

Construire des remblais contigus aux ouvrages d'art

Murs de soutènement et culées de pont

Ouvrages
d'Art
34

Cette note d'information est un rappel des règles de l'art relatives aux remblais contigus. Elle s'adresse à l'ensemble des acteurs du Génie Civil (maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, entreprises et bureaux de contrôles).

Parties intégrantes de l'ouvrage d'art, ces remblais contribuent à la stabilité de celui-ci tout en assurant la transition avec les terrains environnants.

Après un rappel des conditions de mises en œuvre et les contrôles pour des solutions classiques en matériaux granulaires, cette note abordera les possibilités de recours à des matériaux alternatifs (matériaux traités ou « locaux ») pour une meilleure prise en compte du développement durable dans les marchés de travaux.

Une méthodologie d'analyse de variantes à l'attention des maîtres d'œuvre est enfin proposée.

Mots clés : remblais contigus, remblais techniques, ouvrages d'art, pont, mur soutènement, culée, terrassements, contrôle exécution, qualité compactage, variantes, développement durable

Sommaire

1 - Ouvrages concernés et terminologie.....	2
2 - Utilisation de matériaux granulaires.....	4
3 - Utilisation de matériaux traités.....	11
4 - Méthodologie de prise en compte d'options ou variantes.....	13
5 - Capitalisation des expériences.....	15
ANNEXE 1 : Classes de sensibilité d'ouvrage.....	16
ANNEXE 2 : Guides techniques régionaux pour le réemploi de matériaux locaux.....	17
Bibliographie.....	18
Références normatives.....	18

1 - Ouvrages concernés et terminologie

1.1 - Domaine d'application

Cette note, conçue comme un aide mémoire, permet de rassembler en un seul document, les principales règles de l'art relatives à la construction des remblais contigus aux ouvrages d'art que sont les culées de ponts et murs de soutènement. Elle est le fruit d'une réflexion conjointe de spécialistes des ouvrages d'art et de géotechniciens spécialistes en mécanique des sols et en terrassements.

Les remblais contigus, appelés aussi remblais techniques ou blocs techniques, sont une partie intégrante des ouvrages. Ils contribuent à la stabilité de l'ouvrage et assurent la transition entre les structures rigides, souvent en béton, et le déblai ou le remblai courant. Leurs rôles sont souvent sous-estimés, voire méconnus, alors qu'ils sont parfois le cœur, donc la clé de la réussite de certains ouvrages. La maîtrise des conditions de mise en œuvre de ces remblais particuliers est nécessaire pour garantir la pérennité et la durabilité des ouvrages. Le non-respect de certaines règles peut entraîner de graves dysfonctionnements pouvant conduire à la ruine de la structure.

L'objectif de cette note est de faire connaître les spécificités des remblais contigus. Ces prestations incluses dans le cadre du marché d'ouvrage d'art sont couramment sous-traitées à des entreprises de terrassement. Il sera donc rappelé l'ensemble des règles de l'art communément admises.

Dans un souci de préservation des ressources minérales mais aussi d'économie, une tendance forte à la réutilisation des matériaux du site émerge. L'utilisation de matériaux alternatifs à ceux recommandés, comme des matériaux traités à la chaux ou aux liants hydrauliques se fait plus fréquente, voire se banalise dans certaines zones géographiques.

Cette note d'information vise donc à sensibiliser l'ensemble des acteurs de la réalisation d'ouvrages – maîtres d'ouvrages et maîtres d'œuvre, entreprises, concepteurs et contrôleurs – au respect des règles de l'art qui prévalent lors de l'étude et de la construction des remblais contigus d'ouvrages d'art et aux murs de soutènement.

Après un bref rappel des terminologies employées, ce document abordera les différents types de matériaux à mettre en œuvre avec leurs prescriptions, les matériaux à exclure, ainsi que les contrôles à effectuer pour garantir la qualité des remblais contigus. Un processus d'analyse des variantes est également proposé.

1.2 - Ouvrages concernés

Les remblais contigus aux ouvrages d'art et murs de soutènements, objets de la présente note, sont ceux mis en œuvre à l'arrière des ouvrages suivants :

- Piédroit de PICF (Passage inférieur en cadre fermé), PIPO (Passage Inférieur en Portique Ouvert), POD (Portique Ouvert Double) ;
- Mur de front, mur en retour ou en aile de culées de ponts ;
- Mur de soutènement poids, mur de type béton armé sur semelle ou mur constitué d'éléments empilés.

Cette note d'information, ne concerne pas les remblais contigus aux buses et ouvrages-voûtes, ni les remblais support de fondation.

1.3 - Terminologie

Plusieurs termes concernant les remblais environnant les ouvrages d'art sont définis ci-après : **remblai contigu**, **remblai d'accompagnement**, **zone d'exclusion aux compacteurs lourds**.

La modélisation courante de l'action du remblai à l'arrière d'un ouvrage différencie l'action stabilisatrice (action pondérale favorable) et l'action déstabilisatrice (action de poussée). Conformément aux principes généraux de justification des ouvrages de soutènement il convient de distinguer :

- une zone poids du remblai au droit du talon de la semelle (action stabilisatrice), absente dans le cas des murs poids ;
- une zone de poussée schématisée comme le coin de sol faisant un angle de $\pi/4 + \varphi/2$, compté à partir du talon de la semelle (action déstabilisatrice)¹.

Le remblai contigu à l'ouvrage (figure 1) assure la transition entre le point dur représenté par l'ouvrage et le remblai courant ou le déblai (profil en long), et supporte la dalle de transition. Il fait l'objet de prescriptions plus restrictives que le remblai courant car il participe au bon fonctionnement mécanique de l'ouvrage. Il englobe les zones où :

- ses caractéristiques mécaniques influent sur le dimensionnement et la pérennité de l'ouvrage (notamment son angle de frottement interne φ') ;
- sa mise en œuvre se fait dans un espace exigü et sensible ;
- les matériaux ne doivent pas être agressifs pour l'ouvrage (agression chimique et électrochimique, agression mécanique) ;
- les fonctions de drainage sont indispensables.

Le remblai contigu est donc défini par des critères prioritairement mécaniques à travers son influence sur les structures rigides qui le soutiennent (mur, culée d'ouvrage). Cela signifie notamment que dans l'hypothèse où ce remblai serait réalisé avant le remblai courant, la partie du remblai (bloc technique) n'ayant pas d'influence mécanique sur l'ouvrage n'est pas soumise aux prescriptions décrites dans cette note. Il s'agit alors d'un **remblai d'accompagnement** pouvant satisfaire aux exigences de mise en œuvre du remblai courant.

La **zone d'exclusion aux compacteurs lourds** (figure 2) est la partie de remblai contigu attenante à l'ouvrage de génie civil dans laquelle l'utilisation de compacteurs lourds de classe supérieure ou égale à 3 [10] est proscrite.

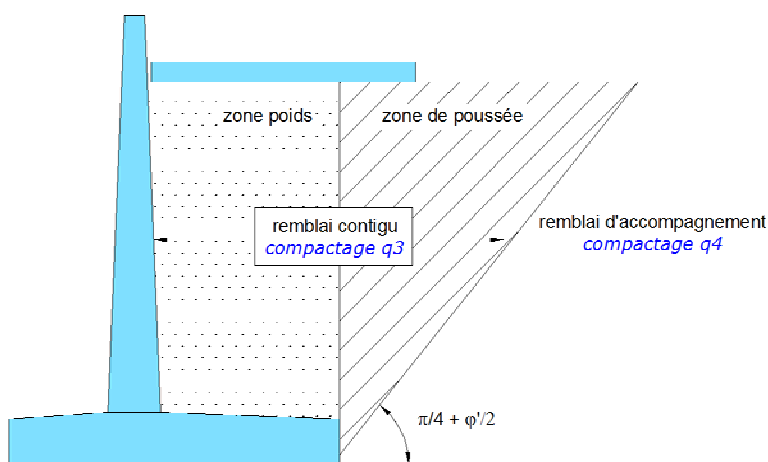


Figure 1 - Définition du remblai contigu, zones poids et zone de poussée

¹ Cette valeur de $\pi/4 + \varphi/2$ n'est exacte que pour une surface de parement verticale et un angle de frottement nul entre le sol et le mur. Dans notre cas il s'agit d'une valeur "conventionnelle" permettant la définition du remblai contigu.

2 - Utilisation de matériaux granulaires

Ce paragraphe comprend les recommandations dont l'utilisation est éprouvée et dont le comportement mécanique à long terme est ma tris e. Bien qu'étant onéreux, leur utilisation est cependant adaptée compte tenu du faible volume que représentent les remblais contigus et de leur importance mécanique.

2.1 - Caractéristiques recherchées des matériaux granulaires

Les matériaux granulaires recommand es, conformes à la norme NFP 11-300 [11], ou éventuellement aux classes de difficultés de compactage au sens de la norme NFP 98-231.2 [23], doivent être mis en œuvre conformément au Guide Technique Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) [1] et au guide de remblayage des tranchées [4].

2.1.1 - Critères granulométriques et intrins eqes recommand es

Le matériel choisi doit être non évolutif, non gonflant, insensible à l'eau, non érodable et présenter des paramètres physico-chimiques non agressifs vis à vis du béton et des armatures. En particulier, les coefficients Los Angel es [18] et micro-Deval humide [17] seront inférieurs à 45. On pourra également vérifier que la fragmentabilit e [19] et la dégradabilité [20] restent inférieures à 7.

Le matériel granulaire doit être exempt d'éléments supérieurs à 50 mm ($D_{max} < 50$ mm) et le passant à 80 μ m doit être inférieur à 12 %.

Lorsque le diamètre maximal des éléments est compris entre 31,5 et 50 mm ($31,5 \text{ mm} < D_{max} < 50$ mm), il est nécessaire de mettre un dispositif de protection du drainage, qu'il s'agisse d'un matériel roul e ou concass e.

2.1.2 - Masse volumique du matériel mis en œuvre

La masse volumique du matériel retenue lors du calcul de l'ouvrage doit être aussi proche que possible de la masse volumique du matériel mis en œuvre, une variation de 10% pouvant être tolérée. Bien qu'un poids volumique humide de 20 kN/m³ soit en général retenu dans les calculs, il est fréquent d'observer en réalité des masses volumiques mises en œuvres plus proches de 21 à 22 kN/m³.

Dans tous les cas, il y a nécessité de connaître la masse volumique s ech e (ρ_d) de mise en œuvre avec la réalisation d'un essai Proctor [21] ou d'une planche d'essai. Cette valeur est généralement fournie avec la fiche matériel lors de la demande d'agrément.

Il est également rappelé que le drainage de l'eau est essentiel car la poussée hydrostatique sur la hauteur totale du mur conduit à augmenter considérablement la poussée totale.

2.1.3 - Paramètres physico-chimiques

D'une manière générale le cahier des clauses techniques particulières (CCTP) fixe des exigences minimales auxquelles doit répondre le béton [13] utilis e dans la construction d'un mur ou d'un pont, et notamment sa classe d'exposition. Cela conduit généralement à retenir plusieurs formules de béton selon les parties d'ouvrage (comme les fondations, les semelles, les piles, les culées, tablier, etc.) bien avant le début de la construction.

Les caractéristiques physico-chimiques des matériaux de remblai contigu peuvent avoir des conséquences sur la durabilité du béton à leur contact. Il est recommand e aux maîtres d'œuvre de s'assurer que les formules de béton retenues en études d'exécution sont compatibles avec les matériaux mis en œuvre.

2.1.4 - Autres matériaux granulaires acceptables

Des matériaux granulaires conformes aux critères avec D_{max} inférieur ou égal à 100 mm, présentant un passant à 80 μ m inférieur à 12 % et une VBS inférieure à 0,1 g bleu/100g sol [22] sont acceptables sous réserve de :

- moyens de compactage adapt es aux épaisseurs de couches, en particulier dans la zone d'exclusion aux compacteurs lourds ;
- protéger les dispositifs de drainage des dégradations lors de la mise en œuvre (couche intermédiaire de plus faible granulométrie, complexe géosynthétique...).

Il est à noter que les bétons concass es, de classe GTR F71 stricte, peuvent entrer dans ces classes sous réserve d'une granulométrie adaptée et de vérifier :

- l'absence de sulfates et de plâtre en particulier ;
- l'absence d'éléments putrescibles ou métalliques ;
- que les paramètres physico-chimiques de ces matériaux répondent aux spécifications demandées.

2.2 - Dispositifs de drainage

La présence d'eau à l'arrière d'un mur ou d'une culée d'ouvrage peut avoir diverses conséquences néfastes :

- l'introduction d'une poussée hydrostatique non prise en compte dans le dimensionnement qui peut doubler a minima la poussée exercée à l'arrière de l'ouvrage ;
- l'altération des matériaux constitutifs du remblai qui peut se traduire par des déformations parasites du remblai ainsi que par la dégradation de la résistance au cisaillement ;
- l'altération de la structure en béton (agressivité chimique et corrosion des armatures) ;
- l'apparition de coulures ou suintements.

Le dimensionnement et la bonne mise en œuvre d'un dispositif de drainage sont donc indispensables. Quel que soit le dispositif de drainage mis en œuvre, la présence d'un **drain de pied en relation avec un exutoire pérenne est obligatoire**.

Suivant le passant à 80µm du matériau constitutif du remblai, il peut assurer la fonction drainage.

Un matériau est dit drainant si sa Valeur de Bleu Sol (VBS) [22] est inférieure à 0,1 g bleu/100 g sol et que son passant à 80 µm est inférieur à 5% (un sable graveleux propre, matériau de classe GTR D21 par exemple). Dans ce cas il n'est pas indispensable d'envisager la pose de dispositifs drainants. Le drain de pied reste indispensable.

Dans le cas de matériaux granulaires présentant un passant à 80 µm compris entre 5 et 12% (grave silteuse par exemple, matériau de classe GTR B31), il y a lieu de mettre en œuvre un dispositif de drainage (couche drainante, géocomposite...) pour à la fois drainer et protéger le parement (photo 1). L'utilisation d'un dispositif géosynthétique fera l'objet d'un examen attentif de ses caractéristiques principales au regard du projet (résistance à la traction, résistance au poinçonnement, permittivité et transmissivité sous contraintes).



Photo 1 - Mise en œuvre d'une nappe drainante sur le badigeon de protection (en noir) d'une culée (crédit : LR de Rouen)

2.3 - Influence du compactage sur l'indice des vides et sur l'angle de frottement interne

Le compactage des remblais granulaires définis précédemment a pour objet de :

- limiter les tassements ;
- assurer les diverses performances mécaniques recherchées pour le remblai ainsi que pour les couches de chaussées.

Le compactage a des effets antagonistes sur l'effort de poussée. D'une part il augmente la valeur de l'angle de frottement interne du matériau mis en œuvre ce qui diminue l'intensité de sa poussée sur les ouvrages. D'autre part le compactage réduit l'indice de vide du matériau ce qui augmente sa masse volumique donc l'effort de poussée. L'effet lié à l'augmentation de l'angle de frottement interne est généralement prépondérant.

Il convient également de noter qu'un compactage excessif peut générer des efforts de poussée très supérieurs à ceux pris en compte dans le calcul, en particulier sur des ouvrages bloqués en déplacement.

Une intensité de compactage adaptée, supérieure à celle d'un remblai courant permet de garantir l'angle de frottement interne pris en compte dans le dimensionnement du mur, en cas d'humidification postérieure du matériau par exemple.

Une qualité de compactage q3 [14] est prescrite pour l'ensemble des remblais contigus, sur toute la hauteur, afin d'assurer la transition entre le point dur que représente la structure et le remblai courant (ou d'accompagnement) compacté à une qualité q4 (figure 1).

L'introduction de cette exigence permet d'augmenter la sécurité globale de l'ouvrage et doit réduire la sinistralité importante couramment observée sur ces remblais contigus (photo2).



Photo 2 - Affaissement d'un remblai contigu marqué par la déformation des barrières de sécurité
(crédit : LR Toulouse)

Le respect de ces spécifications de compactage, autorise à prendre en compte un angle minimal de frottement interne φ' du matériau granulaire de 35° , la cohésion de calcul étant nulle.

2.4 - Conditions particulières de mise en œuvre

2.4.1 - Compactage

Afin de minimiser les effets de vibrations, le compactage à proximité immédiate de l'ouvrage sera réalisé au moyen de compacteurs légers.

On privilégiera l'utilisation de petits rouleaux vibrants, de plaques vibrantes ou de pilonneuses dont l'emploi sera conforme aux modalités définies dans le Guide Remblayage des Tranchées [4].

Les rouleaux vibrants de classe supérieure ou égale à 3 doivent évoluer à une **distance de garde de deux mètres du voile et 1 mètre du talon le cas échéant, qui définit la zone d'exclusion aux compacteurs lourds** sous peine d'engendrer une poussée supplémentaire non prise en compte dans le calcul (figure 2).

L'utilisation de compacteurs légers entraîne une réduction de l'épaisseur des couches élémentaires [4]. Cette limitation de l'épaisseur induit également une limitation du diamètre maximal des gros éléments aux deux tiers de l'épaisseur de la couche.

De plus, en cas de présence de parties d'ouvrages anciens en maçonnerie ou de bâtiments à proximité, des précautions supplémentaires devront être prises conformément à la note d'information « Prise en compte des nuisances vibratoires liées aux travaux »[6].

Dans le cas de réalisation de ponts de type portique ou cadre (PIPO, PICF), la montée simultanée des 2 remblais contigus de part et d'autre de l'ouvrage² est vivement conseillée, afin d'éviter les poussées dissymétriques. Dans le cas contraire, une justification par le calcul en phase d'exécution devra être présentée par l'entreprise avant le début des travaux.

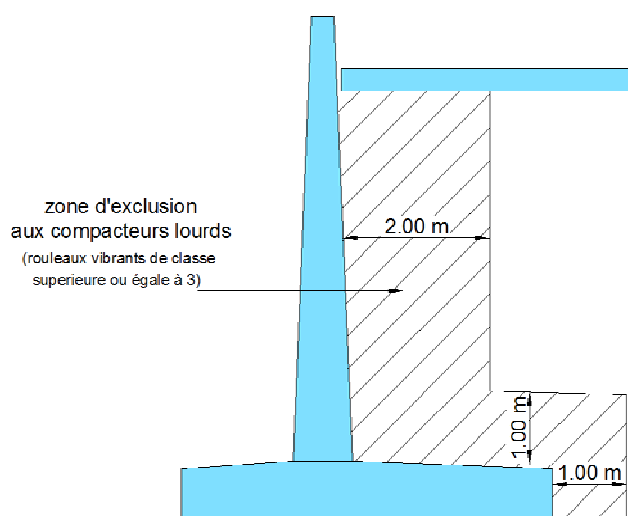


Figure 2 - Zone d'exclusion aux compacteurs lourds

² Un décalage altimétrique de moins de un mètre est acceptable

2.4.2 - Mise en œuvre du drainage

Lors de la mise en œuvre du complexe drainant (matériaux drainants, géocomposite), les points critiques suivants seront particulièrement traités (photo 3) :

- l'épingleage de la nappe de drainage sur l'ouvrage qui doit résister à la mise en œuvre des matériaux,
- le recouvrement entre nappes géotextiles le cas échéant,
- le drainage du talus de déblai s'il y a lieu,
- la liaison hydraulique entre le complexe drainant et le drain de pied ; le contrôle d'exécution pourra d'ailleurs faire l'objet d'un point d'arrêt,
- la connexion entre le drain de pied et l'exutoire pérenne.



Photo 3 - Mise en œuvre d'une nappe drainante complétée par un matériau drainant au contact d'une culée (crédit : LR de Rouen)

2.4.3 - Interface entre le remblai contigu et leur remblai d'accompagnement



Photo 4 - Remblai courant réalisé postérieurement au remblais contigu et son remblai d'accompagnement, réalisation de redans à l'avancement (crédit : LR Blois)

Il existe 3 cas de figures en règle générale :

- Soit **une montée concomitante des deux remblais**. Ce cas est rarement rencontré. La procédure d'exécution s'attachera à préciser les conditions du traitement de l'interface ;
- Soit **les remblais contigus et les remblais d'accompagnement sont déjà réalisés** (photo 4). Ce cas est couramment rencontré lors de la réalisation de passages supérieurs (PS). La procédure d'exécution précisera en particulier les conditions d'accrochage du remblai général, notamment par des redans, au remblai contigu et au remblai d'accompagnement déjà réalisés ;
- Soit **les remblais contigus viennent en appui à la fois sur le piédroit du mur et sur le talus de déblai ou le remblai courant déjà réalisé**. Ce cas est couramment rencontré lors de la réalisation de passages inférieurs (PI) ou de murs de soutènements. La procédure d'exécution doit être rédigée, qui précisera en particulier les conditions de réalisation, de drainage et de compactage du remblai contigu et éventuellement les conditions d'accrochage (redans).

2.5 - Contrôles de remblais contigus en matériaux granulaires

Le contrôle des remblais contigus comprend l'agrément des matériaux lors de la phase de préparation et le contrôle d'exécution lors de la mise en œuvre.

L'agrément du matériau s'attache à vérifier la compatibilité de ses caractéristiques géotechniques avec les hypothèses retenues dans les études d'exécution. Compte tenu de l'importance de ces remblais, un contrôle d'exécution est indispensable afin de garantir la durabilité de la totalité de l'ouvrage :

- les critères de granulométrie et d'argilosité (teneurs en fines, D_{max}) ;
- la densité de référence (essai Proctor ou planche d'essai);
- les paramètres physico-chimiques ;
- l'angle de frottement interne ϕ' , etc.



Photo 5 - Remblai contigu en cours d'exécution. Les épaisseurs maximales des couches ont été not es à la peinture verte sur les palplanches métalliques (crédit : LR de Rouen)

Il convient de s'assurer de l'adéquation des procédures d'exécution des remblais contigus aux prescriptions requises.

Il est rappelé que le « guide technique de l'organisation de l'assurance qualité dans les travaux de terrassements » [7] souligne qu'un contrôle continu est préférable à n'importe quel contrôle a posteriori. Au démarrage du chantier, la teneur en eau du matériau de remblai doit être v rifi e afin d'adapter les prescriptions de compactage. Il est aussi nécessaire de s'assurer de l'adéquation des moyens de compactage et des épaisseurs de mise en œuvre des couches de matériaux ainsi que du respect des zones d'exclusion aux compacteurs lourds. Pour ce faire il ne faut pas hésiter à tracer, ou faire tracer, sur les piédroits de l'ouvrage ou du mur de soutènement, les épaisseurs maximales à respecter dans cette zone d'exclusion (photo 5), ce qui permet une appropriation par tous de cette prescription. De même, il est utile de matérialiser la zone d'exclusion aux compacteurs lourds lorsque cela est possible, comme sur les murs en retour.

Dans les contrôles a posteriori, le contrôle au p n trodensitographe   énergie constante est couramment utilisé (photo 6) comme indiqué sur la fiche n 25 du Fascicule 3 du guide technique de conception et réalisation des terrassements [3] et dans la norme NFP 94-063 [9]. Une qualité de compactage q_3 , définie selon la norme NFP 98-331 [14] sera recherch e. Un contrôle à mi-hauteur est intéressant pour des problèmes d'accès et de profondeur d'investigation mais aussi de facilité de démontage en cas d'anomalie. Ce contrôle à mi-hauteur est complété par un contrôle final.

La réalisation d'au moins 3 profils par remblai contigu est conseill e. L'interprétation des courbes nécessite de connaître au préalable l'identification du matériau conformément à la norme NFP 11-300 [11] ainsi que son état hydrique. En appui à la norme NFP 94-063 [9], le guide remblayage des tranch es [4] permettra une bonne analyse des résultats par qualification de quatre niveaux de gravité en lien avec l'ampleur des déformations attendues.

La vérification de la masse volumique au gammadensim tre peut être prescrite (norme NF P 94-061 [12], cf. fiche 18 fascicule 3 du guide de conception des terrassements [3]). Cependant compte tenu de la faible épaisseur d'auscultation (10 à 40 cm), plusieurs séries de mesures s'av r ent nécessaires. Il faut enfin rappeler que ce mode de contrôle ne peut s'effectuer qu'en référence à un état de compactage optimum défini lors d'une étude en laboratoire ou sur planche d'essai. Ce mode de contrôle suppose donc la réalisation de mesures "en continu" tout au long de l'exécution du remblai.



Photo 6 - Contrôle de remblais contigus au p n trodensitographe à mi-hauteur (crédit : LR Saint-Brieuc)

2.6 - Matériaux à exclure

Conformément aux règles usuelles de calcul, la justification des ouvrages en terre est menée en considérant une cohésion de calcul prise égale à zéro ($c' = 0$ kPa). L'angle de frottement interne φ' et la masse volumique sont alors les paramètres dimensionnants des murs.

De ce fait **les argiles et limons** sont à exclure sans traitement car :

- ils conduisent à un dimensionnement non économique des soutènements,
- ils sont sensibles à l'eau et peuvent mettre en péril la pérennité de l'ouvrage,
- ils sont difficiles à mettre en œuvre,
- ils peuvent se saturer d'eau.

De plus, en cas de pathologie, ces matériaux induisent des problèmes supplémentaires lors de la conception de confortements par ancrage.

Les roches tendres évolutives de type argilites, marnes, schistes, ou craie, non traitées, sont à exclure car elles créent des fines dans le temps, générant des vides et des affaissements.

Les Mâchefers d'Incineration d'Ordures Ménagères (MIOM) sont des matériaux alternatifs récents pour lesquels des soucis d'agressivité chimique pourraient conduire à la ruine de l'ouvrage par corrosion des armatures. Sans étude particulière, le recul n'est actuellement pas suffisant sur ce type de matériau pour conseiller son utilisation en remblai contigu.

Des pathologies en région parisienne notamment, suite à l'emploi de **sables fins, non traités**, conduisent à exclure ces matériaux car trop érodables ($D_{0/2}$ mm, type sable de Fontainebleau), le matériau pouvant être entraîné dans le système de drainage et générer des vides et des affaissements.

3 - Utilisation de matériaux traités

Les matériaux fins traités sont utilisés en remblais contigus, depuis plusieurs années. Un certain nombre de recherches, de suivis d'ouvrages et de retours d'expérience documentés sont encore à réaliser pour vérifier la pérennité du traitement et le maintien dans le temps des caractéristiques mécaniques minimales, au terme de la durée de vie de l'ouvrage (70 à 100 ans).

On pourra donc admettre d'élargir les prescriptions des matériaux pour remblais contigus au cas des matériaux traités. Il conviendra donc d'adopter pour les remblais contigus, les conditions particulières suivantes. Ces conditions ont été appliquées sur plusieurs chantiers, notamment en région parisienne depuis une vingtaine d'années.

3.1 - Etude des matériaux traités

Pour envisager l'utilisation d'un sol traité en remblai contigu il faut en premier lieu connaître avec une précision suffisante les caractéristiques géotechniques des gisements identifiés pour définir des zones géotechniques homogènes. Chacune de ces zones homogènes fera l'objet d'une étude spécifique permettant de définir les seuils limites de variabilité ou de dispersion (granulométrie, plasticité ...).

Les guides de traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques [5] et de conception des terrassements [2] pourra servir de base pour établir les modalités de réalisation des études de traitement des sols (échantillonnage, type d'essais, conservation...).

On rajoutera aux conditions générales des études, des essais à caractères informatifs permettant d'évaluer les caractéristiques intrinsèques du matériau traité dans le long terme. Le protocole de l'étude précisera les modalités de traitement retenues (dosage, durée de cure, mouture) et tout éléments de nature à aider à l'interprétation des résultats (saturation, délai entre le malaxage, le compactage et la saturation des éprouvettes...).

Pour chacun des gisements identifiés, les études menées permettront d'évaluer à partir d'éprouvettes compactées à 95% de l'OPN :

- Rc après 14 jours de cure et 14 jours d'immersion supérieur ou égal à 0,5 à 1 MPa ;³
- Rc à 2 jours supérieur ou égal à 0,1 MPa, pour assurer une cohésion minimale à court terme afin de limiter les efforts sur le voile béton ;³
- Vérification de l'aptitude au traitement par l'essai d'aptitude [24] ;
- le rapport CBRi/IPI dans le cas d'un traitement à la chaux seule supérieur ou égal à un ;⁴
- vérifier la cohésion et l'angle de frottement long terme (c' et ϕ') déterminés à l'essai triaxial drainé ou éventuellement à la boîte de Casagrande.

Paramètres de dimensionnement

Le principe général est de calculer les ouvrages avec $c'=0$ kPa, $\phi'=35^\circ$. Il s'agira donc pour des matériaux traités de pouvoir s'assurer que ses caractéristiques mécaniques à long terme soient toujours suffisantes pour conduire à un effort de poussée inférieur ou égal à celui engendré par un matériau présentant un angle de frottement à long terme ϕ' de 35° et une cohésion nulle.

Les poids volumiques observés sur les matériaux fins traités sont fréquemment inférieurs à 20 kN/m³. Pour le dimensionnement, il conviendra cependant de conserver une valeur de **poids volumique humide de 20 kN/m³**.

3.2 - Mise en œuvre et contrôle des matériaux traités

Les conditions de mise en œuvre sont soumises aux mêmes spécifications que celles concernant les matériaux granulaires : **zone d'exclusion aux compacteurs lourds, gestion des interfaces entre remblais** (§2.5).

Pour l'ensemble des remblais contigus en matériaux traités (chaux ou liants), une qualité de **compactage q3** est prescrite, sur toute la hauteur.

³ Rc = résistance en compression simple mesurée sur une éprouvette d'élanement 2

⁴ Les essais d'Indice Portant Immédiat (IPI) et d'indices CBR (Californian Bearing Ratio) à 4 jours d'immersion avec CBRi/IPI > 1 sont utilisés à ce jour pour vérifier le caractère de faible sensibilité à l'eau des couches de formes en cas de traitement à la chaux vive. A défaut de protocoles d'essais plus adaptés ils pourront servir de base de jugement pour l'utilisation des matériaux en remblai contigus.

Le compactage ainsi réalisé favorise la prise hydraulique et réduit l'indice de vide du matériau, diminuant d'autant sa perméabilité. Les risques de dégradations ultérieures à long terme du traitement par des circulations d'eau en sont diminués. L'introduction de cette exigence permet d'augmenter la sécurité globale de l'ouvrage.

L'utilisation de matériaux fins traités en remblais contigus nécessite d'imposer des conditions de réalisation plus sévères que dans le cas de remblais courants. On recherchera ainsi, après malaxage une **mouture la plus fine possible, de type 0/20 mm**, ce qui implique un pulvérisateur de sol et généralement un traitement en dehors de la zone de mise en œuvre.

3.2.1 - Matériaux traités à la chaux

Les matériaux traités à la chaux de type A1, A2, B5 ou B6 sont acceptables.

Pour ces matériaux, la teneur minimale de traitement à la chaux est de 2 % en général [2]. La teneur minimale pourra être inférieure et sera analysée au cas par cas.

Avec les matériaux traités à la chaux seule, les essais de contrôle au pénétromètre sont possibles rapidement après la mise en œuvre.

3.2.2 - Matériaux traités aux liants hydrauliques

Les matériaux de classe GTR A1, A2, B2, B4, B5 et B6 traités aux liants hydrauliques sont acceptables.

La teneur minimale de traitement aux liants hydrauliques est en général de 3 % quelque soit la granulométrie du matériau. La teneur minimale pourra être inférieure et sera analysée au cas par cas.

Cette solution conduit à créer à terme un massif rigide. Il convient alors de vérifier que le support de remblai est peu déformable.

Il est à noter que les essais de contrôle au pénétromètre sont généralement impossibles dans ce cas. Il convient alors de s'orienter par des moyens de contrôles en continu (Q/S^5 ou gammadensimètre).

3.3 - Dispositifs de drainage

Les matériaux fins traités sont très peu perméables et il convient de leur associer un dispositif complet de drainage (complexes drainants, couche granulaire drainante etc.). Suivant les configurations il pourra alors s'avérer utile de disposer :

- le complexe drainant au contact du parement de l'ouvrage ;
- une base drainante en assise du remblai contigu. Cette base drainante présentera en outre l'avantage de constituer une assise efficace pour le compactage des premières couches.

Il est rappelé la nécessité dans tous les cas :

- **d'un drain en pied ;**
- **d'un exutoire largement dimensionné et d'entretien aisé pour assurer sa pérennité.**

⁵ Ratio entre le volume de matériau compacté pendant un temps donné et la surface balayée par le compacteur sur ce volume pendant le même temps. Ce ratio exprime aussi l'épaisseur théorique compactée en une application de la charge du compacteur [1].

4 - Méthodologie de prise en compte d'options ou variantes

4.1 - Ouverture à option ou variante

Les choix du maître d'ouvrage sont principalement guidés par le respect du délai, la pérennité de l'ouvrage, l'efficacité budgétaire et la prise en compte du développement durable. La pondération de ces objectifs conduit à des choix techniques différents. Les matériaux granulaires sont particulièrement adaptés notamment pour des terrains difficiles ou pour des ouvrages « non courants » mais peuvent exiger l'utilisation de matériaux dont la provenance est très éloignée du chantier. Dès lors il peut s'avérer pertinent de construire des remblais contigus en matériaux traités ou en matériaux alternatifs. Il est alors indispensable d'encadrer les solutions dès la constitution de l'appel d'offres et de pouvoir en mesurer toutes les conséquences sur la pérennité de l'ouvrage. Une pathologie du remblai contigu se traduit souvent par des travaux de reprise ou de consolidation très contraignants pour l'exploitation de l'ouvrage et souvent très onéreux. La présente note d'information propose donc des outils pour comparer différentes options ou variantes.

Il est ainsi proposé de retenir comme solution de base les matériaux granulaires pour des ouvrages exceptionnels ou dans des conditions de sols particulières (sols compressibles notamment). Dans le cas d'ouvrages courants il est proposé l'ouverture sur le choix des matériaux à mettre en œuvre en remblais contigus, en se donnant les moyens techniques de les accepter ou les refuser.

Il convient de réserver les variantes à des ouvrages courants.

Les variantes doivent aboutir à une qualité d'usage au moins équivalente à celle présentée en solution de base.

Le choix d'utilisation d'un matériau a des conséquences financières dans le temps pour le maître d'ouvrage. Dans certains cas il peut rester des incertitudes sur la pérennité à long terme des caractéristiques du matériau ce qui peut conduire à :

- considérer le remblai comme un ouvrage géotechnique de catégorie 3 conformément à l'Eurocode 7 motivant un suivi particulier de l'ouvrage ;
- le considérer « innovant ou relevant de techniques spéciales » au sens du paragraphe 2.3 du fascicule 0 de l'ITSEOA (Instruction Technique pour l'Entretien et la Surveillance des Ouvrages d'Art, 2010 SETRA [15]).

Ainsi, si l'agrément d'une variante pour les matériaux de remblais contigus d'ouvrages peut se justifier en termes de coût ou de problématiques environnementales, cela peut conduire à :

- une bonne définition des critères de contrôle dès la rédaction du marché,
- une augmentation du niveau de contrôle lors de l'exécution des travaux,
- une augmentation notable des contraintes et du coût de suivi de l'ouvrage.

4.2 - Agrément d'une variante

Compte tenu de caractères souvent inhabituels des matériaux couramment proposés en variante, il est vivement conseillé aux maîtrises d'œuvre de recueillir l'avis de spécialistes du domaine.

L'analyse de la variante s'effectue au regard du dossier de propositions de variante qui comprend entre autre des fiches d'adaptation, les fiches d'agréments de matériaux, les résultats d'essais mécaniques ainsi que les propositions de contrôles et de réception de l'ouvrage. Sont alors étudiés les incidences sur le plan qualité, les délais et cadences, les coûts, les conséquences en terme de suivi de chantier, de développement durable (bilan carbone incluant la confection du liant hydraulique, réemploi du matériau du site, impact sociétal ...).

Le maître d'œuvre sera particulièrement vigilant aux contrôles proposés par l'entreprise pour la mise en œuvre de la solution. L'examen des références existantes similaires est vivement encouragée.

4.3 - Sensibilité des ouvrages et innovation

Le remblai contigu est une partie intégrante de l'ouvrage. A ce titre, il peut lui conférer un caractère innovant ou non. Un mur en béton armé sur semelle aux dimensions classiques, remblayé par un matériau connu, présente une fiabilité technique supérieure au même mur remblayé avec un matériau innovant.

Toutes les options ne présentent pas nécessairement la même « certitude ou valeur technique », simplement en raison de l'insuffisance de retour d'expérience. De ce fait, le risque de voir apparaître des désordres, conduisant à des interventions prématurées sur l'ouvrage, doit être pris en compte.

Le croisement de la complexité de l'ouvrage à construire et de la fiabilité du matériau de remblai dont l'emploi est envisagé, permet d'élaborer une grille de lecture qui pourra être utilisée lors du jugement des offres. Le tableau présenté en annexe 1 propose une grille d'analyse de ces variantes, largement inspirée de la méthode d'analyse extraite du guide de conception sur les murs de soutènement [8]. Cette classification d'ouvrages en trois catégories (simple, ordinaire, complexe) peut être mise en correspondance avec la classification des ouvrages neufs au sens de l'Eurocode 7 partie 1 [16], dont nous rappelons pour mémoire les principes généraux.

Le maître de l'ouvrage peut classer l'ouvrage en trois catégories :

- la catégorie 1 comprend les ouvrages petits et relativement simples pour lesquels un dimensionnement basé sur l'expérience est possible à travers des reconnaissances d'ordre qualitatif avec un risque négligeable ;
- la catégorie 2 comprend les types classiques d'ouvrages et de fondations ne présentant pas de risque exceptionnel, de conditions de charge ou de terrains exceptionnels ;
- la catégorie 3 comprend les ouvrages très grands ou inhabituels, les ouvrages présentant des risques anormaux ou des conditions de terrain ou de chargement inhabituels, les ouvrages en zone très sismique, les ouvrages dans des zones susceptibles de présenter des instabilités ou des mouvements permanents du terrain nécessitant des reconnaissances particulières ou des mesures spéciales.

Cette démarche peut ainsi conduire, à réserver l'emploi des variantes à des ouvrages courants (catégories 1 et 2) et à l'exclure pour des ouvrages complexes (catégorie 3). L'ouvrage réalisé avec une solution variante fait l'objet d'un plan de contrôle adapté qui comprend des procédures de contrôle renforcées notamment par établissement de planches d'essais et d'études adéquates.

4.4 - Validation et contrôle des matériaux

Les critères de validation et de contrôles seront de préférence intégrés dès l'élaboration du cahier des charges. En effet l'utilisation de matériaux différents de ceux prévus lors des études de projet peut mener à un dimensionnement complémentaire de l'ouvrage. Ces points de contrôle sont ensuite déclinés tout au long du déroulement du chantier : analyse des offres, élaboration du plan de contrôle, planches d'essai et contrôles interne, externe ou extérieur sur site.

Les points de contrôles sont :

- Les caractéristiques mécaniques globales du matériau (c' et φ' , R_c) ;
- la densité des matériaux proposés (référence Proctor, planche d'essai) ;
- les caractères physico-chimiques des matériaux proposés ;
- la conservation globale des capacités de drainage du remblai contigu à travers le matériau de remblai ou le complexe drainant ;
- l'agressivité mécanique des matériaux proposés (angularité) ;
- les conditions de mise en œuvre et les contrôles in situ associés.

Le marché comportera des clauses adaptées concernant le couple matériau de remblai et béton. Cela peut conduire à formuler des exigences particulières pour les surfaces en béton en contact avec le matériau utilisé en remblai contigu : augmentation de l'épaisseur d'enrobage des aciers ou formulation spécifique du béton.

Dans tous les cas l'entrepreneur remettra une note technique détaillant les méthodologies d'essais et les résultats obtenus de tous les matériaux qu'il soumet à l'agrément.

De plus, les modalités de mise en œuvre de ces matériaux et les moyens de les contrôler seront aussi décrits dans la demande d'adaptation. Nous rappelons enfin que quelque soit la technique mise en œuvre le suivi lors de l'exécution des travaux est toujours préférable aux contrôles a posteriori.

5 - Capitalisation des expériences

Cette note d'information rassemble en un seul document l'ensemble des règles de l'art [2] relatives aux remblais contigus aux culées de ponts et aux murs de soutènement.

Elle permet d'aider les maîtres d'œuvre et les maîtres d'ouvrage dans le choix du matériau à mettre en œuvre dans ces remblais particuliers afin de garantir les exigences de pérennité et de durabilité.

Dans un contexte de préservation des ressources minérales et de diminution de l'impact environnemental et du coût des transports de matériaux, le recours à des matériaux alternatifs peut être envisagé. Les recommandations et prescriptions décrites dans la présente note d'information sur ces types de matériaux donnent un cadre à la validation au contrôle et à la mise en œuvre de matériaux en remblai contigu d'ouvrage.

La problématique des remblais contigus souffre d'un manque évident de retour d'expérience à moyen et long terme. L'instrumentations de remblais contigus, la capitalisation des données d'études et de suivi de l'ouvrage au cours de toutes les phases de sa réalisation doivent permettre de palier à ce défaut de connaissance.

6 - ANNEXE 1 : Classes de sensibilité d'ouvrage

Matériaux de remblai		Catégorie d'ouvrage d'art		Simple	Ordinaire	Complexe
				catégorie géotechnique 1	catégorie géotechnique 2	catégorie géotechnique 3
Granulaire	1	A				
	2	B			B (*)	
Matériaux traités	1	B			C (*)	
	2 ^(**)	B	C (*)		O	
Innovants	1	B (*)	C (*)		O	
	2					

- 1 - Techniques, procédés ou situations ne présentant pas d'incertitudes particulières quant au vieillissement des matériaux employés.
- 2 - Techniques, procédés ou situations pour lesquels subsistent des incertitudes quant au vieillissement à long terme des matériaux et qui conduisent en principe à adopter des dispositions particulières.

A : Technique dont l'utilisation est favorable.

B : Technique dont l'utilisation est possible, si elle est justifiée par une étude particulière.

C : Technique dont l'emploi est à éviter, sauf à titre expérimental dans le cadre d'un programme de suivi à moyen terme.

O : Technique dont l'emploi ne convient pas.

(*) Dans le cas où l'emploi de la technique considérée est envisagé, il y aura lieu de s'assurer tout particulièrement :

- que les dispositions de surveillance sont bien adaptées, correctement intégrées à l'ouvrage et qu'elles pourront être réellement exploitées une fois l'ouvrage en service ;
- qu'il est possible de réparer l'ouvrage dans des conditions acceptables (existence de techniques classiques de réparation ou de renforcement, accès possible,...).

(**) catégorie de technique incluant les matériaux à dominante argileuse traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques

ANNEXE 2 : Guides techniques régionaux pour le réemploi de matériaux locaux

Voici une liste non exhaustive de **guides techniques régionaux pour le réemploi de matériaux locaux en techniques routières** parus et classés par région :

Ile-de-France

- Les calcaires (1996)
- Les chailles (1996)
- Les limons (1996)
- Les sablons (1996)
- Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (1998)
- Les bétons et produits de démolition recyclés (2003)
- Valorisation des excédents de déblais de travaux publics (2003)
- Catalogue des structures de chaussées (2003)

Haute-Normandie

- Les granulats marins (2000)
- Les limons (2000)
- Le retraitement en place à froid des anciennes chaussées (2000)
- La craie (2000)

Champagne-Ardenne

- Les graveluches (2004)
- La craie (2004)

Rhône-alpes

- Les graves de recyclage – recyclage + MIOM (2004)

Lorraine

- Les calcaires (2009)
- Les cendres volantes (2009)
- Les matériaux de démolition recyclés (2009)
- Les schistes houillers (2009)
- Les laitiers (2009)

Cette liste est susceptible d'être abondée dans les années à venir.

Bibliographie

- [1] Réalisation des Remblais et des Couches de Forme (GTR). Guide technique - Fascicule I : Principes généraux - Fascicule II : Annexes techniques. Setra/LCPC, septembre 1992. Réf. D9233.
- [2] Conception et réalisation des terrassements. Guide technique - Fascicule 1 : études et exécution des travaux. Setra, mars 2007. Réf. 0702-1.
- [3] Conception et réalisation des terrassements. Guide technique - Fascicule 3 : méthodes d'essais. Setra, mars 2007. Réf. 0702-3.
- [4] Remblayage des tranchées et réfection des chaussées. Guide technique. Sétra-LCPC, mai 1994. Réf. D9441.
- [5] Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme (GTS). Guide technique. Setra-LCPC, Janvier 2000, Réf. D 9924.
- [6] Compactage des remblais et des couches de forme. Prise en compte des nuisances vibratoires liées aux travaux - Note d'information, Chaussées Dépendances n°121. Sétra, mai 2009. Réf. 0920w
- [7] Organisation de l'assurance qualité dans les travaux de terrassements. Guide technique. Sétra-LCPC, janvier 2000, Réf. D 9923.
- [8] Ouvrages de soutènement (les). Guide de conception générale. Guide technique. Sétra, décembre 1998. Réf. F9849.

Références normatives

- [9] NF P 94-063. Sols : reconnaissance et essais - Contrôle de la qualité du compactage - Méthode au pénétromètre dynamique à énergie constante - Principe et méthode d'étalonnage des pénétrodensitographes - Exploitation des résultats - Interprétation.
- [10] NF P 98-736. Matériel de construction et d'entretien des routes - Compacteurs - Classification.
- [11] NF P 11-300. Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières
- [12] NF P 94-061-1. Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique d'un matériau en place - Partie 1 : méthode au gammadensimètre à pointe (à transmission directe).
- [13] NF EN 206-1 Béton - Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité. Annexes nationales : A1 (avril 2005) et A2 (octobre 2005). AFNOR, indice classement P18-325-1.
- [14] NF P 98-331. Chaussées et dépendances. Tranchées : ouverture, remblayage, réfection.
- [15] Instruction Technique pour l'Entretien et la Surveillance des Ouvrages d'Art.
- [16] NF EN 1997-1. Eurocode 7 : calcul géotechnique. Partie 1 : Règles générales.
- [17] NF EN 1097-1 - Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (micro-DEVAL).
- [18] NF EN 1097-2 - Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 2 : détermination de la résistance à la fragmentation.
- [19] NF P94-066 - Sols : reconnaissance et essais - Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux
- [20] NF P94-067 - Sols : reconnaissance et essais - Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux
- [21] NF P94-093 (octobre 1999): Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal. Essai Proctor modifié.
- [22] NF P 94-068 (octobre 1998): Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache.
- [23] NFP 98-231.2 (février 1992) : essais relatifs aux chaussées – comportement en compactage des matériaux autres que traités aux liants hydrocarbonés – Partie 2 : essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire.
- [24] NFP 94-100 (août 1999) - Sols : Reconnaissance et Essais – Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement.

Rédacteurs

Yasmina Boussafir – IFSTTAR
mél : Yasmina.Boussafir@developpement-durable.gouv.fr

Sabine Cavellec – Sétra
mél : Sabine.Cavellec@developpement-durable.gouv.fr

Vincent Lucas – Sétra
mél : Vincent.Lucas@developpement-durable.gouv.fr

Olivier Malassingne – CETE Ouest - LRPC Saint Briec
mél : Olivier.Malassingne@developpement-durable.gouv.fr

Jérôme Saliba – Sétra
mél : Jerome.Saliba@developpement-durable.gouv.fr

Bertrand Thidet – DREIA IF - DOAT
Gilbert Haiün – Sétra
Michel Kergoet – DREIF LREP

Renseignements techniques

Jérôme Saliba – Sétra
mél : Jerome.Saliba@developpement-durable.gouv.fr

AVERTISSEMENT

La collection des notes d'information du Sétra est destinée à fournir une information rapide. La contre-partie de cette rapidité est le risque d'erreur et la non exhaustivité. Ce document ne peut engager la responsabilité ni de son rédacteur ni de l'administration.

Les sociétés citées le cas échéant dans cette série le sont à titre d'exemple d'application jugé nécessaire à la bonne compréhension du texte et à sa mise en pratique.

Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements
110 rue de Paris – Sourdu – BP 214 – 77 487 PROVINS Cedex
téléphone : 33 (0)1 60 52 31 31 – télécopie : 33 (0)1 60 52 31 69

Document consultable et téléchargeable sur les sites web du Sétra :
• Internet : <http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr>
• Intranet (Réseau ministère) : <http://intra.setra.l2>

Ce document ne peut être vendu. La reproduction totale du document est libre de droits.
En cas de reproduction partielle, l'accord préalable du Sétra devra être demandé.
Référence : 1201w – ISSN : 1250-8675

Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique
du MEDDTL

