78	13,82	1	4,61E-05	4,61E-04
	3	5	500,76	15,02	1	5,01E-05	5,01E-04
	1	10	252,76	15,17	1	2,53E-05	2,53E-04
	2	10	314,72	18,88	1	3,15E-05	3,15E-04
	3	10	369,13	22,15	1	3,69E-05	3,69E-04
	1	30	132,19	23,79	1	1,32E-05	1,32E-04
	2	30	171,99	30,96	1	1,72E-05	1,72E-04
	3	30	227,64	40,97	1	2,28E-05	2,28E-04

Tableau 7 – Détermination du coefficient de perméabilité K requis dans différentes régions de pluviométrie homogène, et pour différentes durées de pluie, pour une période de retour T de 10 ans

En utilisant les coefficients de Montana donnés dans l'**INT 77-284** [5] pour une période de retour de 10 ans, en région 1, pour une pluie de durée = 10 minutes, avec un coefficient d'apport de $C_a = 1$ et un coefficient de sécurité de $C_s = 10$, un coefficient de perméabilité de $K = 2,53 * 10^{-4} m/s$ du revêtement est nécessaire pour infiltrer totalement la pluie donnée.

Incidence de la période de retour

En utilisant les règles d'extrapolation données dans l'**INT 77-284** [5] et rappelées en 2.3.1.2, c'est-à-dire en multipliant l'intensité d'une pluie de période de retour 10 ans par des coefficients pour obtenir les intensités de pluies de périodes de retour supérieures, on obtient le tableau suivant pour une période de retour de 30 ans :

INT 77-284 - période de retour T = 30 ans	REGION	Durée de pluie (min)	Intensité maximale de la pluie (l/s/ha)	Hauteur de pluie h (mm)	Coefficient d'apport Ca	Coefficient de perméabilité minimal requis (m/s)	Coefficient de perméabilité requis (m/s) avec un coefficient de sécurité Cs=10
	1	5	532,64	15,98	1	5,33E-05	5,33E-04
	2	5	645,09	19,35	1	6,45E-05	6,45E-04
	3	5	701,07	21,03	1	7,01E-05	7,01E-04
	1	10	353,86	21,23	1	3,54E-05	3,54E-04
	2	10	440,61	26,44	1	4,41E-05	4,41E-04
	3	10	516,78	31,01	1	5,17E-05	5,17E-04
	1	30	185,07	33,31	1	1,85E-05	1,85E-04
	2	30	240,79	43,34	1	2,41E-05	2,41E-04
	3	30	318,69	57,36	1	3,19E-05	3,19E-04

Tableau 8 – Détermination du coefficient de perméabilité K requis dans différentes régions de pluviométrie homogène, et pour différentes durées de pluie, pour une période de retour T de 30 ans

Cas d'une combinaison de différents revêtements

Il est possible de combiner les différents revêtements de manière à structurer l'espace par la réalisation de différentes surfaces drainantes. Par exemple, les pavés à joints larges peuvent être utilisés pour créer des emplacements de parking, et on précise le chemin piétonnier par une bande de pavés poreux qui sont compatibles avec les contraintes d'accessibilité.

On peut alors calculer un coefficient de perméabilité équivalent K_e quand la surface est composée de plusieurs surfaces de revêtements drainants S_i de coefficients de perméabilité respectifs K_i . L'écoulement des eaux se fait en parallèle, et la formule est alors :

$$K_e = \frac{\sum K_i S_i}{\sum S_i}$$

Exemple :

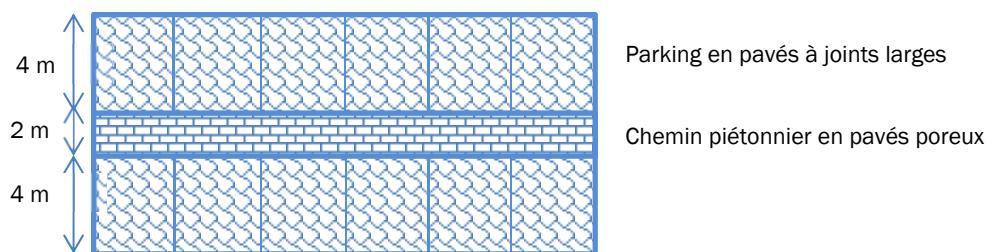


Figure 32 – Cas d'une surface drainante de type parking combinant plusieurs types de revêtements

Le coefficient de perméabilité global du parking est donc ici, en considérant par exemple que la surface en pavés poreux possède un coefficient de perméabilité K_2 égal à un dixième du coefficient de perméabilité de la surface revêtue de pavés à joints larges K_1 :

$$K_e = \frac{K_1 S_1 + K_2 S_2}{S_1 + S_2} = \frac{K_1 S_1 + 0,1 K_1 * 0,25 S_1}{S_1 + 0,25 S_1} = \frac{1,025 K_1 S_1}{1,25 S_1} = 0,82 K_1$$

Ce coefficient est donc à comparer au coefficient requis pour infiltrer une pluie donnée (avec la prise en compte du coefficient d'apport et du coefficient de sécurité).

2.3.1.4. Choix du matériau de jointoient

Le matériau de jointoient ou de remplissage est donné dans les recommandations du fabricant, et on préconise un test « ouvrage » sur les produits et leur matériau de remplissage ou de jointoient, en laboratoire, suivant le protocole décrit en 1.3.

En l'absence de préconisations du fabricant, on pourra se référer aux éléments pour le choix du matériau de jointoient/remplissage qui sont donnés en Annexe 1.

2.3.1.5. Choix du lit de pose et de la fondation

Pour assurer l'infiltration directe de l'eau au travers du lit de pose et de la fondation, il est nécessaire que ces couches aient un coefficient de perméabilité au moins égal à celui requis pour le revêtement.

Par souci de préserver à terme la perméabilité et face au risque de colmatage des couches inférieures, le choix du matériau pour le lit de pose s'orientera sur des sables ou gravillons dépourvus d'éléments fins (exemple : 0/4 bien gradué, 2/6).

Les eaux pluviales peuvent alors être stockées dans la couche de fondation et s'infiltrer dans le sol support. Si les capacités d'infiltration du sol en place sont insuffisantes (voir le paragraphe 2.1.4.1 sur les ordres de grandeur de perméabilité en fonction du type de sol), il peut être nécessaire de coupler l'infiltration avec un exutoire, et d'évacuer les eaux pluviales présentes dans la fondation. Lorsque l'infiltration dans le sol support n'est pas recherchée, par exemple en cas de risque de pollution de la nappe phréatique, un géotextile ou une géomembrane étanche est placé en fond de fouille.

Une étude hydraulique sur le réseau d'assainissement et les rejets maximaux autorisés est alors à mener.

Une attention particulière est à porter à la stabilité des différentes couches. Les particules les plus fines peuvent s'insérer entre les particules de dimensions plus importantes des couches inférieures, entraînant un affaissement et une pollution des couches inférieures. Un géotextile peut ainsi être mis en place pour éviter la ségrégation et séparer les couches composées de différents matériaux.

Dans le cas des chaussées à structure réservoir, le géotextile sous le lit de pose est même nécessaire (*Fascicule 70 du CCTG titre II* [4]) pour éviter la migration de ce dernier vers la structure réservoir.

La couche de fondation a deux fonctions, celle de répartir les sollicitations de la chaussée au sol support, et celle d'infiltrer ou stocker les eaux pluviales.

Il est possible de mettre en œuvre des matériaux non liés (graves grossières 20/80 mm par exemple), des matériaux traités aux liants hydrauliques ou bitumineux (béton poreux par exemple), des plastiques alvéolaires, des éléments creux en béton de type « Hydrocyl »...

D'après l'ouvrage « Techniques alternatives en assainissement pluvial » [7], les granulats des différents matériaux doivent présenter les caractéristiques suivantes :

- Les granulats sont concassés (bonne stabilité), sans sable (passant à 2 mm < 3 %), propres (passant à 0,5 mm < 2 %), durs (pour résister à la fragmentation au compactage et à l'usage) et insensibles au gel et à l'eau.
- La porosité totale représente plus de 20 %.



Figure 33 – Éléments creux en béton de type « Hydrocyl » pour couche de base

Les éléments creux en béton de type « Hydrocyl » sont des cylindres creux en béton préfabriqué. Chaque cylindre fait 8 cm de long, 8 cm de section et 2 cm d'épaisseur. Cette géométrie permet de retenir les eaux pluviales et d'offrir une forte capacité de stockage (600 litres par m³). La couche d'Hydrocyl se met en œuvre à la pelle mécanique et ne nécessite qu'une seule opération de compactage.

Dans le cas d'une chaussée à structure réservoir, le volume d'eau à retenir est calculé par :

$$V = i(D, T, C_a) * A * D = C_a * a(D, T) * D^{b(D,T)} * A * D = C_a * a(D, T) * D^{b(D,T)+1} * A$$

Et la hauteur de stockage nécessaire pour un « réservoir » de stockage horizontal est calculée comme suit :

$$h_{stock}(D, T, p) = \frac{V}{p * A_{stock}} = \frac{C_a * a(D, T) * D^{b(D,T)+1} * A}{p * A_{stock}}$$

Avec :

- $h_{stock}(D, T, p)$ est la hauteur de stockage en mm ;
- V est le volume total à stocker en mm^3 ;
- A_{stock} est la surface de stockage ;
- p est la porosité du matériau de stockage ;
- A est la surface sur laquelle s'abat la pluie dont on veut stocker le volume ;
- $i(D, T, C_a)$ l'intensité pluviale en mm/min pour une durée D (en min), une période de retour T et un coefficient d'apport C_a ;
- $a(D, T)$ et $b(D, T)$ les coefficients de Montana.

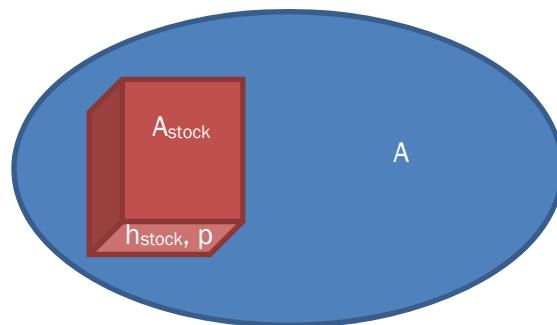


Figure 34 – Schéma de la surface de stockage et la surface de laquelle on veut stocker la pluie

2.3.2. Dimensionnement mécanique

La (ou les) couche(s) de fondation a aussi pour fonction de répartir les sollicitations de la chaussée au sol support, en plus de celle d'filtrer ou stocker les eaux pluviales.

Les épaisseurs finales à mettre en œuvre sont les valeurs maximales entre le calcul hydraulique et le calcul mécanique.

De la même manière, il est possible de mettre en œuvre des matériaux non liés (graves grossières 20/80 par exemple), des matériaux traités aux liants hydrauliques ou bitumineux (béton poreux par exemple), des plastiques alvéolaires, des éléments creux en béton de type « Hydrocyl »...

Le cas échéant, une diminution de portance pendant les périodes de stockage de l'eau dans la structure pourra être prise en compte.

2.4. Caractéristiques des différentes solutions et réponses aux exigences fonctionnelles

Les revêtements perméables modulaires en béton (pavés ou dalles) apportent des solutions intéressantes conciliant esthétique, résistance et pérennité. Les revêtements perméables doivent répondre à différentes exigences fonctionnelles, que ce soit pour une utilisation en voirie ou en aménagements publics :

- l'infiltration des eaux pluviales ;
- la tenue au trafic et la durabilité (du point de vue du coefficient de perméabilité, de la résistance mécanique, de l'abrasion...) ;
- la résistance aux sollicitations climatiques : résistance au gel-dégel, absorption d'eau ;
- l'esthétique (à court et à long terme) : formes, couleurs, textures, végétalisation possible...
- la facilité de mise en œuvre : conditions et délais de mise en œuvre et remise en circulation, pénibilité du travail ;
- la facilité d'entretien : nettoyage, maintenance et réparations ;
- le développement durable et l'aptitude au recyclage : recyclable, naturel, modulable ;
- la sécurité des utilisateurs : maîtrise de la glissance des éléments ;
- l'insertion des personnes handicapées : accessibilité des personnes à mobilité réduite et des non-voyants et malvoyants ;
- l'intégration dans l'environnement ;
- la structuration de l'espace (signalisation des surfaces).

Il est à noter que les pavés et dalles en béton poreux ne sont pas couverts par les normes usuelles sur les pavés et dalles en béton, à savoir les normes **NF EN 1338** [1], **NF EN 1339** [2].

En effet la norme **NF EN 1338** [1] indique que « la présente norme ne traite pas de la perception visuelle ou tactile des pavés ni des pavés perméables », de même que la norme **NF EN 1339** [2] indique que « le présent document [...] ne traite pas de la perception visuelle ou tactile des dalles ni des dalles perméables ».

Cependant, certaines spécifications requises ou méthodes d'essais de ces normes peuvent être adoptées.

Les produits de revêtement perméable tels que les pavés à joints larges ou à ouvertures de drainage (évidés ou perforés) peuvent quant à eux être rattachés à la **NF EN 1338** [1].

2.4.1. Infiltration des eaux pluviales

2.4.1.1. Détermination du coefficient de perméabilité du revêtement

Le coefficient de perméabilité du revêtement est la donnée première recherchée pour les revêtements perméables. Le fait que les revêtements soient perméables contribue à l'infiltration des eaux pluviales et à l'esthétique de l'ouvrage final, puisqu'il n'y aura pas de stagnation d'eau. Indirectement cela améliore donc la sécurité des usagers par la réduction des risques de glisse ou aquaplanage.

La mesure du coefficient de perméabilité s'effectue selon un protocole d'essai développé par le CERIB (voir 1.3), à l'aide d'un dispositif d'infiltration d'eau sur des surfaces en produits en béton préfabriqué.

Le but de l'essai est de mesurer la quantité d'eau qui s'infiltre au cours d'un certain temps sur une surface de 1 m² de revêtement perméable, sous une charge constante de 1 cm d'eau réglée à l'aide d'un trop-plein. Ce revêtement perméable est constitué des produits en béton et d'un matériau de jointoiement ou de remplissage des vides représentatif des matériaux préconisés par le fabricant, voir paragraphe 2.4.1.3. Cette plaque de revêtement

perméable est testée sans lit de pose, comme l'indique le schéma en Figure 35. Ainsi on mesure le coefficient de perméabilité du revêtement seul, sans les couches sous-jacentes.

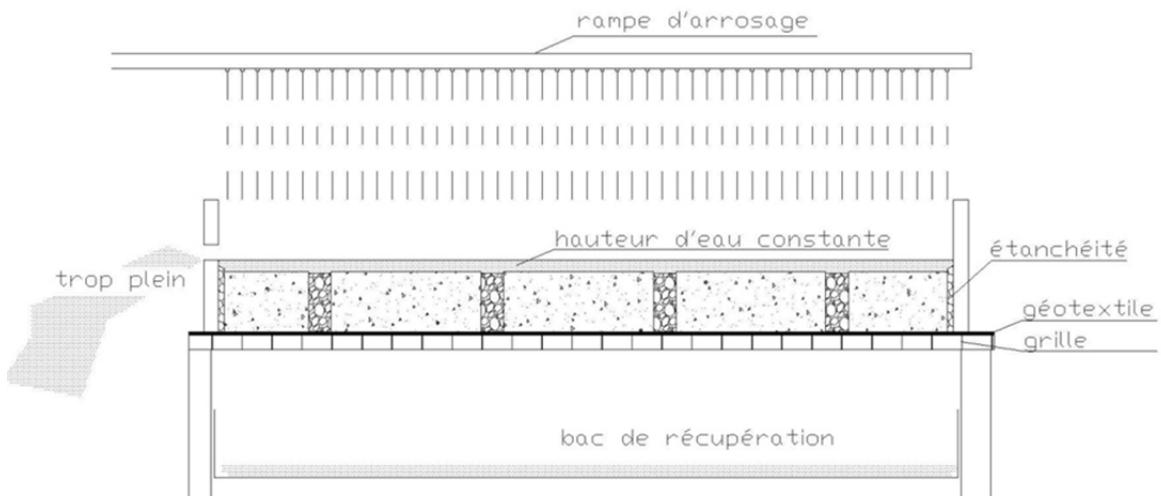


Figure 35 – Schéma de l'essai de détermination du coefficient de perméabilité

2.4.1.2. Caractéristiques du dispositif d'essai

- Surface d'essai

Les essais en laboratoire peuvent aboutir à une capacité d'infiltration plus faible qu'in-situ car les échantillons sont de plus petite taille et l'eau s'infiltra normalement par le chemin le plus facile : joints, fissures, trous, compactage... De plus, il existe une grande dispersion des valeurs de coefficients de perméabilité mesurés sur des éprouvettes poreuses de petite taille (à l'échelle d'un produit).

Cependant, le dispositif développé permet de s'affranchir de certaines incertitudes dues à la composition du béton ou au compactage du matériau de remplissage ou de jointoientement des produits. En effet, en utilisant une surface d'essai de 1 m², le dispositif est plus représentatif d'une situation réelle qu'un échantillon restreint. Il n'est donc pas nécessaire de prendre en compte un coefficient de sécurité dû à la taille de l'échantillon.

- Grille

La grille doit permettre de supporter le poids du revêtement, de laisser s'infiltrer l'eau sans créer de gêne. On a choisi une grille de dimensions supérieures à 1 m * 1 m de maille 5 cm qui permet d'installer le revêtement perméable.

Cette grille doit être horizontale et située à une hauteur suffisante pour insérer le bac de récupération sous la surface d'essai. Une hauteur de 60 cm est considérée suffisante par rapport au bas de récupération choisi. On peut donc monter par exemple deux rangées parallèles de blocs à environ 2 mètres l'une de l'autre, et trois bastaings en bois sur lesquels la grille sera disposée, voir ci-après.



Figure 36 – Préparation d'un essai d'infiltration

- **Bac de récupération**
Le bac doit être choisi en fonction du volume d'eaux infiltrées à recueillir. Le bac choisi pour l'étude est de dimensions 1225 mm * 1225 mm et de contenance 440 L. Ce bac est équipé d'un robinet pour permettre sa vidange.
- **Arrivée d'eau et rampe d'arrosage**
L'arrivée d'eau est munie d'une rampe d'arrosage pour simuler une pluie. Il a été choisi de créer une rampe d'arrosage avec un tuyau percé de multiples trous, serpentant à quelques centimètres au-dessus de la surface d'infiltration pour avoir une pluie uniforme.
- **Ecoulement vertical**
Le volume mouillé à la verticale d'un revêtement à la verticale d'un cylindre rempli d'eau est, du fait d'infiltrations latérales, en forme de bulbe d'oignon.

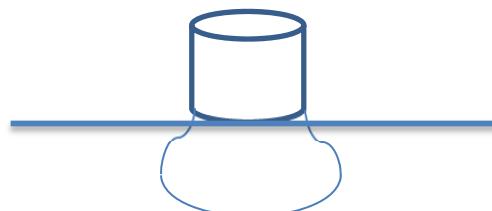


Figure 37 – Volume mouillé à la verticale d'un cylindre rempli d'eau

C'est pourquoi les contours du bâti sont garnis d'un joint d'étanchéité, et on peut assimiler l'infiltration à une infiltration verticale.

L'intérieur du cadre est muni d'une bande mousse caoutchouc en EPDM (éthylène-propylène-diène monomère) à cellules fermées, non adhésive, étanche à l'eau et à l'air, dont la largeur correspond à la hauteur des produits testés. Une fois serré par des tiges filetées et des presses, ce joint d'une épaisseur de 1 cm est comprimé et sert à assurer l'étanchéité latérale du cadre et un écoulement vertical.

Ce dispositif permet alors d'avoir un écoulement vertical de l'eau dans la surface utile durant l'essai.

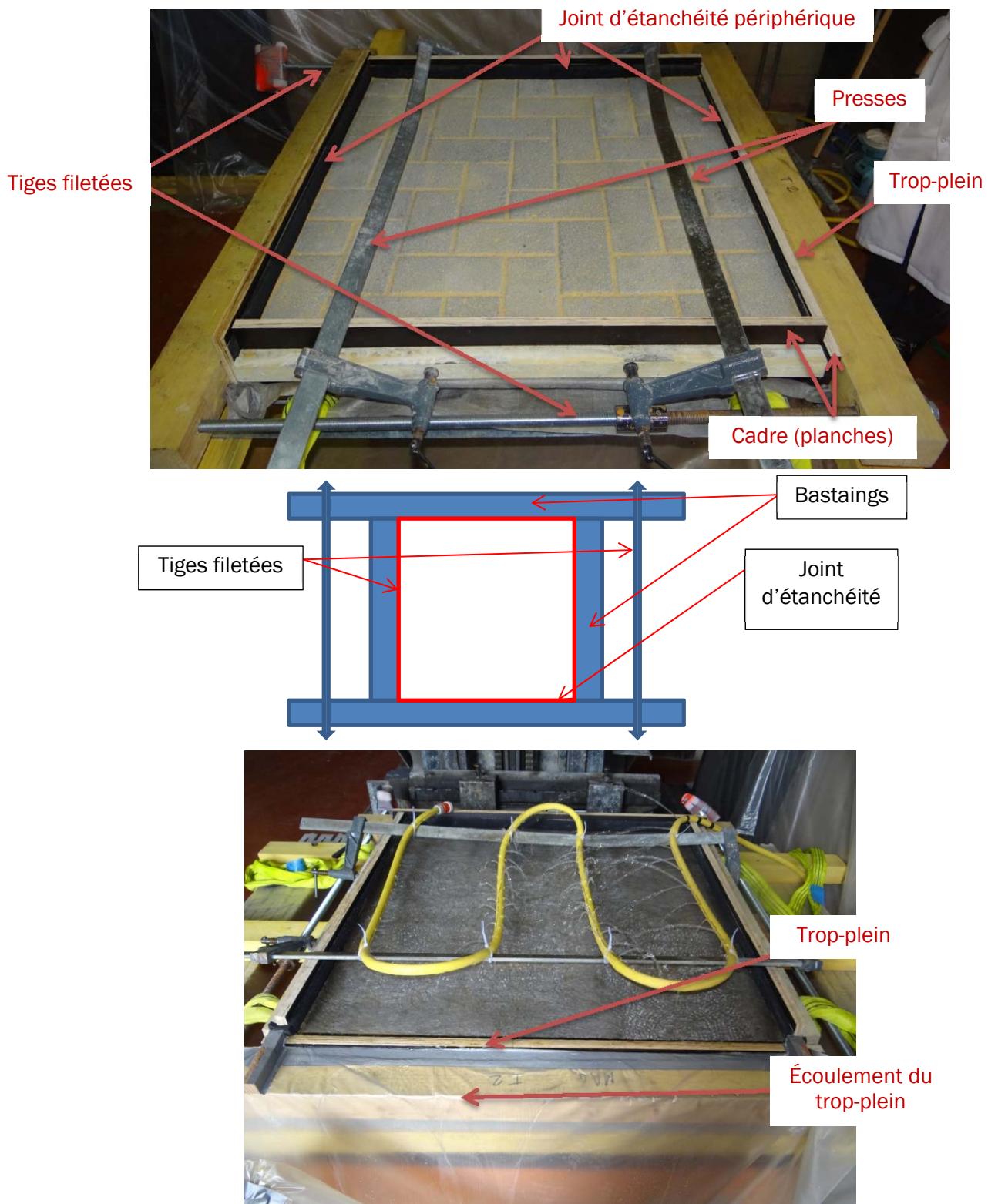


Figure 38 – Vue d'un montage pour déterminer la capacité d'infiltration - tiges filetées, presses et joint d'étanchéité

- Hauteur d'eau

Le dispositif d'essai est conçu de manière à laisser une charge d'eau de dix millimètres sur le revêtement perméable, puisqu'un essai avec une charge d'eau la plus faible possible (proche d'un film d'eau) est plus représentatif des situations de pluie réelles.

La hauteur constante de la couche d'eau étant réglée au moyen d'un trop-plein, il est donc nécessaire de prendre toutes les mesures pour évacuer correctement l'eau débordante et éviter qu'elle n'arrive dans le bac de récupération qui permettra d'évaluer la quantité des eaux infiltrées.

Le cadre destiné à entourer la surface testée doit être réalisé de manière à créer une surface d'essai d'environ 1 m². On pourra par exemple utiliser des bastaings de bois. Afin de créer le dispositif de trop-plein, un côté de ce cadre pourra présenter une hauteur inférieure à celle des autres, de manière à ce que, une fois le revêtement en place, ce côté de cadre ne dépasse que de 10 mm de la surface supérieure des produits.



Figure 39 – Photo du trop-plein sur le dispositif d'essai de perméabilité

- Choix du géotextile disposé sous le revêtement

On dimensionne le géotextile par rapport à son ouverture de filtration et sa perméabilité, puisqu'il doit être plus perméable que le revêtement et retenir les matériaux en place.

Afin de protéger le système contre l'entraînement de fines présentes dans la terre végétale ou le sable déposé en partie supérieure, l'ouverture de filtration (O₉₀ mesurée selon la norme **NF EN ISO 12956** « Géotextiles et produits apparentés - Détermination de l'ouverture de filtration caractéristique » [17]) est choisie vis-à-vis de la granulométrie des matériaux à retenir. Le géotextile est choisi avec des ouvertures de drainage assez fines pour éviter que les particules fines du matériau de jointoiement ou de remplissage s'écoulent lors de l'essai.

Par exemple, si l'essai est réalisé avec un sable 0/2, dont le fuseau granulométrique précise un taux de fine passant dans un tamis de mailles 0,125 mm, soit 125 µm de moins de 7 % ; alors le géotextile mis en place doit présenter une ouverture de filtration caractéristique aux alentours de 140 µm.

Le géotextile doit également être choisi de manière à être assez perméable pour ne pas modifier les résultats de coefficient de perméabilité, car la perméabilité globale du système sera déterminée par la couche la moins perméable. En fonction des valeurs de coefficient de perméabilité attendues, on choisit un géotextile de perméabilité au moins dix fois supérieure.

Par exemple, un géotextile de perméabilité de 7×10^{-2} m/s, soit 700 000 L/s/ha, mesurée suivant la norme **NF EN ISO 11058** [16] est compatible avec des perméabilités de revêtements attendues (jusqu'à 5×10^{-3} m/s).

Le géotextile choisi pour les essais est un Typar SF 32 de DuPont de Nemours, de perméabilité 7×10^{-2} m/s, avec des ouvertures de filtration de 0,140 mm, de dimensions 1,1 m * 1,1 m.

- **Géotextile supérieur**

Les débits mis en jeu lors de l'essai sont très importants, et la pression de l'eau qui sort de la rampe d'arrosage est largement supérieure à ce que l'on observe lors de fortes pluies. L'eau peut alors détériorer la surface d'essai, en lessivant le matériau de jointoientement, ou en tassant de manière inégale le matériau de remplissage...

La mise en place d'un géotextile sur la surface du revêtement permet de répartir l'arrosage, tout en empêchant la détérioration de la surface d'essai. Le coefficient de perméabilité du géotextile doit être très élevé, de manière à ne pas influer sur les valeurs mesurées. On utilise donc le même géotextile que celui placé sous le revêtement (décris précédemment).

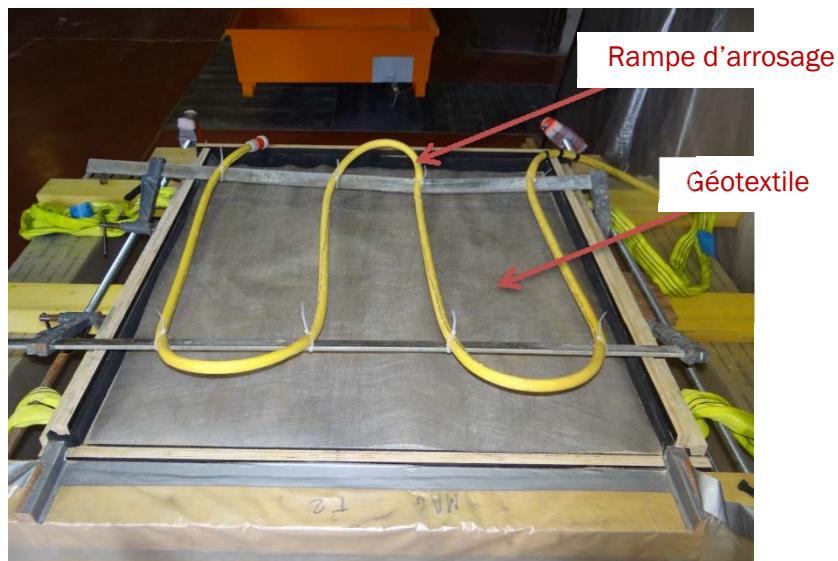


Figure 40 – Montage d'un essai d'infiltration - géotextile supérieur et rampe d'arrosage

2.4.1.3. Matériau de jointoientement et/ou de remplissage pour l'essai de perméabilité

Pour être représentatif d'une surface de revêtement perméable réelle, on utilise pour les joints ou les cavités, les matériaux de jointoientement ou de remplissage préconisés par les fabricants.

L'Annexe 1 donne des éléments pour le choix du matériau de jointoientement ou de remplissage des vides.

Voici les matériaux qui ont été utilisés pour l'étude :

- Pour les pavés poreux : un sable extra siliceux 0/2 mm, de courbe granulométrique ci-dessous.

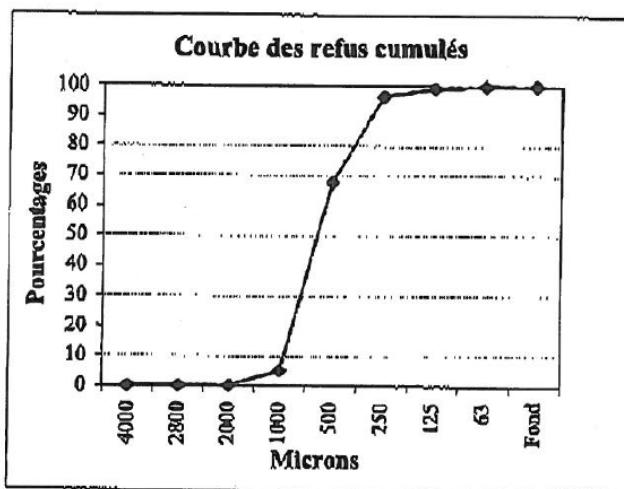


Figure 41 – Courbe granulométrique du sable 0/2 mm utilisé pour les essais d'infiltration sur pavés poreux

- Pour les pavés à joints larges : des gravillons 2/4 mm concassés, de courbe granulométrique présentée dessous :

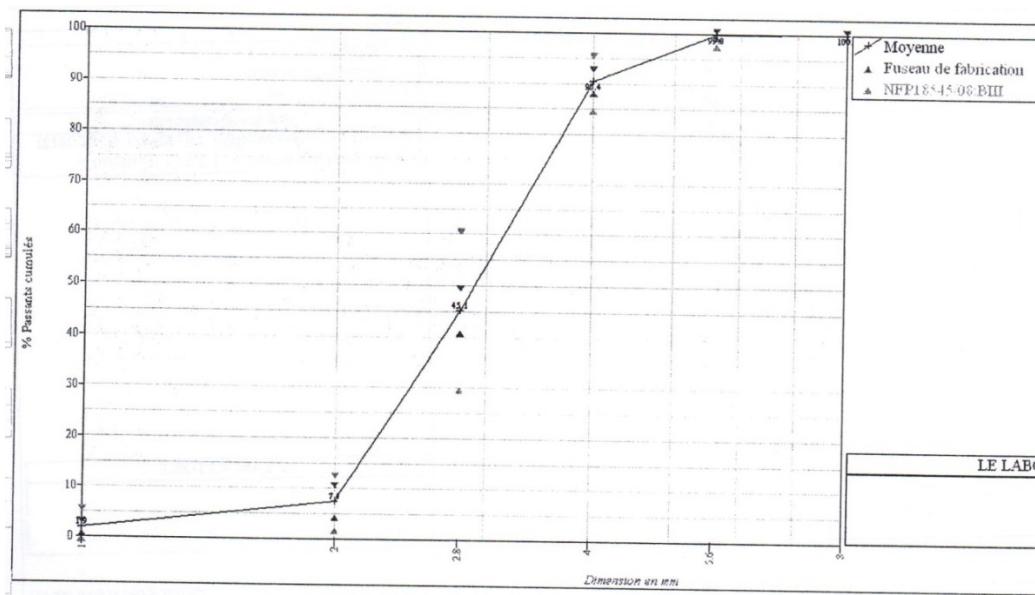


Figure 42 – Courbe granulométrique des gravillons 2/4 mm utilisés pour les essais d'infiltration sur pavés à joints larges

- Pour les dalles drainantes : un mélange terre-sable en proportions volumiques un tiers de sable 0/4 mm et deux tiers de terre végétale. La courbe granulométrique du sable est présentée ci-après.

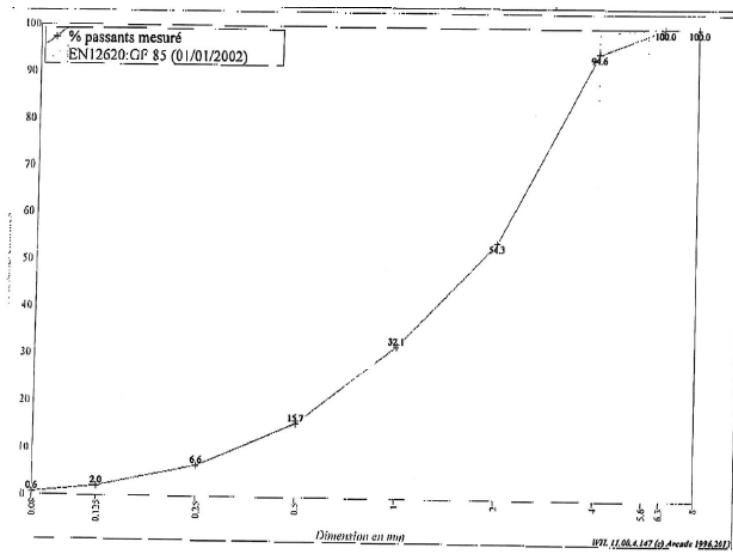


Figure 43 – Courbe granulométrique du sable 0/4 mm utilisé en mélange avec la terre végétale pour les essais d'infiltration sur dalles drainantes

- Garnissage des joints

Dans le cas d'un remplissage de sable ou gravillons : les joints sont garnis, le tout est ensuite compacté à l'aide d'une masse, regarni, compacté, regarni, puis finalement balayé, de manière à obtenir un revêtement parfaitement plan et des orifices remplis (le coefficient de perméabilité serait surestimé si le matériau de jointolement ou de remplissage n'était pas tassé).

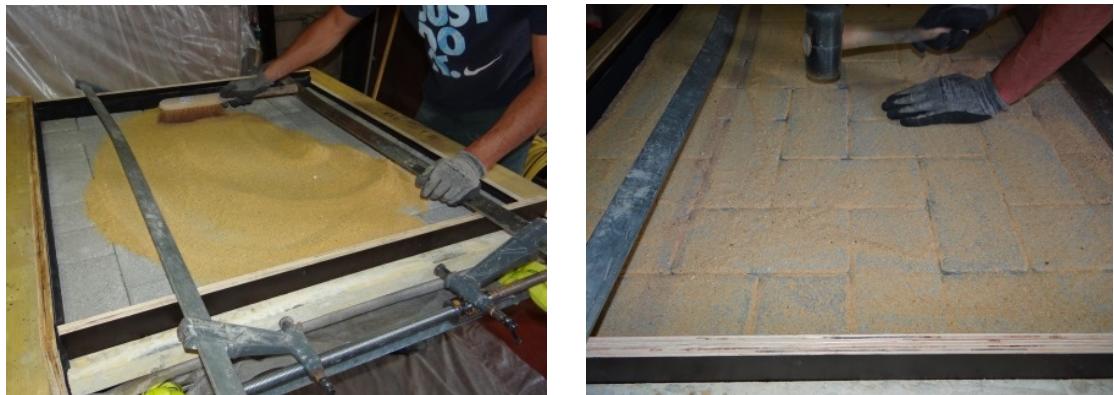


Figure 44 – Mise en place du revêtement - remplissage à la balayette et affermissement à la masse

Dans le cas d'un remplissage avec un mélange terre-sable, dans le cas de dalles drainantes par exemple, on peut par exemple utiliser le tassage naturel via le poids propre de l'eau sans aucun compactage, on aura ainsi un tassement de quelques centimètres sous les plots.



Figure 45 – Tassement naturel du mélange terre-sable sous l'action de l'eau

2.4.1.4. Loi de Darcy

Pendant le test de perméabilité, on mesure la quantité d'eau infiltrée en fonction du temps. L'arrosage constant est poursuivi jusqu'à obtenir une vitesse d'infiltration stable. Sur un revêtement sec, en début d'essai, l'eau pénètre rapidement les interstices et remplit les vides ; c'est l'infiltration. Ensuite, quand le milieu est saturé, l'eau s'écoule principalement par gravité, et la vitesse de filtration atteint un régime permanent.

La loi de Darcy régit l'écoulement stationnaire d'un fluide incompressible caractérisé par une viscosité dynamique μ et une masse volumique ρ au travers d'un milieu poreux, homogène et isotrope, caractérisé par un coefficient de perméabilité K . Cette loi modélise le débit d'eau Q pouvant, par gravité et capillarité, s'écouler à travers un échantillon de matériau poreux saturé, de section A et de longueur L , sous une faible charge hydraulique.

$$Q = KA \frac{\Delta H}{L}$$

- Q : le débit volumique (m^3/s) ;
- K : la conductivité hydraulique ou coefficient de perméabilité du milieu poreux (m/s) ;
- A : la surface de la section étudiée (m^2) ;
- $\frac{\Delta H}{L}$: Le gradient hydraulique où ΔH est la différence des hauteurs piézométriques en amont et en aval de l'échantillon, L est la longueur de l'échantillon (donc pour un écoulement vertical, $\Delta H = L + \text{hauteur d'eau}$ et pour un test avec un film d'eau, $\Delta H \approx L$ et $Q = KA$).

En appliquant la loi de Darcy sur la hauteur saturée, il est alors possible de déterminer le coefficient de perméabilité du milieu ou conductivité hydraulique, équivalente à la vitesse de filtration, exprimée en mm/h ou m/s .

La vitesse de filtration dépend de la nature du fluide (poids spécifique et viscosité du fluide), des propriétés du milieu poreux (structure du milieu, granulométrie, répartition des pores, porosité intergranulaire...) et de la saturation du milieu. Le coefficient de perméabilité s'exprime donc en fonction des propriétés intrinsèques du milieu poreux et du fluide :

$$K = k \frac{\rho g}{\mu}$$

- k : la perméabilité intrinsèque du milieu poreux (m^2) ;
- ρ : la masse volumique du fluide (kg/m^3) ;
- g : l'accélération de la pesanteur (m/s^2) ;
- μ : la viscosité dynamique du fluide ($\text{kg}/\text{m/s}$).

La perméabilité représente les caractéristiques intrinsèques d'un milieu à laisser circuler tout liquide alors que la conductivité hydraulique représente cette capacité pour un liquide en particulier, l'eau.

Les caractéristiques du fluide dépendant de la température, les essais doivent se faire à températures comparables, ou le résultat sera affecté d'un coefficient correctif.

D'après le livre « Analyse physique des sols, Méthodes choisies de Clément Mathieu et Françoise Pieltain » [32], une variation de 10 à 20 % de la vitesse d'infiltration peut être due aux propriétés et caractéristiques d'hétérogénéité du milieu.

De manière à respecter les hypothèses de la loi de Darcy, les essais doivent être effectués sur des échantillons saturés en eau. De plus, cela permet une plus grande répétabilité des essais et une comparaison des différents produits.

2.4.1.5. Calcul du coefficient de perméabilité

Il faudra s'assurer que le niveau requis de perméabilité, correspondant aux pluies types à infiltrer (localisation, période de retour, durée...) et aux données du projet spécifique (coefficient de sécurité, surfaces d'apport) communiquées par le maître d'ouvrage, est respecté.

Pour infiltrer la totalité d'une pluie décennale de 10 minutes en région 3, en prenant en compte un coefficient de sécurité de 2, un coefficient de perméabilité de $7,38 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ est requis pour le revêtement perméable.

Note : Des essais réalisés sur différentes familles de produits ont conduit aux ordres de grandeurs suivants en ce qui concerne le coefficient de perméabilité K :

- Pour les pavés poreux, $K \cong (1 \text{ à } 1,5) \times 10^{-4} \text{ m/s}$
- Pour les pavés à joints larges, $K \cong (1 \text{ à } 2) \times 10^{-3} \text{ m/s}$
- Pour les dalles drainantes garnies de mélange terre-sable, $K \cong (1 \text{ à } 2) \times 10^{-4} \text{ m/s}$

2.4.2. Tenue au trafic et durabilité

2.4.2.1. Résistance mécanique

La détermination de la résistance mécanique des produits, caractéristique de la tenue au trafic, s'effectue par essai de fendage sur les pavés et par essai de flexion sur les dalles. Les essais décrits dans l'Annexe F de la norme **NF EN 1338** [1] pour les pavés et dans l'Annexe F de la norme **NF EN 1339** [2] pour les dalles sont applicables.

- Pavés poreux

L'essai de fendage est réalisé parallèlement au bord le plus long du pavé, et la charge est augmentée de manière continue jusqu'à la rupture.

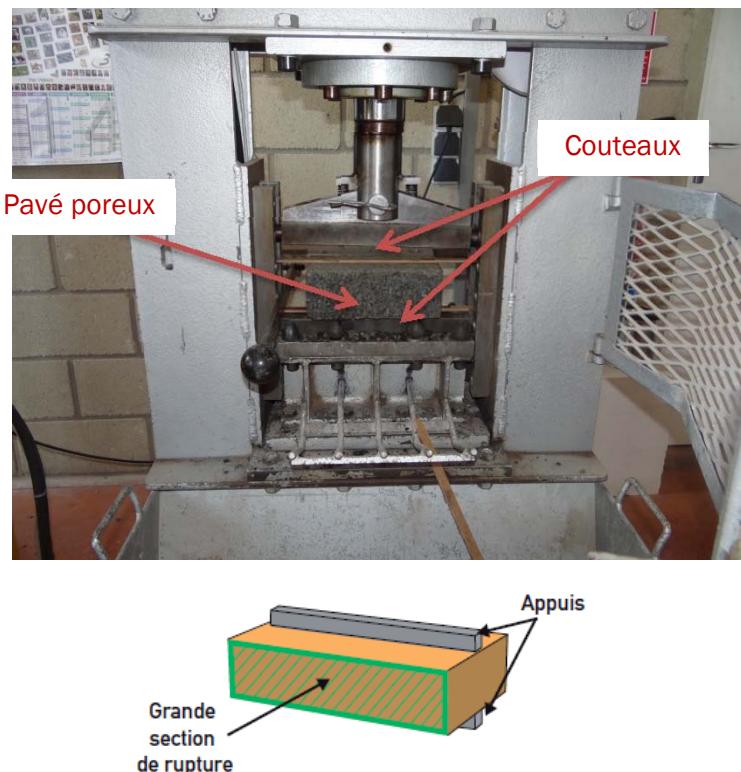


Figure 46 – Essai de fendage sur pavé poreux

Pour les pavés en béton poreux, le fascicule 70 titre 2 impose une résistance au fendage de 3 MPa.

Note : De plus, le fascicule 70 titre 2 « Ouvrages d'assainissement – Ouvrages de recueil, de restitution et de stockage des eaux pluviales » [4] impose pour les pavés poreux en béton une épaisseur minimale de 8 cm, qui correspond à l'épaisseur minimale pour un trafic T4 selon la norme NFP 98-335 [3].

- Pavés à joints larges ou pavés à ouvertures de drainage (évidés ou perforés). Pour des pavés usuels en béton, la résistance en traction par fendage doit être supérieure ou égale à 3,6 MPa, aucun test individuel ne doit être inférieur à 2,9 MPa, et aucune charge de rupture ne doit être inférieure à 250 N/mm. Ces valeurs sont applicables pour des pavés à joints larges.

Le calcul de la résistance à la rupture par fendage s'effectue par :

$$T = 0,637 * k * P/S$$

Avec :

- T la résistance en MPa ;
- P la charge de rupture mesurée en N ;
- k un facteur de correction d'épaisseur du pavé ;
- S la surface de rupture en mm^2 , $S = l * t$;

- l la moyenne des deux mesurages de la longueur de rupture, en mm, l'un réalisé en haut l_1 et l'un réalisé en bas l_2 : $l = \frac{l_1+l_2}{2}$ voir Figure 47 ;
- t l'épaisseur en mm moyenne du pavé au niveau du plan de rupture sur trois valeurs t_1 , t_2 et t_3 : $t = \frac{t_1+t_2+t_3}{3}$ voir Figure 47.

Note : Même lorsque les axes des appuis coïncident avec l'axe des écarteurs, il est sécuritaire de calculer la surface du plan de rupture avec les moyennes des longueurs et des épaisseurs.

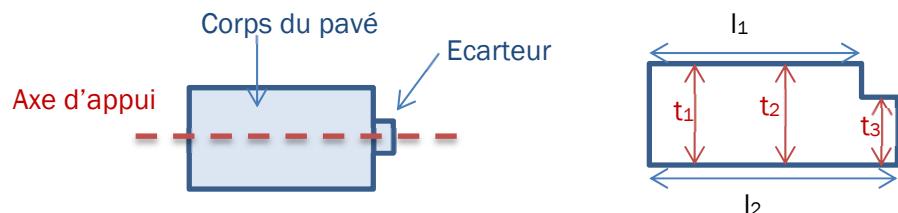


Figure 47 – Vue du dessus et vue de côté d'un pavé avec écarteur

- Dalles drainantes

La détermination de la résistance mécanique des produits, caractéristique de la tenue au trafic, s'effectue par un essai de flexion sur les dalles. L'essai décrit dans l'Annexe F de la norme **NF EN 1339** [2] est applicable.

La dalle est disposée telle que la portée soit sur le côté le plus large de la dalle, et l'essai de flexion trois points est réalisé sur ce côté. La charge est augmentée de manière continue jusqu'à la rupture, comme ci-dessous.

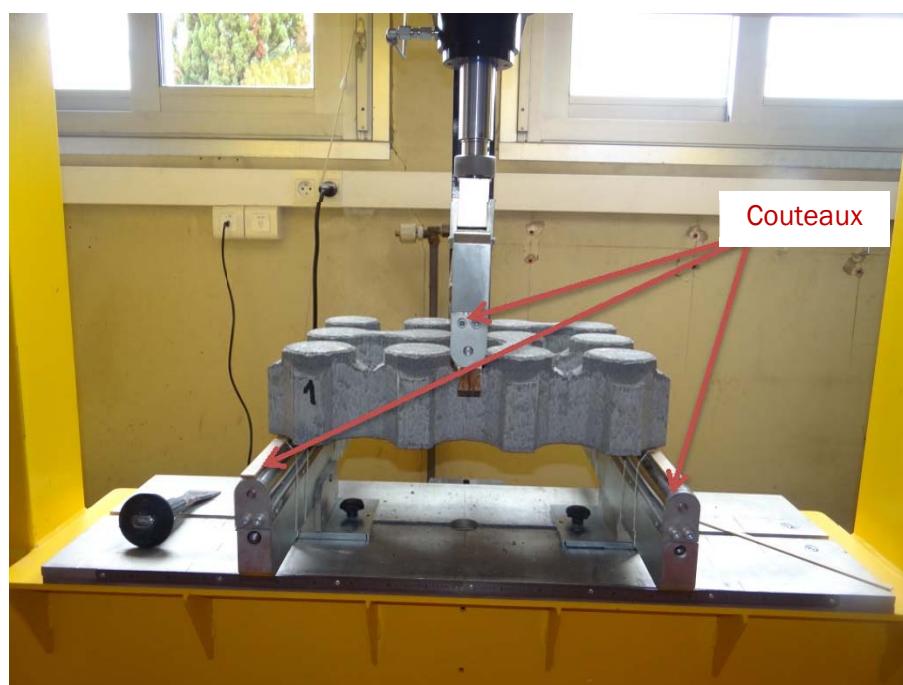


Figure 48 – Essai de flexion sur dalle drainante

Le calcul de la résistance à la rupture en flexion s'effectue par :

$$T = \frac{3 * P * L}{2 * b * t^2}$$

Avec :

- T la résistance en MPa ;
- P la charge de rupture mesurée en N ;
- L la distance entre supports en mm ;
- b la largeur de la dalle au niveau du plan de rupture en mm ;
- t la hauteur de la dalle au niveau du plan de rupture en mm.

A la rupture des dalles drainantes, on observe plusieurs sections de rupture du fait de leur géométrie. On calcule alors b comme la somme des différentes largeurs des sections de rupture, et t comme la moyenne des différentes épaisseurs des sections de rupture.

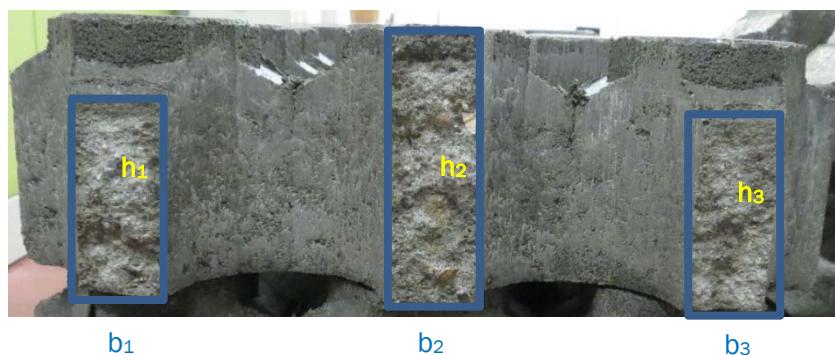


Figure 49 – Rupture d'une dalle drainante

Note : Le lien entre le comportement des dalles drainantes à l'essai de flexion normalisé et en conditions de service a fait l'objet d'investigations supplémentaires et fait l'objet du rapport CERIB 352.P [46].

2.4.2.2. Abrasion

La résistance à l'abrasion influe directement sur l'esthétique et la pérennité de l'ouvrage, mais aussi sur la tenue au trafic, puisqu'une diminution excessive de l'épaisseur du produit entraîne une diminution de la résistance mécanique.

L'essai d'abrasion au disque large décrit dans l'Annexe G de la norme **NF EN 1338** [1] est applicable pour les pavés poreux et à joints larges.

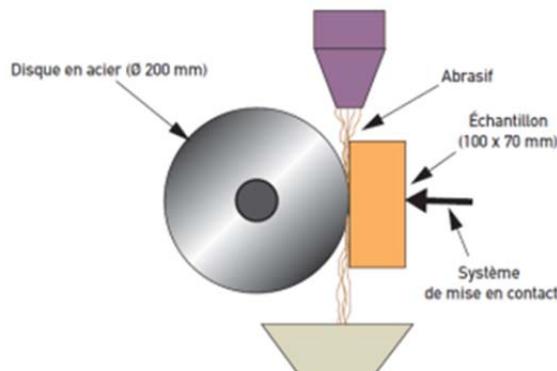
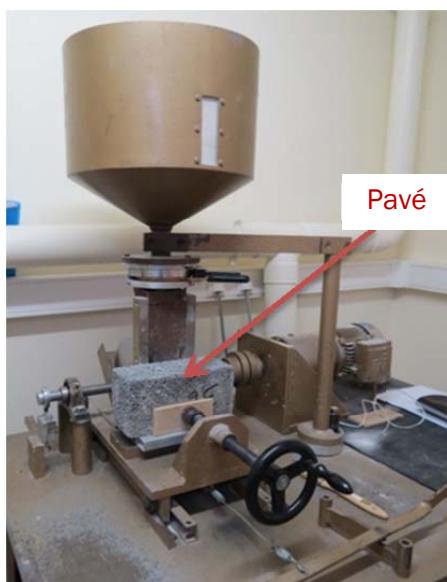


Figure 50 – Dispositif d'essai d'abrasion sur pavés

Pour des pavés usuels en béton, plusieurs classes sont possibles. La classe 2 correspond à une largeur d'empreinte maximale inférieure à 23 mm, tandis que la classe 3 correspond à une largeur d'empreinte maximale inférieure à 20 mm.

Les valeurs de la classe 2 sont applicables pour des pavés à joints larges.

Les pavés en béton poreux peuvent présenter des empreintes plus larges du fait de leur formulation de béton. Aussi on retient deux classes pour le référentiel :

- un seuil de largeur d'empreinte de 23 mm pour les produits poreux ou
- une performance non déterminée (PND).

Le même essai décrit dans l'Annexe G de la norme **NF EN 1339** [2] n'est pas applicable sur les dalles drainantes, car on ne dispose pas d'une surface de roulement suffisamment large pour faire l'essai. On retient donc pour le référentiel : PND.

2.4.3. Résistance aux sollicitations climatiques

Les essais de gel-dégel et d'absorption d'eau permettent d'évaluer la résistance des produits aux agressions climatiques.

2.4.3.1. Tenue au gel-dégel

La détermination de la tenue au gel-dégel des produits, s'effectue par un essai d'écaillage sur éprouvette soumise à 28 cycles de gel-dégel en présence de solution saline. Les essais décrits dans l'Annexe D de la norme **NF EN 1338** [1] pour les pavés et dans l'Annexe D de la norme **NF EN 1339** [2] pour les dalles sont applicables.

La perte de masse par unité de surface après l'essai de gel-dégel doit être inférieure à 1 kg/m² en moyenne, avec aucun résultat individuel supérieur à 1,5 kg/m².

Ces mêmes valeurs peuvent être appliquées pour les pavés à joints larges et les dalles drainantes.

En revanche, cet essai n'est pas applicable pour les pavés poreux, car il requiert de maintenir de l'eau salée en surface, ce qui n'est pas possible avec des pavés poreux, compte tenu que le système « plaques de caoutchouc + isolation thermique » n'est pas étanche.

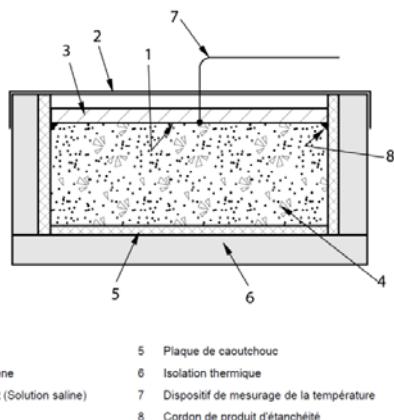


Figure 51 – Schéma du conditionnement d'éprouvette pour l'essai de tenue au gel-dégel

2.4.3.2. Absorption d'eau

L'absorption d'eau est aussi un paramètre de la pérennité du produit. L'essai décrit dans l'Annexe E de la norme **NF EN 1338** [1] pour les pavés et dans l'Annexe E de la norme **NF EN 1339** [2] pour les dalles permet de mesurer le pourcentage d'eau maximal contenu dans le produit.



Figure 52 – Essai d'absorption d'eau

Pour des pavés usuels en béton, la valeur moyenne de l'absorption d'eau doit être inférieure ou égale à 6 % en masse.

Toutefois les projets de révision des normes **NF EN 1338** [1] et **NF EN 1339** [2] feraient passer ce seuil à 6,5 %.

On retient cette valeur moyenne d'absorption d'eau inférieure ou égale à 6,5 % pour tous les produits qui ne sont pas constitués de béton poreux.

2.4.4. Esthétique

La forme, la texture, la couleur, et la géométrie du produit participent à l'esthétique de l'ouvrage.

En contrôlant la géométrie du produit, la mise en œuvre est facilitée (mise en place, dressage) et la sécurité des usagers est améliorée (planéité).

De plus, la résistance mécanique des produits dépend de leur épaisseur, et influe donc sur la tenue au trafic.

Il est donc important de vérifier les différentes caractéristiques géométriques et visuelles des produits, telles que longueurs nominales et leurs tolérances suivant l'Annexe C de la norme **NF EN 1338** [1] ou l'Annexe C de la norme **NF EN 1339** [2].

2.4.5. Sécurité des utilisateurs

- **Glissance**

Les pavés et dalles en béton sont supposés présenter une résistance satisfaisante à la glissance ou au dérapage, sous réserve que l'intégralité de leur surface supérieure n'ait pas été meulée et/ou polie pour obtenir une surface très lisse [1] [2].

Si dans un cas exceptionnel une valeur est exigée pour la résistance à la glissance ou au dérapage, les essais au pendule de frottement décrits en Annexe I de la norme **NF EN 1338** [1] pour les pavés et en Annexe I de la norme **NF EN 1339** [2] pour les dalles sont applicables.

- **Accessibilité**

Les règles d'accessibilité de voirie sont détaillées dans le rapport du CERIB 271.E « Rendre la ville accessible à tous » [35].

Une attention particulière est à porter sur les aménagements avec des pavés à joints larges. En effet *l'arrêté du 15 janvier 2007 portant application du décret n° 2006-1658 du 21 décembre 2006* [34] relatif aux prescriptions techniques pour l'accessibilité de la voirie et des espaces publics fixe des exigences sur les trous ou fentes dans le sol résultant de la présence de grilles ou autres équipements :

« Equipements et mobilier sur cheminement : Les trous ou fentes dans le sol résultant de la présence de grilles ou autres équipements ont un diamètre ou une largeur inférieurs à 2 centimètres. »

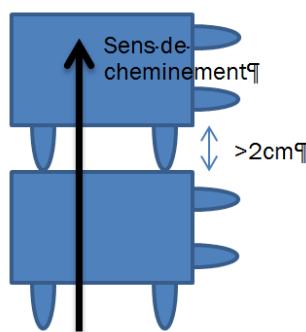


Figure 53 – Exemple de pavés à joints larges sur un cheminement

Les pavés posés avec des joints de largeur supérieure à 2 cm ne sont pas réglementairement interdits, mais les personnes en fauteuils roulants auront beaucoup de difficultés pour y circuler.

Une solution consiste à aménager un cheminement facilement carrossable pour les personnes à mobilité réduite (produits usuels ou produits poreux), et à réservé les pavés à joints larges pour les autres zones. Cela permet également de structurer l'espace et de distinguer les zones de cheminement.

2.5. Bonnes pratiques de mise en œuvre et d'entretien

2.5.1. Principes de pose

La norme **NF P 98-335** [3] précise qu'elle « ne concerne pas la mise en œuvre des revêtements perméables, spécialement conçus pour permettre l'infiltration des eaux de ruissellement à travers les produits modulaires ». De plus, « en aucun cas, la largeur du joint large ne peut excéder 10 % de l'épaisseur du produit ».

Cependant le fascicule 70 titre 2 [4] recommande d'utiliser la norme **NF P 98-335** « Chaussées urbaines - Mise en œuvre des pavés et dalles en béton» [3] pour la mise en œuvre de pavés poreux et de dalles perméables.

Les recommandations ci-après s'appuient donc sur la norme **NF P 98-335** [3].

Pour conserver les caractéristiques du revêtement et son aspect, le déchargement des produits, leur stockage et leur distribution sur le chantier seront soignés.

Une attention particulière sera à porter sur le compactage des matériaux à granularité discontinue utilisés pour les couches de fondation.

La circulation sur les différentes couches est déconseillée pour éviter l'apport de fines et un colmatage éventuel. Pour la même raison, les matériaux et produits doivent être stockés sur une surface propre, en général sur le pavage déjà réalisé.

2.5.1.1. Pose des pavés poreux et des pavés à joints larges ou à ouvertures de drainage (évidés ou perforés)

On peut se référer au carnet de chantier CERIB intitulé « Guide de pose des pavés, dalles et bordures préfabriqués en béton »[45], qui s'appuie sur la norme **NF P 98-335** [3].

De manière à ce que le revêtement ait un bon comportement sous l'effet de charges verticales et d'efforts horizontaux dus au trafic, il convient d'apporter un soin particulier à la réalisation des étapes suivantes :

- Acceptation des assises et du drainage éventuel
L'entreprise de pose vérifie la planéité et les pentes des assises, ainsi que le système de drainage éventuel dans le cas où le sol support est imperméable ou en cas de risque de pollution de la nappe phréatique par exemple. Comme précisé précédemment au paragraphe 2.3.1.5, les assises doivent présenter un coefficient de perméabilité compatible avec le coefficient de perméabilité du revêtement.
- Réalisation des blocages de rive
De la même manière que pour les pavés usuels en béton, il est nécessaire de créer des butées longitudinalement, à l'aide de bordures, pour éviter le mouvement des pavés sous circulation et l'ouverture des joints.
- Réalisation du lit de pose
L'épaisseur du lit de pose après mise en place des pavés doit être de $3 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ et uniforme, nivellée à la règle. Le respect de cette épaisseur conditionne la pérennité des ouvrages circulés.
- Pose des pavés
Le choix du type de pose est conditionné par le poids des produits et la cadence de pose, qui orienteront vers une pose mécanisée ou manuelle, et par les sollicitations et les conditions d'exploitation prévues pour les ouvrages qui conditionnent la nature de leur lit de pose et des joints.
En pose mécanisée, réalisable pour des appareillages simples, un pré-compactage du lit de pose est nécessaire pour éviter l'orniérage lors du passage de l'engin, qui doit toujours circuler sur les produits déjà posés.

La pose se fait du point bas vers le point haut, et suivant l'appareillage, le poseur évoluant sur la surface déjà réalisée.

En présence de trafic de véhicules, on s'oriente sur des appareillages à lignes de joints discontinues dans le sens principal de circulation.

- **Réalisation des joints et remplissage**

Les joints et ouvertures entre les pavés et dalles transmettent les efforts horizontaux générés par le trafic routier. Le remplissage des joints et ouvertures s'effectue à l'avancement, avant d'enlever l'excédent par balayage. Le revêtement est damé du centre jusqu'aux rives. Après plusieurs regarnissage et damage, les joints et/ou ouvertures sont remplis à refus.

- **Contrôles**

Il convient de contrôler le niveling, la planimétrie, l'intégrité des produits, le calepinage et l'appareillage, les joints...

- **Mise en service**

La circulation peut être rétablie directement après la réception de l'ouvrage, il n'y a pas de délai de mise en service. Un regarnissage éventuel des joints et ouvertures peut être nécessaire après quelques jours.

- **Pentes des surfaces des ouvrages**

D'une manière générale, la résultante des pentes en long et en travers doit en tout point être comprise entre 1 % et 5 % pour permettre une bonne infiltration des eaux pluviales sans entraîner de ruissellement.

2.5.1.2. Pose des dalles drainantes

Ces principes de pose de dalles drainantes sont issus du document « Recommandations pour la pose des dalles gazon » [37] du Syndicat national des fabricants de produits en béton pour voirie de surface et signalisation.

- **Cas de circulation piétonnière ou de véhicules légers (allées résidentielles, parkings sans trafic de camions, descentes de garage...)**

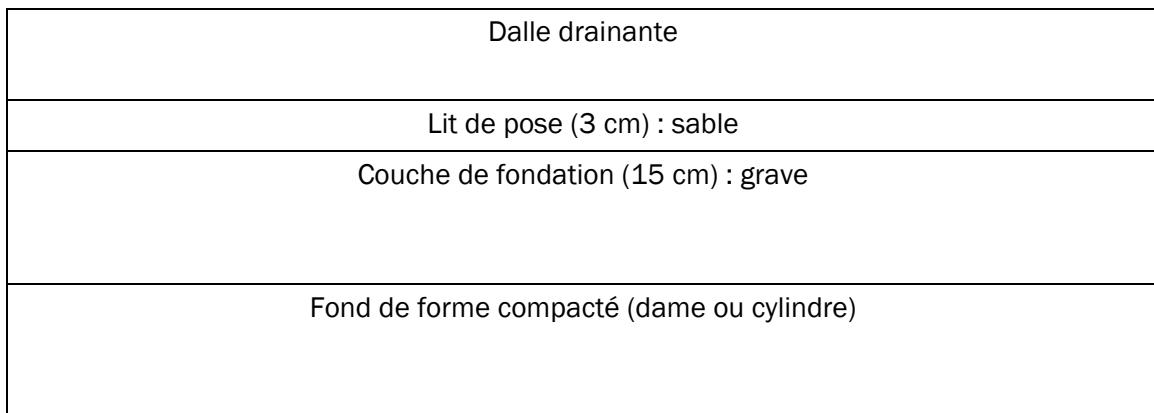
Lorsque le terrain est porteur, seul un décapage sur 10 à 15 cm d'épaisseur est souhaitable. Le fond de forme est alors compacté avec une dame ou un cylindre, puis réglé soigneusement à l'aide d'un sable argileux ou d'un mélange de terre végétale et de sable.

Quelques dalles sont alors posées comme point de niveau, puis le complément est assemblé à la règle ou au cordeau.

Lorsque le terrain n'est pas porteur, il est alors nécessaire de terrasser jusqu'à 25 à 30 cm du sol fini afin de réaliser une couche de fondation en grave cru ou en tout venant compacté de 15 cm environ.

- Cas de circulation de véhicules lourds

Lorsque le terrain est porteur, le décapage réalisé jusqu'à une profondeur de 25 à 30 cm permet, après compactage du fond de forme, la réalisation d'une couche de fondation de 15 cm environ de tout venant, comme le présente la coupe ci-dessous.



Lorsque le terrain n'est pas porteur, il est nécessaire d'augmenter cette couche de fondation de 15 cm environ selon la nature du terrain.

Il est impératif toutefois d'éliminer tout matériau à base de ciment ou de bitume qui s'oppose à la pousse correcte du gazon.

La pose s'effectue sur un lit de sable éventuellement argileux ou limoneux.

- Engazonnement

La terre végétale, de bonne qualité, sans motte, est mise en remblai à refus.

Il est souhaitable de laisser tasser quelques jours en arrosant si possible pour amener le niveau de la terre au bas des plots.

L'engazonnement est alors réalisé avec des graines robustes à croissance lente, à l'exclusion des Ray-grass, adaptées au climat, et le remblai est achevé avec un mélange de terre végétale et d'humus ou d'humus pur.

De toute façon, les règles générales de l'Art pour l'engazonnement doivent être respectées. On ne doit pas, notamment, arroser si l'on ne peut pas assurer un arrosage fréquent.

2.5.2. Entretien

Les éléments polluants qui se déposent à la surface du revêtement peuvent colmater la surface et diminuer fortement la perméabilité globale. Des opérations d'entretien permettent de retrouver une valeur plus élevée de coefficient de perméabilité et de garder l'esthétique du revêtement.

Une valeur de coefficient de sécurité C_s de 10 prend en compte ce colmatage pour une durée de service de 20 ans sans entretien de la chaussée [33]. Dans le cas d'un entretien fréquent et suivi, il est possible de prendre une valeur moindre de coefficient de sécurité pour le calcul du coefficient de perméabilité requis.

Suivant l'évolution du colmatage, différentes techniques peuvent être utilisées : mouillage suivi de balayage, balayage aspiration, aspiration seule, haute pression...

En cas de dégarnissage des joints et ouvertures, des opérations de regarnissage sont recommandées.

Pour éviter le gel en hiver sur le revêtement, il est possible d'utiliser des sels de dé verglaçage, mais on évitera le sable qui peut colmater les produits poreux ou les matériaux de jointolement et de remplissage.

Dans les zones de fortes utilisations de sels de dé verglaçage, l'usage de revêtements poreux est fortement déconseillé, à cause du risque de pollution de la nappe, et de dégradation éventuelle des produits.

2.5.2.1. Entretien en cas d'obstruction

D'après le centre de recherches routières belge (CRR), il convient uniquement d'envisager un nettoyage en cas d'obstruction, qui se manifestera essentiellement sur le centimètre supérieur de la surface. [44]

Il est possible de nettoyer les joints et les pores de la surface à l'aide d'une balayeuse aspiratrice ou d'un nettoyeur vapeur sous faible pression afin de garantir à nouveau une bonne perméabilité.

Si le produit est très colmaté, il est possible de le démonter, suivant les étapes de la Figure 55 et de le remplacer par un autre produit neuf ou nettoyé.

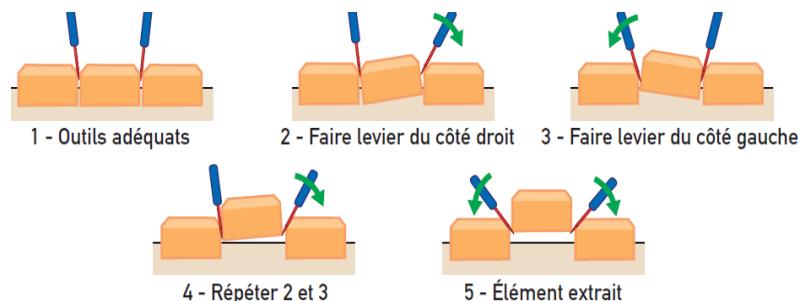


Figure 55 – Méthode non destructive d'enlèvement de produit

Lorsqu'un lavage à l'eau sous pression est pratiqué, la pression doit être au plus de 4 à 5 MPa (40 à 50 bars) et l'angle d'attaque doit être inférieur à 30 degrés par rapport à la surface afin de limiter le plus possible le dégarnissage des joints et ouvertures.

L'élimination des mauvaises herbes éventuelles en surface est possible, mais l'emploi de désherbants chimiques est déconseillé pour éviter une éventuelle pollution de la nappe phréatique.

2.5.2.2. Entretien des produits engazonnés

En ce qui concerne les produits engazonnés, d'après les recommandations pour la pose de dalles drainantes [37], la tonte doit être réalisée régulièrement, et il est souhaitable de répandre de l'engrais à dosage faible 2 à 3 fois par an et d'arroser si nécessaire.

L'usage de phytosanitaire est fortement déconseillé pour éviter toute pollution éventuelle de la nappe phréatique.

2.6. Conclusion

Devant l'absence de recommandation spécifique sur les produits en béton pour les revêtements drainants en France et en Europe, cette étude a permis de définir un référentiel technique professionnel français sur les familles de produits suivantes : les pavés poreux, les pavés à joints larges, ainsi que les dalles drainantes.

Ce référentiel technique spécifique aux produits en béton pour l'infiltration des eaux pluviales détermine les caractéristiques fonctionnelles des pavés et dalles en béton drainants et formule les exigences auxquelles ces produits de pavage doivent satisfaire : caractéristiques géométriques, résistance à l'abrasion, résistance mécanique, perméabilité...

De plus, un essai de perméabilité a été développé lors de cette étude afin de pouvoir mesurer le coefficient de perméabilité du revêtement d'ouvrages d'infiltration.

Le coefficient de perméabilité de l'ensemble « produits et matériaux de jointolement ou de remplissage des vides » déterminé par cet essai constitue alors un élément de dimensionnement nécessaire pour les concepteurs d'ouvrages d'infiltration. Le protocole d'essai pourrait être introduit dans un futur référentiel de certification.

Une méthode de conception hydraulique des ouvrages permettant de déterminer le coefficient de perméabilité requis pour le revêtement de l'ouvrage d'infiltration a été détaillée, d'après les données suivantes :

- La pluie type à infiltrer définie par le maître d'ouvrage : durée de la pluie, période de retour...
- Les caractéristiques du projet : surfaces dont on veut récupérer les eaux pluviales, coefficients de Montana applicables sur le lieu du projet...
- Un coefficient de colmatage ou de sécurité.

Les bonnes pratiques de mise en œuvre et d'entretien ont aussi été rappelées.

Bibliographie

- [1] NF EN 1338 : Pavés en béton - Prescriptions et méthodes d'essai, AFNOR, Février 2004
- [2] NF EN 1339 : Dalles en béton - Prescriptions et méthodes d'essai, AFNOR, Février 2004
- [3] NF P 98-335 : Chaussées urbaines - Mise en œuvre des pavés et dalles en béton, des pavés en terre cuite et des pavés et dalles en pierre naturelle, AFNOR, Mai 2007
- [4] Fascicule n° 70 du CCTG Ouvrages d'assainissement Titre II : Ouvrages de recueil, de restitution et de stockage des eaux pluviales, Novembre 2003
- [5] Circulaire interministérielle n° 77-284/ INT « Instruction technique relative aux réseaux d'assainissement des agglomérations »
- [6] L'infiltration en questions, Recommandations pour la faisabilité la conception et la gestion des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain, Version 2, GRAIE, Janvier 2009
- [7] Techniques Alternatives En Assainissement Pluvial - Choix, Conception, Réalisation Et Entretien, Yolande Azzout, Editions Lavoisier, 1994
- [8] Fascicule FD P84-204-3/A1 (DTU 43.1 - Travaux de bâtiment - Étanchéité des toitures terrasses et toitures inclinées avec éléments porteurs en maçonnerie en climat de plaine - Partie 3 : guide à l'intention du Maître d'Ouvrage), Août 2007
- [9] NF EN 752 Réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments, AFNOR, Mars 2008
- [10] NF DTU 64.1 Dispositifs d'assainissement non collectif (dit autonome) - Pour les maisons d'habitation individuelle jusqu'à 20 pièces principales, AFNOR, Août 2013
- [11] NF EN 1990 Eurocodes structuraux - Bases de calcul des structures, AFNOR, Mars 2003 (Annexe D- Dimensionnement assisté par l'expérimentation)
- [12] NF EN 13369 - Règles communes pour les produits préfabriqués en béton, AFNOR, Novembre 2013
- [13] Rapport CERIB RT 042 - Optimisation de la mise en œuvre des revêtements modulaires perméables en béton, 1998
- [14] Rapport CERIB PT 123 - revêtements modulaires en béton pour chaussées réservoir, 1998
- [15] NF EN 933-1 Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, AFNOR, Mai 2012
- [16] NF EN ISO 11058 Géotextiles et produits apparentés - Détermination des caractéristiques de perméabilité à l'eau normalement au plan, sans contrainte mécanique, AFNOR, Juin 2010

- [17] NF EN ISO 12956 Géotextiles et produits apparentés - Détermination de l'ouverture de filtration caractéristique, AFNOR, Juin 2010
- [18] Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau (DCE)
- [19] Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement dite « Grenelle 2 »
- [20] Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques
- [21] Code de l'Environnement, version consolidée au 17 novembre 2014
- [22] Code de la Voirie routière
- [23] Code de l'Urbanisme, version consolidée au 8 novembre 2014
- [24] Code de la Santé Publique, version consolidée au 17 novembre 2014
- [25] Nomenclature IOTA, Article R214-1 Code de l'Environnement
- [26] CGCT Code Général des Collectivités Territoriales, version consolidée au 1 septembre 2014
- [27] Carnet de chantier CERIB 152.E Guide de pose des pavés, dalles et bordures préfabriqués en béton
- [28] Collection technique CIMbéton - T54. Aménagements urbains et produits de voirie en béton : Conception et réalisation
- [29] Collection technique CIMbéton - T57. Voiries et aménagements urbains en béton : Revêtement et structures réservoir
- [30] Rapport CERIB 206.E - Guide de conception des ouvrages réalisés à partir de pavés, dalles, bordures et caniveaux préfabriqués en béton
- [31] long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement », Dr. Soenke Borgwardt, 8th International Conference on Concrete Block Paving, November 6-8, 2006 San Francisco, California USA
- [32] Analyse physique des sols, Méthodes choisies de Clément Mathieu et Françoise Pieltain, édition Tec et Doc
- [33] Guide to the design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements- Edition 6, Interpave, January 2010
- [34] Arrêté du 15 janvier 2007 portant application du décret n° 2006-1658 du 21 décembre 2006 - prescriptions techniques pour l'accessibilité de la voirie et des espaces publics
- [35] Rapport CERIB 271.E Rendre la ville accessible à tous
- [36] Techniques alternatives en assainissement pluvial – choix, conception, réalisation et entretien, Y. Azzout, S. Barraud, F.N. Cres, E. Alfakih - GRAIE, LCPC, Agences de l'eau, CERTU, INSA Lyon

- [37] Recommandations pour la pose des dalles gazon, Syndicat national des fabricants de produits en béton pour voirie de surface et signalisation et CERIB
- [38] Pollution retention of different permeable pavements with reservoir structure at high hydraulic loads C. Dierkes1, M. Lohmann, M. Becker and U. Raasch 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen/Denmark, 21 -26 August 2005
- [39] Effective pollutant retention capacity of permeable pavements for infiltrated road runoffs determined by laboratory tests S. Fach and W.F. Geiger Water Science and Technology Vol 51 No 2 pp 37-45
- [40] PTV 121 – 2009, PROBETON, dalles gazon en béton
- [41] PTV 122 – 2009, PROBETON, pavés et dalles en béton perméables à l'eau
- [42] DIN 18507 – 2012, DIN, Pavés en béton à structure ouverte
- [43] BGB-Richtlinie - 2005, Nicht genormte Betonprodukte
- [44] Dossier 5 « Revêtements drainants en pavés de béton », Annexe au Bulletin CRR n° 77 (2008), Centre de recherches routières
- [45] Guide de pose des pavés, dalles et bordures préfabriqués en béton, 152.E, CERIB
- [46] Méthode de dimensionnement mécanique des dalles gazon, 352.P, 2015 CERIB

Annexes

Annexe 1 – Eléments de choix du matériau de jointoiement/remplissage

Il existe de nombreuses formules empiriques¹ pour calculer la capacité d'infiltration d'un sable ou gravillon à partir de multiples données comme la porosité et la répartition granulométrique, mais le coefficient de perméabilité dépend de la taille des grains, de la distribution granulaire, de la forme, de la composition, du degré de saturation et de la teneur en eau, du compactage...

Un ordre de grandeur des coefficients de perméabilité théoriques des différents matériaux de jointoiement ou de remplissage est donné par Dr. Soenke Borgwardt, pour des courbes granulométriques idéales, dans son article « long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement » [31] :

- Pour des gravillons concassés 2/5 mm, $K = 10^{-2}$ à 10^{-3} m/s
- Pour des gravillons concassés 1/3 mm, $K = 10^{-3}$ à 10^{-4} m/s
- Pour un mélange de gravillons et de sable 0/5 mm, $K = 10^{-4}$ à 10^{-5} m/s
- Pour un sable 0/2 mm $K = 10^{-4}$ à 10^{-5} m/s

Il est aussi possible de déterminer la perméabilité d'un sable ou gravillon par un essai².

Cependant, il n'est pas possible d'avoir une valeur de coefficient de perméabilité pour un sable « type ». De plus, on ne peut pas relier cette valeur de coefficient de perméabilité du matériau de jointoiement ou de remplissage au coefficient de perméabilité global de la surface de revêtement. En effet, la relation entre le ratio d'ouvertures (ou la largeur de joints) et le coefficient de perméabilité est mal connue, et n'est pas linéaire, comme le montre la figure ci-après.

¹ Van Ganse, Kozeny et Carman, Cazenove, Hazen, Awad et Amer, Cazagrande, Terzaghi, Schlichter, Bakhmetef, Bretjinski...

² ISO 17312:2005 Qualité du sol - détermination de la conductivité hydraulique de matériaux poreux saturés à l'aide d'un perméamètre à paroi rigide

ISO 17313:2005 Qualité du sol - détermination de la conductivité hydraulique de matériaux poreux saturés à l'aide d'un perméamètre à paroi flexible

NF X30-441 :2008 Déchets - Détermination en laboratoire du coefficient de perméabilité à saturation d'un matériau - Essais de perméabilité au perméamètre à paroi rigide à gradient hydraulique constant/variable

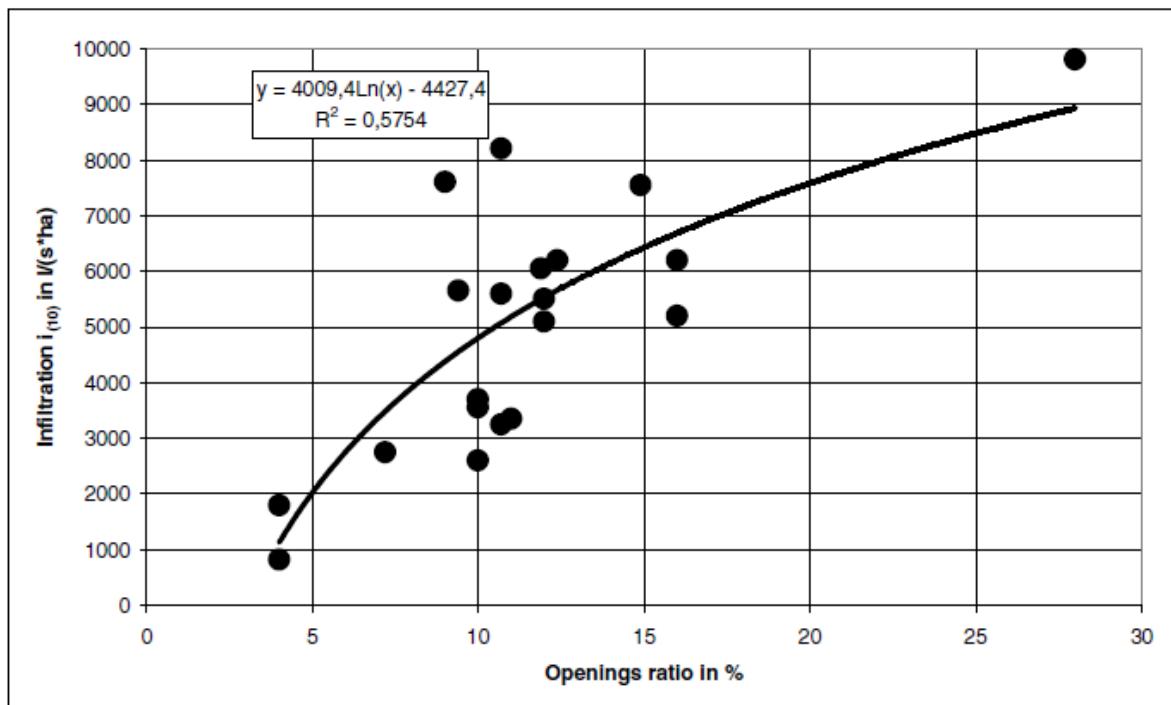


Figure 56 – Influence du ratio d'ouvertures sur le coefficient de perméabilité sur un revêtement de pavés en béton neufs (« long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement », Dr. Soenke Borgwardt [31])

On utilise alors les recommandations de choix suivantes pour les sables et gravillons et on préconise un test « ouvrage » sur les produits et leur matériau de remplissage ou de jointoientement, en laboratoire, suivant le protocole décrit en 1.3.

Les joints ou cavités doivent être garnis des matériaux de jointoientement ou de remplissage préconisés par les fabricants.

Dans tous les cas, il convient de choisir un matériau de jointoientement ou de remplissage dépourvu d'éléments fins pour favoriser l'infiltration à travers les joints, et éviter le colmatage des produits, lors du garnissage des joints par balayage par exemple.

Ainsi les sables ou gravillons doivent être lavés de façon à éliminer les fines (particules inférieures à $63 \mu m = 0,063 \text{ mm}$), qui pourraient colmater le revêtement drainant, ou les couches inférieures en « glissant » dans le lit de pose et conduisent donc à un coefficient de perméabilité plus faible, comme le montre la figure ci-contre :

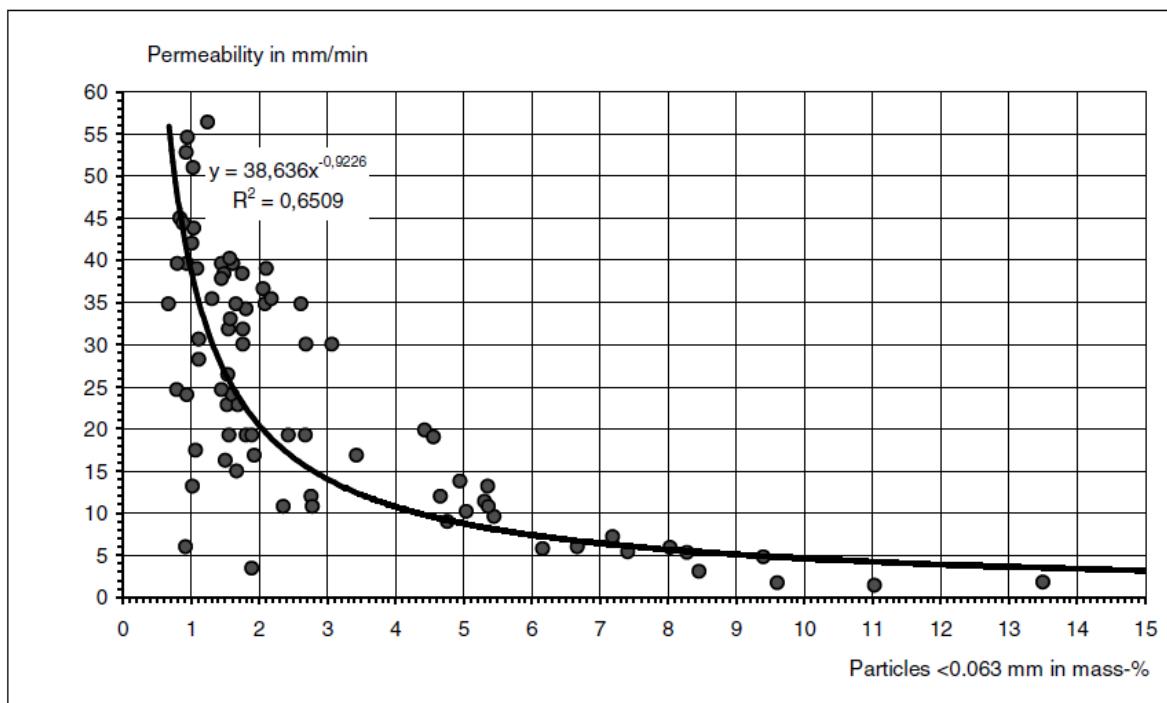


Figure 57 – Influence du pourcentage de fines dans le matériau de jointoiement ou de remplissage sur le coefficient de perméabilité (« long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement », Dr. Soenke Borgwardt [31])

De même, des matériaux durs, pérennes et stables à l'eau sont préférables, de manière à éviter leur dégradation au fil du temps et l'apport supplémentaire de fines et poussières dans l'ouvrage. Par exemple, les matériaux issus de carrières de roche massive calcaire ne sont donc pas recommandés.

Des sables ou gravillons concassés, du fait de leur géométrie anguleuse, ont une compacité plus faible lors de l'empilement que des sables ou gravillons roulés. On préférera donc des matériaux concassés qui créent donc plus de volume de vide à la mise en œuvre et sont donc plus perméables.

Pour des pavés poreux, il est recommandé de choisir un matériau de jointoiement dépourvu d'éléments fins pour éviter le colmatage des produits poreux, comme par exemple un sable 1/2 mm ou 0/2 mm bien gradué.

Il est possible de s'inspirer de la norme **NF DTU 64.1 partie 1-2** [10]. Le sable roulé siliceux lavé, notamment issu de matériaux alluvionnaires, est un matériau stable à l'eau. Sa courbe granulométrique s'inscrit dans le fuseau donné à l'Annexe A de la norme **NF DTU 64.1** [10], donné sur le graphique ci-après.

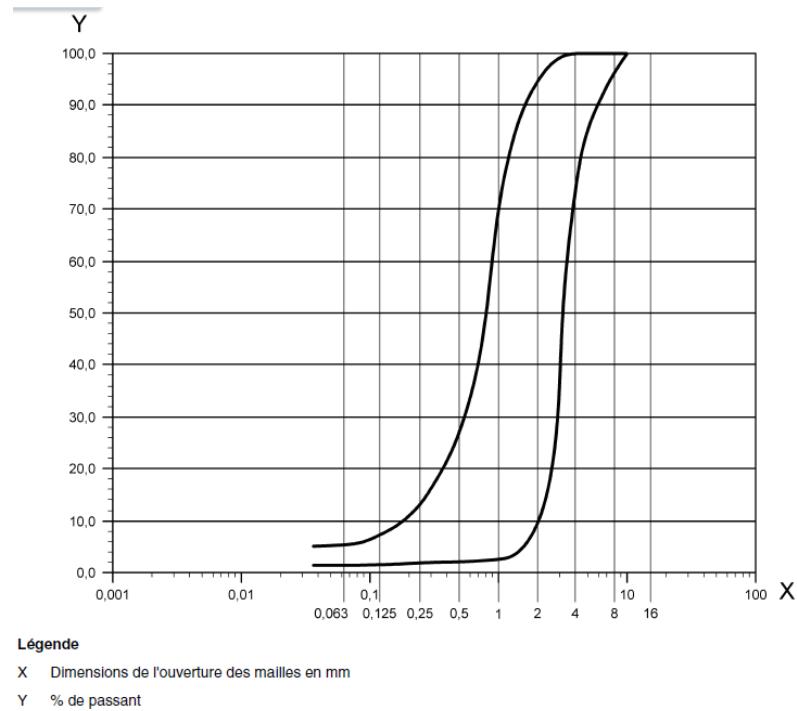


Figure 58 – Fuseau granulométrique des sables filtrants, annexe A de la norme **NF DTU 64-1**

Pour le remplissage des joints des pavés à joints larges ou des pavés à ouvertures de drainage (évidés ou perforés) ou des dalles drainantes, les gravillons peuvent être issus de roches meubles alluvionnaires ou de roches massives concassées. Les gravillons doivent présenter une teneur en fines (pourcentage de passants à 63 microns mesuré selon **NF EN 933-1** [15]) inférieure à 5 %.

Les caractéristiques granulométriques des matériaux de jointolement/remplissage seront choisies en fonction de la taille des joints créés, afin de permettre un garnissage homogène. Des gravillons 2/4 concassés sans fines peuvent correspondre.

Pour l'engazonnement des dalles drainantes ou des pavés à joints larges, on peut utiliser un mélange de terre végétale et de sable 0/4, usuellement en proportions volumiques 1/3 de sable pour 2/3 de terre végétale.

Annexe 2 – Eléments Statistiques

Annexe D de la norme NF EN 1990 – Dimensionnement assisté par l’expérimentation
 Pour déterminer la valeur caractéristique pour un risque statistique de 5 % du paramètre testé, il convient de prendre en compte la dispersion des essais et l’incertitude statistique associée au nombre d’essais.

L’expression suivante permet de déterminer la valeur caractéristique X_d d’une propriété individuelle à partir de n essais, à partir des hypothèses suivantes :

- La distribution des n variables X_i est supposée normale ;
- La moyenne m_X sur les n variables est a priori inconnue ;
- L’écart-type S_x sur les n variables est a priori inconnu ;

$$X_d = m_X - k_n S_x$$

Avec

$$m_X = \frac{1}{n} \sum_1^n X_i$$

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (X_i - m_X)^2}$$

k_n est un coefficient d’incertitude statistique, dépendant du nombre d’observations n :

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
k_n	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Index des figures

Figure 1 – Produits étudiés : pavés poreux (a), pavés à joints larges (b), et dalles drainantes (c)	8
Figure 2 – Vue du dessus et vue de côté d'un pavé avec écarteur	10
Figure 3 – Rupture d'une dalle drainante	10
Figure 4 – Schéma de principe de l'essai de détermination du coefficient de perméabilité	16
Figure 5 – Préparation d'un essai d'infiltration	17
Figure 6 – Vue d'un montage pour déterminer la capacité d'infiltration	18
Figure 7 – Géotextile installé sur la grille pour les essais d'infiltration	19
Figure 8 – Pesée du bac de récupération à l'aide du chariot élévateur	19
Figure 9 – Installation des produits sur le bâti	20
Figure 10 – Remplissage des ouvertures de drainage	20
Figure 11 – Préparation de l'essai d'infiltration – géotextile de surface et rampe d'arrosage	21
Figure 12 - Insertion du bac de récupération sous la surface d'essai	21
Figure 13 – Débits d'eaux pluviales entrants et sortants d'un dispositif de stockage provisoire	28
Figure 14 – Schéma de chaussées à structure réservoir : (a) infiltration directe, (b) infiltration et exutoire, (c) exutoire	29
Figure 15 – Exemple de chaussée à structure réservoir avec restitution par infiltration dans le sol	30
Figure 16 – Exemple de chaussée à structure réservoir avec restitution vers un exutoire	30
Figure 17 – Exemples d'utilisation de produits en béton pour l'infiltration des eaux pluviales	33
Figure 18 – Exemples de pavés poreux	35
Figure 19 – Exemples de pavés à joints larges	35
Figure 20 – Exemple de pavés à joints larges avec écarteurs intégrés	36
Figure 21 – Quatre exemples de calepinage de pavés (bleus) posés avec des écarteurs rapportés (rouges)	36
Figure 22 – Exemples de pavés évidés ou perforés	37
Figure 23 – Exemples de dalles drainantes	37
Figure 24 – Représentation schématique des courbes IDF	39
Figure 25 – Représentation d'une pluie de projet rectangulaire	39
Figure 26 – Représentation d'une pluie de projet simple triangle	39
Figure 27 – Représentation d'une pluie de projet double triangle	40
Figure 28 – Représentation de pluies de projet complexes	40
Figure 29 – Découpage de la France en 3 régions de pluviométrie homogène – INT 77-284 [5]	41
Figure 30 – Coefficients de Montana suivant les régions, selon INT 77-284 [5] pour une fréquence de dépassement F. Cas d'une durée de pluie comprise entre 5 minutes et 120 minutes	41
Figure 31 – Diminution du coefficient de perméabilité dans le temps due au colmatage (« long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement », Dr. Soenke Borgwardt [31])	47
Figure 32 – Cas d'une surface drainante de type parking combinant plusieurs types de revêtements	49
Figure 33 – Éléments creux en béton de type « Hydrocyl » pour couche de base	50
Figure 34 – Schéma de la surface de stockage et la surface de laquelle on veut stocker la pluie	51
Figure 35 – Schéma de l'essai de détermination du coefficient de perméabilité	53
Figure 36 – Préparation d'un essai d'infiltration	54
Figure 37 – Volume mouillé à la verticale d'un cylindre rempli d'eau	54
Figure 38 – Vue d'un montage pour déterminer la capacité d'infiltration - tiges filetées, presses et joint d'étanchéité	55
Figure 39 – Photo du trop-plein sur le dispositif d'essai de perméabilité	56
Figure 40 – Montage d'un essai d'infiltration - géotextile supérieur et rampe d'arrosage	57
Figure 41 – Courbe granulométrique du sable 0/2 mm utilisé pour les essais d'infiltration sur pavés poreux	58

Figure 42 – Courbe granulométrique des gravillons 2/4 mm utilisés pour les essais d'infiltration sur pavés à joints larges.....	58
Figure 43 – Courbe granulométrique du sable 0/4 mm utilisé en mélange avec la terre végétale pour les essais d'infiltration sur dalles drainantes	59
Figure 44 – Mise en place du revêtement - remplissage à la balayette et affermissemement à la masse	59
Figure 45 – Tassement naturel du mélange terre-sable sous l'action de l'eau.....	60
Figure 46 – Essai de fendage sur pavé poreux	62
Figure 47 – Vue du dessus et vue de côté d'un pavé avec écarteur	63
Figure 48 – Essai de flexion sur dalle drainante	63
Figure 49 – Rupture d'une dalle drainante.....	64
Figure 50 – Dispositif d'essai d'abrasion sur pavés.....	65
Figure 51 – Schéma du conditionnement d'éprouvette pour l'essai de tenue au gel-dégel	66
Figure 52 – Essai d'absorption d'eau.....	66
Figure 53 – Exemple de pavés à joints larges sur un cheminement	67
Figure 54 – Coupe type d'une structure en dalles drainantes sous véhicules lourds en terrain porteur.....	70
Figure 55 – Méthode non destructive d'enlèvement de produit	71
Figure 56 – Influence du ratio d'ouvertures sur le coefficient de perméabilité sur un revêtement de pavés en béton neufs (« long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement », Dr. Soenke Borgwardt [31])	78
Figure 57 – Influence du pourcentage de fines dans le matériau de jointoiement ou de remplissage sur le coefficient de perméabilité (« long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement », Dr. Soenke Borgwardt [31])	79
Figure 58 – Fuseau granulométrique des sables filtrants, annexe A de la norme NF DTU 64-1	80

Index des tableaux

Tableau 1 – Tableaux de détermination des classes de résistance à la flexion	11
Tableau 2 – Tableaux de détermination des classes de charges de rupture à la flexion.....	11
Tableau 3 – Ordres de grandeur de la conductivité hydraulique dans différents sols	31
Tableau 4 – Fréquences de calcul recommandées à utiliser avec des méthodes de conception complexes, tableau 3 de la norme NF EN 752 [9]	38
Tableau 5 – Valeurs locales de coefficients de Montana, pour une période de retour de 10 ans, extrait du	43
Tableau 6 – Coefficients de ruissellement pour le calcul des eaux de ruissellement pour des petits projets d'aménagements, selon tableau E3 de la norme NF EN 752 [9].....	45
Tableau 7 – Détermination du coefficient de perméabilité K requis dans différentes régions de pluviométrie homogène, et pour différentes durées de pluie, pour une période de retour T de 10 ans.....	48
Tableau 8 – Détermination du coefficient de perméabilité K requis dans différentes régions de pluviométrie homogène, et pour différentes durées de pluie, pour une période de retour T de 30 ans.....	48

RAPPORT

ÉTUDES ET RECHERCHES

DIFFUSION DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES

JENNIFER FALEYEUX



Cerib - CS 10010
28233 Épernon cedex

02 37 18 48 00
cerib@cerib.com

ÉLÉMENTS MODULAIRES EN BÉTON POUR REVÊTEMENT DES OUVRAGES D'INFILTRATION DES EAUX PLUVIALES : référentiel technique

En l'absence de recommandations spécifiques sur les produits en béton pour les revêtements perméables en France, cette étude a permis de définir un référentiel technique professionnel français couvrant trois familles de produits drainants : les pavés poreux, les pavés à joints larges, ainsi que les dalles drainantes. Il précise les caractéristiques fonctionnelles nécessaires de ces produits et formule les exigences qu'ils doivent satisfaire : caractéristiques géométriques, résistance à l'abrasion, résistance mécanique, perméabilité... Un essai de perméabilité a été développé afin de pouvoir mesurer le coefficient de perméabilité de l'ensemble « produits drainants et matériaux de jointolement ou de remplissage ».

Une méthode de dimensionnement hydraulique des ouvrages d'infiltration est détaillée, prenant notamment en compte la pluie à infiltrer définie par le maître d'ouvrage et un coefficient minorateur du coefficient de perméabilité du revêtement (effets du colmatage et/ou coefficient de sécurité).

Les bonnes pratiques de mise en œuvre et d'entretien sont également rappelées.

MODULAR PRECAST CONCRETE PRODUCTS FOR SURFACE RUNOFF INFILTRATION STRUCTURES: technical specifications

Facing the lack of specific recommendations on concrete permeable pavements in France, this study aimed to define a French technical guidelines document applicable to three products families: porous concrete pavers, concrete pavers with wide joints, and concrete grass grids. It specifies the necessary functional properties of these products, and fixes the requirements they should meet: deviations of the dimensions, abrasion resistance, mechanical performance, permeability...

A permeability test protocol has been developed to measure the permeability coefficient of the set "permeable products and their jointing or filling material". A hydraulic design method of these infiltration structures is detailed, taking into account, among others parameters, a reducing factor, in order to integrate clogging and safety.

Best practices for laying and maintaining the permeable pavements are also reminded.