



VALORISATION DES MATÉRIAUX PAR TRAITEMENT À LA CHAUX SUR LES INSTALLATIONS DE RECYCLAGE

GUIDE TECHNIQUE NATIONAL
Mai 2018



Ce guide est soutenu par :



CE GUIDE A ÉTÉ ÉLABORÉ SOUS LA MAÎTRISE D'OUVRAGE DU SR BTP.

La rédaction a été assurée par le Cerema :

Jacques **BLACHE**
Laurent **EISENLOHR**

Agathe **DENOT**
Fabrice **ROJAT**

Ainsi que par :

Jean-Michel **CORNET**
Pascal **AUSSANT**

SNCF
ENGIE Lab CRIGEN

Ce guide a été réalisé dans le cadre d'un groupe de travail composé de :

Pour le Syndicat Professionnel des Terrassiers de France :

Kamel **BESSAFI**

Groupe ROGER MARTIN

Pour le Syndicat des Recycleurs du BTP :

Josselyn **LANES**

AMR

Yann **JEFFROY**

CAP RECYCLAGE

Jean-Emmanuel **POITIER**

CAP RECYCLAGE

Frédéric **WOLF**

*Chambre Syndicale
Recyclage BTP 69*

Christian **VITSE**

*DEVAREM
ENVIRONNEMENT*

Jean-Pierre **GEORGEONNET**

MARC SA

Stéphane **SUEUR**

MARC SA

Jean-François **RAITIERE**

PHILIPPE ET FILS

Albert **ZAMUNER**

PICHETA

Franck **METAIS**

RFM

Lucas **QUILLERE**

SATO

Gérard **LECINA**

SEPS

Fabrice **MABO**

STATERA

François **PRZYBYLKO**

YPREMA

Pour UP'CHAUX Union des producteurs de chaux :

Bertrand **BRUYERES**

*SEE BRUYERES
ET FILS*

Didier **LESUEUR**

*LHOIST SOUTHERN
EUROPE*

Pascal **LECONTE**

*LHOIST SOUTHERN
EUROPE*

Avec la participation de :

BRGM

CEREMA

CIMBETON

Conseil Régional Ile-de-France

ENGIE Lab

FEDEREC

IFSTTAR

Laboratoire d'Essais des Matériaux de la Ville de Paris

UNPG (Union nationale des producteurs de granulats)

L'édition ainsi que les analyses réalisées dans le cadre de ce guide ont été financés par :

UP'CHAUX

Le SR BTP

L'ADEME via une convention ADEME-SRBTP de soutien
à un programme d'actions de relais et animation pour une
meilleure valorisation des déchets du BTP

Les entreprises adhérentes SR BTP suivantes :

CHAMBRE SYNDICALE 69, CHAVIGNY, DEVAREM
ENVIRONNEMENT, LAFARGE, GRANULATS, MARC SA,
PHILIPPE ET FILS, RFM, SATO, SEPS, VICAT, YPREMA



TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	4
I INSTALLATIONS VALORISANT LES MATÉRIAUX TRAITÉS À LA CHAUX	6
1.1 Équipements des installations de recyclage	6
1.2 Rubriques des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)	7
1.3 Nature des matériaux entrants sur l'installation de recyclage	8
2 PROCESSUS DE TRAITEMENT DES MATÉRIAUX PAR CHAULAGE	9
2.1 Tri en entrée d'installation	10
2.2 Réalisation de stocks homogènes	10
2.2.1 Essais géotechniques	10
2.2.2 Classification des matériaux	12
2.2.3 L'étude de traitement	13
2.3 Elaboration du matériau	15
2.3.1 Scalpage	15
2.3.2 Criblage, émottage	15
2.3.3 Déferrailage	15
2.3.4 Incorporation de la chaux	15
2.3.5 Malaxage	18
2.3.6 Stockage des matériaux chaulés	18
2.4 Essais sur les matériaux chaulés	18
3 UTILISATION DES MATÉRIAUX CHAULÉS EN GÉNIE CIVIL	20
3.1 Terrassements et plateformes routières	21
3.1.1 Remblai courant	21
3.1.2 Couches de forme	22
3.1.3 Remblayage de tranchées ou travaux de canalisation	23
3.2 Terrassements contigus aux ouvrages d'art	25
3.3 Autres travaux de terrassement	26
3.4 Plateformes de bâtiments et aires industrielles	26
3.5 Plateformes ferroviaires	27
3.5.1 Remblais méthodiquement compactés	27
3.5.2 Matériaux sélectionnés de base de blocs techniques	27
3.5.3 Matériaux de massifs d'appuis de blocs techniques	28
3.5.4 Matériaux de couche de forme ferroviaire	28
3.6 Autres filières et perspectives de développement	28
4 PERFORMANCE DES MATÉRIAUX TRAITÉS	29
4.1 Plan d'assurance qualité	29
4.2 Caractéristiques des matériaux chaulés	29
4.3 Fiche technique produit	30
5 RETOURS D'EXPÉRIENCES	32
ANNEXES	35
Synthèse des caractéristiques des matériaux chaulés issus de FTP	35
LEXIQUE	38
BIBLIOGRAPHIE	38
REFERENCES NORMATIVES	39



INTRODUCTION

Dans une perspective d'économie des ressources naturelles et afin de s'inscrire dans une société de recyclage, des orientations ont été définies au niveau national priorisant la prévention de la production des déchets, ainsi que, la réutilisation, le recyclage et la valorisation des déchets.

La gestion des déchets du BTP et plus particulièrement des déchets non dangereux inertes est un enjeu national repris dans les orientations du programme national de prévention des déchets 2014-2020 et la loi n°2015-992 du 7 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte. L'encart ci-dessous en présente les objectifs.

ENCART I / OBJECTIFS DE LA LOI DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE POUR LA CROISSANCE VERTE (N° 2015-992 DU 17 AOÛT 2015)

Cette loi prévoit :

- de tendre vers un modèle économique circulaire en appelant à une consommation sobre et responsable des ressources naturelles ;
- des objectifs de recyclage :
 - en 2020, l'État et les collectivités territoriales devront réemployer ou orienter vers le recyclage ou les autres formes de valorisation matière au moins 70 % des matières et déchets produits sur les chantiers de construction ou d'entretien routier ;
 - à partir de 2017, au moins 50 % en masse de l'ensemble des matériaux utilisés pendant l'année dans leurs chantiers de construction routiers devront être issus du réemploi, de la réutilisation ou du recyclage de déchets. L'objectif passe à 60 % en 2020.
- une commande publique durable :
 - tout appel d'offre de l'État ou des collectivités territoriales, passé pour la construction ou l'entretien de chantiers routiers, intègre une priorité à l'utilisation des matériaux issus du réemploi, de la réutilisation ou du recyclage des déchets ;
- la non-discrimination des produits issus de la valorisation ou du réemploi.

Désormais, le modèle de société introduit la notion d'économie circulaire. Ce modèle est basé, notamment, sur la gestion optimisée des stocks et des flux de matières, la réutilisation des déchets et l'éco-conception. Tous les secteurs d'activité sont concernés par le déploiement de cette économie circulaire, notamment le secteur du BTP qui est le plus important producteur de déchets en France, en tonnage absolu.

Ces dernières années les entreprises du BTP ont généré 227,6 millions de tonnes de déchets (Mt). Les déchets sont constitués de 211,3 Mt de déchets non dangereux inertes, 13,3 Mt de déchets non dangereux non inertes et de 3 Mt de déchets dangereux [1].

Afin de favoriser la valorisation des déchets issus des chantiers du BTP et des carrières et ainsi de répondre aux objectifs nationaux et au modèle d'économie circulaire, le secteur du BTP développe des techniques de traitement, notamment le chaulage des matériaux sur des installations de recyclage. Cette technique répond aux objectifs de préservation de la ressource, de prévention et de valorisation des déchets fixés dans la Loi du 17 août 2015 portant sur la transition énergétique pour la croissance verte.

Notamment, cette technique :

- diminue les coûts de transport et les nuisances associées en fonction de la proximité des installations ;
- permet de supprimer les éventuels coûts liés à leur élimination en installation de stockage de déchets inertes ;
- permet d'optimiser le transport, avec un double fret possible.

Le chaulage permet également :

- de réduire la teneur en eau des matériaux ;
- d'améliorer les propriétés géotechniques.

Ainsi les matériaux traités, peuvent être utilisés plus facilement.



Bien que la chaux soit un matériau de construction très ancien, la généralisation de son usage en Travaux Publics, remonte aux années 60 en France lorsque les besoins de reconstruction nécessitaient une technique rapide, peu coûteuse, dans les régions dépourvues de granulats en grandes quantités. Les matériaux naturels chaulés sont fréquemment utilisés dans les travaux de terrassement. La profession estime que le terrassement en France représente chaque année entre 90 et 180 Mt de matériaux, essentiellement des sols naturels. Sur cette quantité, 45 à 63 Mt sont traités (en comptant chaux et ciment).

Le traitement des matériaux excédentaires issus du BTP est plus récent. La disponibilité de la ressource, le nombre d'installations de traitement, l'équilibre économique de la filière laissent entrevoir des marges de progression pour les installations de recyclage : sur les matériaux recyclés, seulement 10 % sont des matériaux chaulés (estimation SRBTP).

Le présent guide technique fixe un cadre commun et opérationnel justifiant la valorisation de déchets issus de chantiers du BTP et de carrières par la technique de chaulage (en utilisant de la chaux calcique) en installation de recyclage. Le guide propose :

- aux exploitants d'installation de traitement, des modalités de contrôle de la performance géotechnique des matériaux en sortie d'installation par une fiche technique produit (FTP) et un plan d'assurance qualité (PAQ) de l'installation. La vérification des performances géotechnique est réalisée par les référentiels techniques existants (notamment GTR [2], GTS [3]) et des préconisations particulières comme celles de la SNCF ;
- aux prescripteurs de travaux routiers (maître d'ouvrage et maître d'œuvre), des éléments techniques à insérer dans leurs dossiers de consultation des entreprises (DCE) afin de s'assurer que les performances des matériaux issus du recyclage répondent aux exigences liées à chaque type d'usage.

Le guide est structuré en cinq chapitres :

- le premier chapitre décrit les installations de recyclage des matériaux par traitement à la chaux : le contexte réglementaire et la nature des matériaux entrants dans les installations de recyclage ;
- le deuxième chapitre détaille les processus de traitement des matériaux sur les installations ;
- le troisième chapitre illustre les usages possibles de matériaux chaulés en génie civil, en lien avec les référentiels existants (GTR [2] et GTS [3] notamment) ;
- le quatrième chapitre fournit des outils permettant d'assurer la performance de matériaux chaulés adaptés à un usage (FTP et PAQ) ;
- enfin, le cinquième et dernier chapitre illustre l'emploi de matériaux chaulés au travers de retours d'expérience.

Les matériaux extraits des sites identifiés pollués⁽¹⁾, les matériaux contenant de l'amiante ou des substances radioactives n'entrent pas dans le champ d'application du présent guide.

(1) L'ensemble du territoire national n'a pas vocation à relever de la méthodologie de gestion des sols pollués. La prestation « LEVE » définie dans la norme NFX 31-620-2 permet de vérifier si un site relève de cette méthodologie.



I INSTALLATIONS VALORISANT LES MATÉRIAUX TRAITÉS À LA CHAUX

Les matériaux entrants sur les installations sont des ressources minérales ou des déchets au sens de l'article L541-I-1 du code de l'environnement⁽²⁾. Ils correspondent à des sols ne pouvant pas être réemployés sur le site de production et des déchets du BTP ou des matériaux issus de carrières ne pouvant pas être valorisés, sans traitement.

Le chaulage en place sur chantier est décrit par le Guide de Traitement des Sols (GTS) [3] et n'est pas abordé dans le présent guide.

I.1 Équipements des installations de recyclage

Sur les installations de recyclage, des équipements mobiles ou fixes peuvent être présents pour réaliser les étapes de traitement. Les matériaux entrants sur l'installation sont scalpés, criblés, malaxés avec de la chaux, maturés et stockés avant valorisation sur chantiers. Ces différentes étapes sont détaillées dans le chapitre 2.

Le traitement sur une installation de recyclage est justifié principalement par :

- l'assèchement ou l'humidification du matériau ;
- la floculation des fines du matériau ;
- la suppression des émissions de poussière (et autres nuisances) sur et au voisinage du chantier en comparaison d'un traitement sur place ;
- la possibilité d'un stockage tampon des matériaux traités à la chaux en vue d'une utilisation sur chantier. La mise en stock (par exemple, en pyramide) est possible durant plusieurs semaines, voire plusieurs mois.

Équipement mobile

Les deux principaux équipements mobiles sont les suivants :

1. Équipement composé d'une chargeuse ou d'une pelle équipée d'un godet cribleur et d'un silo contenant de la chaux vive équipé d'un doseur volumétrique télécommandé. Il est adapté pour tous types de chantiers de faible importance. Le traitement des matériaux peut atteindre 150 tonnes par jour. Son installation est rapide et déplaçable sur l'installation de recyclage. L'équipement demande de faibles investissements, mais nécessite un suivi rigoureux, notamment en phase d'élaboration du matériau chaulé : le matériau doit être passé plusieurs fois dans le godet cribleur afin d'obtenir une homogénéité convenable du mélange matériau-chaux. Une étude spécifique sur la faisabilité du traitement est réalisée systématiquement.
2. Équipement composé, a minima, d'un crible et d'un malaxeur (voir photo 1). Le rendement de cet équipement peut atteindre 500 à 1 500 tonnes par jour. Les réglages, le suivi du dosage et la quantité fabriquée peuvent être contrôlés par ordinateur. Un seul opérateur peut gérer la pelle mécanique et la machine (télécommande). Le remplissage de la chaux est réalisé en circuit fermé.



Photo 1 - Équipement mobile (crédit photo : société MARC SA)



Photo 2 - Équipement fixe (crédit photo : AMR - LOCATEP)

Équipement fixe

Les équipements fixes (composés de cribles, concasseurs, malaxeurs,...) permettent le traitement de grand rendement (200 à 1 000 tonnes par heure) et d'étendre la gamme des matériaux entrants dans l'installation.

(2) Déchet : toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se débarrasser



1.2 Rubriques des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)

L'installation de recyclage des matériaux par traitement à la chaux est soumise à la législation relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) : elle est autorisée, enregistrée ou déclarée pour son activité en fonction des seuils des rubriques ICPE la concernant. En entrée d'installation, les matériaux doivent respecter les conditions d'admission des rubriques ICPE concernées (tableau I).

Au moment de l'édition de ce guide, certaines rubriques sont en cours de révision. Le Tableau I présente les différentes rubriques ICPE possibles pour les installations.

Tableau I : Rubriques ICPE d'une installation de recyclage par traitement à la chaux.

Rubrique	Intitulé	Régime de l'installation
2515	<i>Broyage, concassage, criblage, ensachage, pulvérisation, nettoyage, tamisage, mélange de pierres, cailloux, minerais et autres produits minéraux naturels ou artificiels ou de déchets non dangereux inertes</i> <i>1. Installations de broyage, concassage, criblage, ensachage, pulvérisation, nettoyage, tamisage, mélange de pierres, cailloux, minerais et autres produits minéraux naturels ou artificiels ou de déchets non dangereux inertes, autres que celles visées par d'autres rubriques et par la sous-rubrique 2515-2. La puissance maximum de l'ensemble des machines fixes pouvant concourir simultanément au fonctionnement de l'installation, étant :</i> <i>a) Supérieure à 550 kW</i> <i>b) Supérieure à 200 kW, mais inférieure ou égale à 550 kW</i> <i>c) Supérieure à 40 kW, mais inférieure ou égale à 200 kW</i> <i>2. Installations de broyage, concassage, criblage, mélange de pierres, cailloux, minerais et autres produits minéraux naturels ou artificiels ou de déchets non dangereux inertes extraits ou produits sur le site de l'installation, fonctionnant sur une période unique d'une durée inférieure ou égale à six mois. La puissance maximum de l'ensemble des machines fixes pouvant concourir simultanément au fonctionnement de l'installation, étant :</i> <i>a) Supérieure à 350 kW</i> <i>b) Supérieure à 40 kW, mais inférieure ou égale à 350 kW</i>	A E D E D
Rubrique	Intitulé	Régime de l'installation
2516	<i>Station de transit de produits minéraux pulvérulents non ensachés tels que ciments, plâtres, chaux, sables fillérisés ou de déchets non dangereux inertes pulvérulents.</i> <i>La capacité de transit étant :</i> <i>1. Supérieure à 25 000 m³</i> <i>2. Supérieure à 5 000 m³, mais inférieure ou égale à 25 000 m³</i>	E D
2517	<i>Station de transit de produits minéraux ou de déchets non dangereux inertes autres que ceux visés par d'autres rubriques.</i> <i>La superficie de l'aire de transit étant :</i> <i>1. Supérieure à 30 000 m²</i> <i>2. Supérieure à 10 000 m², mais inférieure ou égale à 30 000 m²</i> <i>3. Supérieure à 5 000 m², mais inférieure ou égale à 10 000 m²</i>	A E D

Les informations essentielles à la conception et au fonctionnement des installations de traitement des déchets du BTP sont présentées dans le guide SRBTP [4].



1.3 Nature des matériaux entrants sur l'installation de recyclage

Les matériaux entrants sur l'installation de recyclage sont généralement fins, graveleux, sensibles à l'eau et pour certains, gélifs. Ils proviennent principalement de :

- chantiers du BTP : terrassements en pleine masse et aménagements de plateformes industrielles ou pavillonnaires, excavations sur chantiers routiers, voiries ou réseaux divers ;
- carrières : matériaux de découverture, et éventuellement les boues de lavage et les résidus de scalpage des installations, n'ayant pas de filière de valorisation sur le site d'extraction ;
- mélange des 2 catégories ci-dessus.

Selon l'annexe II de l'article R541-8 du code de l'environnement, ils sont classés :

- 17 05 04 - terres et cailloux ne contenant pas de substances dangereuses (à l'exclusion de la terre végétale, de la tourbe et des terres et cailloux provenant de sites contaminés) ;
- 20 02 02 – terres et pierre (provenant uniquement de jardins et de parcs et à l'exclusion de la terre végétale et de la tourbe).

Selon l'arrêté du 12 décembre 2014⁽³⁾, prescrivant les conditions d'admission des déchets inertes dans les installations relevant des rubriques 2515, 2516, 2517, l'exploitant s'assure, à l'entrée de l'installation, que :

- les matériaux ne proviennent pas de sites contaminés ;
- le maître d'ouvrage du chantier (producteur du déchet) a fourni : son nom et ses coordonnées ainsi que ceux du (ou des) transporteur(s) et de (ou des) intermédiaire(s), l'origine et la quantité des matériaux et la codification selon l'annexe II de l'article R541-8 du code de l'environnement.

En cas de suspicion de pollution, l'exploitant pourra demander au producteur de déchets de prouver la non-contamination des matériaux. L'analyse des activités du site, via une recherche documentaire, une étude historique et des bases de données existantes (Basias⁽⁴⁾, BASOL⁽⁵⁾, SIS⁽⁶⁾), et/ou des analyses chimiques représentatives du sol permettront de justifier de la qualité des matériaux.

A réception des matériaux, l'exploitant de l'installation délivre un accusé d'acceptation à l'entreprise en indiquant la quantité admise, la date et l'heure d'acceptation.

L'exploitant de l'installation tient un registre d'admission des matériaux entrants.

(3) Arrêté du 12 décembre 2014 relatif aux conditions d'admission des déchets inertes dans les installations relevant des rubriques 2515, 2516, 2517 et dans les installations de stockage de déchets inertes relevant de la rubrique 2760 de la nomenclature des installations classées

(4) Basias : base de données sur l'inventaire historique de sites industriels et activités de service

(5) BASOL : base de données sur les sites et sols pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics à titre préventif ou curatif

(6) SIS : secteur d'information sur les sols



2 PROCESSUS DE TRAITEMENT DES MATÉRIAUX PAR CHAULAGE

Les différentes étapes de traitement des matériaux sont présentées dans la Figure 1. Elles sont détaillées dans les paragraphes suivants.

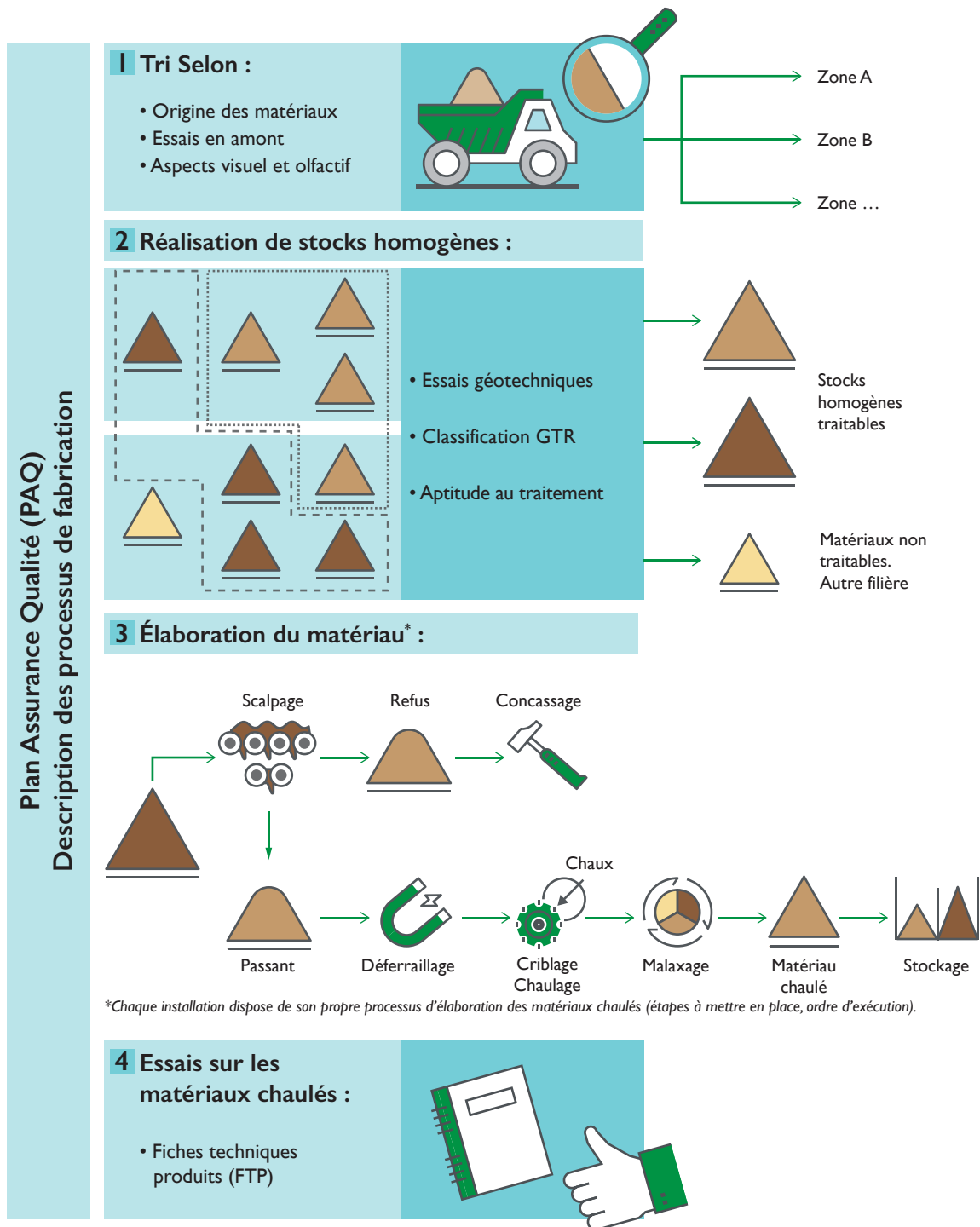


Figure 1 : Étapes de traitement des matériaux par chaulage (le chapitre 4 présente le Plan Assurance Qualité (PAQ) et des Fiches Techniques Produits)



2.1 Tri en entrée d'installation

Dans un premier temps, un tri est opéré dès l'arrivée des matériaux sur l'installation de recyclage. Ce tri a pour objectif de réaliser un pré-classement. La constitution du ou des stocks initiaux peut s'effectuer de la manière suivante :

1. tri selon l'origine du matériau : matériau géologique naturel ou matériau anthropique ;
2. tri sur la base d'essais géotechniques réalisés sur la zone d'extraction des matériaux (notamment pour des travaux importants) ;
3. tri visuel et olfactif en entrée de l'installation, à la bascule et au déchargement, afin de différencier les matériaux en fonction de leur argilosité ou de leur humidité, voire de refuser les matériaux suspects (tri réalisé par des personnes expérimentées de l'installation).

2.2 Réalisation de stocks homogènes

À cette étape, les stocks initiaux (matériaux approvisionnés sur la plateforme) sont regroupés pour obtenir des stocks homogènes, correspondant à des caractéristiques du matériau et à un type de traitement adapté. Cette étape permet également d'éliminer certains matériaux non traitables.

Pour cela, des échantillons représentatifs des stocks initiaux sont prélevés (cf. encart 2).

Des analyses sont réalisées sur ces échantillons. Il s'agit :

- des essais géotechniques : granulométrie (cf. encart 3) et argilosité (cf. encart 4) ;
- de la classification des matériaux (cf. encart 5) ;
- de l'étude de traitement (dont aptitude, cf. encart 6).

La constitution des échantillons et les essais réalisés sont identiques à ceux réalisés sur les matériaux naturels.

Chaque stock homogène doit être fermé ou gerbé en vue de conserver son état hydrique.

Les paragraphes suivants détaillent les essais réalisés.

2.2.1 Essais géotechniques

L'échantillonnage est réalisé selon la méthode présentée dans l'encart 2.

Les essais géotechniques concernent :

- l'analyse granulométrique du matériau selon la norme NF P 94-056^(*) [N1] ;
- la mesure de l'argilosité selon 2 méthodes :
 - l'indice de plasticité I_p , selon la norme NF P 94-051 [N3], est utilisé pour des matériaux moyennement à très argileux ;
 - la valeur au bleu de méthylène (VBS), selon la norme NF P 94-068 [N4], est utilisé pour les sables, les graves et les matériaux faiblement argileux ;
- la détermination de la teneur en eau selon la norme NF P 94-050 [N5].

Les encarts 3 et 4 précisent les essais géotechniques.

ENCART 2 / MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE SUR STOCK

Masse à prélever (NF EN 932-1 [N6] ou NF P 94-056^(*) [N1])

Les masses minimales à prélever, en fonction du diamètre maximal (D_{max}) des éléments contenus dans les matériaux et des essais prévus, devront correspondre aux préconisations de la norme NF EN 932-1 [N6] ou au tableau I de la norme NF P 94-056^(*) [N1].

Dans tous les cas, cette quantité ne pourra pas être inférieure à 20 kg pour les sols fins ($0/D < 20$ mm) pour permettre la réalisation des essais d'aptitude au traitement notamment.



(*) norme annulée et remplacée par une norme expérimentale XP CEN ISO/TS 17892-4 [N2]. Au moment de l'édition du document, la référence pour la classification GTR des matériaux est toujours la NF P 94-056. Le document sera modifié en fonction de la révision du GTR et la mise en place du référentiel européen.



Prélèvement sur stock (NF EN 932-1 [N6] et NF EN 932-2 [N7])

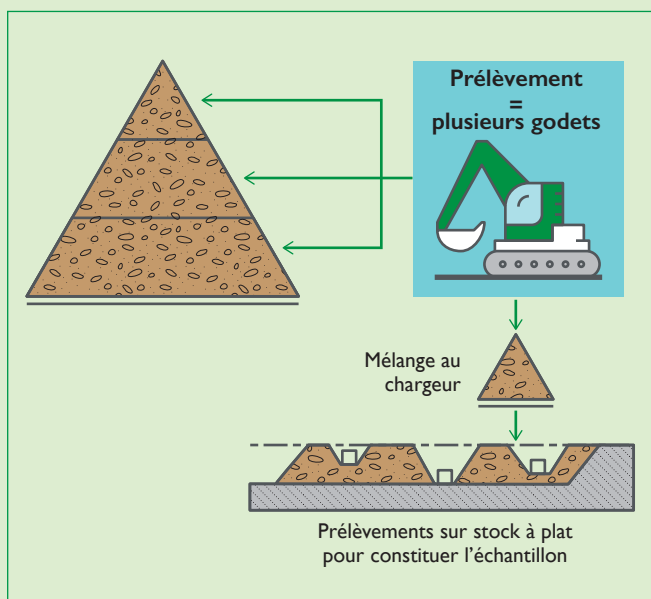
L'emplacement et le nombre de prélèvements doivent tenir compte de la manière dont le stock est construit, de sa forme et de la possibilité de ségrégation interne. Le prélèvement peut être fait à l'aide d'une pelle à main, d'une pelle mécanique ou d'une benne au point le plus profond de chaque trou réalisé par un engin.

Une chargeuse ou une pelle mécanique est utilisée pour découvrir une surface d'échantillonnage à l'intérieur du stock. Au moins 3 godets sont prélevés sur cette surface pour être mélangés et former un second stock en vue de l'échantillonnage final.

Pour minimiser l'effet de la ségrégation du stock, il faut ensuite privilégier des prélèvements de taille comparable (par exemple 2 kg par prélèvement), effectués en différents points, à différentes hauteurs ou profondeurs sur l'ensemble du stock.

L'échantillon final dont la masse totale dépend du Dmax du matériau sera composé du mélange de ces différents prélèvements.

La réduction de l'échantillon en laboratoire, pour s'adapter aux prises d'essais propres à chaque méthode, pourra ensuite être effectuée suivant les préconisations de la norme NF EN 932-2.



ENCART 3 / LA GRANULOMÉTRIE (NORME NF P 94-056(*) [N1])

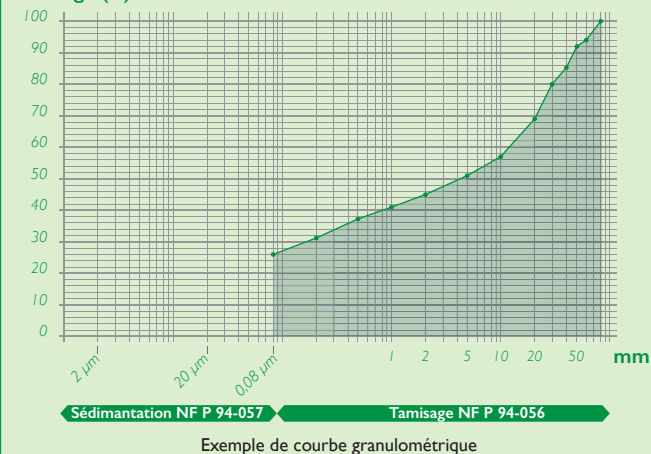
L'analyse granulométrique d'un sol consiste à déterminer la proportion des diverses classes de taille de particules. La distribution de la taille des particules a un effet sur les propriétés des matériaux telles que leur sensibilité à l'eau ou leur facilité de mise en œuvre.

Le Dmax est la dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol (passant au tamis le plus élevé). Ce paramètre est déterminant pour dimensionner les ateliers de terrassement utilisables et notamment pour évaluer l'épaisseur des couches élémentaires de compactage (l'élément le plus gros devra faire au maximum 2/3 de l'épaisseur de la couche).

Les tamisats à 80 µm ou à 63 µm permettent de distinguer les sols riches en fines et d'évaluer leur sensibilité à l'eau. Les quantités d'argile minéralogique peuvent être estimées à partir de la fraction inférieure ou égale à 2 µm obtenue par sédimentométrie. La quantité de fines d'un matériau influe usuellement sur la quantité de chaux à incorporer.

Analyse granulométrique des sols - NF P 94-056 et NF P 94-057

Tamissage (%)



(*) norme annulée et remplacée par une norme expérimentale XP CEN ISO/TS 17892-4 [N2]. Au moment de l'édition du document, la référence pour la classification GTR des matériaux est toujours la NF P 94-056. Le document sera modifié en fonction de la révision du GTR et la mise en place du référentiel européen

ENCART 4 / L'ARGILOSITÉ

La mesure de l'argilosité d'un sol permet de connaître sa sensibilité à l'eau. L'argilosité peut être évaluée à parti de deux tests : l'indice de plasticité (Ip) et la valeur au bleu de méthylène (VBS).

L'indice de plasticité (Ip) (norme NF P 94-051 [N3])

L'indice de plasticité (Ip) permet de déterminer l'étendue du domaine de plasticité d'un matériau, c'est-à-dire la quantité d'eau nécessaire pour le faire passer d'un état plastique (malléable) à un état liquide. L'Ip est d'autant plus fiable que la proportion pondérale de la fraction 0/400 µm (fraction servant à l'essai) contenue dans le sol étudié est importante et que l'argilosité de cette fraction est grande. Au-delà d'une proportion de 80 % de cette fraction (0/400 µm) et d'une valeur de 12, l'interprétation de l'Ip est simple, mais l'essai devient peu pertinent lorsque cette proportion tombe en dessous de 35 % et la valeur de l'Ip en dessous de 7.

Trois seuils sont usuellement retenus :

- 12 : limite supérieure des sols faiblement argileux ;
- 25 : limite supérieure des sols moyennement argileux ;
- 40 : limite entre les sols argileux et très argileux.

l'Ip définit l'intervalle de teneur en eau dans lequel le sol reste souple et déformable (c'est-à-dire plastique) tout en conservant une certaine résistance au cisaillement. La connaissance de cet intervalle est utile pour la classification des sols en vue d'un usage dans les ouvrages en terre.

La valeur au bleu de méthylène (VBS) (norme NF P 94-068 [N4])

Ce paramètre représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules du sol, autrement dit une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol. Dans un sol, c'est plus particulièrement la surface des particules contenues dans la fraction argileuse ($d < 2 \mu\text{m}$) qui détermine sa surface spécifique. En pratique, on détermine la VBS à partir de l'essai au bleu de méthylène à la tache sur la fraction 0/5 mm. La valeur trouvée est alors rapportée à la fraction 0/50 mm par une règle de proportionnalité. C'est cette dernière valeur qui est appelée valeur au bleu de méthylène du sol. La VBS s'exprime en grammes de bleu pour 100 g de sol.

Seuils retenus :

- 0,1 : seuil en dessous duquel on peut considérer que le sol est insensible à l'eau (au sens défini précédemment). Ce critère doit cependant être complété par la vérification du tamisat à 80 µm qui doit être $\leq 12 \%$;
- 0,2 : seuil au-dessus duquel apparaît à coup sûr la sensibilité à l'eau ;
- 1,5 : seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux ;
- 2,5 : seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne ;
- 6 : seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux ;
- 8 : seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

Choix entre Ip et VBS

La VBS est applicable aux graves, sables et matériaux faiblement argileux car elle exprime la quantité et l'activité de l'argile contenue dans ces matériaux.

L'Ip est à privilégier pour les sols moyennement à très argileux car :

- c'est un paramètre pour lequel on dispose de nombreux retours d'expérience ;
- il est plus sensible que la VBS dès que les sols deviennent significativement argileux ;
- c'est un paramètre à la fois d'identification et de comportement.

2.2.2 Classification des matériaux

Les essais géotechniques permettent de classer les matériaux. L'encart 5 précise cette classification.



ENCART 5 / LA CLASSIFICATION SUIVANT LA NORME NF P 11-300 [N8] ET LE GUIDE DES TERRASSEMENTS ROUTIERS (GTR) [2]

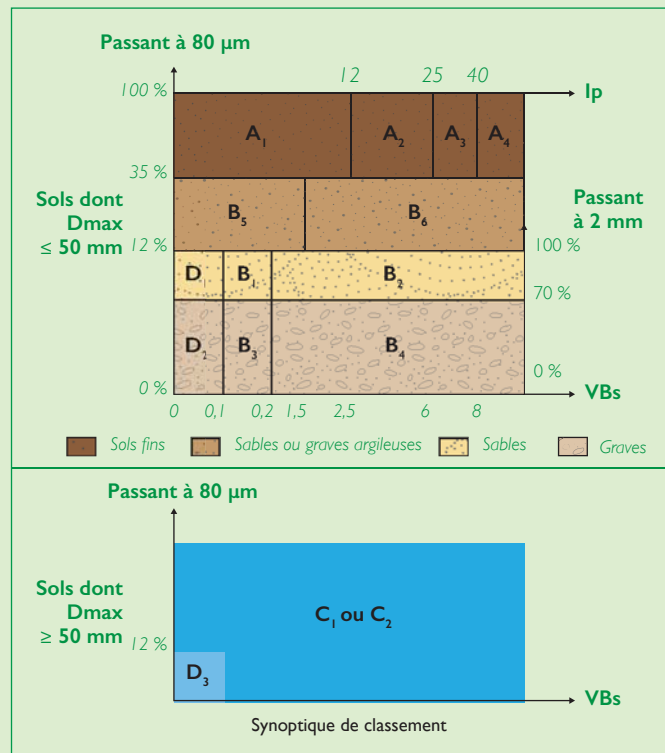
La norme NF P 11-300 [N8] définit une classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. Cette classification s'appuie sur des critères représentatifs des problèmes posés dans la construction et le comportement de ces ouvrages.

Les matériaux (classes A, B, C et D) sont classés d'après leur nature, leur état et leur comportement.

Un D_{max} de 50 mm est la valeur proposée dans le GTR [2] (ou la norme NF P 11-300 [N8]) pour distinguer les sols fins, sableux et graveleux (classes A, B, D1 et D2), des sols « blocailleux » (classes C et D3) ; c'est aussi une valeur limite couramment admise actuellement pour distinguer les sols pouvant être malaxés correctement avec de la chaux et permettre une réaction correcte. La Figure ci-contre présente le synoptique de classification des sols.

Le Guide des Terrassements Routiers (GTR) [2] définit les conditions d'emploi des matériaux (sols, matériaux rocheux, sous-produits industriels) utilisés dans la construction des remblais et des couches de forme du domaine routier.

Pour d'autres applications, des guides spécifiques peuvent être consultés (par exemple, le guide de remblayage des tranchées [6] ou le guide de terrassement des plateformes [7]).



2.2.3 L'étude de traitement

L'étude de traitement débute par la vérification de l'aptitude au traitement, qui sera réalisée selon la norme NF P 94-100 [N9]. L'encart 6 présente la démarche.

ENCART 6 / L'ESSAI D'APTITUDE AU TRAITEMENT (NORME NF P 94-100 [N9])

Dans le cas de matériaux traités à la chaux, l'essai d'aptitude au traitement consiste à mesurer le gonflement volumique d'une éprouvette de sol traité dans des conditions de cure favorisant une accélération des phénomènes.

Le matériau traité est préparé à une teneur en eau proche de l'Optimum Proctor Normal ($W_{OPN} < W < W_{OPN} + 2\%$). Il est ensuite compacté à la presse dans un moule rigide cylindrique, entre deux pistons, de sorte à obtenir une éprouvette d'environ 50 mm de diamètre pour 50 mm de hauteur dont la masse volumique est de 96 % de celle de l'OPN. Le volume initial V_0 de cette éprouvette est déterminé par 6 mesures au pied à coulisse.



L'éprouvette est alors soumise à 3 jours de cure sous une température de 20°C et une hygrométrie de 90 %. Après confinement dans une bande textile, elle subit ensuite 7 jours d'immersion dans une eau à 40°C. Le volume final est déterminé par pesée hydrostatique, ou au pied à coulisse si l'état de l'éprouvette le permet.

Le gonflement volumique (GV) correspond à la variation de volume par rapport au volume initial. L'essai ne renseigne que sur d'éventuels gonflements et non sur la qualité de la prise pouzzolanique (à vérifier par une étude CBR immersion/IPI suivant nécessité).

L'aptitude au traitement est qualifiée en fonction des valeurs du gonflement volumique :

- gonflement volumique < 5 % : le chaulage est adapté ;
- entre 5 et 10 %, l'aptitude au traitement est douteuse, c'est l'étape de formulation qui déterminera la faisabilité du chaulage ;
- gonflement volumique > 10 % : le chaulage est inadapté.

Suite aux essais d'aptitude au traitement, une étude de formulation est réalisée. Elle permet de définir le dosage optimal en chaux nécessaire afin d'obtenir les performances fixées dans la norme NF EN 13286-49 [N10] et au guide de traitement des sols (GTS) [3].

Cette étude comporte deux volets :

- l'identification et la classification géotechnique selon la norme NF P 11 300 [N8] des matériaux destinés au chaulage, réalisées sur des stocks homogènes (chapitre 2.2.2) ;
- la formulation des mélanges, en laboratoire, ayant pour but d'optimiser le dosage pondéral en chaux vive des matériaux qualifiés à l'état sec pour atteindre les performances recherchées.

La méthodologie de l'étude de formulation consiste à humidifier la fraction 0/20 mm des échantillons caractérisés au chapitre 2.2, pour les amener à différentes valeurs de teneur en eau. Les échantillons ainsi préparés sont mélangés à des dosages croissants de chaux, ce pourcentage n'excédant généralement pas 3 % pour des questions économiques. Pour ces opérations d'humidification et de mélange, l'utilisation d'un malaxeur tel que précisé dans les normes NF P 94-093 [N11] ou NF EN 13286-2 [N12] s'impose étant donné que les matériaux concernés seront presque toujours plus ou moins plastiques.

Chaque échantillon est ensuite compacté à l'Optimum Proctor Normal selon les normes NF P 94-093 [N11] ou NF EN 13286-2 [N12] à la teneur en eau naturelle (V_N) et directement après compactage, l'Indice Portant Immédiat (IPI) est déterminé selon la norme NF P 94-078 [N13].

Les résultats sont présentés sous forme d'abaques donnant le pourcentage pondéral de chaux à appliquer en fonction de la teneur en eau pour obtenir les valeurs de portance fixées par le GTS [3].

Pour un usage en remblai courant, les valeurs cibles d'IPI sur matériaux traités et non traités selon leur classification et les objectifs recherchés, sont indiquées dans le Tableau 2. Pour obtenir un résultat constant en matière d'IPI, le dosage en chaux doit s'adapter à la teneur en eau du matériau.

Tableau 2 : Objectifs du traitement des sols appliqué à des sols utilisés en remblai (Source : guide technique pour le traitement des sols à la chaux (GTS, 2000) [3])

IPI	A ₁ C ₁ A ₁ C ₂ A ₁ (*)	A ₂ B ₆ C ₁ A ₂ C ₂ A ₂ (*) C ₁ B ₆ C ₂ B ₆ R3 ₄	A ₃ C ₂ A ₃ (*)	B ₄ C ₁ B ₄ C ₂ B ₄ (*)	B ₂ B ₅ C ₁ B ₂ C ₂ B ₂ (*) C ₁ B ₅ C ₂ B ₅	R ₁₂ (**)	R ₁₃ (**)
Valeurs en-dessous desquelles un traitement peut être envisagé (cf. GTR [2])	8	5	3	15	12	15	10
Valeurs à obtenir sur le matériau traité (***)	10 à 20	7 à 15	5 à 10	20 à 40	15 à 30	15 à 30	10 à 20
Valeurs au-delà desquelles le traitement peut être arrêté (ou poursuivi avec réduction de dosage)	15 à 25	10 à 20	8 à 15	30 à 50	20 à 40	25 à 35	15 à 25
(*) Les matériaux de ces classes comportent une fraction importante d'éléments anguleux supérieurs à 20 mm. De ce fait, l'estimation de leur portance à partir de la valeur de l'IPI mesuré sur leur fraction 0/20 mm peut ne pas être suffisamment représentative. Une évaluation plus précise nécessiterait de pratiquer des essais en place (à la plaque, dynaplaque, etc.)							
(**) Pour les classes R, les valeurs proposées ne sont pas issues du GTR [2] mais seulement indicatives. Pour les classes de matériaux sensibles à l'eau, non envisagés dans le tableau, les valeurs de l'IPI à considérer doivent résulter d'une étude spécifique							
(***) Pour le traitement des parties supérieures de terrassement (PST), des valeurs majorées de 10 à 20 % doivent être considérées, étant entendu qu'il est en plus nécessaire de vérifier la condition CBR immersion/IPI ≥ 1							



2.3 Élaboration du matériau

Suite à la réalisation des stocks homogènes et aux essais et études de traitement sur les stocks, les matériaux sont élaborés par scalpage, déferrailage, criblage, émottage, incorporation de la chaux par malaxage/pulvérisation et stockage des matériaux chaulés.

Les installations définissent le processus de traitement en fonction de la nature des matériaux à traiter et des usages prévus. Ainsi, chaque installation dispose de son propre processus d'élaboration des matériaux chaulés (étapes à mettre en place, ordre d'exécution et contrôle qualité).



Photo 3 - Plateforme fixe d'élaboration de matériaux chaulés
(crédit photo : YPREMA)

2.3.1 Scalpage

Une fois le matériau entrant trié et sélectionné, celui-ci peut être scalpé à Dmax (diamètre retenu pour le traitement) pour séparer la partie la plus grossière. Généralement le Dmax est compris entre 63 et 100 mm.

Les éléments supérieurs à Dmax peuvent être valorisés sous forme de grave, usuellement après concassage.

2.3.2 Criblage, émottage

Le passant à Dmax (diamètre retenu pour le traitement) subit ensuite un criblage qui permet d'atteindre une granularité 0/D (le D étant généralement compris entre 20 mm ≤ D ≤ 63 mm). Cette opération permet également un émottage du matériau avant son traitement. Le refus du criblage (matériau > D) peut être valorisé au même titre que les matériaux supérieur à Dmax issus du scalpage ou recyclés après concassage dans le processus de fabrication. A l'issue du criblage, le passant (0/D) peut alors être orienté vers l'installation de recyclage par traitement à la chaux.

2.3.3 Déferrailage

Selon l'origine des matériaux, un déferrailage peut être nécessaire. Cette étape permet d'enlever les métaux ferreux éventuellement présents dans les matériaux entrants sur l'installation.

2.3.4 Incorporation de la chaux

Le mélange est réalisé avec un réactif normé : la chaux vive aérienne calcique (CaO). Celle-ci doit satisfaire aux obligations de conformité de la norme NF EN 459-1 [N14].

La chaux vive à préconiser est une chaux, à minima, CL80 - Q (R4 ; P3), c'est-à-dire une chaux (CL) calcique vive aérienne (Q) ayant une teneur CaO + MgO d'au moins 80 %, une teneur en chaux libre d'au moins 65 %, une réactivité de classe R4 et dont la granulométrie appartient au moins à la classe P3. Elle doit répondre aux exigences du RPC (Règlement des Produits de Construction), avec l'apposition du marquage CE.

Le dosage de chaux est déterminé selon les formules suivantes :

$$d\% = \frac{Q}{(Mms+Q)} * 100 \quad \text{ou} \quad d\% = \frac{Q}{\frac{Mms}{(1+w)} + Q} * 100$$

Avec :

- d = pourcentage de chaux ou teneur pondérale en chaux vive en % de matériau sec
- Q = masse de chaux vive
- Mms = masse de matériau sec
- Mmh = masse de matériau humide (mesurée juste avant le chaulage)
- w = teneur en eau



Photo 4 - Plateforme mobile d'élaboration de matériaux chaulés
(crédit photo : Philippe et Fils)



Le Tableau 3 présente les classes de chaux aériennes, définies par la norme NF EN 459-1 [N14].

Tableau 3 : Classes de chaux aériennes définies par la NF EN 459-1 [N14]

	TYPE DE CHAUX		Valeurs données en pourcentage en masse				
	Désignation	Notation	CaO + MgO	MgO	CO ₂	SO ₃	Chaux libre
Chaux calciques (CL)	Chaux calcique 90	CL 90	≥ 90	≤ 5	≤ 4	≤ 2	≥ 80
	Chaux calcique 80	CL 80	≥ 80	≤ 5	≤ 7	≤ 2	≥ 65

Remarque :

des additifs peuvent être incorporés en faible quantité pour améliorer la fabrication ou les propriétés de la chaux. Si la teneur est supérieure à 0,1 %, la teneur réelle et le type d'additif doivent être déclarés.

Un test de réactivité est effectué selon le mode opératoire de la norme NF EN 459-2 [N15] dès réception de la chaux et réitéré en cas de stockage prolongé (> 3 mois).

Les encarts 7 et 8 présentent les propriétés de la chaux et les réactions lors du mélange avec les matériaux.

ENCART 7 / PROPRIÉTÉS DE LA CHAUX

La chaux est un oxyde de calcium plus ou moins riche en oxyde de magnésium. La chaux vive CaO utilisée dans les installations de recyclage est issue directement d'un procédé de calcination du calcaire. Elle se transforme en « chaux éteinte » lors de sa réaction exothermique avec l'eau (hydratation), puis subit une cristallisation lente.

Deux familles de chaux peuvent être utilisées en construction :

- la chaux dite « aérienne » : la chaux éteinte cristallise lentement au contact de l'air pour redonner du carbonate de calcium (CaCO₃, recarbonatation) ;
- la chaux dite « hydraulique » : la chaux éteinte connaît une première cristallisation en présence d'eau puis se carbonate lentement.

Le présent guide concerne uniquement le traitement à la chaux calcique aérienne.

Le test de réactivité effectué selon la norme NF EN 459-2 [N15] s'exprime par la valeur t₆₀, représentant le temps nécessaire pour porter de 20 à 60°C la température de 600 ml d'eau auxquels on ajoute 150 g de chaux vive⁽⁷⁾. La valeur t₆₀ est exprimée en minutes. Plus la chaux est réactive, plus vite elle réagira et donc plus petite sera la valeur t₆₀. La classe R4 permet d'utiliser une chaux à réactivité élevée, soit t₆₀ < 25 min afin d'avoir une réaction rapide.

La granulométrie de la chaux vive ne doit être ni trop importante (délai de réaction et de diffusion dans la terre) ni trop faible (risque de perte au vent). La classe granulométrique retenue par rapport à la norme NF EN 459-1 [N14] est à minima la classe P3 (passant au tamis de 5 mm = 100%, passant au tamis de 2 mm ≥ 95%, et passant au tamis de 90 µm ≥ 30%).

La teneur totale en oxyde de calcium (CaO) est déterminée selon la méthode décrite dans la norme NF EN 459-2 et doit être d'au moins 80 % pour une CL90 et 65 % pour une CL80, conformément à la norme NF EN 459-1 [N14].

(7) Matériau constitué à plus de 90 % d'oxyde de calcium



ENCART 8 / RÉACTIONS LORS DU CHAULAGE

La chaux modifie le comportement des matériaux argileux, grâce à trois actions distinctes, qui se produisent immédiatement, à court terme puis à long terme.

1. Une diminution immédiate de la teneur en eau

La teneur en eau du mélange matériau-chaux se trouve abaissée⁽⁸⁾ immédiatement en raison de :

- la consommation de l'eau nécessaire à l'hydratation de la chaux vive ;
- l'évaporation d'eau suite à la chaleur dégagée par la réaction d'hydratation exothermique ;
- l'aération provoquée par le malaxage, et les reprises du matériau chaulé ;
- l'apport de chaux, qui augmente la masse sèche.

2. Des modifications à court terme des propriétés géotechniques du matériau chaulé

L'incorporation de chaux vive dans un matériau argileux entraîne une agglomération de particules argileuses en éléments plus grossiers et friables : c'est la floculation (formation d'agglomérats ou « grumeaux »).

Les incidences de cette réaction sur le mélange matériau-chaux entraînent :

- une diminution de l'Indice de plasticité (Ip), du fait d'une augmentation importante de la limite de plasticité (WP) du sol sans modification significative de la limite de liquidité (WL) ;
- une augmentation de l'Indice Portant Immédiat : IPI ;
- un aplatissement de la courbe Proctor Normal avec la diminution de la masse volumique apparente sèche à l'optimum Proctor et l'augmentation de la teneur en eau optimale ;
- un accroissement de l'angle de frottement (φ) pour les sols fins.

Le matériau argileux humide passe ainsi de manière progressive d'un état plastique à un état solide, friable, non collant, pulvérulent plus ou moins aggloméré, et perd sa sensibilité à l'eau. Le matériau chaulé peut être considéré comme non sensible à l'eau si, conformément à la norme NF P 94-078 [N13], le rapport suivant est vérifié :

$$\frac{CBR_{immersion}}{IPI} \geq 1$$

Avec :

CBR_{immersion} : Indice de portance californien (California Bearing Ratio) sur matériau chaulé après 4 jours d'immersion

IPI : Indice Portant Immédiat sur matériau chaulé avant immersion

3. Des modifications à long terme du matériau chaulé

La chaux hydratée ou éteinte : Ca(OH)_2 , en tant que base forte, élève le pH ($\text{pH} > 10$) du matériau chaulé et provoque ainsi l'attaque et la solubilisation dans l'eau interstitielle de la silice et de l'alumine des complexes limono-argileux du matériau. Il peut se former alors des aluminates et des silicates de calcium hydratés (réaction pouzzolanique) qui, en cristallisant et précipitant, agissent comme un liant entre les agglomérats ou « grumeaux ».

Il est à noter que l'intensité et la vitesse de ces réactions chimiques à long terme dépendent d'un certain nombre de paramètres :

- le pH (potentiel Hydrogène) des matériaux ;
- le dosage en chaux vive optimal (quantité maximale de chaux éteinte « consommable » par l'argile, obtenue par hydratation de la chaux vive, présente dans le matériau à traiter pour alimenter les réactions) ;
- la teneur en eau : l'eau résiduelle, libre, circulant dans le matériau traité permet la poursuite des phénomènes de floculation des argiles présentes dans le matériau stocké sur plateforme et favorise la carbonatation. Il est donc primordial que le matériau avant et après traitement ne se retrouve pas dans un état s (sec) ou ts (très sec) ;
- la température ambiante : pour que l'effet pouzzolanique s'opère, la température doit être supérieure à + 5°C ; si elle passe en dessous de 5°C, cette réaction s'interrompt mais reprend dès que la température remonte au-dessus de 5°C ;
- le compactage du matériau chaulé lors de sa mise en œuvre, permet le rapprochement spatial des éléments réactifs et facilite la réaction pouzzolanique.

(8) La teneur en eau diminue d'environ 1 à 3 % par % de chaux ajouté au matériau



2.3.5 Malaxage

Le malaxage (notamment par pulvérisation) permet un mélange homogène de la chaux avec le matériau à traiter afin de limiter son caractère argileux en éclatant les mottes d'argile.

En améliorant ses caractéristiques, le matériau chaulé peut être utilisé à une teneur en eau différente de celle de son état naturel. Cette étape est importante pour garantir la qualité du matériau chaulé en sortie d'installation.

2.3.6 Stockage des matériaux chaulés

Les aires de stockage doivent avoir des superficies suffisantes, il est important que les stocks soient suffisamment espacés, pour éviter le risque de mélange des matériaux n'ayant pas les mêmes caractéristiques. La topographie du terrain doit être régulière, un terrain plan en légère déclivité pour améliorer le drainage et faciliter l'écoulement des eaux superficielles de ruissellement est idéal. Le mode de stockage par couches successives permet la constitution d'un stock homogène. La forme du stock la mieux adaptée est celle qui se rapproche le plus possible de la pyramide. Le stock doit être lissé et fermé par un léger serrage. Pour des argilosités modérées, une croûte de protection se forme naturellement par le processus de carbonatation, spécifique à la chaux vive aérienne. Dans de telles conditions, le stockage permet une amélioration des performances géotechniques du matériau chaulé dans le temps⁽⁹⁾.

Le stockage des matériaux traités à la chaux permet une maturation du mélange conduisant à une modification de la minéralogie de l'argile.



Photo 5 : Stockage des matériaux (crédit photo : YPREMA)

2.4 Essais sur les matériaux chaulés

Après chaulage, on parle d'une assimilation à la classification de départ (selon la norme NF P 11-300 [N8]), lorsque le matériau d'origine était un sol.

Les essais, réalisés sur des échantillons représentatifs des matériaux chaulés, permettent de déterminer les caractéristiques suivantes :

- caractéristiques de production : analyse granulométrique (NF P 94-056-⁽⁹⁾ [N1]), VBS (NF P 94-068 [N4]) ;
- caractéristiques mécaniques et propriétés au compactage : LA (NF EN 1097-2 [N16]), MDE (NF EN 1097-1 [N17]), ^WOPN et ^γOPN, (NF P 94-093 [N11]), courbe IPI et CBRimmersion/IPI (NF P 94-078 [N13]) ;
- la connaissance de la plage de variation de la teneur en eau du stock. Cette plage est obtenue en mesurant la teneur en eau sur divers prélèvements caractérisant divers états hydriques (définis à partir de la courbe Proctor Normal préalablement établie) ;
- caractéristiques propres à divers usages ;
 - gonflement au gel (NF P 98-234-2 [N18]) pour des usages en couche de forme et en arase dans les régions soumises au gel-dégel ;
 - résistance mécanique (Rc, Rtb, ... voir GTS [3]) pour les usages en couche de forme traitée ;
 - mesures de résistivité pour les remblais renforcés, ouvrages d'art, matériaux en présence d'acier ou de béton ;
 - teneur en matière organique (XP P 94-047 [N19]) pour les ouvrages d'art (remblai contigu) ;
 - pH (NF ISO 10390 [N20]) pour les remblais renforcés, ouvrages d'art (remblai contigu), matériaux en présence d'acier ;
 - teneurs en sulfates et en chlorures (NF EN 1744-1+A1 [N21]) pour les matériaux en présence de béton ;
 - essais de cisaillement (NF P 94 071-1 [N22]) pour déterminer l'angle de frottement, en vue de la réalisation de merlons et de remblais.

Pour différencier la caractérisation des matériaux chaulés de la classification géotechnique d'une grave non traitée GNT, il est proposé d'utiliser la terminologie suivante :

- MCE 0/D (matériau chaulé élaboré avec une classe granulaire 0/D : ex. 0/5, 0/20, 0/63 mm),

⁽⁹⁾ En cas de stockage prolongé et non protégé, et plus particulièrement lorsque le matériau présente une argilosité élevée, la pérennité des effets du chaulage peut parfois être remise en cause. Les conditions de stockage et de reprise constituent alors un élément important pour la performance des matériaux.

^(*) norme annulée et remplacée par une norme expérimentale XP CEN ISO/TS 17892-4 [N2]. Au moment de l'édition du document, la référence pour la classification GTR des matériaux est toujours la NF P 94-056. Le document sera modifié en fonction de la révision du GTR et la mise en place du référentiel européen.



ENCART 9 / SPÉCIFICITÉ D'ÉLABORATION DE CERTAINS MATÉRIAUX CHAULÉS EN RHÔNE-ALPES : LES MATÉRIAUX MIXTES

En région Rhône-Alpes, le matériau chaulé, une fois mûré, est parfois mélangé avec des matériaux inertes issus de la déconstruction routière ou de bâtiment, constituant un matériau mixte.

Ces derniers ont les caractéristiques suivantes :

- $D_{max} \leq 80$ mm ;
- matériau assimilée à la classe géotechnique D3 selon le guide technique régional sur les graves recyclés [5].

Une série d'essais de gonflement au gel est réalisée pour définir la quantité maximale de matériau chaulé à intégrer au mélange afin de s'assurer qu'il présente un caractère non gélif. La proportion est indiquée dans la Fiche Technique Produit.

Le guide Rhône Alpes [5] précise le mode d'élaboration, les domaines d'utilisation, la classification et les fréquences des contrôles associés à ce matériau.

Le Tableau 4 présente une classification des matériaux chaulés à partir de diverses propriétés définies dans la norme NF P11-300 [N8]. Il indique des caractéristiques géotechniques courantes des matériaux traités, et les fréquences de contrôles (selon le nombre de jours de production, de tonnage ou de chantier) réalisées sur l'installation. La réalisation d'essais de laboratoire aux fréquences recommandées est nécessaire pour valider l'atteinte des valeurs propres à chaque catégorie et pouvoir les intégrer dans une Fiche Technique Produit (FTP) (fiche récapitulant les résultats de la caractérisation de matériaux chaulés pour un usage). Le tableau présente aussi quelques usages possibles des matériaux chaulés, qui seront détaillés dans le chapitre 3 du guide. Dans les cas où la performance mécanique du matériau à long terme est sollicitée (couches de forme par exemple), des essais de caractérisation complémentaires (notamment, résistance, module) sont généralement nécessaires. Un traitement additionnel au liant hydraulique, suivant les préconisations du GTS [3], peut en outre permettre de modifier certains usages.

Tableau 4 : Classification des matériaux chaulés élaborés (MCE) à partir des caractéristiques géotechniques définies dans la norme NF P11-300 [N8]

	MCE 0/D (x) % chaux	Fréquence des contrôles
Paramètres de nature		
Granularité NF P 94-056 (*) [N1]	0/D $D_{max} \leq 80$ mm	I / 2000 tonnes ⁽¹⁾ ou I / chantier A minima, 1 essai hebdomadaire
Valeur au bleu VBS (propreté) NF P 94-068 [N4]	Valeur déclarée	
Paramètres de comportement mécanique		
Dureté	Sans objet	Engagement du producteur sans fréquence ⁽²⁾
LA (NF EN 1097-2) [N16]		
MDE (NF EN 1097-1) [N17]		
Indice Portant Immédiat (NF P 94-078) [N13] Classe du matériau : C_1, B_5 Autres classes possibles : A_3, CiA_3 A_2, CiA_2, B_6, CiB_6 $A1, CiA1$ B_2, CiB_2, B_5 B_4, CiB_4	15 à 30 5 à 10 7 à 15 10 à 20 15 à 30 20 à 40	I / 2000 tonnes ⁽¹⁾ ou I / chantier A minima, 1 essai hebdomadaire



(*) norme annulée et remplacée par une norme expérimentale XP CEN ISO/TS 17892-4 [N2]. Au moment de l'édition du document, la référence pour la classification GTR des matériaux est toujours la NF P 94-056. Le document sera modifié en fonction de la révision du GTR et la mise en place du référentiel européen



	MCE 0/D (x) % chaux	Fréquence des contrôles
Paramètres de comportement mécanique (suite)		
CBR immersion / IPI - NF P 94-078 [N13] entre 0,80 et 1,00 de OPN	Sans objet	1 par production
Caractéristique physico-chimique⁽³⁾		
Teneur en sulfates solubles dans l'eau NF EN 1744-1 +A1 [N21]	SS _{0,2} ou SS _{0,7} suivant usage	1 / 2000 tonnes ⁽¹⁾ ou 1 / chantier A minima, 1 essai hebdomadaire
Caractéristiques complémentaires		
Suivant usages prévus : résistances en compression (Rc) ou en traction (Rtb), module (E), angle de frottement (φ), sensibilité au gel, etc.		
Classement géotechnique – Domaine d'utilisation envisageable en l'état⁽⁴⁾		
Classement équivalent GTR NF P11-300 [N8]	Remblais Remblais sous couche de forme pour assainissement	
(1) 2 000 tonnes ou 1 000 m ³ (NF EN 14227-11 [N23]) (2) Au minimum 1 par an - 1 / chantier < 2 000 tonnes ou 5 jours (3) Les caractéristiques physico-chimiques sont notamment importantes lorsque le matériau est au contact d'autres structures (notamment, béton, acier, géosynthétiques) (4) Sous réserve de validation de l'ensemble des conditions techniques définies dans les guides appropriés à chaque usage (voir section 3), en particulier pour les usages en couche de forme		

Les fréquences de contrôles présentées au tableau 4 peuvent être adaptées par l'exploitant après justification particulière et sur la base de campagnes d'échantillonnage visant à caractériser les propriétés d'une quantité précise de matériaux, en prouvant :

- l'homogénéité de la nature et des caractéristiques des matériaux entrants sur l'installation ;
- l'homogénéité des performances des matériaux sortants de l'installation.

Notamment, la fréquence de contrôle de la teneur en sulfate peut être divisée par 2 si les valeurs sont systématiquement < 50 % du seuil. Également, le PAQ et la FTP doivent tenir compte de l'adaptation de la fréquence de contrôle.

3 UTILISATION DES MATÉRIAUX CHAULÉS EN GÉNIE CIVIL

Les matériaux chaulés élaborés, hors contraintes environnementales propres au site, sont utilisables comme n'importe quel matériau traité dont les caractéristiques (physiques, mécaniques, chimiques) ont été établies sur la base d'un ensemble d'essais. Leur usage est à valider en fonction des préconisations techniques usuelles de l'ouvrage considéré, formalisées dans les guides techniques ou normes appropriés. À titre d'exemple, dans le domaine des terrassements routiers, le GTR [2] et le GTS [3], enrichi des apports récents de la recherche [8], constituent les documents de référence.

En pratique, le matériau chaulé peut, a minima, être considéré comme un matériau amélioré et mis en œuvre en tant que tel. L'action d'amélioration, d'après l'AIPCR⁽¹⁰⁾, porte sur les propriétés physiques du sol telles que la teneur en eau naturelle, la plasticité, la sensibilité à l'eau et l'aptitude au compactage. Cette amélioration est recherchée pour son action à court terme, afin de favoriser la traficabilité et la mise en œuvre.

Une attention plus particulière est nécessaire lorsque le matériau chaulé est employé comme matériau stabilisé, c'est-à-dire lorsque l'effet du traitement est pris en compte dans une action à long terme et intégré dans le dimensionnement de la partie d'ouvrage considérée.

Dans ce cas, il s'agira de garantir la pérennité des propriétés mécaniques (notamment, cohésion, angle de frottement, portance) puisqu'elles jouent un rôle sensible dans le dimensionnement de l'ouvrage. Ces propriétés peuvent en effet être altérées au cours du temps, notamment en cas de lessivage, de cycles d'imbibition et séchage multiples, de cycles de gel-dégel, d'hétérogénéités initiales de mise en œuvre. Les conditions d'environnement de l'ouvrage (gestion des circulations d'eau ou des conditions de gel par exemple) sont également à examiner avec attention.

(10) Dictionnaire en ligne de l'AIPCR : <http://www.piarc.org/fr/Dictionnaires-Terminologie-Transport-Routier-Route/>



Quelques cas d'utilisation courants des matériaux chaulés sont portés ci-après à la connaissance des maîtres d'ouvrage :

- terrassements et plateformes routières (remblai courant, couche de forme, remblayage de tranchée et travaux de canalisation) ;
- terrassements contigus aux ouvrages d'art ;
- plateformes de bâtiments et aires industrielles ;
- plateformes ferroviaires.

Dans la suite du document, seuls les principaux points d'attention sont soulignés pour chaque application. Il est implicite, comme indiqué précédemment, que la bonne adaptation du matériau à l'usage visé doit avoir été validée par ailleurs avec les référentiels techniques appropriés (performances mécaniques à long terme en particulier).

3.1 Terrassements et plateformes routières

La mise en œuvre de matériau chaulé est envisageable dans de multiples situations d'ingénierie routière. La Figure 2 présente de manière synthétique divers cas d'usage au voisinage d'une structure de chaussée.

Le domaine d'utilisation dépend essentiellement du caractère peu ou non gélif (à démontrer après chaulage par des essais de gonflement au gel selon la norme NF P 98-234-2 [N18]), qui est exigé pour certaines applications, et de la performance mécanique recherchée.

Après la mise en œuvre du matériau chaulé en terrassement, il est usuellement recommandé de fermer la surface et les abords de la zone remblayée afin d'empêcher les infiltrations d'eau et de conserver de manière optimale l'état hydrique des matériaux, particulièrement en cas de précipitations ou de délai avant la poursuite des travaux. Une couche de protection doit être mise en œuvre pour les usages en couche de forme.

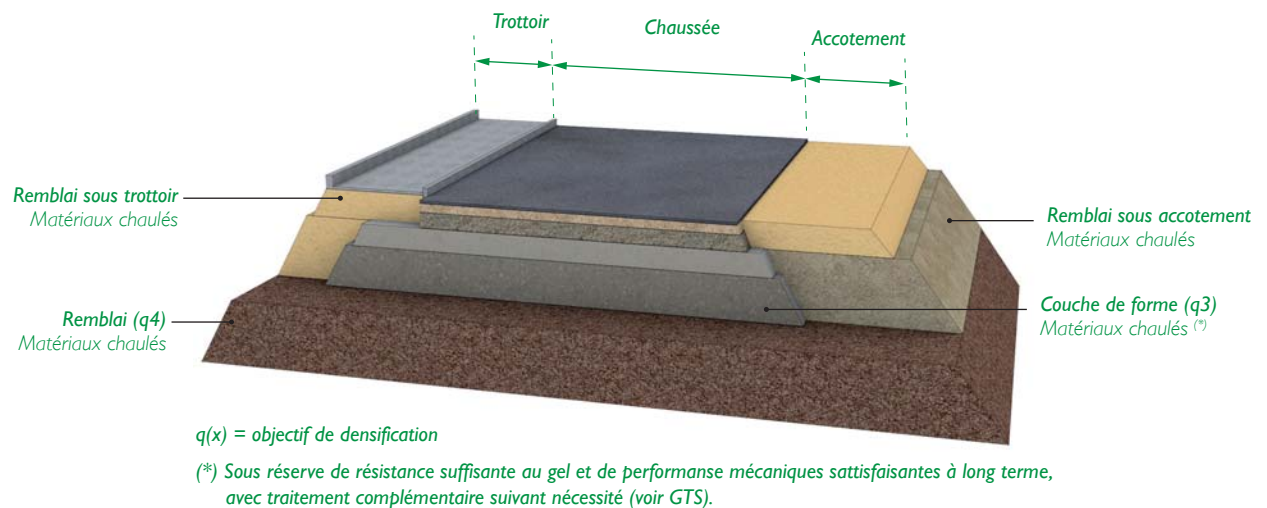


Figure 2 - Usages possibles des matériaux chaulés au voisinage d'une structure de chaussée

3.1.1 Remblai courant

Les conditions d'utilisation en remblai courant sont similaires à celles de tout sol traité à la chaux, employé en chantier de terrassement. L'atelier de compactage doit être choisi en référence au guide GTR [2], avec un objectif de densification q_4 .

L'usage de matériaux chaulés peut parfois permettre de raidir les talus par rapport à une solution non traitée. Le dimensionnement précis de l'ouvrage sera à adapter aux caractéristiques mécaniques du matériau, en particulier à son angle de frottement interne φ' . S'il n'est pas réalisé de traitement additionnel au liant hydraulique sur chantier et une étude spécifique, il conviendra de rester prudent sur l'éventuelle prise en compte d'une amélioration significative de la cohésion liée à l'usage du matériau chaulé.



Les points d'attention particuliers pour un usage en remblai courant sont :

- la qualité du compactage ;
- la mise en œuvre en dehors des périodes de fortes pluies ;
- la vérification des valeurs d'IPI et de CBR immersion suivant les préconisations du guide GTS [3] ainsi que les valeurs de portance, pour les usages en partie supérieure des terrassements (PST) ;
- le caractère plus ou moins gélif au voisinage de la plateforme ou de bords de talus raidis ;
- la vérification des critères de résistance et de pérennité du traitement spécifiés dans le guide GTS [3] pour les zones pouvant être sous eau de manière intermittente (zones inondables en particulier).

3.1.2 Couches de forme

L'emploi du matériau chaulé élaboré est possible en couche de forme traitée (notamment pour des voiries à faible trafic) sous condition de mener des études de formulation de niveau adapté, conformément aux préconisations du guide GTS [3].

Dans la grande majorité des cas, il est nécessaire de prévoir un traitement complémentaire au liant hydraulique, et/ou d'accroître sensiblement le taux de chaulage, pour obtenir les performances mécaniques recherchées (en module d'Young et en résistance en traction brésilienne (Rtb) en particulier).

Une caractérisation fine du stock et de son homogénéité (nature du matériau chaulé, granulométrie) sont nécessaires pour garantir des performances homogènes sur l'ensemble de la couche de forme et valider la représentativité de l'étude.

Outre l'aptitude au traitement, les principaux points d'attention sont :

- les performances mécaniques à court et à long terme (évaluées par essais de laboratoire suivant le GTS [3]) ;
- la résistance au gel du matériau ;
- l'homogénéité de mouture et de mise en œuvre ;
- la qualité du compactage, l'atelier devant être choisi conformément au guide GTR [2] pour un objectif de densification q3 ;
- la mise en place d'une protection de surface sur la couche de forme ;
- le traitement adapté de l'interface avec les couches de chaussée ;
- la gestion à court et long terme des eaux de la plateforme.

De manière générale, le respect des préconisations du GTS [3] permet une prise en compte adaptée de la majorité des points sensibles.

ENCART 10 / SPÉCIFICITÉ EN RHÔNE-ALPES

On notera que certains maîtres d'ouvrage étendent actuellement le domaine d'application des matériaux chaulés élaborés en couche de forme dans des cas précis. Par exemple, les pratiques suivantes ont été recensées en région Rhône-Alpes [5] à l'heure de la rédaction du présent guide :

- dans le cas de formulations mixtes intégrant une part importante de graves de recyclage tout en vérifiant l'absence de plâtre, d'éléments putrescibles et de perturbateurs chimiques (sulfates notamment), le matériau chaulé peut parfois être assimilé à une grave de type D, présentant une valeur au bleu VBS < 0,1. L'usage en couche de forme sans traitement additionnel est alors envisageable pour des valeurs de LA et MDE < 45, en suivant les préconisations de mise en œuvre du GTR [2] et après vérification des critères de sensibilité au gel ;
- dans le cas particulier de voies à faible trafic (inférieur à T4, moins de 50 PL/j/sens), en fonction de la localisation (matériau potentiellement gélif) et du contexte du chantier (notamment, réseaux, conditions de mise en œuvre envisageables), un emploi en l'état du matériau chaulé peut parfois être admis en couche de forme, avec une mise en œuvre similaire au matériau GTR équivalent. Les conditions de gestion des eaux (notamment, assainissement, drainage, nappe) et de sensibilité au gel-dégel et à l'eau doivent faire l'objet d'une attention particulière dans ce cas.



3.1.3 Remblayage de tranchées ou travaux de canalisation

Les matériaux chaulés sont utilisables en remblayage de tranchée ou en travaux de canalisations sous conditions. Les Figures 3 et 4 présentent les domaines d'emploi.

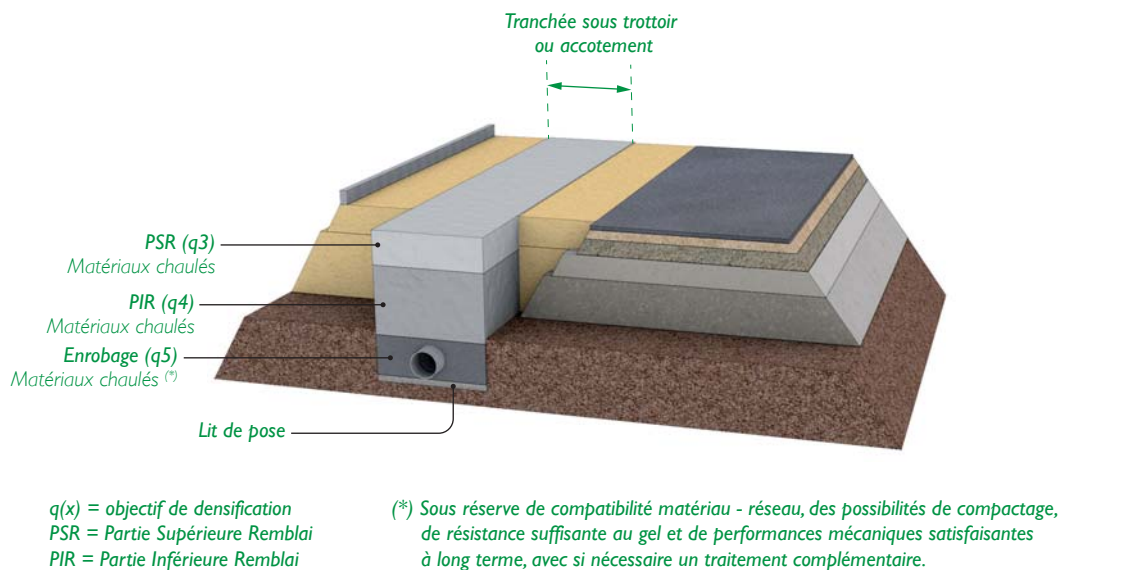


Figure 3 - Usages possibles des matériaux chaulés en tranchée sous trottoir ou accotement (dénominations suivant le guide de remblayage des tranchées [7])

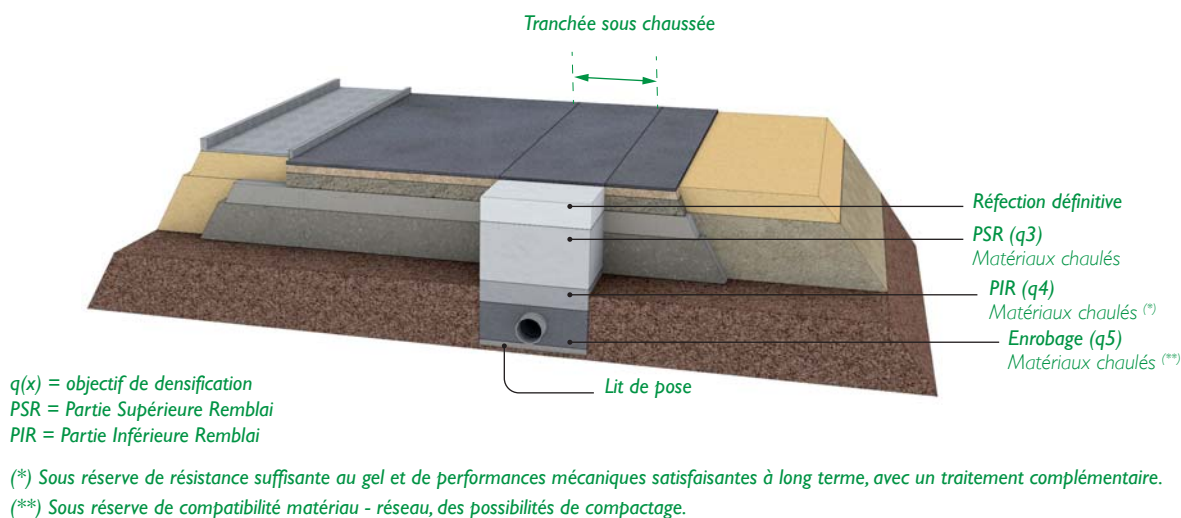


Figure 4 - Usages possibles des matériaux chaulés en remblayage de tranchées ou travaux de canalisation

En partie supérieure de remblai (PSR) ou en partie inférieure de remblai (PIR) les limites d'usage sont celles retenues classiquement pour les remblaiements de tranchée (voir guide « Remblayage des tranchées » [6] et note d'information I 17 du Setra [9]), notamment :

- un Dmax compatible avec les dimensions de la tranchée ;
- une aptitude au compactage compatible avec les moyens mobilisables ;
- des performances mécaniques à long terme satisfaisantes en PSR (avec si nécessaire un traitement complémentaire au liant hydraulique) ;
- pour une utilisation en PSR, une résistance au gel adaptée, à examiner en fonction de l'indice de gel et de la protection apportée par la chaussée.



Les objectifs de densification sont classiquement : q4 en PIR et q3 en PSR. À titre indicatif, les modalités de compactage peuvent être sélectionnées en s'appuyant sur les tableaux du guide de « Remblayage des tranchées » [6] correspondant au sol naturel auquel le matériau chaulé est assimilable. On notera toutefois que le guide [6] n'a pas été actualisé vis-à-vis des spécificités de compactage propres aux matériaux recyclés chaulés utilisés en tranchée.

En enrobage ou en lit de pose, l'usage dépend de la compatibilité chimique du matériau chaulé avec la canalisation. Sur les canalisations en fonte ductile et en acier, des essais ont montré une compatibilité satisfaisante avec des matériaux chaulés présentant une teneur maximale en chaux de 2 % (hors présence d'autres perturbateurs chimiques).

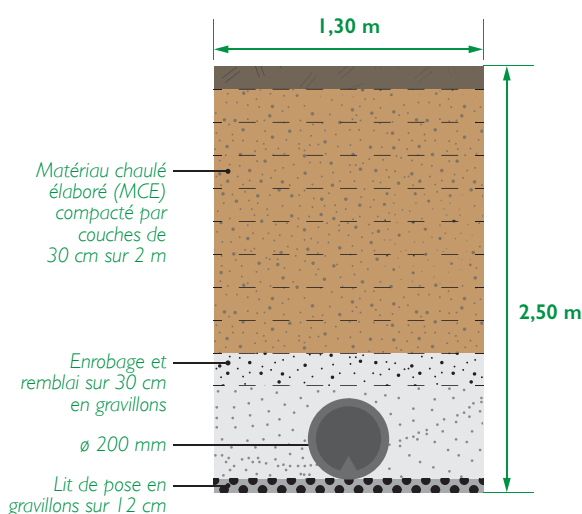
Une étude réalisée par Engie Lab Crigen démontre que le traitement à 1 % de chaux :

- n'a pas d'influence sur le vieillissement des canalisations polyéthylène (PE) ;
- à un faible impact sur la tenue à la corrosion des matériaux de type cuivre ou laiton (accessoires de réseaux notamment) ;
- à un faible impact sur la protection cathodique.

REMBLAI DE TRANCHÉE



Enrobage d'une canalisation en grès et remblaiement de la tranchée



ASSAINISSEMENT / ENROBAGE



Tranchée d'une conduite d'eau potable

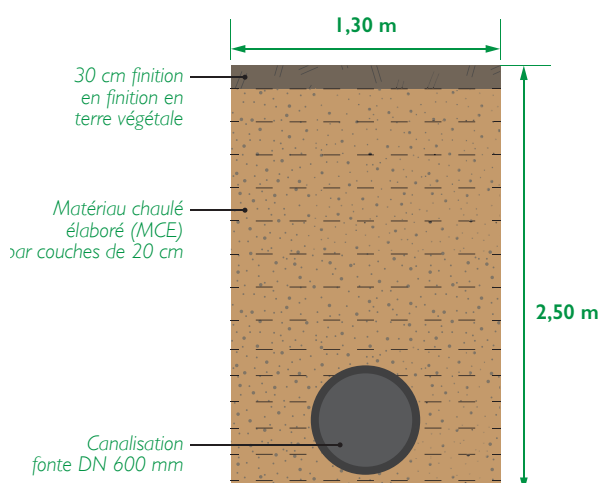
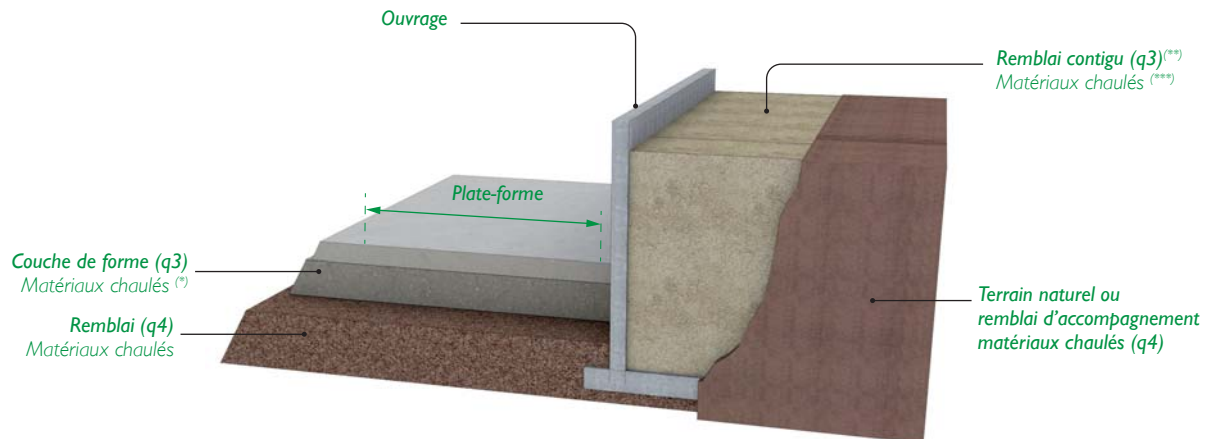


Figure 5 - Exemple d'usage des matériaux chaulés en remblayage de tranchées et travaux de canalisation



3.2 Terrassements contigus aux ouvrages d'art



$q(x)$ = objectif de densification

(*) Sous réserve de compatibilité des propriétés du matériau avec l'usage en couche de forme, avec si nécessaire un traitement complémentaire.

(**) q3 sur toute la hauteur pour les blocs techniques et pour les remblais contigus qui assurent une transition mécanique entre le remblai d'accompagnement et l'ouvrage rigide.

(***) Sous réserve de compatibilité matériau - ouvrage.

Figure 6 - Usages possibles des matériaux chaulés en terrassement contigu aux ouvrages d'art

L'usage des matériaux chaulés est possible en terrassement contigu aux ouvrages d'art (remblais contigus ou blocs techniques), sauf en cas d'incompatibilité physico-chimique avec le matériau constitutif de l'ouvrage et sous réserve d'obtention d'un niveau de performance minimal.

Les conditions de compactage sont à adapter aux exigences du projet. En général, un objectif de densification q3 est recherché sur toute la hauteur considérée. La méthode de compactage peut être définie par référence au GTR [2] pour les engins lourds, ou au guide de remblayage des tranchées [5] pour les compacteurs légers (à proximité immédiate de l'ouvrage). De manière générale, il conviendra également de respecter les prescriptions de la note d'information n°34 du Setra « Construire des remblais contigus aux ouvrages d'art » [8], ainsi que celles du rapport IDRRIM « Enseignements du projet Terdouest. Propositions de compléments au Guide Traitement des Sols » de 2015 [8].

Les caractéristiques mécaniques du matériau intégrées au dimensionnement de l'ouvrage devront être évaluées avec prudence et dans une perspective de long terme. Par exemple, sauf traitement additionnel au liant hydraulique et/ou étude spécifique, les connaissances techniques actuelles ne permettent pas de garantir qu'un matériau chaulé après stockage puis mise en œuvre, développera systématiquement une cohésion (« prise ») suffisamment homogène et durable à l'échelle de l'ouvrage. Seules des valeurs minimales de quelques kPa peuvent alors être prises en compte. En revanche, les angles de frottement sont en général considérés comme davantage pérennes. À titre conservatoire, et sous réserve d'obtention de résistances en compression minimales, la note d'information n°34 du Setra [10] propose par exemple de dimensionner avec une cohésion nulle et un angle de frottement de 35° pour les matériaux traités (à la chaux et/ou au liant).

Les principaux points d'attention pour l'usage des matériaux chaulés en terrassements contigus aux ouvrages d'art sont donc les suivants :

- la compatibilité physico-chimique du matériau chaulé avec l'ouvrage : absence de sulfates, de plâtre, d'éléments putrescibles, de chlorures notamment ;
- les performances mécaniques du matériau chaulé à long terme (Rc après 14 j de cure et 14 j d'immersion, Rc à 2 j, CBRimmersion/IPI, cohésion et angle de frottement) (voir note d'information du SETRA n°34 [10]) ;
- l'homogénéité du matériau, de sa mouture et de sa mise en œuvre ;
- la qualité du compactage, avec un objectif de densification q3 ;
- la maîtrise du système de drainage et d'assainissement au voisinage du remblai contigu ou du bloc technique ;
- le traitement de l'interface entre le remblai contigu et le remblai courant ou le terrain naturel (notamment, redans).



Remarque :

la note d'information n°34 du Setra [10] recommande en général une teneur en chaux minimale de 2 % pour ces applications en remblai contigu, les teneurs inférieures étant à examiner au cas par cas.



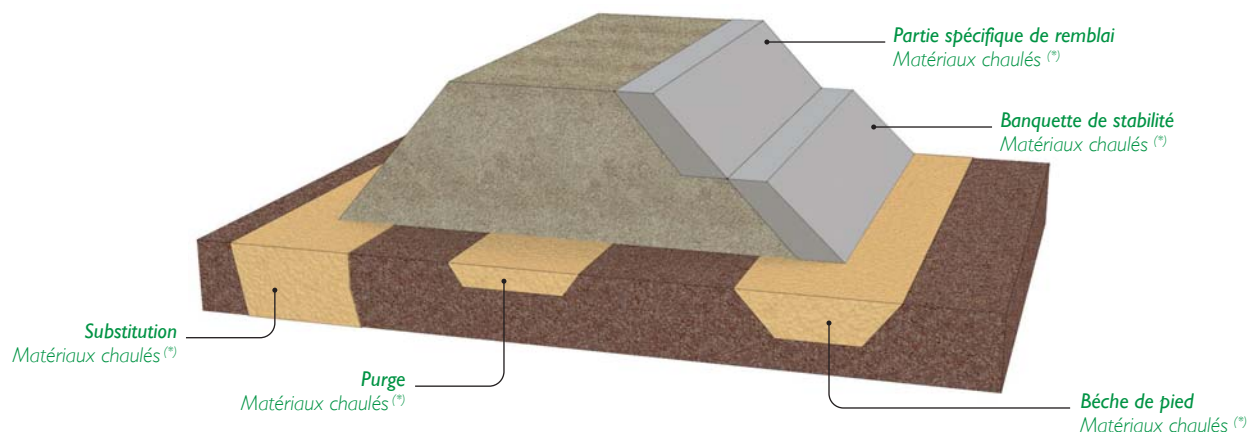
Photo 6 - Exemple d'usage des matériaux chaulés en remblaiement derrière un ouvrage d'art

3.3 Autres travaux de terrassement

Les matériaux chaulés présentent couramment des caractéristiques mécaniques avantageuses pour un usage dans des travaux de terrassement spécifiques, comme par exemple :

- les bèches de pied de remblai (hors d'eau) ;
- les banquettes pour élargissement ou stabilisation de remblai ;
- certaines parties spécifiques de remblais, après études ;
- les substitutions et purges (hors d'eau).

Une étude doit être réalisée pour valider la compatibilité du matériau avec l'usage envisagé, en particulier au regard des références techniques actuelles GTR [2] et GTS [3].



(*) Sous réserve de compatibilité technique avec l'usage prévu

Figure 7 - Autres usages possibles des matériaux chaulés en terrassement

3.4 Plateformes de bâtiments et aires industrielles

Une utilisation des matériaux chaulés en plateforme de bâtiment ou en plateforme industrielle et commerciale est envisageable. Le matériau présente usuellement une bonne traficabilité à court terme, ce qui peut se révéler avantageux.

De manière générale, les limites d'usage en partie supérieure des terrassements (PST) et en couche de forme sont similaires à celles des ouvrages routiers. Compte-tenu des superficies importantes pouvant être concernées, on veillera plus particulièrement à la fermeture (ou à la protection) des surfaces après mise en œuvre, ainsi qu'aux pentes des arases pour une évacuation satisfaisante de l'impluvium.



Si un usage du matériau chaulé est envisagé en remblai ou en couche de substitution support d'éléments de structure ou de maçonnerie, il sera nécessaire de vérifier sa sensibilité à l'eau, de valider ses caractéristiques mécaniques à court et long terme et de vérifier l'absence d'incompatibilité physico-chimique avec l'ouvrage prévu, notamment les taux de sulfates (classe d'agressivité à établir suivant la norme NF EN 206/CN [N24]). Le matériau devra également respecter les conditions prévues par les principaux documents techniques en vigueur pour le bâtiment concerné.

3.5 Plateformes ferroviaires

Selon l'usage envisagé, les matériaux chaulés pourront être utilisés en terrassement ferroviaire soit traités à la chaux seule, soit traités complémentirement aux liants hydrauliques.

Les paragraphes suivants détaillent les usages possibles de matériaux chaulés selon la fonction du matériau dans l'ouvrage en terre. Certaines caractéristiques sont liées au matériau lui-même, d'autres à des objectifs de résultat (degré de compactage, portance) que le chantier devra obtenir mais qu'il n'est pas pertinent, dans le présent document, de dissocier du matériau.

Les différents usages ferroviaires sont présentés sur la Figure 8.

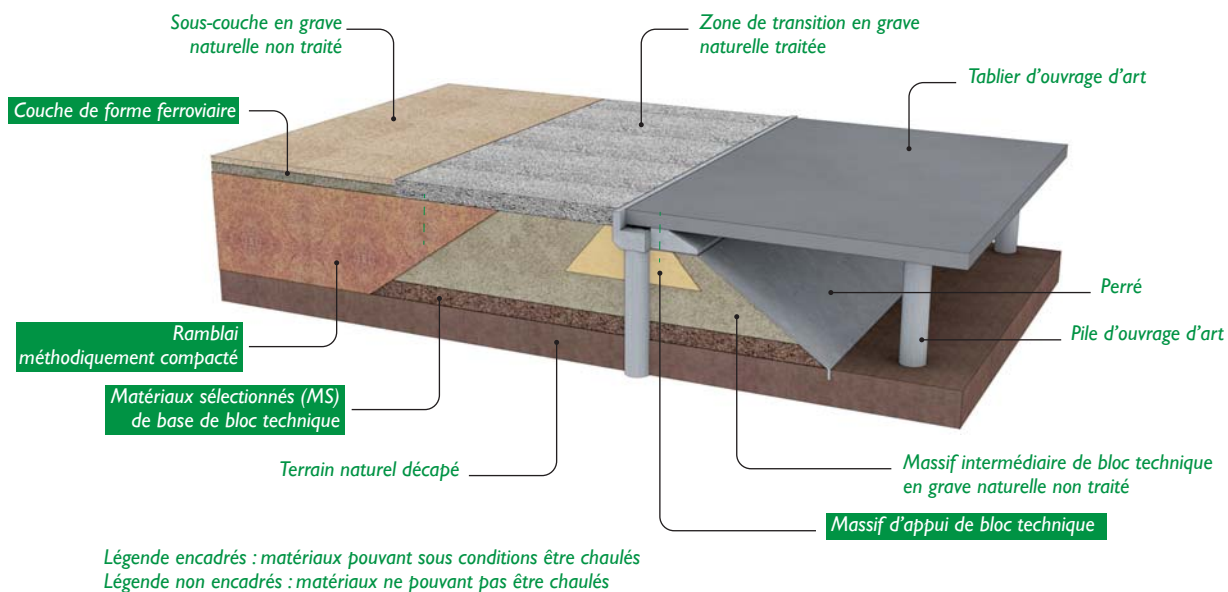


Figure 8 - usages possibles des matériaux chaulés élaborés au niveau des infrastructures ferroviaires

Les traitements aux liants hydrauliques sont interdits en zones compressibles.

Concernant la teneur en sulfate soluble dans l'eau des matériaux chaulés en usage ferroviaire, on retiendra un matériau SS0.7 (cf. Tableau 3), sauf quand le matériau chaulé est immédiatement au contact du ballast en zones de traverses en béton, ou immédiatement au contact de matériaux traités aux liants hydrauliques, où l'on retiendra alors un SS0.2.

3.5.1 Remblais Méthodiquement Compactés

Il s'agit de matériaux de remblais courants qui ne nécessitent, dans le cadre du présent document, qu'un traitement à la chaux seule.

Les exigences usuelles de la SNCF sont les suivantes :

- matériaux mis en œuvre conformément aux prescriptions du GTR [2] et du GTS [3] pour les remblais (compactage q4) et compatible avec les pentes de talus du projet.

3.5.2 Matériaux Sélectionnés de base de Blocs techniques

Ces matériaux sont situés en base des hauts remblais (hauteur > 5 m) en zones de Blocs Techniques (proximités d'ouvrages). On retiendra, dans le cadre du présent document, un traitement à la chaux seule.



Les exigences usuelles de la SNCF sont les suivantes :

- matériaux chaulés ;
 - présentant un Dmax (dimension maximale des plus gros éléments) ≤ 150 mm ;
 - présentant une fraction 20 mm/Dmax inférieure à 30 % de la masse sèche totale pour permettre un contrôle de compactage en référence aux résultats de l'essai Proctor ;
 - ne comportant pas d'éléments corrosifs vis-à-vis du béton ;
 - ayant démontré leur insensibilité à l'eau ainsi que la pérennité du traitement proposé, selon les critères du GTS [3] (CBR immersion / IPI traité ≥ 1) ;
 - Insensibles au gel (SGn) dans les zones où ils ne sont pas protégés par une épaisseur conforme de matériaux non gélifs.
- mise en œuvre conformément aux prescriptions du GTR [2] et du GTS [3] pour les couches de forme (compactage q3) et compatible avec les pentes de talus du projet ;
- un module à la plaque ou dynaplaque (mis en place) EV2 ≥ 50 MPa.

3.5.3 Matériaux de massifs d'appuis de blocs techniques

Ces matériaux supportent la sous-couche traitée à la jonction avec un ouvrage dans une zone de bloc technique. Leur traitement aux liants hydrauliques est impératif, avec ou sans chaux additionnelle, dans le cadre de l'usage des matériaux chaulés.

Les exigences usuelles de la SNCF sont les suivantes :

- Matériaux chaulés ;
 - ne comportant pas d'éléments corrosifs vis-à-vis du béton ;
 - présentant une fraction 20 mm/Dmax inférieure à 30 % de la masse sèche totale pour permettre un contrôle de compactage en référence aux résultats de l'essai Proctor ;
 - ayant démontré leur insensibilité à l'eau ainsi que la pérennité du traitement proposé, selon les critères du GTS [3] (CBR immersion / IPI traité ≥ 1) ;
 - insensibles au gel (SGn) sauf protégés par une épaisseur conforme de matériaux non gélifs ;
 - traités aux liants hydrauliques, compactés q3, et devant - à ce niveau de compactage et à 90 jours - être de classe mécanique 4 selon le paragraphe CI.3.6.2 du GTS [3],
- Mise en œuvre comme une couche de forme selon les prescriptions du paragraphe CI.3.6.2 du GTS [3].

3.5.4 Matériaux de couche de forme ferroviaire

Ces matériaux supportent la sous-couche en zone courante.

Dans le cadre du présent document, et en l'absence de retour d'expérience sur ce sujet, l'usage des matériaux chaulés, en couche de forme ferroviaire rapportée, est limitée exclusivement à celui des matériaux traités aux liants hydrauliques, avec ou sans chaux additionnelle.

Ces matériaux seront traités aux liants hydrauliques et compactés q3, et devront présenter les caractéristiques ci-après pour permettre leur usage en couche de forme ferroviaire :

- Être de classe mécanique 4 ou 5 selon le paragraphe CI.3.6.2 du GTS [3] ;
- Présenter une fraction 20 mm/D (grand D) inférieure à 30 % de la masse sèche totale pour permettre un contrôle de compactage en référence aux résultats de l'essai Proctor ;
- Avoir démontré leur insensibilité à l'eau ainsi que la pérennité du traitement proposé, selon les critères du GTS [3] (CBR immersion / IPI traité ≥ 1) ;
- Présenter (mis en place) un module à la plaque EV2 ≥ 120 MPa et une déflexion $d \leq 0,5$ mm ;
- Être insensible au gel (SGn) sauf à en être protégés par une épaisseur conforme de matériaux non gélifs.

NB : les classes mécaniques 4 et 5 sont respectivement associées à des épaisseurs de couche de forme de 35 cm et de 40 cm pour un objectif imposé de classe de portance P3 de la plateforme terrassement (information donnée à titre indicatif dans le cadre du présent document pour permettre une comparaison technico-financière des solutions d'amélioration possibles).

3.6 Autres filières et perspectives de développement

Les matériaux chaulés pourront être utilisés dans d'autres filières. Dans ce cas, le traitement par chaulage est seulement une étape dans le processus d'élaboration des matériaux (gravillon pour béton par exemple).

Le projet de recherche TRIBUN Traitement Innovant de déchets d'Excavation du BTP pour une Utilisation dans des applications béton (projet ADEME) en cours de finalisation s'attache à démontrer que ces matériaux chaulés pourront être utilisés pour la fabrication de granulats (gravillons roulés et concassés, sables concassés) pour un usage béton.



4 PERFORMANCE DES MATÉRIAUX TRAITÉS

Le producteur doit s'assurer que les exigences requises du matériau chaulé sont atteintes.

Pour cela, le producteur rédige un Plan Assurance Qualité (PAQ) : document décrivant les pratiques, les moyens et la séquence des activités liées à la qualité du matériau chaulé élaboré.

4.1 Plan d'assurance qualité

Le PAQ décrit les processus depuis l'entrée sur l'installation jusqu'à la livraison des matériaux afin de prouver la maîtrise de la production.

Il s'agit notamment des points suivants :

- l'organisation de l'installation : organigramme, responsabilités, moyens humains et techniques, type de travail et prestation, capacité de production, autorisations administratives ;
- les conditions d'acceptation des matériaux à l'entrée de l'installation : vérification des documents de traçabilité, contrôles (visuel et olfactif) et détection des impuretés pouvant perturber le traitement à la chaux (par exemple, présence de matière organique et/putrescibles, phosphates, sulfures, sulfates), et le traitement des non conformités ;
- les documents permettant la traçabilité des matériaux dans l'installation de recyclage, notamment leur cheminement, les registres ;
- la description des étapes de traitement, les modalités d'échantillonnages, les types et fréquence des essais (sur les matériaux entrants, en cours d'élaboration, la chaux et les matériaux élaborés), la traçabilité et les modalités de gestion des non-conformités pour chaque étape (réalisation du stock homogène à l'arrivée des matériaux, élaboration, chaulage et le stockage du matériau) ;
- la description et les conditions d'utilisation des matériaux élaborés et l'élaboration d'une fiche technique produit (FTP) par usage.

4.2 Caractéristiques des matériaux chaulés

Certains matériaux commercialisés à ce jour possèdent une Fiche Technique Produit regroupant les informations nécessaires à l'identification des matériaux et permettant de définir leurs domaines d'utilisations.

Dans le cadre de la rédaction de ce guide, une campagne d'essai a été réalisée (6 échantillons) par le SRBTP pour tester le comportement à la lixiviation selon la norme NF EN 12457-2 [N25] des matériaux chaulés. Sur 6 installations de recyclage, 2 échantillons de matériaux ont été prélevés, l'un correspondant aux matériaux avant chaulage et l'autre correspondant aux matériaux élaborés prêts à être utilisés en usage routier. Les installations de recyclage ayant participé à la campagne d'essai sont réparties sur le territoire : Bretagne, Auvergne Rhône-Alpes, Ile-de-France, Pays de la Loire, Hauts de-France et présentent différents contextes géologiques.

Ces essais, qui n'ont pas vocation à proposer un référentiel, montrent que le traitement des 6 matériaux :

- n'entraîne pas d'augmentation du relargage des fractions solubilisées inorganiques (notamment As, Cd, Cr, Hg, Mo, Pb, Sb, Se et Zn) et des sulfates, pour un traitement à 2 % de chaux ;
- entraîne une augmentation du pH qui demeure dans la gamme de pH obtenue pour les bétons de déconstruction ;
- entraîne une augmentation de la fraction soluble qui est principalement due à une augmentation de la teneur en Ca et CO₃.

Également, cette campagne d'essai réalisée sur 6 échantillons de matériaux issus d'installations de recyclage (non représentative de tous les matériaux susceptibles d'être traités sur les installations de recyclage) a permis de montrer que le caractère inerte des terres n'a pas été modifié après un traitement à la chaux de 2 %.

L'annexe A de ce guide propose une synthèse de Fiches Techniques Produits transmis par les d'adhérents du SRBTP. Elle présente les différentes familles GTR des matériaux avant et après chaulage, les pourcentages de chaux, les densités et les teneurs en eau à l'OPN, ainsi que les valeurs d'IPI. Cette synthèse ne reflète pas la diversité des matériaux que l'on peut retrouver sur l'ensemble du territoire français.

La mise en œuvre du matériau n'engendre pas de risques ni de nuisances, dès lors que le processus de traitement a permis l'hydratation complète de la chaux. Pour les travailleurs, il n'y a pas d'équipement de protection individuel à mettre en place autre que ceux habituellement utilisés dans les chantiers du BTP. Pour les riverains, la mise en œuvre de matériaux chaulés n'entraîne pas de nuisance particulière si le matériau est employé à un état hydrique adapté.



4.3 Fiche technique produit

La fiche technique produit (FTP) garantit la conformité du matériau pour l'usage demandé. La FTP caractérise le matériau chaulé et précise les conditions de mise en œuvre. Elle précise les valeurs d'engagement du producteur pour l'usage et synthétise les résultats des essais sur une période donnée (ou les plus récents en ce qui concerne les essais du suivi de production). Elle présente une durée de validité limitée.

La FTP doit reprendre les informations suivantes :

- le nom du producteur et le lieu de production ;
- la classe du matériau et ses constituants (notamment la teneur moyenne en chaux vive et le type de chaux utilisé) ;
- le référentiel utilisé, pour la partie contractuelle ;
- les caractéristiques de production : analyse granulométrique (NF P 94 056^(*) [N1]), VBS (NF P 94-068 [N4]) et jour(s) de production ;
- les caractéristiques mécaniques et propriétés au compactage : LA (NF EN 1097-2 [N16]), MDE (NF EN 1097-1 [N17]), W_{OPN} et γ_{OPN} (NF P 94-093 [N11]), IPI et CBRimmersion/IPI (NF P 94-078 [N13]) ;
- la connaissance de la plage de variation de la teneur en eau du stock traité. Cette plage est obtenue en mesurant la teneur en eau sur divers prélèvements caractérisant divers états hydriques (définis à partir de la courbe Proctor Normal préalablement établie) ;
- caractéristiques propres à divers usages :
 - gonflement au gel (NF P 98-234-2 [N18]) pour les usages en couche de forme et en arase dans les régions soumises au gel-dégel ;
 - résistance mécanique (R_c , R_{tb} ,... voir GTS [3]) pour les usages en couche de forme traitée ;
 - mesures de résistivité pour les remblais renforcés, ouvrages d'art, matériaux en présence d'acier ou de béton ;
 - teneur en matière organique (XP P 94-047 [N19]) pour les ouvrages d'art (remblai contigu) ;
 - pH (NF ISO 10390 [N20]) pour les remblais renforcés, ouvrages d'art (remblai contigu), matériaux en présence d'acier ;
 - teneurs en sulfates et en chlorures (NF EN 1744-1+A1 [N21]) pour les matériaux en présence de béton ;
 - essais de cisaillement (NF P 94 071-1 [N22]) pour déterminer l'angle de frottement, en vue de la réalisation de merlons et de remblais ;
- le respect des normes « Produits » (NF EN 13242+A1 [26], NF EN 13285 [27], NF P 18545 [28]) ;
- les précautions d'usage dans le cadre d'emploi à dans des contextes à enjeux (compatibilité des matériaux, environnement, etc.) ;
- les usages possibles du matériau chaulé en respectant les préconisations des guides techniques appropriés et les recommandations de mise en œuvre, notamment :
 - éviter la mise en œuvre en cas de forte pluie ;
 - « fermer » la surface du MCE en place tous les soirs par compactage ;
 - réaliser un traitement de cure pour la fermeture définitive du chantier. La protection superficielle à appliquer sur l'ARase de terrassement ou la couche de forme est assurée par un traitement de cure constitué d'un épandage uniforme d'une couche d'émulsion suivi d'un cloutage à l'aide de gravillons concassés de granularité 4/6 mm ou 6/10 mm, à raison de 5 à 7 kg/m².

Un modèle de FTP est présenté à la Figure 9.

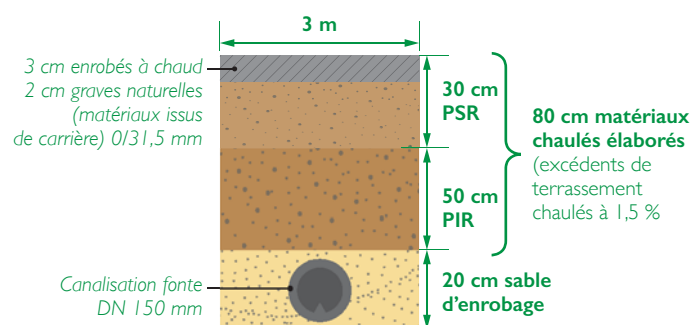


5 RETOURS D'EXPÉRIENCES

Syndicat Intercommunal de Distribution d'Eau du Sud-Ouest Lyonnais



Coupe de la tranchée



PSR : partie supérieure de remblais
PIR : partie inférieure de remblais

Description du chantier

- Remblai de tranchée avec une canalisation d'eau potable en fonte.
- Travaux sur 200 mètres de long sur le « chemin de la Guille » d'un lotissement de la commune de Pollionnay (69).
- Travaux réalisés en mars 2009.
- Matériaux chaulés élaborés : excédents de terrassement élaborés à une granulométrie 0/63 mm et chaulés à 1,5 % sur une plateforme de recyclage.
- Quantités fabriquées : 2 500 tonnes.
- Quantités utilisées : 200 tonnes.



Comment le maître d'ouvrage a intégré les matériaux chaulés élaborés dans son chantier

En 2009, à l'exécution des travaux, il n'existait pas de document technique relatif à l'utilisation de matériaux chaulés élaborés. Le syndicat des eaux, sensibilisé au développement durable, a décidé de tester les matériaux chaulés élaborés lors de travaux en tranchée. Cette technique permettait, via une installation de recyclage à la chaux, d'utiliser des excédents de terrassement du secteur. L'entreprise a réalisé les essais préalables sur les matériaux chaulés élaborés et a fourni une fiche technique produit détaillant les performances techniques des matériaux chaulés élaborés et les usages.



Matériaux chaulés élaborés

Mise en œuvre

- Les matériaux chaulés élaborés ont été acheminés au fur et à mesure des besoins du chantier.
- Des tests de compacité ont été réalisés. Ces tests sont identiques à ceux réalisés sur les graves naturelles issues de carrière en nombre et en type d'essais. Les résultats des tests sont conformes aux exigences du chantier avec q4 sur la partie inférieure de remblais (PIR) et q3 sur la partie supérieure de remblai (PSR).



Point de vue du maître d'ouvrage sur l'utilisation des matériaux chaulés élaborés

Le chantier étant sur l'Ouest Lyonnais, l'utilisation des matériaux chaulés élaborés issues de déblais de chantiers de TP locaux a évité le transport et une évacuation de ces excédents en stockage définitif.

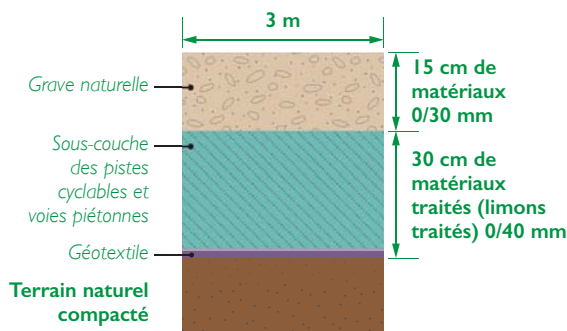
Les matériaux chaulés élaborés répondent aux caractéristiques demandées : 8 ans après les travaux, aucun affaissement ou autre désordre de la chaussée n'a été constaté.

L'utilisation de matériaux chaulés élaborés permet de répondre aux principes d'économie circulaire et de préservation des ressources ainsi qu'aux objectifs de la Loi de sur la Transition Énergétique pour la Croissance Verte.

Le chantier fait parti des chantiers qui ont contribué à l'élaboration du guide Rhône-Alpes sur les « graves chaulées » de 2013.



Coupe des pistes cyclables et des voies piétonnes



Description du chantier

- Réalisation de 600 mètres de pistes cyclables et voies piétonnes de 3 mètres de largeur sur un village de vacances d'écotourisme de Villeneuve-le-Comte (77).
- Date de réalisation du chantier : printemps 2017.
- Les matériaux chaulés élaborés : limons chaulés (issus de déblais de chantier) à 2 %.
- Elles sont classées B5 selon le GTR.
- Quantité de matériaux chaulés : 1 500 tonnes.



Comment le maître d'ouvrage a intégré les matériaux chaulés élaborés dans son chantier

Sur le secteur, les matériaux naturels sont des limons à forte teneur en argile.

Dans le cadre du marché, l'entreprise devait traiter les limons directement sur le site (traitement chaux / ciment).

Lors de la réalisation des pistes cyclables et voies piétonnes, le terrassement d'une partie du chantier a mis en évidence une présence importante d'eau dans les matériaux en place rendant la portance du fond de forme insuffisante pour l'atelier de traitement.

L'entreprise a proposé de limiter les terrassements et de mettre en œuvre sur chantier des limons traités en centrale.

L'entreprise a fourni une fiche technique produit du matériau traité (2% chaux et 6% ciment) élaboré avec les caractéristiques mécaniques



Mise en œuvre

Les matériaux traités sont élaborés sur une installation fixe de et stockés à l'abri. Cela permet une utilisation quelque soit les conditions météorologiques.

Ils sont acheminés et mis en place à l'avancement.

Le compacteur utilisé est de type pv3 (identique à ceux utilisés pour des matériaux naturels dans le même usage).



Point de vue du maître d'ouvrage sur l'utilisation des matériaux chaulés élaborés

L'utilisation de matériaux chaulés élaborés permet :

- de recycler des matériaux qui seraient envoyés en installation de stockage ;
- une économie financière, si on les compare à une grave classique ;
- de maintenir une homogénéité avec les structures traitées en place.

Les éléments de traçabilité fournis par l'entreprise permettent de s'assurer que les matériaux peuvent être utilisés en technique routière.



GRANDLYON La métropole

Utilisation des matériaux chaulés par la Métropole de Lyon

La Métropole de Lyon a participé au groupe de travail du guide « Graves de valorisation – Graves chaulées » (CETE de Lyon, 2013) permettant de cadrer l'élaboration et les usages des matériaux chaulés. Les entreprises de Rhône-Alpes peuvent répondre aux marchés de travaux de la Métropole de Lyon avec un matériau chaulé s'il respecte les prescriptions du guide.

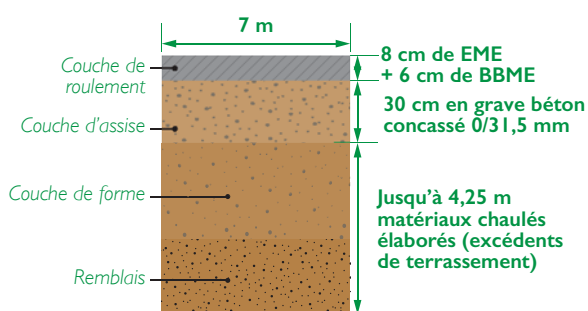
La Métropole de Lyon utilise les matériaux chaulés sur des chantiers ponctuels en partie inférieure des remblayages de tranchées. Elle l'autorise par ailleurs en couche de forme pour des trafics inférieurs à T4 dans le cadre de chantiers expérimentaux. Deux chantiers tests ont déjà été réalisés dans ce sens.

La Métropole de Lyon mène une politique de développement durable. Elle est sensibilisée à l'utilisation dans ses chantiers de matériaux alternatifs depuis plus de 10 ans, dont les matériaux chaulés. En effet, leur utilisation permet une économie circulaire des matériaux en évitant leur mise en stockage définitif.

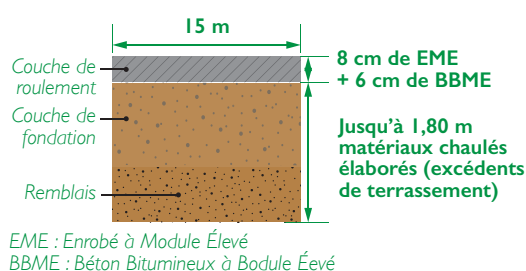
Société du Grand Paris

Description du chantier

- Création d'une plateforme temporaire et d'une rampe d'accès destinées à l'aménagement du chantier de la ligne 15 sud, sur le tronçon entre les gares de Noisy-Champs (93) à Champigny-sur-Marne (94)
- Matériaux chaulés élaborés : limons chaulés dans une installation de recyclage
- Quantités de matériaux chaulés utilisées : 3 000 tonnes



EME : Enrobé à Module Élevé
BBME : Béton Bitumineux à Bodule Élevé



EME : Enrobé à Module Élevé
BBME : Béton Bitumineux à Bodule Élevé



Comment le maître d'ouvrage a intégré les matériaux chaulés élaborés dans son chantier ?

Le marché de travaux affichait la volonté de valoriser les matériaux issus du chantier.

Le matériau chaulé a été proposé par l'entreprise à la maîtrise d'œuvre et à la Société du Grand Paris.

Point de vue du maître d'ouvrage sur l'utilisation des matériaux chaulés élaborés

- Les excédents de terrassement des travaux du Grand Paris représentent un volume astronomique.
- La Société du Grand Paris prône toutes les solutions pouvant valoriser les excédents du chantier. Le chaulage des limons est une des solutions retenues.
- Les caractéristiques techniques des matériaux chaulés ont permis de les mettre en place sur une plateforme temporaire et une rampe d'accès dans des usages en remblais, couche de forme et/ou couches de fondation.
- Les matériaux ont ainsi pu être valorisés au lieu d'être éliminés en installations de stockage de déchets.



Rampe d'accès du chantier (pente de 10 %)



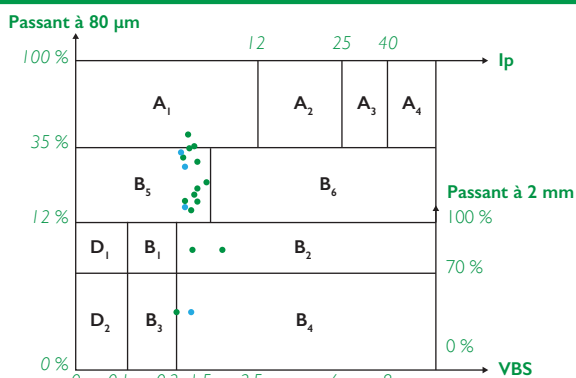
ANNEXES

Synthèse des caractéristiques des matériaux chaulés issus de FTP

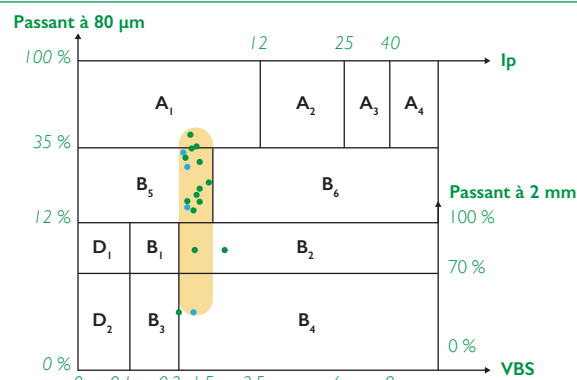
La synthèse des FTP ci-dessous présente les différentes familles GTR des matériaux avant et après chaulage, les pourcentages de chaux des matériaux traités sur les plateformes, les densités et les teneurs en eau à l'OPN, ainsi que les valeurs d'IPI. Cette synthèse a été établie sur la base de la transmission volontaire de FTP par les adhérents du SRBTP et ne reflète donc pas nécessairement la diversité des matériaux que l'on peut retrouver sur l'ensemble du territoire français.

A. Répartition des matériaux selon leur classement suivant la norme NF P 11-300 et GTR

L'étude des Fiches Techniques Produits (FTP) montre, si l'on parle en terme de classement géotechnique (GTR et NF P 11-300), que les matériaux chaulés dans les installations de recyclage appartiennent à plusieurs familles, allant de A1 à B4.



On peut s'apercevoir également que la plupart des matériaux entrent dans une lentille matérialisée en jaune sur le schéma.



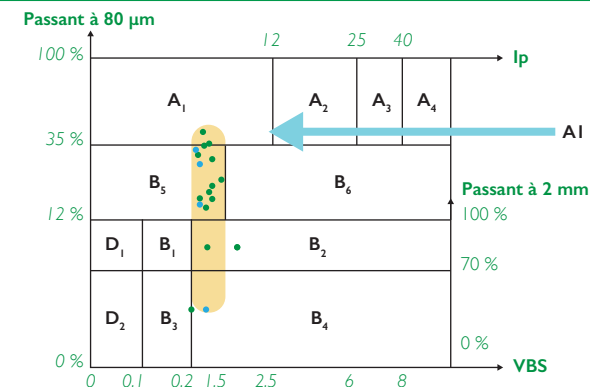
B. Familles de matériaux avant chaulage

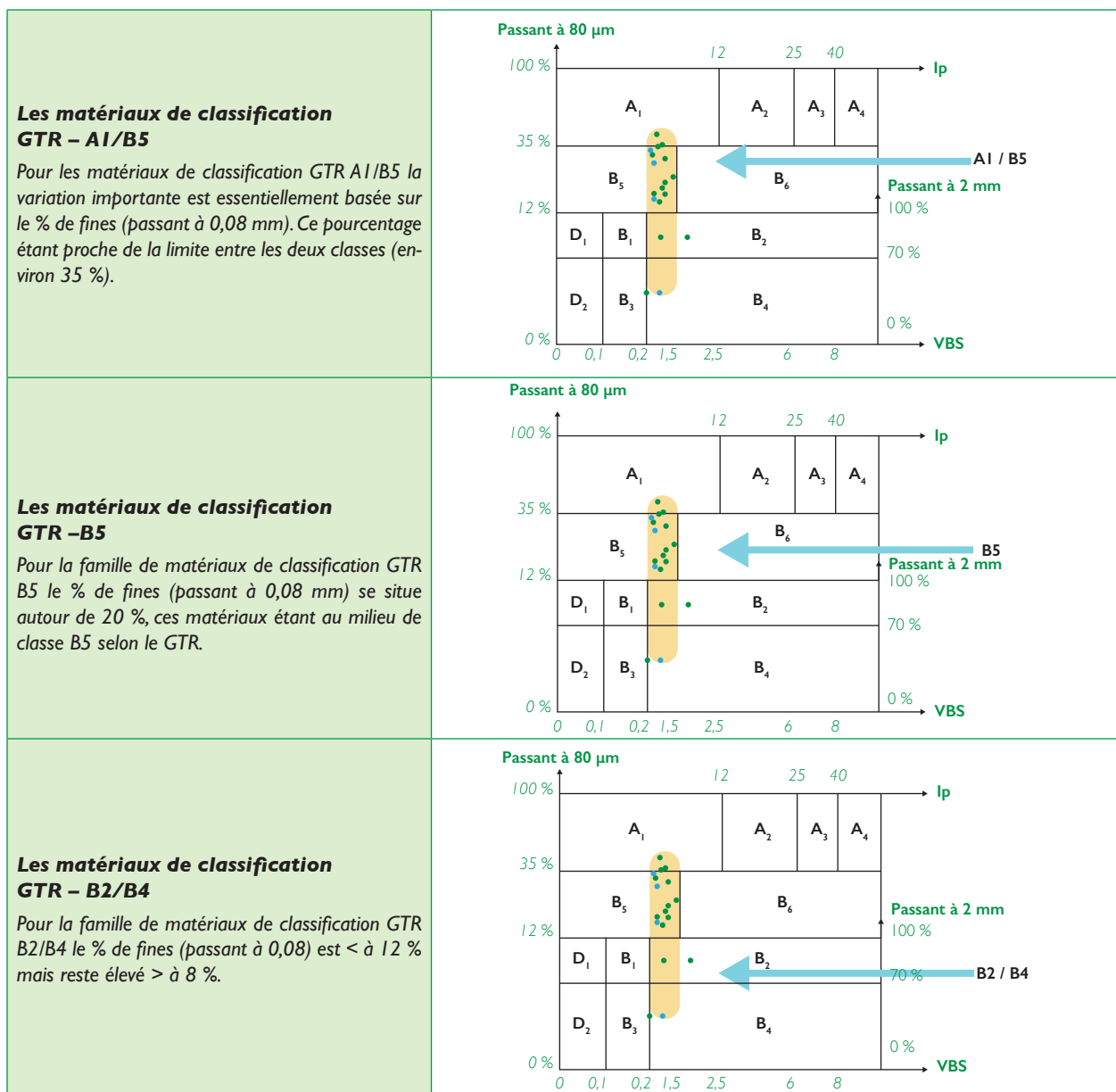
À partir de ces données collectées nous pouvons définir **quatre grandes familles de matériaux avant leur traitement**.

Les paramètres influant sont essentiellement la détermination des pourcentages de fines (passant à 0,08 mm) et les valeurs au bleu (caractérisation de l'argilosité du matériau).

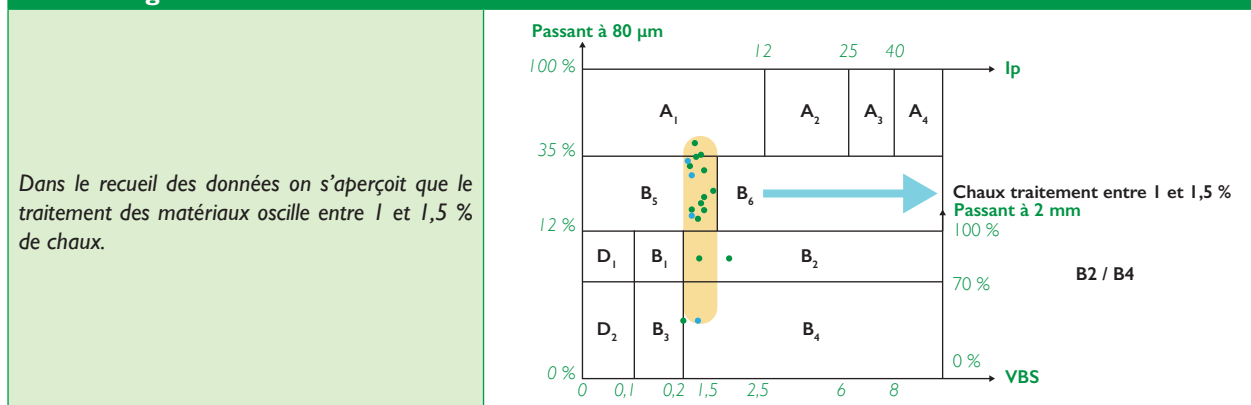
Les matériaux de classification GTR - A1

Les matériaux de classification GTR A1 sont des matériaux fins avec un pourcentage de passant à 0,08 mm > à 35 %. Ces matériaux avec une valeur au bleu pouvant aller jusqu'à 2,5, sont généralement traités avec une valeur de VBS ne dépassant pas 1,5.



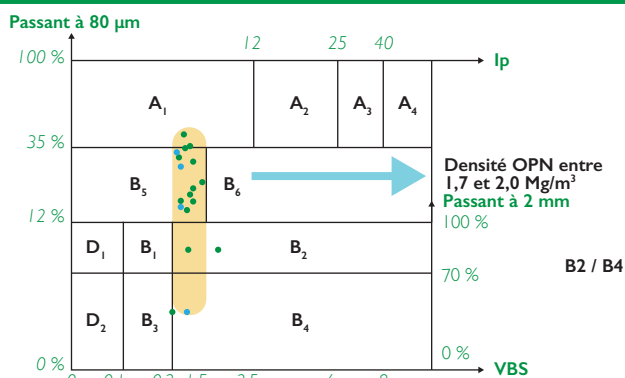


C. Chaulage

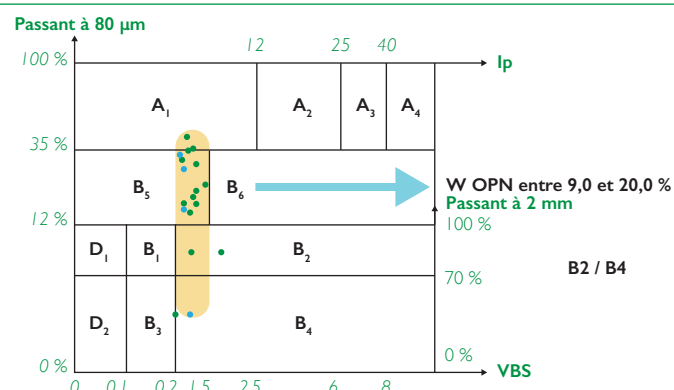


D. Après chaulage

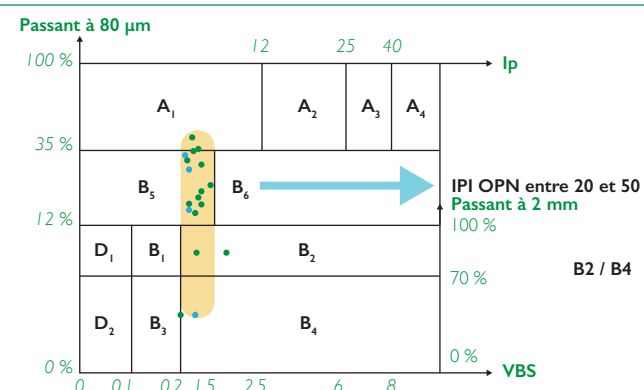
Après chaulage, on constate que la densité sèche de l'Optimum Proctor Normal (OPN) des matériaux traités à la chaux varie de 1,7 à 2,0 Mg/m³.



En ce qui concerne la teneur en eau à l'Optimum Proctor Normal (OPN) on peut noter que les valeurs (exprimées en%) sont comprises entre 9,0 et 20,0 %.



Pour l'Indice Portant Immédiat (IPI) à l'Optimum Proctor Normal (OPN) on peut noter que les valeurs sont comprises entre 20 et 50 (sans unité). La détermination de l'Indice Portant Immédiat (IPI) couplée avec celle de l'indice CBR (Indice de portance californien) après 4 j d'immersion peut permettre de déterminer la non sensibilité à l'eau du matériau chaulé si le rapport CBRimmersion / IPI est ≥ 1 .



E. Usages des matériaux chaulés élaborés recensés dans les FTP

Ce chapitre présente quelques usages de matériaux chaulés recensés sur les FTP, en fonction principalement de l'analyse granulométrique et du pourcentage de fines :

- Les matériaux appartenant à la classe A1 au sens de la norme NF P 11-300, sont la plupart du temps des matériaux fins (ex : granulométrie 0/4, 0/5) servant essentiellement à l'enrobage en tranchée lorsque la compatibilité matériau – réseau est avérée.
- Les matériaux appartenant à la classe A1/B5 au sens de la norme NF P 11-300, sont à la fois des matériaux fins (ex : 0/4, 0/5) et des matériaux graveleux (0/20, 0/30, 0/40) servant à l'enrobage lorsque la compatibilité matériau – réseau est avérée pour les matériaux fins mais également en remblai pour les plus graveleux
- Les matériaux appartenant à la classe B5 au sens de la norme NF P 11-300, sont composés par des matériaux sablo-graveleux (ex : 0/20, 0/30, 0/40) utilisés en remblai de tout type. Dans certaines régions, le maître d'ouvrage a aussi accordé de façon ponctuelle un usage en couche de forme en fonction du contexte et du trafic.
- Les matériaux appartenant à la classe B2/B4 ou C1B2/C1B4 au sens de la norme NF P 11-300, sont utilisés dans les mêmes applications que les matériaux classés B5 avec une granulométrie plus importante 0/80 pour les C1B2/C1B4.



LEXIQUE

Déchets inerte : tout déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine (article R541-8 du code de l'environnement).

Installation de recyclage : installation accueillant des déchets issus de chantier du BTP, d'installation de traitement de déchets du BTP ou de carrières. Les déchets sont élaborés et traités à la chaux pour un usage en génie civil. Ces installations peuvent être soumises à la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement, en fonction des seuils des rubriques concernées (2515 : broyage, concassage [...], 2516 : station de transit de produits minéraux pulvérulents [...], 2517 : station de transit de produit minéraux ou déchets non dangereux inertes [...]).

Matériau chaulé élaboré (MCE) : matériau géologique naturel, éventuellement amendé de fines de recyclage du BTP, élaboré en installation de recyclage par ajout de chaux, en vue de réemploi. Le matériau chaulé élaboré fait l'objet d'une production régulière et d'une fiche produit détaillant ses propriétés.

BIBLIOGRAPHIE

1. Entreprises du BTP : 227.5 millions de tonnes de déchets en 2014, Datalab logement et construction, Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, en charge des relations internationales sur le climat, service de l'observation et des statistiques, 2017, 4 p.
2. Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) – Guide technique, Fascicule 1 : principes généraux (98 p.) et Fascicule 2 : annexe techniques (102 p.), SETRA, LCPC, ISBN : 2-00-054436-3, 2000
3. Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS) – Application à la réalisation des remblais et des couches de forme – Guide technique, SETRA, LCPC, ISBN : 2-7208-3810-1, 2000, 240 p.
4. Guide de conception et de fonctionnement des installations de traitement des déchets du BTP, FFB, Ademe, SRBTP, 2014, 125 p.
4. Graves de valorisation – Graves chaulées, Guide Rhône-Alpes d'utilisation en Travaux Publics, CETE de Lyon, Mars 2013, 27 p.
6. Remblayage des tranchées et réfections des chaussées, guide technique et annexes, SETRA, LCPC, ISBN : 2-11085746-3, 1994, 126 p.
7. Guide pour la réalisation des terrassements des plateformes de bâtiments et d'aires industrielles dans le cas de sols sensibles à l'eau, Syndicat professionnel des terrassiers de France, 2009, 38 p.
8. Enseignements de TerDOUEST - Propositions de compléments au Guide Traitement des Sols, rapport, IDDRIM, 2015, 52 p.
9. Remblayage des tranchées et réfection des chaussées, note d'information I 17, SETRA, 2007, 10 p.
10. Construire des remblais contigus aux ouvrages d'art – Murs de soutènement et culées de pont, note d'information 34, SETRA, 2012, 20 p.



REFERENCES NORMATIVES

1. **NF P 94-056 Sols** : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage, AFNOR, mars 1996, 18 p.
2. **XP CEN ISO/TS 17892-4** : Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 4 : Détermination de la distribution granulométrique des particules, AFNOR, janvier 2018
3. **NF P 94-051 Sols** : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau, AFNOR, mars 1993, 18 p.
4. **NF P 94-068 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, AFNOR, octobre 1998, 10 p.
5. **NF P 94-050 Sols** : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage, AFNOR, septembre 1995, 10 p.
6. **NF EN 932-1** : Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats - Partie 1 : Méthodes d'échantillonnage, AFNOR, décembre 1996, 34 p.
7. **NF EN 932-2** : Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats - Partie 2 : Méthodes de réduction d'un échantillon de laboratoire, AFNOR, août 1999, 22 p.
8. **NF P 11-300** : Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières, AFNOR, septembre 1992, 23 p.
9. **NF P 94-100 Sols** : reconnaissance et essais - Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Essais d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement, AFNOR, août 2015, 18 p.
10. **NF EN 13286-49** : Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 49 : essai de gonflement accéléré pour sol traité à la chaux et/ou avec un liant hydraulique, AFNOR, octobre 2004, 17 p.
11. **NF P 94-093 Sols** : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié, AFNOR, octobre 2014, 30 p.
12. **NF EN 13286-2** : Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 2 : méthodes d'essai de détermination en laboratoire de la masse volumique de référence et de la teneur en eau - Compactage Proctor, AFNOR, décembre 2010
13. **NF P 94-078 Sols** : reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR, AFNOR, mai 1997, 14 p.
14. **NF EN 459-1** : Chaux de construction - Partie 1 : définitions, spécifications et critères de conformité, AFNOR, mars 2012
15. **NF EN 459-2** : Chaux de construction - Partie 2 : méthodes d'essai, AFNOR, août 2012
16. **NF EN 1097-2** : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques de granulats - Partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation, AFNOR, juin 2010, 36 p.
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), AFNOR, août 2011, 18 p.
18. **NF P 98-234-2** : Essais relatifs aux chaussées - Comportement au gel - Partie 2 : essai de gonflement au gel des sols et matériaux granulaires traités ou non de D inférieur ou égal 20 mm, février 1996, 18 p.
19. **XP P94-047 : Sols** : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un matériau - Méthode par calcination, AFNOR, décembre 1998, 10 p.
20. **NF ISO 10390** : Qualité du sol – Détermination du pH, AFNOR, mai 2005, 13 p.
21. **NF EN 1744-1+A1** : Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats - Partie 1 : analyse chimique, AFNOR, février 2014, 62 p.
22. **NF P 94-071-1 : Sols** : reconnaissance et essais - Essai de cisaillement rectiligne à la boîte - Partie 1 : cisaillement direct, AFNOR, août 1994, 18 p.
23. **NF EN 14227-11** : Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 11 : sol traité à la chaux, AFNOR, décembre 2006, 29 p.
24. **NF EN 206/CN** : Béton – Spécification, performance, production et conformité – Complément national à la norme NF EN 206, AFNOR, décembre 2014, 149 p.
25. **NF EN 12457-2** : Caractérisation des déchets - Lixiviation - Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues - Partie 2 : essai en bâchée unique avec un rapport liquide-solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 4 mm



