

es tranchées réalisées pour la pose et la maintenance des réseaux enterrés sous les voiries présentant en proportion relativement importante des défaillances de comportement liées à une insuffisance de compactage des matériaux de remblayage.

Ces dernières années sont apparus sur le marché des matériaux autocompactants se mettant en place dans les tranchées par déversement sans compactage ni vibration et dont la résistance limitée à long terme permet leur réexcavation éventuelle. Ces matériaux comportent un liant hydraulique - le plus souvent du ciment - et sont généralement élaborés dans les centrales de béton prêt à l'emploi.

Ce document établi par un groupe de travail fait le point des connaissances actuelles sur les caractéristiques et les utilisations de ces matériaux.

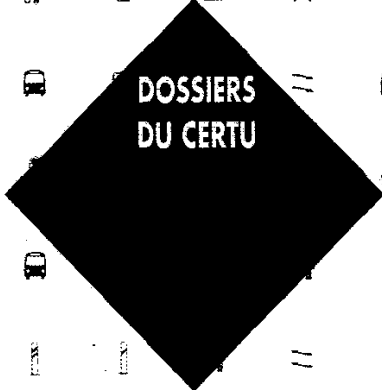
The development of self-compacting materials for the backfilling of trenches led us to assess the state of knowledge regarding both their characteristics and their potential uses.

These materials are employed by means of direct pouring into trenches without any prior compacting or vibration; moreover, they possess a limited level of resistance which enables their subsequent re-excavation. Use of such materials should make it possible to improve the quality of work carried out on utility networks located beneath roadways, which often result in behavioral defects due to an insufficient compaction of fill materials.

This document is intended for managers of road systems and utility networks as a means of informing them about these materials, which will become more heavily utilized by contractors as a replacement for more conventional fill materials.

El desarrollo de los materiales autocompactantes para el relleno de las zanjas nos ha llevado a establecer un balance sobre el conocimiento de sus características y de sus posibilidades efectivas de utilización. Estos materiales se utilizan mediante vertido directo en las zanjas sin compactado ni vibración y presentan una resistencia limitada que permite su eventual reexcavación. Su empleo debería permitir mejorar la calidad de las obras de las redes enterradas bajo las vías que a menudo presentan fallos de comportamiento vinculados a una insuficiencia de compactado de los materiales de relleno.

Este documento se encuentra dirigido a los responsables de la gestión de la vialidad y de las redes con el objetivo de informarles sobre estos materiales, que las empresas les propondrán cada vez más como reemplazo de los materiales clásicos de relleno.



DOSSIERS
DU CERTU

Remblayage des tranchées

Utilisation de matériaux autocompactants



Certu

Résumé

● **Les matériaux autocompactants** utilisés en France, pour le remblayage des tranchées, sont des mélanges de matériaux divers (sables, gravillons < 20 mm, cendres volantes, fillers, etc.), de ciment ou d'un liant hydraulique en faible quantité (< 100 kg par m³), d'eau et éventuellement d'un ou plusieurs adjuvants.

Ils sont appelés **autocompactants** parce qu'ils se mettent en place naturellement dans la tranchée par déversement, sans compactage ni vibration. Ils développent un raidissement en quelques heures, et présentent une résistance à long terme limitée, ce qui devrait les rendre facilement réexcavables.

Deux types de produits sont proposés sur le marché : les produits dits essorables qui utilisent le principe des remblais hydrauliques et les produits dont la capacité portante est obtenue par la prise et le durcissement du liant.

Cette note relate l'historique, définit le domaine d'application, décrit les différents types de produits actuellement connus et la manière de les caractériser, de les fabriquer, de les transporter et de les mettre en oeuvre et propose quelques spécifications à court et à long terme. Elle dresse également un constat des chantiers réalisés, en France, depuis ces dernières années, établit un bilan des avantages et des inconvénients - de la technique et enfin présente les études en cours pour caractériser et contrôler les produits, les problèmes que l'on se pose encore et les perspectives d'évolution.

Ce document a été rédigé par :
Monsieur G. Bonnet du CERTU,
Messieurs A. Cavaldà et A. Quibel du CETE Normandie Centre.

Sommaire

1 - Introduction	7	7 - Avantages, contraintes et limites d'emploi	26
2 - Description des produits connus	8	7.1 - Avantages	26
3 - Constatations sur les études et les chantiers réalisés	10	7.2 - Contraintes, limites d'emploi	28
3.1 - L'expérience étrangère	10	8 - Suivi possible de la qualité	29
3.2 - L'expérience française	11	8.1 - Au niveau du fournisseur	29
4 - Utilisation	14	8.2 - Au niveau de l'entreprise de mise en œuvre	29
4.1 - Applications potentielles	14	8.3 - Réception des travaux par le maître d'œuvre	30
4.2 - Applications possibles dans l'immédiat	16	9 - Études en cours, perspectives d'évolution	31
5 - Etat de la technique	17	9.1 - Essais ou études en cours, problèmes que l'on se pose encore	31
5.1 - Formulation	17	9.2 - Perspectives d'évolution	33
5.2 - Fabrication et transport	17		
5.3 - Mise en œuvre	18		
6 - Identification des produits	20		
6.1 - Données générales sur le produit	20		
6.2 - Description du produit	20		
6.3 - Caractéristiques du produit à l'état frais	21		
6.4 - Caractéristiques du matériau durci après 28 jours	21		
6.5 - Caractéristiques en place	23		
6.6 - Conseil de mise en œuvre	24		
6.7 - Chantiers de référence	25		

1. Introduction

Les tranchées remblayées classiquement présentent encore en proportion importante une défaillance de comportement, principalement liée à une insuffisance de compactage au moment de leur réalisation. Par ailleurs, la fréquence d'interventions sur les réseaux existants s'accroît, et amplifie les désordres observés sur les chaussées.

Ces défaillances sont dues à une application insuffisante, soit par impossibilité, soit par négligence, des règles de l'art décrites dans la norme NF P 98.331 et dans le "**Guide technique SETRA-LCPC de remblayage des tranchées et réparation des chaussées**" édité en mai 1994.

Un autre choix de matériau et de méthode de remblayage évoqué par ce guide est le recours à des produits nouveaux à base de liants hydrauliques (remplissages fluides) que nous appelons ici "matériaux autocompactants". Ces matériaux faiblement dosés en ciment **ne nécessitent pas de compactage ni de vibration** lors de la mise en œuvre et sont aussi **réexcavables à long terme**.

Des études et des chantiers ont été réalisés depuis 3 à 4 ans en France en nombre suffisant pour justifier d'un premier bilan. L'objectif est d'organiser le développement rationnel de cette technique nouvelle pour proposer une alternative aux maîtres d'œuvre. À terme, le guide technique déjà cité serait complété en développant les propositions de cette présente note d'information.

Un groupe de travail composé d'environ 50 personnes représentant l'administration, les services techniques des villes, les concessionnaires, les fournisseurs de matériaux et les entreprises, sensibilisées par cette technique, a été constitué sous l'égide du Ministère de l'Équipement (CERTU-SETRA) et a fonctionné dans un esprit de **club d'échanges d'expériences**. Les échanges au sein de ce groupe ont permis de rédiger cette première note d'information.

2. Description des produits connus

La plupart des centrales de béton prêt à l'emploi, quelques entreprises de TP ainsi que E.D.F. proposent un ou plusieurs matériaux autocompactants - appelés "produits" dans la suite du texte - comportant de 25 à 100 kg par m³ d'un liant hydraulique, généralement du ciment.

On distingue actuellement deux types de ces produits :

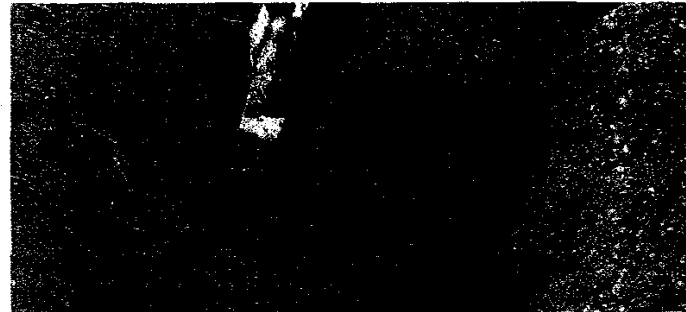
1. **Les produits essorables** qui utilisent le principe des remblais hydrauliques : la fluidité nécessaire à la mise en œuvre est due à leur teneur en eau élevée. Leur capacité portante est obtenue essentiellement par l'évacuation d'une forte partie de cette eau (40 à 50%) dans les matériaux encaissants et par la prise et le durcissement du liant.

2. **Les produits non essorables** dont la fluidité est obtenue par l'utilisation d'adjuvants - parfois spécifiques - et la capacité portante par la prise et le durcissement du liant.

Le choix du type de produit nécessite donc l'identification préalable des matériaux encaissants de la tranchée, les produits essorables ne sont pas utilisables dans des roches massives non fissurées, dans des argiles ou des limons et sables argileux, sauf à établir un dispositif permettant l'évacuation de l'eau.

Ces deux types de produits se répartissent en deux classes :

- ceux dont la granulométrie est inférieure à 6,3 mm, produits constitués de sables et/ou de cendres, de fillers...



- ceux qui comportent des gravillons jusqu'à 20 mm.



Nota : la teneur en eau globale étant liée à la composition granulométrique, celle des produits essorables n'est pas, à fluidité égale, forcément plus élevée que celle des produits non essorables

3. Constatations sur les études et les chantiers réalisés

3.1 - L'expérience étrangère

Le Canada utilise ces matériaux autocompactants en remblai sous chaussée et en assises de chaussée sous couche de roulement dans les lotissements, depuis plusieurs années. Il s'agit de produits essorables ayant un dosage en ciment très faible, une tenue au gel satisfaisante et des résistances moyennes en compression à 28 jours comprises entre 0,3 et 1 MPa.

Les Etats-Unis utilisent des mélanges dosés généralement en ciment entre 30 et 60 kg/m³, ayant des résistances en compression à long terme de 0,35 à 2 MPa, appelés "Controlled Low Strength Materials (C.L.S.M.)". Les ingénieurs américains ont aussi étudié des "Low Density-Controlled Low Strength Materials (L.D.- C.L.S.M.)", matériaux autocompactants à faible densité à base de mousse de béton.

La Grande-Bretagne utilise des matériaux autocompactants qui sont des mousses de béton (densités comprises entre 0,6 et 2 et Rc 28 j variant de 1 à 18 MPa) en remblais de tranchées (gaz et eau), en autorisant l'emploi sur certaines catégories de chaussées, jusqu'à 10 cm sous la surface (remblai et assises), lorsque Rc 28 j est supérieur à 2 MPa.

3.2 - L'expérience française

L'exploitation des rapports d'étude, des fiches d'enquête remplies par les fournisseurs et des comptes rendus de suivi de chantier, a permis les observations ci-après :

- D'une manière générale, on observe peu de tassement (< 10mm), et de retrait.
- Certains produits (matériaux essorables 0/20) ont donné de mauvais résultats lors du remblayage de tranchées peu profondes (< 0,30 m).
- Les résistances en compression à 28 jours varient selon les produits de 0,3 à 2 MPa. Les produits à fort dosage en ciment (> 100 kg/m³) présentent les performances mécaniques les plus élevées. Il sera donc nécessaire d'éviter tout surdosage si l'on veut être sûr de pouvoir réexcaver.
- Des essais d'imbibition / dessiccation réalisés sur certains produits ont montré un bon comportement, à savoir que l'on n'a pas noté de baisse de résistance. Un premier test à des essais de gel/dégel a montré également des performances correctes.
- Selon les sources précitées des essais à la plaque ont donné les résultats suivants :
 - à 24 heures, les modules EV2 varient de 70 à 300 MPa,
 - à 28 jours, les modules EV2 varient de 120 à 400 MPa,ces modules étant mesurés sur des remblayages de tranchées de dimensions suffisantes.
- Les déflexions, mesurées in situ, varient de 10/100 à 80/100 mm à court ou à long terme selon les tranchées et le type de produit. Certaines tranchées se situent dans une gamme 10/100 à 30/100 mm sans apparaître, à l'usage, comme un "point dur" dans des chaussées souples. D'autres présentent des déflexions de 40/100 à 80/100 mm homogènes avec celles de la chaussée environnante.

- Les cendres volantes employées dans les matériaux autocompactants cités dans cette note d'information, sont des cendres volantes silico-alumineuses.
- Lorsque le produit comporte des cendres volantes silico-alumineuses (CV), son durcissement est plus lent et plus long. Cet effet peut se traduire par un gain de résistance d'au moins 15 à 25% entre 28 jours et 1 an. On peut donc accepter d'avoir avec les CV des résistances plus faibles à 28 jours. Certains adjuvants ne sont pas compatibles avec les cendres volantes.
- Le délai de restitution à la circulation piétonne varie de 1 à 4 heures pour la majorité des produits.
- Le délai de restitution à la circulation des véhicules et/ou mise en œuvre de la couche de roulement est plus différencié. Quelques produits autorisent un délai court, 4 à 8 heures, mais la plupart des produits demande un délai d'au moins 24 heures.
- La détermination du délai de restitution à la circulation peut être mesurée avec des pénétromètres dynamiques (PDG 1000, PANDA...). Un certain nombre de produits présente un enfoncement à 24 heures de 10 mm par coup, ou bien un niveau de résistance à la pénétration supérieur à 5 MPa.
- L'utilisation de produits à faible granulométrie - sables par exemple - n'est pas, en principe, favorable à un délai de restitution rapide.
- Par température basse, ces produits mettent plus de temps à faire prise et à durcir ; dans ce cas il faut diminuer le dosage en eau ou mettre plus d'adjuvant, en préservant toutefois un coulage facile et la qualité de l'enrobage.
- Les tentatives de prélèvement d'échantillons par carottage ont été vaines (à une exception près), la cohésion de ces matériaux étant insuffisante.
- Une technique consiste à remblayer la tranchée jusqu'au niveau de l'ancienne couche de roulement, à rétablir la circulation ($\leq T3$) provisoirement dès que possible, et à venir ensuite réexcaver sur

quelques centimètres pour mettre en œuvre la nouvelle couche de roulement. Ceci n'est possible qu'avec des matériaux autocompactants qui peuvent résister à l'abrasion de cette circulation provisoire.

- Dans un encaissant très perméable les tranchées remblayées avec des produits essorables peuvent être très rapidement restituées à la circulation piétonne. En revanche, il a été observé un allongement important des délais de restitution à la circulation lorsque les matériaux encaissants ne permettent pas un essorage rapide.
- Dans un environnement perméable on a pu mesurer que la teneur en eau d'un produit essorable chutait de 50% en 1,5 heures (chute de la teneur en eau de 14% à 7%). Ceci témoigne de la nécessité d'évacuer du produit une quantité importante d'eau sous un délai bref. Dans un environnement imperméable, le lit de pose en sable et la couche d'enrobage éventuelle peuvent ne pas être suffisants pour évacuer toute cette eau. Le tableau ci-après donne une échelle indicative de perméabilité des terrains en place :

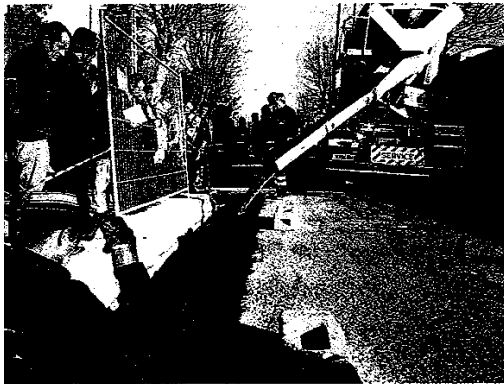
Perméabilité en m/s	10^{-12} à 10^{-10}	10^{-13} à 10^{-9}	10^{-9} à 10^{-5}	10^{-5} à 10^{-3}	10^{-3} à 1
Nature des matériaux	Roches massives non fissurées (R6, R4, R3...)	Argiles (...A4, A3...B6...)	Limons et sables argileux (...A1, A2...B5...)	Sables (...B4...D1...)	Graviers, éboulis rocheux, galets (...B3...D3...)

4. Utilisations

4.1 - Applications potentielles

Les tranchées étroites et encombrées (croisements, empilement de réseaux) semblent un lieu d'emploi privilégié car il y est difficile, voire impossible, de réaliser un compactage correct. Mais a priori toutes les tranchées constituent un marché potentiel : tranchées larges, profondes, blindées...

Tous les types de réseaux sont concernés (EDF, GDF, réseaux d'eaux pluviales, France Télécom, etc.) sachant que chaque concessionnaire présentera des spécifications particulières.

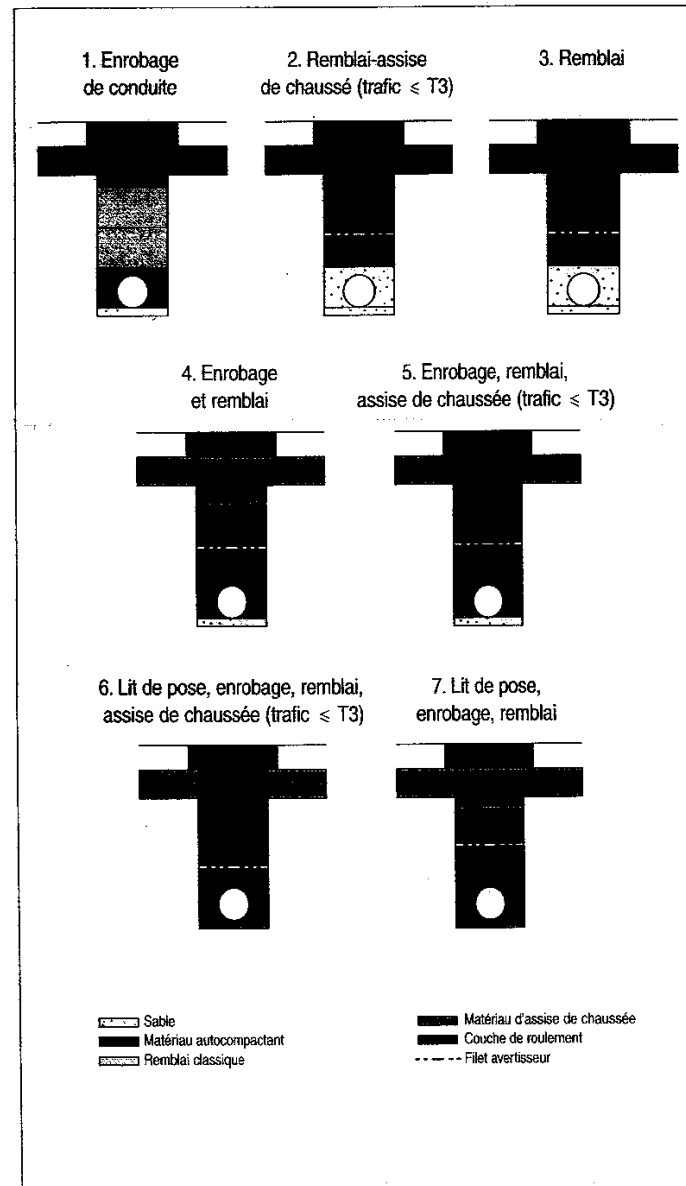


Sur le plan fonctionnel, plusieurs usages ont été définis :

- matériau autocompactant d'enrobage,
- matériau autocompactant de remblai,
- matériau autocompactant pour assises de chaussée.

Ils permettent d'inventorier, comme l'indiquent les schémas qui suivent, les divers cas susceptibles d'être rencontrés.

À titre indicatif, il a été utilisé en France, en 1997, environ 50 000 m³ de matériaux autocompactants. Pour des raisons pratiques (une seule couche à mettre en œuvre) et économiques (rendement du chantier) les emplois les plus fréquents ont été les cas n° 6 et 2, avec une certaine prise de risques concernant la tenue à terme sous trafic. À ce jour, le comportement de ces tranchées paraît satisfaisant.



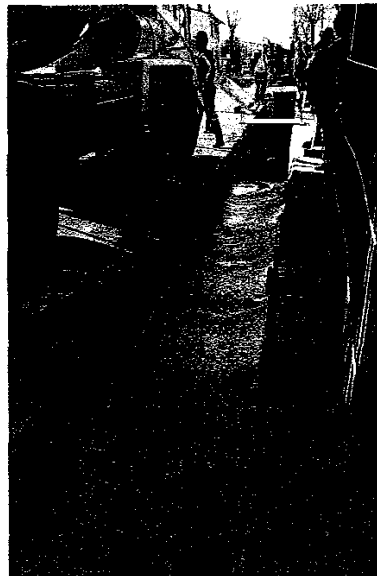
4.2 - Applications possibles dans l'immédiat

Les produits actuellement proposés sur le marché, essorables ou non essorables, à base de sables, de cendres volantes ou de granulats 0/20, sont utilisables en matériau d'enrobage et de remblai. Pour être réexcavables, la résistance en compression à 28 jours devra être inférieure ou égale à 2 MPa et ne pas évoluer fortement ensuite.

Dans l'état actuel de nos connaissances, l'utilisation en matériau d'assise de produits dont la résistance en compression à 28 jours est de l'ordre de 2 MPa sera réservée à des chaussées supportant un trafic inférieur ou égal au T3.

Il conviendra toutefois de tenir compte pour le choix de cette technique de remblayage et des produits :

- des capacités d'essorage du matériau encaissant,
- de la géométrie de la tranchée : dimensions, pente,
- des contraintes locales pour les délais de restitution à la circulation des piétons et des véhicules,
- des spécifications propres à chaque concessionnaire, par exemple EDF a des exigences sur la résistivité thermique, GDF sur la perméabilité à l'air...



5. Etat de la technique

5.1 - Formulation

Chaque producteur a sa propre méthodologie pour déterminer la composition de ses produits.

Pour une appellation de produit donnée, les différences de caractéristiques entre les constituants - granulats, liants, ajouts, adjuvants - des diverses unités de fabrication conduisent à des ajustements dans la formulation pour maintenir les propriétés annoncées par le producteur.

5.2 - Fabrication et transport

Ces produits sont fabriqués par des centrales assurant le dosage des constituants et leur malaxage. Les dispositifs de dosage peuvent être pondéraux ou volumétriques, les malaxeurs continus ou discontinus.

Ces produits sont, à ce jour, le plus souvent fabriqués dans des centrales de béton prêt à l'emploi. Les dosages en liant étant faibles le matériel de dosage doit permettre une précision correcte.

L'utilisation quasi générale d'adjuvants demande un malaxage efficace en centrale.

Le transport se fait en camion malaxeur. Certains adjuvants devant être introduits dans le camion malaxeur à l'arrivée sur chantier, un malaxage à grande vitesse de rotation de la cuve doit donc être effectué après leur introduction pendant 3 à 5 minutes.

Les délais autorisés entre fabrication et mise en œuvre devront être précisés sur la fiche produit.

Compte tenu de leur fluidité, il existe des risques de pertes de produit pendant le transport sur des parcours accidentés.

5.3 - Mise en œuvre

Comme pour les bétons traditionnels, ces produits ne doivent pas être mis en œuvre - sauf dispositions spéciales - par des températures inférieures à + 5° C.

En plus du chauffeur du camion malaxeur, la mise en œuvre nécessite un ouvrier qui guide la goulotte de déversement dans la tranchée et qui égalise éventuellement le niveau du produit avec une raclette à manche ou un râteau.



Le matériau est versé directement depuis la goulotte dans la tranchée à l'avancement du camion. Pour éviter la ségrégation - en particulier

pour les produits essorables à granulométrie discontinue - il faut limiter au maximum la hauteur de chute depuis la goulotte, de plus, si la zone de pose en sable est conservée, une hauteur de chute trop importante peut provoquer l'entraînement de celle-ci. Également on évitera le déversement direct sur les

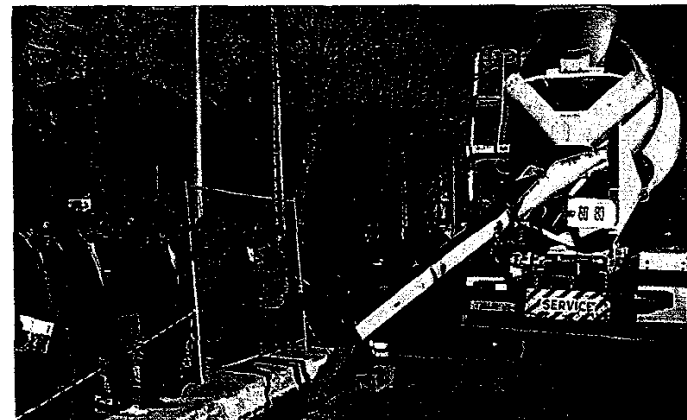
canalisations pour éviter de les détériorer.

Les canalisations ainsi que les filets avertisseurs devront être sérieusement arrimés pour ne pas remonter dans le matériau sous la poussée hydrostatique. On utilisera pour ce faire des étriers métalliques, des plots en béton, des calages horizontaux...

Ces matériaux très fluides peuvent poser des problèmes pour des pentes supérieures à 10%.

La mise en œuvre des produits non essorables peut être réalisée en présence d'une faible quantité d'eau dans la fouille : flaques, couches minces, en prenant des précautions pour ne pas les délayer.

Pour les produits essorables, la présence d'eau dans la tranchée ainsi que l'imperméabilité de l'encalssant peuvent augmenter sensiblement les délais de restitution à la circulation.



6. Identification des produits

Le modèle de fiche-produit proposé en annexe contient les renseignements utiles pour décider de l'emploi d'un matériau autocompactant en fonction du ou des usages souhaités.

Elle est renseignée par le producteur. Les caractéristiques et propriétés sont définies autour d'un intervalle de variation. Le producteur garantit la conformité d'un produit livré, par rapport aux tolérances qu'il a lui-même fixées en fonction des sources de variations possibles. Elle comporte les rubriques ci-après.

6.1 - Données générales sur le produit

Cette partie permet d'identifier le type de matériau (essorable ou non essorable) de préciser ses usages (enrobage, remblai, assise de chaussée), et indique les caractéristiques de perméabilité nécessaires pour le sol encaissant.

6.2 - Description du produit

Le fournisseur indique tous les constituants du matériau et les intervalles de variation admissibles de leur dosage. Il n'a pas l'obligation d'indiquer sur cette fiche la formulation exacte. Si l'utilisation comme matériau d'assise de chaussée est envisagée, les caractéristiques des granulats devront être précisées et conformes à une utilisation routière.

6.3 - Caractéristiques du produit à l'état frais

Ce sont les éléments nécessaires aux contrôles de réception du matériau sur chantier. **Ces résultats d'essais, réalisés par le fournisseur lors des études en laboratoire**, permettront ensuite sur les chantiers de détecter des anomalies de fabrication.

- **Fluidité** : mesurée par affaissement et/ou par étalement au cône d'ABRAMS. Cet essai, réalisé sur produit frais en sortie de goulotte, qualifie l'écoulement du produit et sa capacité à épouser les aspérités des parois de la tranchée. L'indication de la pente longitudinale maxi est liée à ce paramètre pour éviter les mises en œuvre impossibles à contenir.
- **Masse volumique apparente humide** du produit à l'état frais pour les matériaux non essorables qui est un indicateur de conformité.
- **Stabilité** : mesure du pourcentage d'eau qui remonte à la surface et qui s'évapore pour les matériaux non essorables en vue de détecter une susceptibilité à la ségrégation.
- **Restitution à la circulation piétonne** : nous avons considéré que la circulation des piétons pouvait être autorisée lorsque l'empreinte d'une chaussure était à peine visible ce qui correspond à un enfoncement mesuré au boulet de KELLY inférieur ou égal à 2,5 cm.

6.4 - Caractéristiques du matériau durci après 28 jours

■ Pour la qualité du remblai

- Masse volumique apparente à 28 jours mesurée sur éprouvettes.
- Résistance en compression à 28 jours : la résistance en compression

à 28 jours est déterminante pour estimer la "réexcavabilité" du matériau. Celle-ci est définie en 3 classes :

Rc28j	< 0,7MPa	0,7 à 2 MPa	> 2MPa
Réexcavabilité	Facile	Moyennement facile	Difficile
	Manuelle	Manuelle ou mécanisation légère	Mécanisation

- Module d'élasticité en compression à 28 jours : le module d'élasticité permet d'évaluer la possibilité d'utilisation du produit en couche d'assise de chaussée.

- Porosité ouverte : cet essai permet d'estimer la résistance au gel/dégel des produits, les résultats obtenus sont à rapprocher des caractéristiques de perméabilité à l'air et à l'eau.

- Résistance en compression à 90 jours : l'accroissement de résistance entre 28 jours et 90 jours permet de mesurer l'effet pouzzolanique de certains constituants utilisés ; il faut que la réexcavabilité soit conservée dans le temps donc que les limites de résistance fixées pour 28 jours soient à peine dépassées.

- Perméabilité à l'eau : la connaissance de cette caractéristique peut être utile pour éviter de forts contrastes avec la perméabilité de l'encaissant et éviter un effet de drainage entraînant une consolidation de l'environnement immédiat en cas de nappe phréatique peu profonde. Cette perméabilité à l'eau peut être définie en 3 classes :

	Perméable	Moyennement perméable	Peu perméable
Perméabilité en m/s	> 10 ⁻⁵	10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁷	< 10 ⁻⁷

■ **Spécifications des concessionnaires**

(liste non exhaustive, certaines valeurs sont encore à préciser)

- Perméabilité à l'air : cette caractéristique est exigée pour les réseaux comme le gaz pour permettre la détection en surface de fuites éventuelles.
- Résistivité thermique : cette caractéristique est exigée par EDF pour l'enrobage des câbles électriques HTA
 - sur matériau à 50% de teneur en eau < 1 kelvin-mètre/watt,
 - sur matériau après séchage total < 2,5 kelvins-mètres/watt.
- pH : à définir par les concessionnaires.
- Agressivité chimique : à définir par les concessionnaires.

6.5 - Caractéristiques en place

Cette partie de la fiche-produit présente les caractéristiques en place qu'il est normal d'attendre du matériau sous réserve de certaines contraintes indiquées à respecter. Elles sont issues de la connaissance qu'a le producteur du comportement de son matériau, au moyen de mesures effectuées lors de planche(s) d'essai ayant comporté des contrôles et un suivi ultérieur.

Ces caractéristiques ont été obtenues sur une (des) tranchée(s) dont on précisera la géométrie (longueur, largeur, profondeur), la pente, la perméabilité de l'encaissant, les conditions climatiques, éventuellement le revêtement réalisé et toutes autres conditions de mise en œuvre. Elles concernent :

■ **Les délais pour restitution à la circulation**

Pour les piétons, un enfoncement du boulet de KELLY mesuré en place inférieur ou égal à 2,5 cm reste le critère de restitution.

Pour les véhicules, il a été admis que la restitution à leur circulation pouvait l'être lorsque les déformations plastiques en surface sous un essieu de 13 tonnes étaient inférieures à 1 cm. Ce critère a été relié à des résultats de mesure à l'aide de pénétromètres dynamiques et à des résultats d'essai de portance à la plaque présentés dans le tableau ci-après. Pour les véhicules, nous avons tenu compte également de l'intensité du trafic.

	Essais	Caractéristiques requises
Restitution piétons	Boulet de KELLY	Enfoncement $\leq 2,5$ cm
Restitution trafic ≤ 14 (une condition au choix)	PDG 1000 sur 50 cm supérieurs PANDA sur 50 cm supérieurs Essai de plaque	Enfoncement ≤ 60 mm/coup $R_p \geq 2$ MPa EV2 > 35 MPa \Rightarrow EV = 17 MPa
Restitution trafic ≤ 13 (une condition au choix)	PDG 1000 sur 50 cm supérieurs PANDA sur 50 cm supérieurs Essai de plaque	Enfoncement ≤ 15 mm/coup $R_p \geq 8$ MPa EV2 > 50 MPa

■ Le comportement à long terme

- Essais de plaque : module EV2 à 28 jours.
- Déflexion à 28 jours : le module ou la déflexion à 28 jours situe la rigidité du massif de produit. Ces valeurs permettent d'éviter de créer des points durs dans des chaussées en place relativement déformables.

6.6 - Conseil de mise en œuvre

L'épaisseur et la nature du lit de pose, la perméabilité de l'encaissant, la température extérieure, le délai tolérable entre fabrication et mise en œuvre, le temps de malaxage en toupie avant déversement, la

penne longitudinale maximale, la protection superficielle, la préparation de la surface avant mise en œuvre de la couche de revêtement, etc. sont des contraintes "additionnelles" à respecter.

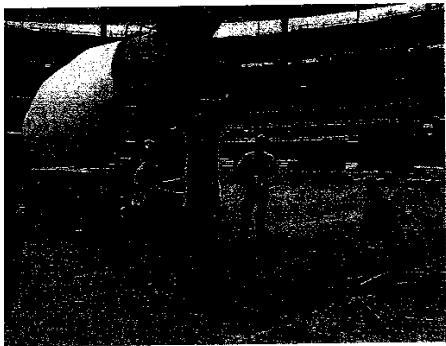
6.7 - Chantiers de référence

La fiche peut être utilement complétée par la citation des chantiers déjà réalisés, et qui ont bénéficié de mesures et d'un suivi, dès l'origine, des caractéristiques énoncées dans les diverses rubriques précédentes.

Chaque chantier est identifié par son année, sa localisation (site, département), le trafic supporté, son implantation par rapport au trafic, le type de travaux (usage cf. § 4.1), la quantité mise en œuvre et par qui, le maître d'œuvre et le laboratoire de contrôle.

7. Avantages, contraintes et limites d'emploi

7.1 - Avantages



- Matériau étudié pour la fonction remblayage de tranchées.

- Matériau à caractéristiques régulières car il est fabriqué en centrale assurant les dosages des constituants et le malaxage.

- Matériau facilement disponible car proposé par de nombreuses centrales de béton prêt à l'emploi qui sont bien réparties sur le territoire.

- Livraison et mise en place aisées : l'utilisation de camions malaxeurs supprime les stockages intermédiaires entre fabrication et mise en œuvre et offre la possibilité de mise en place directe par goulotte, transporteur, pompe ou godet suivant l'emplacement du vide à remplir. Le produit autonivelant ne nécessite ni réglage fin, ni compactage.

- Gains de productivité possibles :

- Chantier rapide : sa durée est globalement réduite.

- La main d'œuvre est moins nombreuse et la sécurité des ouvriers, qui n'ont plus à descendre dans les fouilles pour le remblayage, est améliorée.

- Réduction du matériel : la mise en œuvre se fait sans chargeur ni compacteur.

- Permet la réalisation de tranchées plus étroites que ce qu'impose parfois l'emploi des matériels de compactage, en particulier au droit des canalisations.

- Pas de tassement dans le temps : capacité de portance élevée sans défaut de compactage même pour des tranchées étroites et encombrées, par rapport à celle d'un remblai granulaire, avec une perméabilité réduite et donc une meilleure résistance à l'érosion. L'absence de tassement permet une réparation de chaussée définitive dès que le matériau autocompactant est suffisamment "raidi" donc une remise définitive en circulation plus rapide.

- Réexcavable : pour des résistances en compression à 28 jours de 0,3 à 0,7 MPa, la réexcavation est facile avec les outils conventionnels.



- Pas de contrôle de compacité pendant le chantier.

- Pas de stockage de matériau de remblai sur le site, ni de remblai résiduel à évacuer.

- Elimination des nuisances liées aux bruits et aux vibrations provoquées par le compactage mécanique.

- Peut permettre la construction par temps froid : l'utilisation pour ces produits de la même méthode de réchauffage que pour le béton prêt à l'emploi est possible.

- La présence d'une faible quantité d'eau dans la tranchée n'est pas un obstacle à son remblayage avec des produits non essorables sous réserve d'approvisionner judicieusement le matériau pour ne pas le délayer.

7.2 - Contraintes, limites d'emploi

- Nécessite un matériel de fabrication performant.
- Le transport par camion malaxeur est obligatoire.
- La livraison par petites quantités - très inférieures à la capacité d'un camion malaxeur - n'est pas rationnelle (sauf à regrouper les petits chantiers).
- Ne permet pas le réemploi direct des matériaux de déblai provenant de la tranchée qui doivent être évacués.
- Risque de ségrégation important en cas d'excès d'eau pour accroître la fluidité.
- Après remblayage un certain délai est nécessaire pour obtenir une portance permettant la circulation piétonne (et la sécurité des animaux errants). Des essais seront nécessaires avant restitution à la circulation piétonne et automobile.
- Les propriétés à long terme ne sont pas encore déterminées avec précision. Les études sont en cours.
- Les matériaux essorables ne sont pas utilisables si le drainage de l'eau est impossible dans la fouille.
- Il est nécessaire d'amarrer les conduites contre la poussée hydrostatique exercée par le matériau.
- La pose du filet avertisseur est délicate.
- La mise en œuvre dans le cas de pentes élevées (supérieures à 10%) demandera des dispositions spéciales ou sera même impossible.

8. Suivi possible de la qualité

8.1 - Au niveau du fournisseur

Contrôle interne sur : - le matériel de fabrication,
- les constituants du produit.

8.2 - Au niveau de l'entreprise de mise en œuvre

Pour vérifier la conformité à la fiche produit.

■ À la livraison

- Vérification du bon de livraison.
- Sur des prélèvements en sortie de camion :
 - mesure de la fluidité : affaissement au cône d'Abrams ou essai d'étalement,
 - et/ou mesure de la masse volumique apparente humide (produits non essorables),
 - mesure éventuelle de la teneur en eau.

■ À court terme sur le remblai réalisé

- Portance au boulet de KELLY : sécurité et circulation des piétons.
- Portance au PANDA, au PDG 1000, ou pénétromètres similaires : restitution à la circulation automobile.



- Et/ou essais de plaque : restitution à la circulation automobile.

■ Performances à long terme

- Rc 28 j et masse volumique apparente sèche sur éprouvettes prélevées à la mise en œuvre.

- Mesures de déflexion et/ou essais de plaque.

- Essais de réexcavation.

8.3 - Réception des travaux par le maître d'œuvre

- Mesures de déflexion ou essais de plaque.

- Essais de réexcavation.

- Mesures de tassement éventuel.

Il est à noter que la plupart des modes opératoires sont en cours d'étude et seront définis et publiés dans un document final.

9. Études en cours, perspectives d'évolution

9.1 - Essais ou études en cours, problèmes que l'on se pose encore

Parmi les essais, il y a ceux à long terme, à 90 jours et à 1 an, qui permettront de vérifier que les performances (Rc) sont effectivement assez proches de celles à 28 jours (au moins pour les granulats naturels), qu'elles sont limitées et contrôlées, et que par conséquent, le produit est bien réexcavable. Cela, sur les différents produits dont l'examen a donné lieu à la première action concertée et coordonnée selon un mode opératoire défini en commun.

Une recherche est menée sur la mise au point d'une méthodologie d'essais en laboratoire ou in situ permettant de caractériser un produit de remblayage autocompactant dans sa phase initiale depuis la mise en œuvre jusqu'au début du raidissement (24 à 48 heures en général).

Il est prévu de réaliser des essais in situ (chargements cycliques), en vraie grandeur au CER de Rouen. Le programme d'études est en cours de définition. Parallèlement, le Laboratoire Régional de Lille a commencé des essais de fatigue sur un produit du type "non essorable". L'objectif de ces études est de définir les caractéristiques mécaniques afin de pouvoir permettre le dimensionnement et valider l'utilisation de ces matériaux en assises de chaussées notamment sous des trafics supérieur au T 3.

Dans le même temps, le comportement aux cycles de gel/dégel demeure pratiquement inconnu : un protocole d'essais reste à définir et un programme général d'essais à réaliser.

L'adéquation "perméabilité de l'encaissant - essorage - lit de sable" d'un produit à essorer est un phénomène mal connu, donc mal quantifié. Des études et essais doivent être faits dans ce domaine. Pour le moment, si l'on ne peut disposer que d'un produit essorable pour un encaissant imperméable il est possible de prévoir une certaine épaisseur - par exemple 20 cm - de lit support en sable sec dont le pourcentage de fines sera inférieur à 10% sous condition de prévoir une évacuation de l'eau de cette couche réservoir. Cette solution doit être réservée à des tranchées de profondeur inférieure à 1,50 m et à des produits dont le dosage en eau est inférieur à 230 l/m³.

Des études sont en cours sur l'utilisation de cendres hydrauliques - plus particulièrement les cendres de lit fluidisé circulant (LFC) - comme liant.

Un matériau autocompactant doit être considéré comme un produit de substitution à un remblai compacté et non comme un Béton de Ciment. Ses propriétés sont à la limite entre les sols et les graves traitées aux liants hydrauliques. S'il est fabriqué généralement à partir de composants utilisés pour la fabrication des bétons, et mis en œuvre de façon similaire, il présente en service des propriétés plutôt caractéristiques des sols.

Concernant le domaine de l'assainissement, dans lequel les tranchées sont généralement larges et profondes, les matériaux autocompactants étant différents de ceux mentionnés dans le CCTG 70, il conviendra de mener une réflexion pour évaluer les incidences de l'utilisation de ces matériaux et définir les caractéristiques intrinsèques à retenir (cf. notamment chapitre III du fascicule 70 "règles de conception et de calcul des ouvrages d'assainissement") en distinguant réhabilitation et travaux neufs...

9.2 - Perspectives d'évolution

Les perspectives d'évolution sont assujetties aux résultats des études en cours ou à définir, aux conditions économiques, à la demande du marché (forte demande des communautés urbaines)...

En matière de routes, les études en cours devraient apporter des réponses aux questions que l'on peut se poser notamment sur le comportement en fatigue, la résistance aux cycles de gel/dégel, le collage de la couche de roulement. Si dans l'immédiat, on limite l'emploi de ces matériaux en assises de chaussées à un trafic inférieur ou égal au T3, il sera alors peut-être possible d'admettre des trafics plus importants.

Il faudra obtenir des coûts comparables ou inférieurs à ceux d'une tranchée traditionnelle effectivement remblayée avec les matériaux classiques suivant les règles de l'Art.

Pour ce qui concerne les granulats entrant dans les compositions, le recours, à terme, à des matériaux nobles risque d'être plus sélectif et réservé à des cas particuliers.

Le réemploi de co-produits ou de sous-produits industriels, non polluants et dont l'agressivité chimique serait éventuellement à neutraliser, va dans le sens de la protection de l'environnement (cf. aussi la loi relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux, applicable en 2002). Ce sont des constituants potentiels de matériaux autocompactants. De même, les études et l'emploi de coulis à base de cendres volantes, (CV seules ou CV + sable), devraient pouvoir se développer.

L'utilisation de matériaux de déblais de tranchées reconditionnés (cf. les études menées par EDF-GDF Services à Cergy par exemple, ou par des entreprises du Nord de la France) pourrait être une voie intéressante de recherche.

Lorsque les modes opératoires - donc les caractéristiques de ces produits - auront été déterminés, la délivrance d'avis techniques officiels, comme cela se pratique déjà pour des produits non normalisés, serait à envisager.