

# Recommandations pour la commande d'études d'infiltrabilité des sols





# Recommandations pour la commande d'études d'infiltrabilité des sols

Collection | **Références**

Édition Cerema

Cerema Eau, mer et fleuves – 134, rue de Beauvais – CS 60039 – 60280 Margny-lès-Compiègne Tél : +33(0)3 44 92 60 00

Siège social : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30

L'ouvrage est une œuvre collective réalisée sous la direction du Cerema.

#### Les rédacteurs

Bruno KERLOC'H, Cerema Nord-Picardie  
Julien HABERT, Cerema Nord-Picardie

#### Les Membres du groupe de travail

Maëlle ANCELLE, ADOPTA  
Philippe BONNEAU, Agence de l'Eau Artois-Picardie  
Pierre BRAME, Communauté d'Agglomération Lens-Liévin  
Marie BRICLOT, Communauté d'Agglomération Hénin-Carvin  
Hervé CANLER, Agence de l'Eau Artois-Picardie  
Gilles CHAUSSEBOURG, STRADAL  
Ludovic DENNIN, Douaisis Agglo  
Elia DESMOT, ADOPTA  
Hakim HAIKEL, Syndicat Intercommunal d'Assainissement de Valenciennes  
David HENRYON, APOGEO  
Jean-Jacques HERIN, ADOPTA  
Emmanuelle LACAILLE, Communauté d'Agglomération Hénin-Carvin  
Bruno MACKRE, Communauté d'Agglomération Hénin-Carvin  
Anne-Laure MILL, Agence de l'Eau Artois-Picardie  
Cécilia POPULAIRE, Syndicat Intercommunal d'Assainissement de Valenciennes  
Frédérique RAMETTE, Communauté d'Agglomération Béthune-Bruay, Artois Lys Romane  
Grégory TEITE, SIA Habitat  
Baptiste TONON, DREAL Hauts-de-France  
Nicolas VAN MEENEN, MAGEO  
Benoît ZULIANI, STRADAL

#### Les relecteurs

Olivier COURCY, BET ALEHO  
Barbara LOUCHE, Université d'Artois, Hydrogéologue  
Cyril GACHELIN, Office International de l'Eau  
Aurélié GEROLIN, DRIEE Ile de France, Service Police de l'eau  
Olivier PREVOST, DREAL Hauts-de-France  
Yannick VAN ES, Métropole Européenne de Lille, Directeur eau et assainissement

Comment citer cet ouvrage :

Cerema. Recommandations pour la commande d'études d'infiltrabilité des sols  
Cerema, 2019. Collection : Références. ISBN : 978-2-37180-415-9 (web)

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

<b>1. POURQUOI CES RECOMMANDATIONS ?</b>	<b>4</b>	6.2.2 MAÎTRE D'ŒUVRE	15
1.1 CONTEXTE	4	6.2.3 BUREAU D'ÉTUDES GÉOTECHNIQUE	15
1.2 OBJECTIFS	4	<b>6.3 COMMANDE D'ÉTUDE D'INGÉNIERIE GÉOTECHNIQUE</b>	<b>15</b>
<b>2. NOTIONS D'INFILTRABILITÉ ET DE PERMÉABILITÉ</b>	<b>4</b>	6.3.1 ÉLÉMENTS D'ENTRÉE	15
<b>3. CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE</b>	<b>5</b>	6.3.2 DIMENSIONNEMENT DE LA CAMPAGNE DE RECONNAISSANCES	16
<b>4. LES TERRAINS VIS-À-VIS DE L'INFILTRABILITÉ</b>	<b>5</b>	<b>6.4 RENDU DE LA MISSION D'INGÉNIERIE GÉOTECHNIQUE</b>	<b>16</b>
4.1 NATURES DES TERRAINS	5	6.4.1 RAPPORT FACTUEL	16
4.1.1 LES SOLS	5	6.4.2 MODÈLE GÉOTECHNIQUE	16
4.1.2 LES ROCHES	6	6.4.3 ÉLÉMENTS RELATIFS À LA DÉFINITION DU PROJET	17
4.1.3 TERRAINS INTERMÉDIAIRES	6	6.4.4 ÉLÉMENTS RELATIFS À L'EXÉCUTION	17
4.2 LA PERMÉABILITÉ	6	6.4.5 SUITES À DONNER	17
4.2.1 DÉFINITION	6	<b>6.5 SYNTHÈSE SUR LES RESPONSABILITÉS DES DIFFÉRENTS ACTEURS</b>	<b>17</b>
4.2.2 ORDRES DE GRANDEUR	6	<b>7. ANNEXE A : RÉFÉRENTIELS</b>	<b>18</b>
4.2.3 ÉCOULEMENT DANS LES TERRAINS	7	7.1 RÉGLEMENTATION ET NORMALISATION	18
4.3 RECONNAISSANCE DES TERRAINS	7	7.2 DOCUMENTATION TECHNIQUE	18
4.3.1 OBJECTIF : LE MODÈLE GÉOTECHNIQUE	7	7.3 BASES DE DONNÉES NATIONALES	18
4.3.2 TECHNIQUES DE RECONNAISSANCES	8	<b>8. ANNEXE B : EXEMPLE DE PROJET</b>	<b>19</b>
4.3.3 CARACTÉRISATION DES NIVEAUX DE NAPPE	8	8.1 PRÉSENTATION DU PROJET	19
4.3.4 ESSAIS DE PERMÉABILITÉ	8	8.2 DÉROULÉ DES ÉTUDES	19
<b>5. LES ÉTAPES D'UN PROJET</b>	<b>11</b>	8.2.1 ÉTUDE D'ESQUISSE	19
5.1 LOI MOP	11	8.2.2 AVANT-PROJET	19
5.1.1 ÉTUDES D'ESQUISSE (OU ÉTUDES PRÉALABLES, EP)	11	8.2.3 PROJET	20
5.1.2 ÉTUDES D'AVANT-PROJET (AVP)	11	<b>9. ANNEXE C : FICHE SYNTHÉTIQUE D'AIDE À LA RÉDACTION D'UN CAHIER DES CHARGES DE MISSION D'INGÉNIERIE GÉOTECHNIQUE</b>	<b>21</b>
5.1.3 ÉTUDES DE PROJET (PRO)	11	9.1 PRINCIPE GÉNÉRAL	21
5.1.4 VISA ET DIRECTION DE L'EXÉCUTION DU OU DES CONTRATS DE TRAVAUX (DET)	12	9.2 ÉLÉMENTS D'ENTRÉE	21
5.2 NORME NF P94-500	12	9.3 RECONNAISSANCES IMPOSÉES	21
5.2.1 OBJET DE LA NORME NF P94-500	12	9.4 RENDUS ATTENDUS	21
5.2.2 PROGRESSIVITÉ DES MISSIONS D'INGÉNIERIE GÉOTECHNIQUE	12	<b>10. ANNEXE D : GLOSSAIRE</b>	<b>21</b>
5.2.3 CONCLUSION SUR LA NORME NF P94-500	13		
5.3 CORRESPONDANCE LOI MOP ET NORME NF P94-500	13		
<b>6. LE PROJET ET L'INFILTRABILITÉ</b>	<b>14</b>		
6.1 DÉCLINAISON DES ÉTAPES DE LA LOI MOP ET DE LA NORME NF P94-500	14		
6.1.1 ESQUISSE	14		
6.1.2 AVANT-PROJET	14		
6.1.3 PHASE PROJET	14		
6.1.4 TRAVAUX	15		
6.2 RÔLE (ET RESPONSABILITÉ) DES DIFFÉRENTS ACTEURS	15		
6.2.1 MAÎTRE D'OUVRAGE/ASSISTANCE À MAÎTRISE D'OUVRAGE	15		

# 1. POURQUOI CES RECOMMANDATIONS ?

## 1.1 Contexte

Le bon déroulement du cycle de l'eau est un enjeu majeur pour les écosystèmes et les êtres humains. Auparavant, les eaux pluviales étaient souvent collectées, transportées et rejetées en dehors de leur lieu de précipitation. Cela engendre des risques en cas de rejet dans les réseaux d'assainissement et peut contrarier l'alimentation des nappes phréatiques. Aussi, de nombreuses collectivités mettent en place des mesures visant à réduire les rejets d'eaux pluviales dans les réseaux d'assainissement. Ces mesures se traduisent par une gestion durable et intégrée des eaux de ruissellement qui consiste à les infiltrer dans le sol en tout ou partie, ou/et, les rejeter à débit limité vers un exutoire (de préférence, le milieu naturel superficiel).

Ainsi lors d'un projet d'aménagement neuf ou d'une réhabilitation, il est indispensable de réaliser, au préalable, une étude géotechnique comprenant des essais de perméabilité *in situ* afin de connaître la capacité d'absorption du sol. Les résultats fournis et leur analyse par le bureau d'études géotechnique sont déterminants pour vérifier la faisabilité du mode de gestion des eaux pluviales par infiltration.

Pour mener à bien son projet, le maître d'ouvrage consulte un bureau d'études géotechnique. Le cahier des charges de consultation comprend en général la définition des ouvrages envisagés dans le projet, la localisation, une profondeur minimale et un nombre d'essais.

L'expérience montre que les cahiers des charges sont souvent incomplets et aboutissent à des réponses du bureau d'études géotechnique qui ne correspondent pas aux objectifs et caractéristiques du projet (essai inadapté au regard des ouvrages de recueil des eaux pluviales projetés,...). Parfois, l'infiltration est écartée et la faisabilité du projet est même remise en cause. Or, il est souvent possible d'infiltrer au moins une partie des eaux pluviales.

Fort de ce constat et de la complexité du sujet particulièrement pointu, il est apparu nécessaire de produire un guide pour aider les acteurs de l'aménagement du territoire à rédiger une bonne commande dans le cadre d'études d'infiltrabilité des sols.

## 1.2 Objectifs

Ce guide a pour objectif de :

- trouver un langage commun ;
- préciser les essais les mieux adaptés en fonction du contexte du projet et des techniques de gestion des eaux pluviales envisagées ;
- apporter les éléments techniques pour rédiger le cahier des charges.

À cette fin, ce document :

- rappelle la définition de l'infiltrabilité et son contexte réglementaire ;
- présente les caractéristiques des terrains vis-à-vis de l'infiltrabilité et ses modalités de reconnaissance ;
- explicite les différentes étapes d'un projet, le rôle de chaque acteur et le contenu attendu d'une étude d'infiltrabilité des sols.

Le présent guide a fait l'objet d'un groupe de travail constitué de collectivités, hydrogéologues, bureaux d'études techniques, bureaux d'études géotechnique, Agence de l'eau Artois-Picardie, services de l'État (DREAL Hauts-de-France) et animé en partenariat par l'ADOPTA et le Cerema.

## 2. NOTIONS D'INFILTRABILITÉ ET DE PERMÉABILITÉ

L'infiltrabilité représente la capacité d'infiltration d'un sol ou d'une roche. Elle se caractérise par le flux d'eau maximal que ce milieu est capable d'absorber. L'infiltration correspond, quant à elle, au phénomène de transfert de l'eau à travers les couches du sol ou d'une roche.

Pour étudier les problématiques précédentes, la perméabilité, qui traduit la facilité de l'eau à s'écouler dans les vides connectés du terrain, va être utilisée. C'est un paramètre propre à chaque terrain.

■ La perméabilité est parfois aussi appelée conductivité hydraulique.

### 3. CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

Il n'y a pas de texte national qui interdit l'infiltration des eaux pluviales mais plusieurs textes la réglementent :

- la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006, modifiée par la loi Grenelle II du 12 juillet 2010, et ses décrets d'application ;
- l'arrêté ministériel du 17 juillet 2009 modifié relatif aux mesures de prévention ou de limitation des introductions de pollution dans les eaux souterraines ;
- les plans de prévention des risques mouvement de terrain (PPRMT) ;
- pour les ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) :
  - l'arrêté ministériel du 10 juillet 1990 relatif à l'interdiction des rejets de certaines substances dans les eaux souterraines en provenance d'ICPE ;
  - l'arrêté ministériel du 02 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation ;
  - l'arrêté du 13 juin 2005 modifiant les arrêtés précédents du 10 juillet 1990 et du 02 février 1998. Les installations, ouvrages, travaux et activités (IOTA), dont les eaux pluviales sont infiltrées, sont ainsi soumis à déclaration ou à autorisation selon la surface du projet et du bassin versant naturel intercepté :

« Rubrique 2.1.5.0 : 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 :

**1°  $\geq 20$  ha : AUTORISATION (A)**

**2°  $\geq 1$  ha mais  $< 20$  ha : DÉCLARATION (D).»**

Au niveau local, le SDAGE, le SAGE, le zonage pluvial, les servitudes d'utilité publique intégrées dans le plan local d'urbanisme (PLU), le règlement d'assainissement, la réglementation liée aux captages..., peuvent également définir les modalités d'infiltration des eaux pluviales.

### 4. LES TERRAINS VIS-À-VIS DE L'INFILTRABILITÉ

L'étude des conditions d'infiltrabilité nécessite la détermination préalable de la perméabilité des terrains.

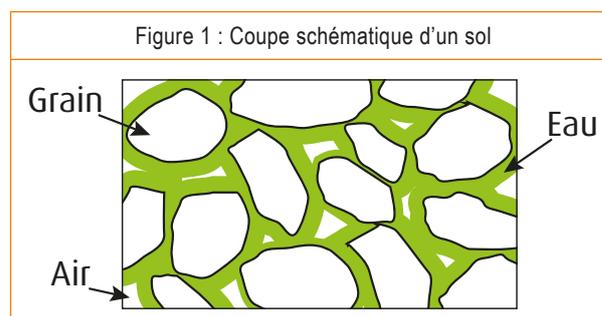
#### 4.1 Natures des terrains

Pour des applications géotechniques, les terrains sont conventionnellement regroupés en deux grandes familles :

- les sols ;
- les roches.

##### 4.1.1 Les sols

Les sols font référence à des terrains meubles, qui sont constitués de 3 « phases » (cf. figure 1) : les grains (la partie solide ou matrice), l'eau et l'air (ces deux derniers étant situés dans les vides entre les grains).

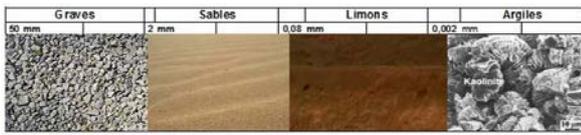


Du fait de ces différentes phases, la classification des sols va alors se baser :

- d'une part sur les propriétés des grains : la nature minéralogique, le mode de dépôt, la taille, la forme, etc. ;
- d'autre part sur le rapport entre les différentes « phases » (c'est-à-dire les quantités relatives de grains, de vides, d'eau et d'air à l'intérieur des vides) : porosité (volume des vides par rapport au volume des grains), teneurs en eau (quantités en masse ou en volume d'eau par rapport à la quantité de solide), saturation, masses volumiques.

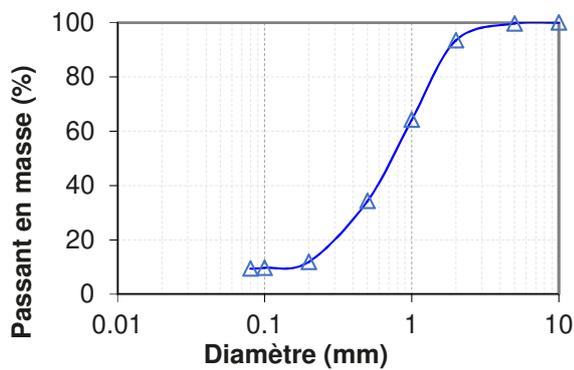
Selon la taille des grains, il est également possible de mettre en avant une première dénomination des sols (cf. figure 2), en faisant référence aux grandes catégories suivantes : argiles, limons, sables et graves.

Figure 2 : Taille des grains et dénomination des sols  
(d'après Jean-Pierre Magnan, Polycopié cours de mécanique des sols de l'ENTPE, 2004)



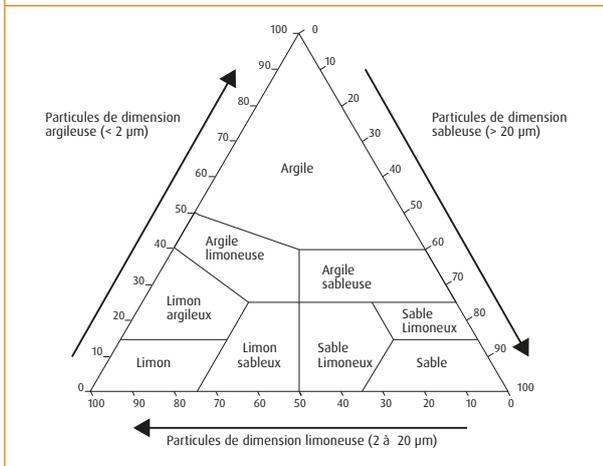
Dans la pratique, tous les grains n'ont pas la même taille, et il est possible de déterminer la courbe granulométrique d'un sol donné (cf. figure 3), visant à caractériser la part relative (en masse) de chaque fraction granulométrique.

Figure 3 : Courbe granulométrique d'un sol



Le sol est rarement constitué d'une seule classe granulométrique, mais peut être constitué d'un mélange de sables, de limons et d'argiles. Un exemple de classification permettant de prendre en compte cette complexité est donné sur la figure 4.

Figure 4 : Exemple de classification des sols  
(d'après Jean-Pierre Magnan, Polycopié cours de mécanique des sols de l'ENTPE, 2004)



## 4.1.2 Les roches

Les roches (calcaires, granites, etc.), en revanche, font référence à des matériaux compacts. La porosité du matériau sain est généralement faible. Par contre, du fait de leur mode de dépôt et de leurs bonnes propriétés mécaniques, les roches sont susceptibles d'être le siège de discontinuités, qui selon leur ouverture, peuvent devenir des fissures voire des fractures.

## 4.1.3 Terrains intermédiaires

La distinction entre les sols et les roches n'est pas systématiquement évidente et ne permet pas de toute façon de couvrir l'intégralité des terrains susceptibles d'être rencontrés. Pour certains terrains intermédiaires entre les sols et les roches (par exemple craies ou marnes), une caractérisation particulière est nécessaire. Selon les applications et la localisation, ils sont susceptibles de s'apparenter à des sols ou des roches.

## 4.2 La perméabilité

### 4.2.1 Définition

La perméabilité est la facilité de l'eau à s'écouler dans les vides entre les grains du sol et les fissures dans le cas des roches.

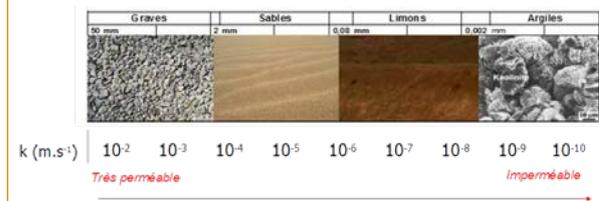
Elle est notée  $k$  et s'exprime en m/s.

Dans les sols, plus la taille des grains est élevée, plus les vides entre les grains ont également une taille importante, et plus la perméabilité sera forte. C'est pourquoi, bien que cette classification ne soit basée que sur la caractérisation des terrains, elle permet également d'obtenir un premier ordre de grandeur de la perméabilité des terrains.

### 4.2.2 Ordres de grandeur

Des premiers ordres de grandeur de la perméabilité des sols peuvent être obtenus en fonction de la granulométrie des matériaux, comme indiqué sur la figure 5. Il peut ainsi être mis en évidence l'étendue importante de la plage de variations de la perméabilité.

Figure 5 : Ordres de grandeur de la perméabilité  
(d'après Jean-Pierre Magnan, Polycopié cours de mécanique des sols de l'ENTPE, 2004)



### 4.2.3 Écoulement dans les terrains

Dans le cas d'un bassin d'infiltration de surface  $S$  reposant sur des terrains non saturés, le débit  $Q$  d'infiltration est, en première approximation, directement relié à la perméabilité  $k$ .

$$Q = k \cdot S$$

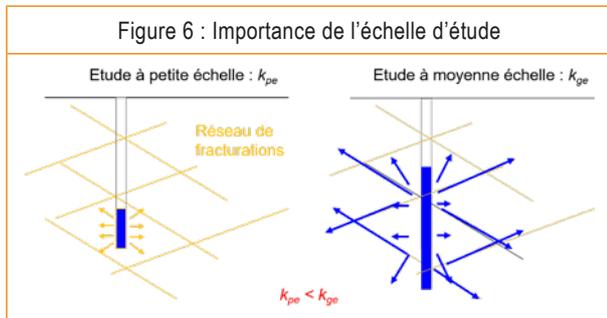
Dans les roches, la perméabilité s'exprime au travers des fissures.

La craie peut en particulier présenter un comportement variable. Si la craie est saine et fracturée, la perméabilité peut atteindre  $10^{-2}$  m/s. Au contraire dans une craie saine non fracturée, ou dans une craie altérée, la perméabilité peut descendre à  $10^{-7}$  m/s.

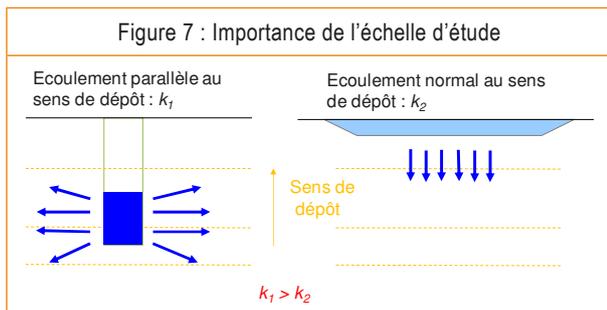
Cette première approche masque néanmoins la complexité de la perméabilité des terrains, du fait :

- de l'importance de l'échelle d'étude de la perméabilité ;
- du sens de l'écoulement ;
- des conditions de saturation.

Selon l'espacement des fissures, l'échelle d'étude est importante pour apprécier la perméabilité de ces terrains (cf. figure 6).



Du fait du mode de dépôt des terrains (sols et roches), ces derniers présentent généralement des perméabilités verticales et horizontales différentes. La perméabilité horizontale, parallèle au sens de dépôt, peut notamment être beaucoup plus importante que la perméabilité verticale (cf. figure 7).



Enfin, la perméabilité dépend des conditions de saturation (c'est-à-dire de la quantité relative d'eau dans les vides du terrain) et est maximale pour les terrains saturés. C'est pourquoi les protocoles d'essais comprennent quasi-systématiquement une phase de saturation préalable, afin d'écartier l'influence du degré de saturation.

La perméabilité prise en compte dans les calculs d'un ouvrage d'infiltration n'est pas un paramètre absolu d'un site donné mais dépend de l'ouvrage étudié et en particulier :

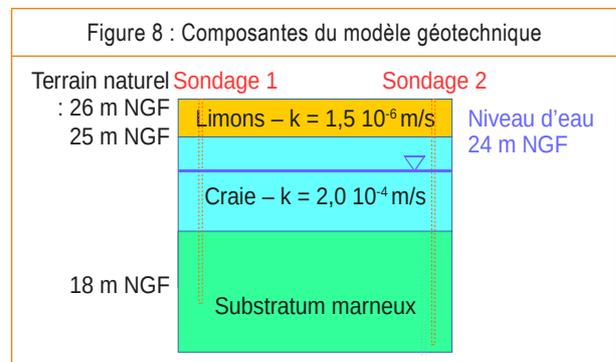
- de sa géométrie et notamment de ses cotes et de ses dimensions ;
- du modèle géotechnique et des différentes couches rencontrées ;
- du sens d'écoulement des eaux infiltrées ;
- etc.

### 4.3 Reconnaissance des terrains

#### 4.3.1 Objectif : le modèle géotechnique

Les reconnaissances de terrain ont pour objectif de définir le modèle géotechnique, c'est-à-dire les conditions géotechniques nécessaires à la conception d'un projet. Il comprend ainsi (cf. figure 8) :

- la position des différentes couches (stratigraphie ou encore modèle géologique) ;
- les propriétés de chaque couche : dans le cas de l'étude d'un ouvrage d'infiltration, les perméabilités (c'est-à-dire les propriétés hydrauliques) de chaque couche sont à déterminer ;
- les conditions hydrogéologiques, c'est-à-dire les propriétés des nappes éventuelles (profondeur, variations saisonnières et sens d'écoulement).



Le modèle géotechnique est défini pour chaque zone homogène (lithologie et propriété hydraulique similaires).

### 4.3.2 Techniques de reconnaissances

Afin de déterminer le modèle géotechnique, la première étape est la détermination de la stratigraphie, c'est-à-dire l'identification des couches en présence.

Diverses techniques de sondages sont disponibles selon les profondeurs potentielles du projet et les emprises disponibles.

Peuvent ainsi être envisagés :

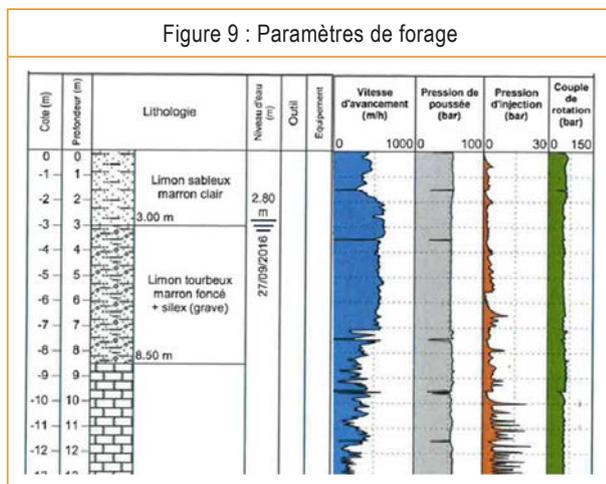
- des sondages à la pelle mécanique ;
- des forages, pouvant être manuels, mais nécessitant rapidement l'emploi d'une foreuse, en distinguant :
  - les sondages destructifs (qui ne prélèvent pas d'échantillon de terrain), permettant d'obtenir une première identification des terrains rencontrés ;
  - les sondages à la tarière (dits semi-destructifs), permettant le prélèvement d'échantillons remaniés ;
  - les sondages carottés, permettant de prélever des échantillons intacts (matériau pouvant être considéré non remanié).

Dans le cas de sondages destructifs, un enregistrement des paramètres de forage peut être mis en œuvre (cf. figure 9), comprenant :

- la Vitesse d'Avancement (ViA) de l'outil de forage ;
- le Couple de Rotation (CR) appliqué à l'outil de forage ;
- la Pression sur l'Outil (PO) ;
- la Pression d'Injection (PI) ;

Ces éléments permettent de compléter la description des couches rencontrées. En particulier, des diminutions de la pression d'injection traduisent une fracturation et une perméabilité importantes des terrains traversés.

Figure 9 : Paramètres de forage



### 4.3.3 Caractérisation des niveaux de nappe

Le suivi du niveau de nappe doit se baser sur des observations piézométriques sur une période suffisante de l'ordre d'un an (pour s'assurer de déterminer le niveau pendant la période des hautes eaux).

À la fin des différents forages réalisés, le niveau d'eau est systématiquement relevé. Néanmoins, une telle mesure présente un caractère ponctuel et est susceptible d'être perturbée par l'opération de forage elle-même (utilisation d'une boue de forage).

Lors de la réalisation des forages, des arrivées d'eau peuvent également être constatées par l'entreprise de sondage. Elles sont systématiquement signalées sur les procès-verbaux (PV) de sondages.

Ces arrivées d'eau ne doivent pas être interprétées systématiquement comme la présence d'une nappe. En effet, ces arrivées d'eau peuvent traduire dans certains cas la présence de terrains plus perméables.

Au contraire, dans des terrains imperméables par exemple, l'absence d'arrivée d'eau ne signifie pas une absence de nappe.

### 4.3.4 Essais de perméabilité

#### a) Préambule

Les essais visant à mesurer la perméabilité peuvent être réalisés *in situ* (sur le terrain) ou en laboratoire. Néanmoins, les essais en laboratoire, sensibles aux techniques de prélèvement et nécessitant des éprouvettes de sol de petite taille s'avèrent donc peu pertinents pour apprécier la perméabilité des sols naturels. C'est pourquoi, dans le cadre de l'étude de l'infiltrabilité, seuls des essais *in situ* sont généralement réalisés.

Même réalisés sur le terrain, les essais se classent en grande catégorie selon :

- les dimensions de la zone de terrain testée ;
- la direction de la perméabilité recherchée.

De manière générale, ils consistent :

- soit à injecter, soit à prélever un certain débit d'eau dans le sol ;
- soit à maintenir le niveau d'eau en cours d'essai (on parle alors d'essai en régime permanent), soit à suivre l'évolution du niveau d'eau au cours de l'essai (on parle alors de régime transitoire) ;

Le cas échéant, une phase de saturation préalable est mise en œuvre.

Dans le cas des études d'infiltrabilité, ce principe peut être conservé. Néanmoins, le recours à des essais avec injection d'eau s'impose naturellement du fait de l'implantation des projets dans des terrains non saturés.

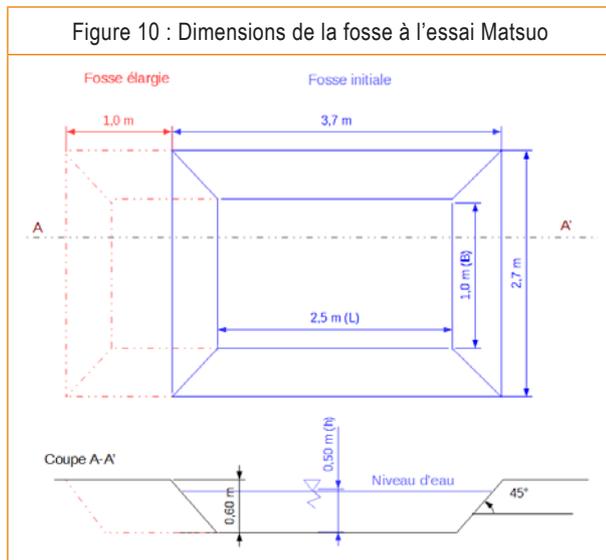
### b) Essais «à la fosse» (et notamment essai Matsuo)

Les essais «à la fosse» permettent essentiellement de mesurer la perméabilité verticale. Ils consistent à injecter de l'eau dans une fouille de «grandes» dimensions (de l'ordre de quelques mètres, cf. figure 11). Ils ne sont pas normalisés actuellement.

L'essai Matsuo constitue un essai à la fosse particulier. Le protocole rigoureux de l'essai Matsuo, décrit ci-après, implique notamment une procédure d'essai en deux étapes successives présentant les caractéristiques suivantes :

- la fosse est creusée dans un premier temps et après une phase de saturation préalable (remplissage d'eau de la fosse) une première mesure du débit d'infiltration est réalisée ;
- puis, afin de minimiser les effets de bord, la fosse est élargie et une deuxième mesure est réalisée.

Les dimensions des fosses nécessaires à la réalisation des essais peuvent être variables (notamment la largeur de la fosse), sous réserve que celles-ci soient suffisamment importantes. Dans le cadre de l'application stricte du protocole Matsuo, les dimensions à retenir sont reportées sur la figure 10.



Dans le cas de l'essai Matsuo, la hauteur d'eau est maintenue constante.

La perméabilité verticale  $k_v$  est alors encadrée par les valeurs suivantes :

$$\frac{Q_1 - Q_2}{L(B+2h)} \leq k_v \leq \frac{Q_1 - Q_2}{L(B-2h)}$$

Où :

$Q_1$  et  $Q_2$  sont les débits infiltrés pour chacune des phases ;

$L$  et  $B$  sont respectivement la longueur et la largeur de la fosse initiale ;

$h$  est la hauteur l'eau dans le bassin.

Afin de gagner en précision, la formule précédente souligne l'intérêt de procéder à des fosses de dimensions importantes devant la hauteur d'eau dans la fosse.

Figure 11 : Déroulement d'un essai à la fosse



### c) Essais en forage

Les essais en forage permettent principalement de mesurer la perméabilité horizontale. Ils sont réalisés dans un forage préalable de «petit» diamètre, compris généralement entre 60 et 150 mm.

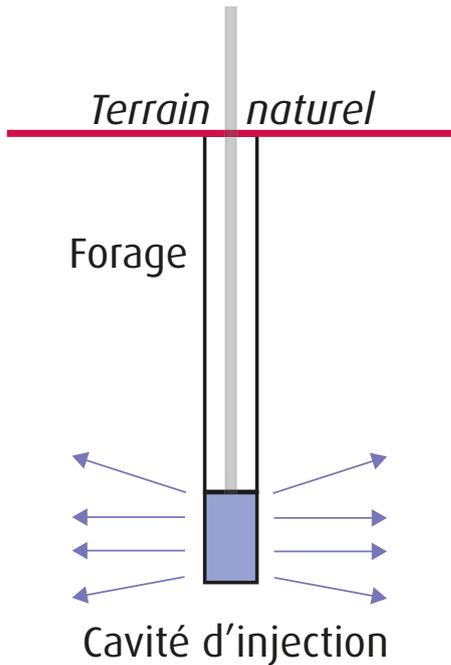
Dans le cas de l'étude de l'infiltrabilité, ils consistent à injecter de l'eau au sein d'une cavité d'injection, élargie, comme indiqué sur les figures 12 et 13.

L'essai Nasberg, réalisé en l'absence de nappe, est très similaire à l'essai Lefranc, réalisé en présence de nappe, et constituant l'essai de base pour l'étude de la perméabilité.

Néanmoins, du fait de la nécessité d'une nappe pour sa réalisation, l'essai Lefranc s'avère inadapté à l'étude de la perméabilité pour l'étude de l'infiltrabilité.

À l'heure actuelle, les essais Lefranc et Nasberg sont décrits par la norme européenne NF EN ISO 22282-2.

Figure 12 : Fonctionnement d'un essai en forage



En régime permanent (qui est à privilégier pour les sols perméables, en général  $k > 10^{-5}$  m/s), la perméabilité  $k$  (m/s) est alors reliée au débit en utilisant la formule suivante :

$$k = Q/m.B.\Delta h$$

Où :

$Q$  est le débit infiltré ( $m^3/s$ ) ;

$m$  est un coefficient « de forme » qui dépend de l'élanement de la cavité, de l'épaisseur de la couche étudiée et de la position de la nappe éventuelle (sans dimensions, valeur disponible dans la norme NF EN ISO 22282-2) ;

$B$  est le diamètre du forage (m) ;

$\Delta h$  est la hauteur d'eau dans le forage (m).

Dans cet essai, le non-remaniement des parois du forage est primordial. En particulier, l'usage de la tarière devra être évité afin de ne pas lustrer les parois du forage (dans les terrains fins et dans la craie) et conduire à une sous-estimation de la perméabilité. L'utilisation d'une tête de forage de forme saillante ou similaire est conseillée.

#### d) Essais Porchet

Ces essais sont définis dans la circulaire n° 97-49 du 22 mai 1997 relative à l'assainissement non collectif.

Ils sont réalisés à petite échelle et mesurent globalement la perméabilité  $k$ , sans distinguer ou cibler ses composantes verticales et horizontales. Ils consistent à injecter de l'eau au droit d'un forage de 150 mm de diamètre et de hauteur, comme indiqué sur la figure 14.

Après une phase d'imbibition préalable de 4 heures, le volume d'eau en  $mm^3$  injecté pendant 10 minutes (noté  $V_{10}$ ) est mesuré. Il est relié à la perméabilité  $k$  par la formule suivante :

$$k = 6,79 \cdot 10^{-5} \cdot V_{10}$$

Figure 13 : Déroulement d'un essai d'injection



Figure 14 : Essai Porchet

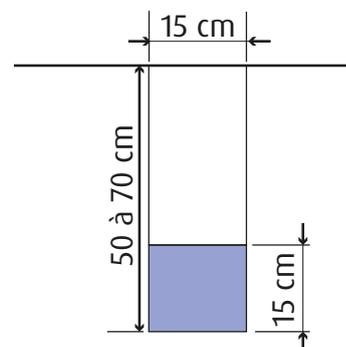


Figure 15 : Essai Porchet



### e) Synthèse

Une synthèse des principaux essais utilisables dans le cas d'études d'infiltrabilité est présentée ci-dessous, au regard des ouvrages d'infiltration envisagés.

La figure 16 présente une synthèse des principales caractéristiques des essais et précisent leur adéquation avec les techniques d'infiltration étudiées.

Figure 16 : Domaines d'application des essais

Essai d'eau	Volume investigué	Perméabilité mesurée	Ouvrage d'infiltration privilégié	Documents de référence
<b>Essais « Porchet »</b>	Petite échelle	Horizontale et verticale	Bassins, chaussées réservoirs, noues, tranchées	Circulaires du ministère de l'environnement n° 97-49 du 22 mai 1997
<b>Essais à la fosse</b>	Moyenne à grande échelle	Verticale		Pas de norme disponible
<b>Essai en forage</b>	Petite échelle	Horizontale	Puits d'infiltration	NF EN ISO 22282-2

## 5. LES ÉTAPES D'UN PROJET

Les éléments présentés ci-dessous se basent sur les éléments réglementaires relatifs à la maîtrise d'ouvrage publique. Néanmoins, les mêmes éléments peuvent être transposés à la maîtrise d'ouvrage privée.

### 5.1 Loi MOP

La loi n°85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique (dite loi MOP) définit notamment les différentes étapes d'un projet.

En phase de conception, elle distingue ainsi :

- les études d'esquisse (ou Études Préalables, EP) ;
- les études d'AVant-Projet (AVP) ;
- les études de PROjet (PRO) ;
- le VISA et la Direction de l'Exécution du ou des contrats des Travaux (DET).

Ces différentes étapes doivent être respectées pour des problématiques d'infiltrabilité.

#### 5.1.1 Études d'esquisse (ou Études Préalables, EP)

La première tâche du maître d'œuvre est de lister les contraintes de l'opération, en vue de proposer des solutions qui sont techniquement, architecturalement et financièrement adaptées aux besoins du maître d'ouvrage. À ce titre, l'objectif des études d'esquisse est de vérifier la faisabilité, tant technique qu'économique, de l'opération.

#### 5.1.2 Études d'avant-projet (AVP)

La phase d'avant-projet a pour principal objectif de confirmer la faisabilité, tant technique qu'économique, de l'opération. Elle fixe les principales caractéristiques du projet, comme les volumes et l'implantation des différents ouvrages ou parties d'ouvrages. À ce titre, elle fixe définitivement le programme de l'opération.

#### 5.1.3 Études de projet (PRO)

La phase projet doit permettre une estimation financière fine du projet. Elle s'appuie d'une part sur des calculs de dimensionnement ou de justification et d'autre part sur la définition des matériaux et/ou produits employés et leurs conditions de mise en œuvre.

### 5.1.4 VISA et Direction de l'exécution du ou des contrats de travaux (DET)

La phase de direction de l'exécution du contrat de travaux marque le transfert de responsabilité à l'entreprise en charge des travaux.

## 5.2 Norme NF P94-500

### 5.2.1 Objet de la norme NF P94-500

La norme NF P94-500 de novembre 2013 est relative aux missions d'ingénierie géotechnique.

Elle préconise la progressivité des études géotechniques en définissant les différentes phases G1 à G4. Le choix des essais à réaliser, dépendant de la stratigraphie et de la nature des terrains, nécessite une première connaissance du contexte géologique. Par ailleurs, les premiers résultats géotechniques orientent les choix de conception et peuvent nécessiter d'investiguer une zone géographiquement plus étendue ou les terrains plus en profondeur. La progressivité des études géotechniques reste indispensable pour conserver des programmes de reconnaissances équilibrés.

La norme NF P94-500 est une norme non technique, qui :

- détermine les responsabilités du bureau d'études géotechnique, mais aussi les données d'entrée nécessaires à la réalisation de ses études ;
- fixe le cadre permettant de réduire les incertitudes géotechniques lors d'un projet.

### 5.2.2 Progressivité des missions d'ingénierie géotechnique

Les différentes étapes notées G1 à G4 sont obligatoires et se répartissent principalement lors des études de conception et les phases de travaux. Une vue synthétique de ces différentes étapes est reportée sur la figure 16.

Figure 17 : Progressivité des missions d'ingénierie géotechnique

Phase		Sous-phase	
G1	Étude géotechnique préalable	G1-ES	Étude de Site
		G1-PGC	Principes Généraux de Construction
G2	Étude géotechnique de conception	G2-AVP	Avant-Projet géotechnique
		G2-PRO	PROjet géotechnique
		G2-ACT	Assistance Contrat de Travaux
G3	Études et suivi géotechniques d'exécution	-	Phase d'étude d'exécution
		-	Phase suivi
G4	Supervision géotechnique d'exécution	-	Supervision des études d'exécution
		-	Supervision du suivi d'exécution

#### a) Étude géotechnique préalable G1

Cette première étape est le démarrage des études géotechniques. Elle est principalement tournée vers une première estimation du modèle géotechnique (sous phase ES : Étude de Site). Elle doit également être déclinée en fonction des spécificités du projet, en évaluant les premières orientations pour la justification et la réalisation (sous-phase PGC : Principes Généraux de Construction).

L'étude G1-ES, dans le cas d'études d'infiltrabilité, consiste principalement en une étude bibliographique, qui ne doit pas être négligée. Le site [www.infoterre.fr](http://www.infoterre.fr) (BRGM) présente les sondages atteignant une profondeur supérieure à 10 m.

#### b) Étude géotechnique de conception G2

Cette phase repose sur 3 sous-phases :

- l'avant-projet géotechnique : mission G2-AVP ;
- le projet géotechnique : G2-PRO ;
- la participation du prestataire à l'élaboration du Dossier de Consultation des Entreprises et la mise au point des contrats de travaux (analyse des offres, analyse technique des variantes, etc.) : G2-ACT.

L'implication continue du bureau d'études géotechnique lors de ces différentes étapes est essentiel, et ce jusqu'à l'établissement du DCE et la mise au point du contrat de travaux. Cette implication s'appuie sur :

- La fourniture des éléments de compréhension du projet (qui évoluent au fil de l'avancement de celui-ci) ;
- La responsabilisation du bureau d'études géotechnique, qui comprend :
  - o La détermination des reconnaissances à réaliser en tenant compte de la complexité du projet ;
  - o Le suivi des investigations ;
  - o Leur adaptation éventuelle en cours de réalisation de reconnaissances.

Par ailleurs, une nouvelle phase d'étude géotechnique n'est pas synonyme systématiquement de nouvelles campagnes de reconnaissances.

### c) Études et suivis géotechniques d'exécution G3

Cette mission, à la charge de l'entreprise, permet de la responsabiliser sur les dimensionnements effectués et sur l'exécution de l'ouvrage indissociable de l'efficacité des ouvrages. Elle se subdivise en conséquence en deux parties indissociables :

- la mission G3 phase étude, qui constitue la partie géotechnique des études d'exécution ;
- la mission G3 phase suivi, relative à l'exécution proprement dite des travaux et qui statue sur les moyens mis en œuvre, mais aussi les constatations et/ou découvertes éventuelles en phase chantier.

L'exécution des travaux géotechniques reste indissociable des études. En phase travaux les terrains sont enfin mis à nu sur leur intégralité. A minima une vérification et dans certains cas une adaptation des hypothèses initialement considérées sont alors possibles voire parfois sont rendues nécessaires.

### d) Supervision géotechnique d'exécution G4

La mission G4, à la charge de la maîtrise d'œuvre, assure :

- la supervision des études d'exécution ;
- et de façon également indissociable la supervision du suivi d'exécution sur les moyens mis en œuvre et les constatations et/ou découvertes éventuelles en phase chantier.

La mission G4, «symétrique» de la mission G3, est la prolongation en phase travaux de la responsabilité géotechnique de la maîtrise d'œuvre.

### 5.2.3 Conclusion sur la norme NF P94-500

La norme traite exclusivement des missions d'ingénierie géotechnique (du fait de son titre) et exclut la réalisation de campagnes de reconnaissances dépourvues d'analyse.

Cette volonté traduit la responsabilité du bureau d'études géotechnique dans l'établissement du modèle géotechnique.

Le bureau d'études géotechnique, d'une part, a les compétences en géologie, et, d'autre part, maîtrise la réalisation des différents essais (et les incertitudes associées).

Il est donc le plus (voire le seul) à même d'apprécier la variabilité des propriétés des terrains et doit en conséquence proposer le modèle géotechnique, en fonction de l'ouvrage projeté.

## 5.3 Correspondance loi MOP et norme NF P94-500

La version actuelle de la norme NF P94-500, datant de novembre 2013, est compatible avec les différentes phases des responsabilités de la maîtrise d'ouvrage publique, comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

Figure 18 : Correspondance loi MOP et NF P94-500

Loi MOP bâtiment neuf	NF P94-500
Étude d'esquisse	G1 ES et PGC
Avant-projet (APS & APD)	G2-AVP
Projet (PRO)	G2-PRO
Études d'exécution	G3
VISA et direction de l'exécution du contrat de travaux (DET)	G4

Il est par ailleurs indiqué que les missions géotechniques peuvent être éventuellement intégrées aux missions de maîtrise d'œuvre. Pour les projets complexes au niveau géotechnique, cette dernière approche est même recommandée.

## 6. LE PROJET ET L'INFILTRABILITÉ

### 6.1 Déclinaison des étapes de la loi MOP et de la norme NF P94-500

#### 6.1.1 Esquisse

Lors de cette phase, le maître d'œuvre détermine une estimation des volumes d'eaux pluviales à gérer. Par ailleurs, cette phase permet un échange entre le bureau d'études géotechnique et le maître d'œuvre afin d'avoir une première estimation des débits de projet à infiltrer, en détaillant, pour chaque scénario :

- le temps de stockage maximal ;
- les débits de rejet éventuels ;
- les contraintes du site ;
- etc.

Dans le cadre d'une étude d'infiltrabilité, au travers de l'étude G1-ES (Étude de Site), cette phase doit notamment identifier :

- les formations en présence ;
- leur caractère plus ou moins perméable ;
- la présence éventuelle et la position de la nappe superficielle ;
- la définition d'un programme de reconnaissances pour la phase d'étude géotechnique suivante.

Dans un deuxième temps, des premières recommandations pour le projet d'infiltration des eaux pluviales doivent être émises (étude G1-PGC - Principes Généraux de Construction).

Quelle que soit la phase d'étude considérée, l'infiltrabilité constitue une composante des études géotechniques nécessaires à la conception de chaque ouvrage. À ce titre, il n'est pas recommandé de distinguer artificiellement cette problématique des autres sujets étudiés (fondations, etc.)

#### 6.1.2 Avant-projet

La phase AVP est la phase privilégiée de réalisation des premières investigations géotechniques.

La phase G2-AVP doit en premier lieu fournir des modèles géologiques et géotechniques du site. Dans un premier temps, elle consiste donc :

- à s'approprier le programme de l'opération ;
- à synthétiser les conclusions des études géotechniques précédentes ;
- à proposer un programme de reconnaissances adapté ;
- à suivre le programme de reconnaissances, et éventuellement l'adapter notamment en fonction des premiers résultats obtenus, et ce en termes :
  - de longueurs de sondages ;
  - de nature des essais de perméabilité ;
  - des caractéristiques précises de ces essais : profondeur, etc.

Dans un second temps, cette phase fournit des premières recommandations pour :

- la conception de l'ouvrage, au regard des volumes et débits à gérer ;
- son exécution ;
- les incertitudes géotechniques résiduelles éventuelles et le moyen de réduire ces incertitudes.

Cette phase doit permettre de définir la stratigraphie, c'est à dire les couches rencontrées et leur position dans le sol, tout en tenant compte des variations spatiales et des incertitudes associées.

#### 6.1.3 Phase Projet

Lors de cette phase, au moins une solution technique doit avoir été complètement étudiée. La nature et les dimensions du ou des ouvrages d'infiltration doivent être déterminées. En particulier, le volume de stockage des ouvrages doit être précisé.

Si nécessaire (incertitudes résiduelles à lever, modification sensible des caractéristiques des ouvrages étudiés), des reconnaissances complémentaires sont réalisées.

Sur la base des volumes à infiltrer, les caractéristiques des ouvrages d'infiltration doivent être vérifiées, voire réévaluées.

Enfin, cette phase indique les dispositions constructives à retenir, et notamment les conditions de terrassement.

### 6.1.4 Travaux

Cette phase comprend le visa des études d'exécution et la direction du contrat de travaux. Concernant les problématiques géotechniques, elle s'appuie sur la mission G4.

## 6.2 Rôle (et responsabilité) des différents acteurs

Le présent paragraphe considère une organisation dans laquelle les missions d'ingénierie géotechnique ne sont pas comprises à la mission de maîtrise d'œuvre.

Si la mission d'ingénierie géotechnique est intégrée à la mission de maîtrise d'œuvre, le maître d'œuvre assure les responsabilités du bureau d'études géotechnique.

### 6.2.1 Maître d'Ouvrage/Assistance à Maîtrise d'Ouvrage

Le Maître d'Ouvrage doit définir ses besoins, ses grandes orientations, ses contraintes, ses objectifs de résultat.

Il rédige précisément le cahier des charges des missions du maître d'œuvre en s'appuyant sur des études préalables (étude de faisabilité, ...).

Il indique l'organisation prévisible des missions d'ingénierie, et notamment :

- si les prestations géotechniques (reconnaitances *in situ* et ingénierie géotechnique) sont intégrées à la mission de maîtrise d'œuvre ;
- si ces prestations sont confiées à un marché tiers.

Il peut avoir recours à une Assistance à Maîtrise d'Ouvrage.

### 6.2.2 Maître d'œuvre

À partir des premiers résultats et livrables de l'étude géotechnique, il appartient au maître d'œuvre :

- d'initier les échanges avec le bureau d'études géotechnique ;
- d'orienter les solutions de gestion des eaux pluviales.

Le maître d'œuvre ne doit en aucun cas définir la valeur de perméabilité à retenir qui est de la responsabilité du bureau d'études géotechnique.

### 6.2.3 Bureau d'études géotechnique

L'entité responsable des missions géotechniques (intégrée éventuellement à la maîtrise d'œuvre) a en charge :

- la définition de la campagne, y compris la justification des différents éléments au regard des objectifs à atteindre ;
- la réalisation de la campagne de reconnaissances et l'interprétation des essais ;
- le suivi de la campagne et l'adaptation de celle-ci en fonction des éléments réellement rencontrés ;
- l'analyse et la synthèse de tous les résultats et la proposition d'un modèle géotechnique ;
- les calculs des dimensionnements le cas échéant.

En revanche, le bureau d'études géotechnique n'a pas à statuer sur la faisabilité (ou la non faisabilité) de l'infiltration des eaux pluviales qui reste de la responsabilité du maître d'œuvre.

## 6.3 Commande d'étude d'ingénierie géotechnique

Le paragraphe suivant développe spécifiquement la problématique d'infiltrabilité qu'il est conseillé d'intégrer aux missions d'ingénierie «classiques» nécessaires pour la conception de l'ouvrage (fondations, etc.).

### 6.3.1 Éléments d'entrée

Afin de permettre le bon déroulement de l'étude géotechnique, en partant de la définition de la campagne de sondages jusqu'à la rédaction du rapport, les éléments suivants sont à fournir :

- la nature de l'ouvrage ou des ouvrages envisagés ;
- la position (en plan et en altitude) et les caractéristiques géométriques envisageables ;
- les volumes et débits à infiltrer.

Évidemment les caractéristiques précédentes sont définies progressivement au cours des différentes phases d'études d'un ouvrage.

Au niveau de la G2-PRO, ces éléments doivent être cependant connus et communiqués au bureau d'études géotechnique.

### 6.3.2 Dimensionnement de la campagne de reconnaissances

Comme indiqué précédemment, le dimensionnement de la campagne de reconnaissances (si nécessaires) est à la charge du bureau d'études géotechnique. Un nombre de reconnaissances minimales peut être dans certains cas indiqué dans les documents de consultation afin de faciliter par exemple le jugement des offres.

Le dimensionnement de la campagne de reconnaissances doit être défini par le bureau d'études géotechnique. Il est ainsi recommandé que le candidat détaille et justifie la campagne envisagée dans son offre. Afin de permettre cette analyse, les éléments précédents, émanant des études géotechniques, doivent être joints à la consultation.

La campagne de reconnaissances doit ainsi comprendre :

- les sondages envisagés :
  - leur nature ;
  - leur nombre ;
  - leur position prévisible, reportée sur un plan ;
  - le diamètre des forages.
- les essais *in situ* (essais de perméabilité) et en laboratoire (essais d'identification) :
  - leur nature et leur nombre ;
  - leur position prévisible.

## 6.4 Rendu de la mission d'ingénierie géotechnique

Le rendu de la mission d'ingénierie géotechnique doit être constitué d'un seul livrable, comprenant systématiquement les trois ensembles suivants :

- le rapport factuel ;
- le modèle géotechnique ;
- les éléments relatifs à la définition du projet.

### 6.4.1 Rapport factuel

La première partie du rapport d'étude géotechnique doit reprendre l'ensemble des investigations réalisées. Cela inclut :

- un plan de localisation des essais ;
- les procès verbaux des sondages et essais, qui doivent également reporter :
  - les outils de forage utilisés (tête de forage, mode de soutien des parois, etc.) ;
  - les constatations des équipes de sondage (arrivées d'eau, etc.) ;
- le détail des mesures lors des essais de perméabilité réalisés ;
- la reprise dans le rapport des principaux résultats obtenus, à savoir :
  - la lithologie retrouvée ;
  - les propriétés mesurées.

Dans tous les cas, les résultats obtenus doivent être comparés :

- aux éléments bibliographiques disponibles (cartes géologiques du BRGM, éléments de la base de données BSS) ;
- à l'expérience locale disponible ;
- aux études géotechniques antérieures.

En particulier, les formations traversées doivent être systématiquement rattachées à la géologie régionale.

### 6.4.2 Modèle géotechnique

Le modèle géotechnique présente une synthèse (cf. figure 8) :

- des différentes couches traversées, c'est-à-dire la stratigraphie ou la lithologie ;
- des propriétés des différentes couches utiles pour le projet, c'est-à-dire les perméabilités dans le cadre de l'étude de l'infiltrabilité,
- de la plage de variation des perméabilités,
- du niveau de nappe, ainsi que ses variations saisonnières potentielles.

### 6.4.3 Éléments relatifs à la définition du projet

Cette partie s'intéresse à la conception de l'ouvrage mais également à son exécution, et évolue au cours de l'élaboration d'un projet.

Elle doit comprendre :

- la présentation des solutions a priori envisageables ;
- un pré-dimensionnement des principaux ouvrages jugés pertinents. Sur la base des volumes à infiltrer, les caractéristiques des ouvrages d'infiltration doivent être vérifiées, voire réévaluées ;
- une conclusion sur les ouvrages à retenir pour la suite des études ;
- des dispositions constructives pour permettre la bonne exécution des ouvrages.

En tout état de cause, des échanges entre la maîtrise d'œuvre et le bureau d'études géotechnique doivent avoir lieu pour assurer l'adéquation entre les rendus de la maîtrise d'œuvre et du bureau d'études géotechnique.

### 6.4.4 Éléments relatifs à l'exécution

L'étude géotechnique doit également préciser les moyens et les principales dispositions constructives à retenir lors de l'exécution, et permettant l'adéquation aux hypothèses retenues dans les calculs.

### 6.4.5 Suites à donner

En fin de rapport d'étude géotechnique, une position est attendue sur :

- la valeur de la perméabilité à retenir pour le dimensionnement des ouvrages ;
- les incertitudes résiduelles ;
- les reconnaissances complémentaires éventuellement nécessaires.

## 6.5 Synthèse sur les responsabilités des différents acteurs

Les responsabilités de chacun aux différentes phases d'un projet sont synthétisées dans le tableau ci-après.

Figure 19 : Synthèse des responsabilités des différents acteurs

	Maître d'œuvre	Bureau d'études géotechnique
Perméabilité à retenir	-	G2-AVP et G2-PRO
Prédimensionnement	-	G2-AVP et G2-PRO
Faisabilité de l'infiltrabilité	AVP	-
Dimensionnement	PRO	G2-PRO

## 7. ANNEXE A : RÉFÉRENTIELS

### 7.1 Réglementation et normalisation

**Loi MOP** : loi n°85-704 du 12 juillet 1985 modifiée par la loi n°2009-323 du 25 mars 2009.

**NF EN ISO 22282-1** : Règles générales (pour les essais de perméabilité).

**NF EN ISO 22282-2** : Essais de perméabilité à l'eau dans un forage en tube ouvert (Essais Lefranc et Nasberg).

**NF P94-500** : Enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique.

**Circulaire n° 97-49** du 22 mai 1997.

**Bulletin officiel (2003)**. Fascicule 70 du CCTG - Ouvrages d'assainissement : Titre II - Ouvrages de recueil, de stockage et de restitution des eaux pluviales.

### 7.2 Documentation technique

**S. Matsuo, Y. Honmachi et K. Akai (1953)**. A field determination of permeability, Proceedings 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1, p. 268.

**ADOPTA (2014)**. Fiche méthodologique/Études de la perméabilité des sols.

**ADOPTA (2013)**. Actes des journées de sensibilisation « Infiltrer les eaux pluviales ». [www.adopta.fr](http://www.adopta.fr)

**Ministère de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie DGALN/Cerema (2014)**. Fiche instructeur n°6. Procédures d'autorisation et de déclaration des projets d'aménagement au titre du code de l'environnement rubrique 2.1.5.0 : rejets d'eaux pluviales. Études de sols pour les ouvrages d'infiltration ou de rétention d'eaux pluviales.

**Barraud S. et al. (2009)**. L'infiltration en questions -Recommandations pour la faisabilité, la conception et la gestion des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain. Programme ANR Écopluies.

**Cassan M. (2005)**. Les essais de perméabilité sur site dans la reconnaissance des sols. Presses de l'ENPC.

**Castany G. (2002)**. Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Éditions Dunod.

### 7.3 Bases de données nationales

**Basias** : <http://basias.brgm.fr/>

**Basol** : <http://basol.developpement-durable.gouv.fr>

**Cartorisque** : <http://cartorisque.prim.net/>

**Cavités souterraines** : <http://www.bdcavite.net/>

**EauFrance** : <http://www.eaufrance.fr/>

**GIS Sol** : <http://www.gissol.fr/index.php>

**IGN** : <http://professionnels.ign.fr>

**InfoTerre** : <http://infoterre.brgm.fr/>

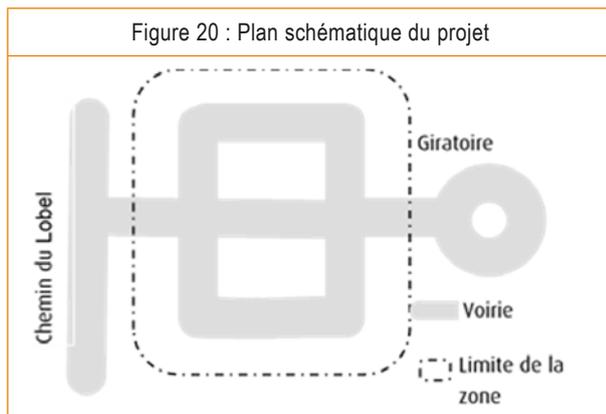
**SIGES** : <https://www.brgm.fr/projet/siges-portails-thematiques-regionaux-sur-eaux-souterraines>

## 8. ANNEXE B : EXEMPLE DE PROJET

### 8.1 Présentation du projet

Le maître d'ouvrage décide d'aménager une zone d'activités.

Le projet considéré est un projet de voirie à l'intérieur d'une zone d'activités.



À l'origine, la voirie comprend une surface de 13 000 m<sup>2</sup> et un linéaire de 1625 m.

Le projet prévoit l'infiltration de la pluie trentennale.

### 8.2 Déroulé des études

#### 8.2.1 Étude d'esquisse

Le maître d'œuvre transmet l'objectif de l'infiltration de la pluie trentennale au bureau d'études géotechnique.

En s'inspirant des ouvrages similaires situés à proximité, le maître d'œuvre privilégie tout d'abord un ouvrage de type bassin d'infiltration.

Dans le cadre de sa mission G1, le géotechnicien réalise une étude basée sur les seuls éléments bibliographiques disponibles.

Lors de la mission G1-ES (Étude de Site), la carte géologique du BRGM au 1/50000<sup>e</sup>, ainsi que les sondages historiques situés à proximité, mettent en évidence des limons sur une épaisseur de quelques mètres recouvrant la craie secondaire. Le niveau d'eau apparaît systématiquement à plus de 10 m de profondeur.

Dans ses éléments de mission G1-PGC (Principes Généraux de Construction), le géotechnicien propose la réalisation d'un bassin dont la base est située dans la craie.

Des essais de perméabilité en forage de type Nasberg sont préconisés. Ces essais ne sont pas les plus adaptés mais constituent un compromis technico-économique pertinent à ce stade. La réalisation d'essais à la fosse nécessiterait en effet des fouilles importantes.

En fin de mission G1, il préconise la réalisation de quelques sondages de reconnaissances, associés à la réalisation d'essais de perméabilité en forage de type Nasberg, dans les limons et dans la craie.

Sur cette base, le maître d'œuvre envisage un bassin d'infiltration de 500 m<sup>2</sup>. Sans considérer de débit de fuite, cela conduit à gérer un volume de 820 m<sup>3</sup> sous 24 h.

#### 8.2.2 Avant-projet

Lors de la mission G2-AVP, les sondages de reconnaissance confirment la présence de limons recouvrant la craie.

L'épaisseur de limons, comprise entre 2 et 3 m, apparaît relativement homogène sur le site.

Le niveau d'eau n'est pas observé lors des sondages de 6 m de profondeur.

Une zone de marnette (mélange de limons et de granules de craie) marque la transition limons/craie. La craie est ensuite fracturée sur les 2 premiers mètres puis devient compacte.

Du fait de l'homogénéité géotechnique présumée de la zone, seuls deux essais sont réalisés au droit de chaque formation.

Les essais Nasberg conduisent aux valeurs de perméabilité suivantes :

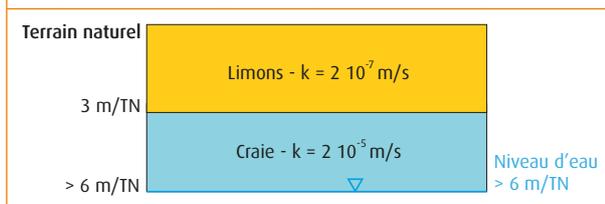
- Limons : 2,2.10<sup>-7</sup> m/s et 4,3.10<sup>-7</sup> m/s ;
- Craie : 2,1.10<sup>-5</sup> m/s et 3,5.10<sup>-5</sup> m/s.

En regardant la possibilité de réaliser un bassin d'infiltration, le géotechnicien retient alors les valeurs suivantes :

- Limons : 2.10<sup>-7</sup> m/s ;
- Craie : 2.10<sup>-5</sup> m/s.

La figure 21 ci-après représente le modèle géotechnique.

Figure 21 : Modèle géotechnique à l'issue de la phase AVP



Sur la base de ces valeurs, le géotechnicien recommande le recours à un bassin d'infiltration creusé jusqu'à la craie.

Le maître d'œuvre reprend le dimensionnement du bassin d'infiltration de 500 m<sup>2</sup> avec une valeur de perméabilité  $k = 2 \cdot 10^{-5}$  m/s. Le volume à stocker trentennal est alors évalué à 410 m<sup>3</sup>.

Par ailleurs, le maître d'œuvre, compare cette solution de base à une solution de noues. Avec la perméabilité de  $2 \cdot 10^{-7}$  m/s retenue par le géotechnicien, il apparaît que la mise en place de noues ne permet pas de gérer la totalité des eaux pluviales de la voirie. Il manque en effet 50 m<sup>3</sup>.

Toutefois, cette variante est jugée intéressante à creuser.

### 8.2.3 Projet

Au niveau du projet, le linéaire de voirie a légèrement augmenté et est passé de 1625 à 1750 m.

La surface de voirie est désormais égale à 14 000 m<sup>2</sup>.

Le maître d'œuvre demande par ailleurs au géotechnicien d'étudier une solution de noues.

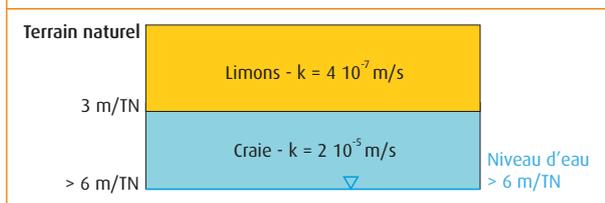
Dans le cadre de sa mission G2-PRO (Projet), le géotechnicien prévoit alors la réalisation de deux essais d'infiltration à la fosse, de type Matsuo, à 50 cm de profondeur dans les limons, qui conduisent aux résultats suivants :

Essai 1 :  $3,6 \cdot 10^{-7}$  m/s,

Essai 2 :  $4,7 \cdot 10^{-7}$  m/s.

A l'issue de ces reconnaissances, le modèle géotechnique de la figure 22 est proposé.

Figure 22 : Modèle géotechnique à l'issue de la phase PRO



Si des noues sont projetées, le géotechnicien propose de retenir la valeur de  $4 \cdot 10^{-7}$  m/s.

Le maître d'œuvre vérifie les noues projetées avec cette nouvelle valeur. Il s'avère que la solution de noues est désormais suffisante pour infiltrer les eaux pluviales.

L'essai Matsuo, mieux adapté pour déterminer la perméabilité des noues, a permis de prendre en compte une perméabilité deux fois plus élevée qu'en phase avant projet.

Des cloisons sont intégrées dans les noues afin d'optimiser leur capacité de stockage notamment dans les secteurs où il y a de la pente.

Cette solution de noues est en conséquence retenue pour la consultation des entreprises de travaux.

Outre leur fonction hydraulique, les noues ont de multiples intérêts. Elles sont de véritables espaces verts qui assurent une très bonne intégration paysagère. Elles sont propices au développement de la biodiversité et constituent un moyen de diminuer la température des îlots de chaleur urbains. Elles contribuent également à réalimenter les nappes phréatiques en limitant les risques de pollution car le ruissellement des eaux en est limité.

Figure 23 : Exemple de noue



## 9. ANNEXE C : FICHE SYNTHÉTIQUE D'AIDE À LA RÉDACTION D'UN CAHIER DES CHARGES DE MISSION D'INGÉNIERIE GÉOTECHNIQUE

### 9.1 Principe général

Le géotechnicien doit définir les moyens qu'il juge nécessaire pour répondre à la problématique technique posée. Dans ce sens il définit, la nature, le nombre et les caractéristiques des reconnaissances.

Il s'engage sur les modèles géotechniques, pour chaque zone homogène, à retenir au vu des ouvrages envisagés et justifient les valeurs de perméabilité retenues.

### 9.2 Éléments d'entrée

Les éléments d'entrée suivants doivent être mis à disposition du géotechnicien :

- le niveau d'avancement du projet (AVP, PRO, etc.), et le niveau de mission demandé, en référence à la norme NF P94-500 ;
- la liste des études précédentes (études géotechniques notamment) ;
- les débits à infiltrer ;
- la nature et l'implantation prévisible des ouvrages (au stade projet, ces éléments sont normalement arrêtés).

### 9.3 Reconnaissances imposées

La nature, le nombre et les caractéristiques des essais doivent être proposés par le bureau d'études géotechnique et ne doivent en aucun cas être imposé par le maître d'ouvrage ou le maître d'œuvre.

Le maître d'ouvrage et/ou le maître d'œuvre peuvent néanmoins imposer un minimum de reconnaissances.

Le mémoire technique, réalisé par le géotechnicien, définit la nature, le nombre et les caractéristiques des reconnaissances.

Les reconnaissances doivent être décrites et justifiées.

### 9.4 Rendus attendus

Un livrable unique est attendu. Il doit comprendre :

- une partie factuelle présentant les résultats de sondages et essais ;
- une partie interprétative présentant :
  - le modèle géologique faisant apparaître les variations éventuelles de la géologie ;
  - le modèle géotechnique à considérer pour chaque type et implantation d'ouvrage(s) d'infiltration, et notamment la valeur de perméabilité retenue.

## 10. ANNEXE D : GLOSSAIRE

**Arrivée d'eau** : constatation ponctuelle et factuelle en cours de forage de la présence d'eau.

**Infiltrabilité** : capacité d'infiltration d'un sol ou d'une roche. Elle se caractérise par le flux d'eau maximal que ce milieu est capable d'absorber.

**Modèle géotechnique** : couches de terrains rencontrées (position et nature) complétées par les propriétés nécessaires à l'étude de l'ouvrage projeté (perméabilités dans le cas de l'étude de l'infiltrabilité).

**Perméabilité** : facilité de l'eau à s'écouler dans les vides connectés du terrain (aussi appelée conductivité hydraulique).

© 2019 - Cerema

Le Cerema, l'expertise publique pour le développement et la cohésion des territoires

Le Cerema est un établissement public qui apporte un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre d'études et d'expertise, il a pour vocation de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au cœur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, organismes de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Coordination-Maquettage : Service éditions Cerema Eau, mer et fleuves

Dépôt légal : Octobre 2019

ISBN : 978-2-37180-415-9

ISSN : 2276-0164

Prix : gratuit

Illustration couverture ou crédits photos : Sébastien Liénard, Cerema Nord-Picardie

#### **Editions du Cerema**

Cité des mobilités,

25 avenue François Mitterrand

CS 92803

69674 Bron Cedex

#### **Cerema Eau, mer et fleuves**

##### **Service Qualité Édition**

134 rue de Beauvais

CS 60039

60280 Margny-lès-Compiègne

[www.cerema.fr](http://www.cerema.fr)

## La collection « Références » du Cerema

Cette collection regroupe l'ensemble des documents de référence portant sur l'état de l'art dans les domaines d'expertise du Cerema (recommandations méthodologiques, règles techniques, savoir-faire...), dans une version stabilisée et validée. Destinée à un public de généralistes et de spécialistes, sa rédaction pédagogique et concrète facilite l'appropriation et l'application des recommandations par le professionnel en situation opérationnelle.

## Recommandations pour la commande d'études d'infiltrabilité des sols

De nombreuses collectivités mettent en place une gestion durable et intégrée des eaux pluviales qui consiste à les infiltrer dans le sol en tout ou partie. Aussi, lors d'un projet d'aménagement neuf ou d'une réhabilitation, il est nécessaire de réaliser, au préalable, une étude géotechnique comprenant des essais de perméabilité *in situ* afin de connaître la capacité d'absorption du sol. L'expérience montre que les cahiers des charges, rédigés dans cet objectif, sont souvent incomplets et aboutissent à des réponses du bureau d'études géotechnique qui ne correspondent pas aux objectifs et caractéristiques du projet. Ce guide a pour objectif d'apporter des éléments de compréhension du sujet et d'aider les acteurs de l'aménagement du territoire à rédiger une bonne commande dans le cadre d'études d'infiltrabilité des sols.

## Sur le même thème

L'intérêt de l'utilisation de l'eau de pluie dans la maîtrise du ruissellement urbain - *Cerema, 2018*

Fiche instructeur n°6. Procédures d'autorisation et de déclaration des projets d'aménagement au titre du code de l'environnement rubrique 2.1.5.0 : rejets d'eaux pluviales. Études de sols pour les ouvrages d'infiltration ou de rétention d'eaux pluviales - *Ministère de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie/Cerema, 2014*

La ville et son assainissement - Principes, méthodes et outils pour une meilleure intégration dans le cycle de l'eau - *Cetmef, 2003*

Techniques alternatives aux réseaux d'assainissement pluvial - *Cetmef, 2001*

Organiser les espaces publics pour maîtriser le ruissellement urbain - *Cetmef, 2000*

Aménagement et cohésion des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

