

Sables de fonderie

Mise à jour de la version : 29/03/2013

1	Définitions	1
2	Lois, normes, guides.....	1
3	Origine, Elaboration, Stockage.....	4
4	Caractéristiques Physico-chimiques	10
5	Caractéristiques géotechniques	15
6	Caractéristiques environnementales.....	18
7	Aspects sanitaires.....	20
8	Utilisation dans les infrastructures routières.....	22
9	Bibliographie.....	24
10	Auteurs et relecteurs.....	29

1 Définitions

Qu'est-ce que les sables de fonderie ?

Ce sont des sables siliceux liés avec des matériaux naturels (bentonite, sables à verts) ou de résines chimiques (sables à prise chimique), les sables de fonderie sont utilisés pour confectionner des moules et des noyaux dans lesquels sont coulés les métaux en fusion.

Ce procédé de « moulage au sable » est utilisé pour la totalité des productions de fonderie de fonte et d'acier et pour environ la moitié des productions d'alliages et de métaux non ferreux [Torralba, 2010].

Après l'opération de démoulage des pièces métalliques, une grande partie des sables est réutilisée sur place par régénération, tandis que les sables usés de fonderie résiduaire (nommés également « sables rejetés », « vieux sables » ou « sables brûlés ») doivent être éliminés.

2 Lois, normes, guides

2.1 Références législatives et réglementaires

- annexe 2 de l'article R541-8 du Code de l'Environnement
- [Arrêté du 28 octobre 2010](#) relatif aux installations de stockage de déchets inertes (JO n°265 du 16 novembre 2010) abrogeant [l'Arrêté du 31 décembre 2004](#) (JO n°50 du 01 mars 2005) qui modifiait certains articles de [l'Arrêté du 16 juillet 1991](#) (JO n°230 du 2 octobre 1991) relatif à l'élimination des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse
- [Circulaire n°91-59 du 16 juillet 1991](#), relative à l'application de l'arrêté ministériel relatif à l'élimination des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse.

Le mode de gestion des sables de fonderie le plus adapté, dépend de la présence ou non de matières dangereuses, leurs concentrations et du caractère inerte ou non de ces sables. Après identification et analyse, les sables de fonderie peuvent être d'abord i : **classés** (dangereux ou non dangereux et inerte ou non inerte) et ensuite soit ii : **recyclés** ou iii : **stockés** dans le site de stockage le plus approprié après une phase de collecte et de transport.

i: annexe 2 de l'article R541-8 du Code de l'Environnement

Selon cette nomenclature française des déchets, les sables de fonderie sont inscrits dans le chapitre 10, « Déchets provenant de procédés thermiques », et sont répertoriés sous la rubrique 10.09 ou la rubrique 10.10 sous les codes suivants (l'astérisque signifie que le déchet est considéré comme un produit dangereux s'il présente une ou plusieurs des propriétés énumérées à l'annexe I de l'article R541-8 du Code de l'Environnement) :

1. « déchets de fonderie de métaux ferreux » :

- 10.09.05* Noyaux et moules de fonderie n'ayant pas subi la coulée contenant des substances dangereuses
- 10.09.06 Noyaux et moules de fonderie n'ayant pas subi la coulée autres que ceux visés à la rubrique 10.09.05
- 10.09.07* Noyaux et moules de fonderie ayant subi la coulée contenant des substances dangereuses
- 10.09.08 Noyaux et moules de fonderie ayant subi la coulée autres que ceux visés à la rubrique 10.09.07

2. « déchets de fonderie de métaux non ferreux » :

- 10.10.05* Noyaux et moules de fonderie n'ayant pas subi la coulée contenant des substances dangereuses
- 10.10.06 Noyaux et moules de fonderie n'ayant pas subi la coulée autres que ceux visés à la rubrique 10.10.05
- 10.10.07* Noyaux et moules de fonderie ayant subi la coulée contenant des substances dangereuses
- 10.10.08 Noyaux et moules de fonderie ayant subi la coulée autres que ceux visés à la rubrique 10.10.07

ii : Seuls les sables non dangereux (inertes ou non inertes) peuvent être recyclés (10.09.06, 10.09.08, 10.10.06 ou 10.10.08).

iii : Trois types de stockages sont envisageables :

- Les Installations de Stockage de Déchets Dangereux (ISDD), (anciennement classe 1) pour les déchets dangereux toxiques ([l'arrêté du 30 décembre 2002 modifié](#))
- Les Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux (anciennement classe 2) pour les Déchets Non Dangereux, qui sont polluants mais non toxiques ([Arrêté du 9 septembre 1997 modifié](#)).
- Les Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI) (anciennement classe 3) pour les Déchets Inertes, (sans décomposition, sans modification physique, chimique ou biologique, et non inflammables) ([Arrêté du 28 octobre 2010](#)).

Le recyclage et la mise en décharge des sables de fonderie était réglementée au niveau français par [l'arrêté du 16 juillet 1991](#) qui définissait les filières de valorisation des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse en fonction de la seule teneur en phénol dans la fraction lessivable (test lixiviation norme NFX-31210), précisé

par la [circulaire n°91-59 du 16 juillet 1991](#). L'arrêté n'imposait pas une filière particulière de traitement. Il fixait seulement le type de décharge dans laquelle pouvaient être admis les sables usés ainsi que les modes de valorisation possibles en fonction des caractéristiques du déchet. Certains articles de cet arrêté ont été modifiés par l'arrêté du 31 décembre 2004 relatif à l'admission des déchets dans les installations de stockage de déchets inertes. Aujourd'hui, l'arrêté du 31 décembre 2004 a été abrogé et remplacé par [l'arrêté du 28 octobre 2010](#).

Aujourd'hui, le recyclage et le stockage des sables de fonderie ne dépend plus uniquement de leurs teneurs en phénol et leur contenu en substances dangereuses, mais aussi de leurs teneurs en As, Ba, Cd, Cr total, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn, Chlorure, Fluorure, Sulfate, COT (carbone organique total) et fraction soluble sur éluat, ainsi que de certains paramètres organiques en terme de composition chimique (BTEX, HAP, hydrocarbures totaux, COT, PCB).

- Si les sables contiennent une substance dangereuse, ils doivent alors être stockés en ISDD
- Si les sables ne contiennent pas de substance dangereuse, mais une de leurs teneurs en As, Ba, Cd, Cr total, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn, Chlorure, Fluorure, Sulfate, COT (carbone organique total) et fraction soluble sur éluat et contenu en composés organiques est supérieure à une des limites définies par [l'arrêté du 28 octobre 2010](#), alors ces sables de fonderie admissibles en ISDnD
- Si les sables ne contiennent pas de substance dangereuse, sont inertes (stables) et leurs teneurs en As, Ba, Cd, Cr total, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn, Chlorure, Fluorure, Sulfate, COT (carbone organique total) et fraction soluble sur éluat et contenu en composés organiques sont inférieures aux limites définies par [l'arrêté du 28 octobre 2010](#), alors ces sables de fonderie sont admissibles en ISDI
- Si les sables ne contiennent pas de substance dangereuse, sont inertes (stables) et leurs teneurs en As, Ba, Cd, Cr total, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn, Chlorure, Fluorure, Sulfate, COT (carbone organique total) et fraction soluble sur éluat et contenu en composés organiques sont inférieures aux limites définies par le guide du Sétra (2011), alors ces sables de fonderie sont recyclables
-

2.2 Documents techniques

- DRE Haute Normandie, CETE Normandie-Centre, Région de Haute-Normandie, Préfecture de Haute-Normandie, SPRIR Normandie, UNICEM Normandie. « Guides techniques et monographies, utilisation des matériaux de Haute-Normandie ». mars 2000.
- Guide technique des matériaux du BTP, Région Centre, juin 2007
- [Guide Régional de la région du Nord-Pas de Calais](#) « Filières de valorisation des déchets du BTP et des co-produits industriels de la région Nord-Pas de Calais », juin 2011
- Catalogue des matériaux de substitution en Bourgogne, 2006
- CETE Nord-Pas-de-Calais, Mines de Douai. « Guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et co-produits industriels (PREDIS). Guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des sables de fonderie. Décembre 2002, 21p.

- Guide SETRA « Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière-Evaluation environnementale », mars 2011
- Foundry sand facts for engineers, FIRST, mai 2004. Disponible sur le site https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pub_details.cfm?id=55
- Federal highway administration (FHWA), « User guideline for waste and byproduct materials in pavement construction », report FHWA-IF-04-004. Disponible sur le site : <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrstructures/structures/97148/fs1.cfm>

3 Origine, Elaboration, Stockage

3.1 Origine :

Le sable de fonderie est un sable propre, de granulométrie uniforme, ayant une haute qualité qui est lié par un liant pour former des moules afin de mouler des pièces en métal ferreux ou non ferreux. Le procédé de moulage au sable, l'élaboration des sables de fonderie et leur stockage se fait schématiquement en plusieurs étapes successives (Figure n°2) :

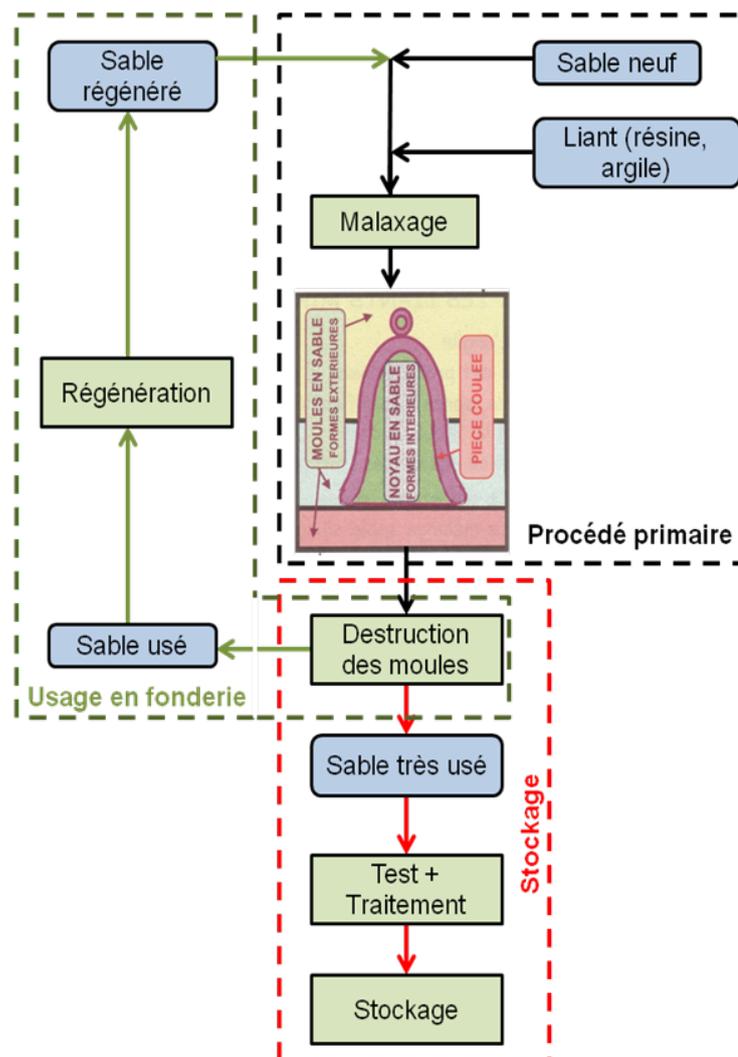


Figure 1 : Procédé d'élaboration d'un sable pour l'industrie de la fonderie – procédé primaire [CETE Nord Picardie, 2002] ; Usage en fonderie ; Stockage.

3.2 Elaboration d'un sable pour l'industrie de la fonderie –procédé primaire

Il existe trois procédés pour la production de sables pour l'industrie de la fonderie. Chaque procédé est utilisé pour une application donnée.

Procédé sable naturel :

Ce sable est directement extrait de carrière et se compose de silice et d'argile en forte proportion. Il est utilisé en fonderie d'art.

Procédé sable silico-argileux ou sable à vert :

Ce sable est constitué de sable siliceux à 70-80% en masse, mélangé à 5-15% d'argile souvent de type bétonite (montmorillite) qui sert de liant. Ce liant est activé par 7 à 10% d'eau (la masse d'eau incorporée est souvent égale au tiers de la masse d'argile). Un additif carboné (noir minéral qui est un charbon pulvérisé) est souvent utilisé à 3-5% en masse.

Ce sable est utilisé pour le moulage de pièce de faible dimension.

Procédé sable à prise chimique :

Ce sable est composé de silice à 93-95% (pour le moulage de l'aluminium et la fonte) ou de chromite (pour les aciers) préalablement tamisée, lavée et séchée à laquelle une résine chimique (liant organique) est ajoutée à 1-3% en masse du sable. Cette résine est souvent de type furanique ou polyuréthane ou epoxy. Peu de temps avant la réalisation du moule, le mélange est activé par l'ajout d'un catalyseur à l'aide malaxeur à vis rapide, muni de pompe doseuse qui délivre la quantité de sable préparée nécessaire à la réalisation du moule. Au cours de cette étape, le catalyseur active la polymérisation de la résine, qui permet la liaison du mélange.

Ce procédé est utilisé pour le moulage de grandes pièces.

Procédé mixte :

Pour des pièces de forme compliquée, les deux procédés sable à vert et sable à prise chimique peuvent être utilisés en même temps. Le premier pour la partie extérieure du moule de la pièce et le deuxième pour la partie intérieure de la pièce (le noyau).

Ces différents procédés primaires produisent des sables de fonderie usés qui peuvent être régénérés et réutilisés en fonderie pour la confection de nouveaux moules et la fabrication de pièces métalliques.

3.3 Le recyclage des sables de fonderie usés, usage en fonderie (régénération)

Les sables de fonderie usés peuvent être réutilisés en fonderie pour la fabrication de nouveaux moules. Cet usage est intégré au procédé de préparation des mélanges agglomérés pour le moulage, il est précédé d'un procédé de régénération du sable. La régénération consiste à séparer le plus complètement possible la silice des autres constituants du sable usé.

Plusieurs techniques de régénération se sont développées pour transformer un maximum de sable usé en sable régénéré « propre » [Devaux P., 1984]. Selon qu'on ait un sable à vert ou un sable à prise chimique, le procédé de régénération est différent.

Régénération des sables à vert :

La régénération des sables à vert consiste à séparer les éléments constitutifs suivants :

- La bentonite non calcinée dite active
- La bentonite ayant perdue ses caractéristiques liantes (chamotte adhérent en partie aux particules de silice)
- Les additifs carbonés
- Les fines diverses notamment la silice

Par voie sèche

Le sable [Jasson P., 2005] est soumis à un traitement mécanique d'attrition dans le but de séparer les liants des grains de sable. Ce traitement est suivi d'un dépoussiérage énergétique pour éliminer les impuretés.

Par voie humide (méthode hydraulique)

Dans ce cas le traitement mécanique d'attrition [Jasson P., 2005] est mis en œuvre en phase humide par agitation d'une pulpe très concentrée (environ 80% de sable et 20% d'eau). Les particules fines sont éliminées par des lavages. Cette technique est plus efficace que celle par voie sèche et présente l'avantage de ne pas dégager de poussières durant la régénération. Mais ce mode est très onéreux et pose le problème de traitement des eaux résiduaires [Jasson P., 2005].

La régénération du sable à vert usé par voie hydraulique existe à l'échelle en Italie et est en phase de développement en Espagne [Lamotte *et al.*, 2008].

-Technique « Safond » de l'entreprise italienne Safond :

Le sable est d'abord débourbé, on obtient une pulpe homogène. Ensuite cette pulpe est émottée puis attritée avant épaississage. Le sable est ensuite séché et refroidi et stocké en silos. L'eau de traitement est décantée en bac avec ajout de flocculant et coagulants.

Le sable obtenu est réinjecté dans la fabrication de moules et la confection de noyaux. Les taux de résine et catalyseur malaxés avec ce sable régénéré est similaire ou légèrement supérieur à ceux utilisés dans les sables neufs. [Lamotte *et al.*, 2008].

-Technique « SASIL » développée en Italie :

Cette technique associe attrition et classification hydraulique puis séparation magnétique et lixiviation acide après séchage. [Lamotte *et al.*, 2008].

Par ultrasons :

Le CETIF a vérifié la qualité d'un sable traité pour utilisation en noyautage après traitement aux ultrasons afin de démontrer la faisabilité de cette technique. L'analyse des échantillons de sable après traitement a montré que : la rétention de bleu de méthylène par ces sables est très faible : plus d'argile active ; le sable est bien nettoyé

de son argile calcinée (oolithisation) ; le pH avoisine celui d'un sable neuf ; la morphologie des grains confirme la disparition de liant argileux [Lamotte *et al.*, 2008].

Régénération des sables à prise chimique :

Ces sables peuvent être régénérés par calcination. La couche de résine polymérisée qui entoure les grains de sable est détruite par calcination autour de 700-800°C dans une atmosphère oxydante.

Ce mode de régénération est celui qui redonne aux sables de fonderie les propriétés les plus proches de celles des sables de base neufs [Jasson P., 2005].

Régénération des sables en mélange (produits par procédés mixtes) :

La régénération de ces sables nécessite des traitements successifs des différents modes de régénération selon la composition du mélange. Différentes combinaisons sont possibles : voie sèche-calcination ou calcination-voie sèche ou alors voie sèche-calcination-voie sèche [Jasson P., 2005].

Selon la nature du sable de moulage, le potentiel de régénération des sables usés peut varier :

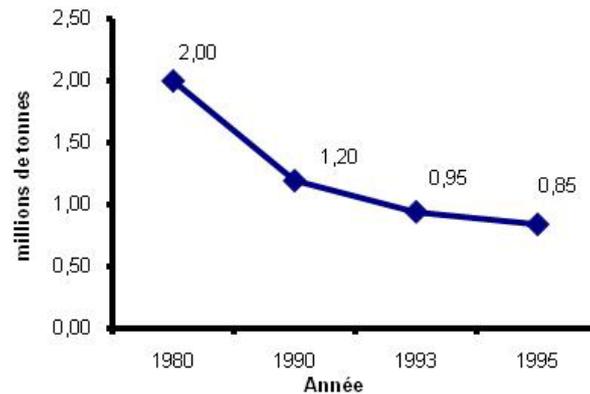
- Sable à l'argile $\approx 98\%$
- Sable au silicate de soude 25% à 100%
- Sable au ciment $\approx 50\%$
- Sable à la résine $\approx 70\%$

Le taux de régénération possible du sable de moulage est très dépendant de la situation géographique de la fonderie, de la technique de moulage et du volume de production des pièces. Par exemple, pour les procédés de sables à résines, une installation de régénération thermique ou thermo-mécanique est nécessaire, mais ce type d'installation est coûteux. Ainsi, en France, selon Torralba (2010), 43 à 50% du sable usé issu de moulages au sable à résine est régénéré alors que 98% du sable usé issu du procédé de moulage à vert est régénéré.

Au final, les sables usés de fonderie ne sont jamais intégralement régénérés. 90% du sable usé est régénéré par ajout de sable neuf et moyennant une préparation spécifique. Le sable restant (10%) est rejeté du procédé de fabrication.

Il faut en moyenne 600 à 1200 kg de sable frais pour mouler 1 tonne d'alliage de métaux ferreux [Danko J. *et al.*, 2008]. L'industrie de la fonderie estime qu'en moyenne, pour une tonne de pièces de fonderie produite, on utilise 10 tonnes de sable de fonderie dont environ 1 tonne doit être éliminée. En 1995, en France, il a été produit approximativement 850 000 tonnes de sables usés, dont 300 000 tonnes ont été déposées en ISDD. En 2006 et 2007, cette production de sables usés a été estimée entre 391000 et 460000 t / an [Torralba, 2010].

Il est important de souligner en effet que depuis 1980 le volume de sables usés restant à valoriser par voies externes à la fonderie a considérablement diminué (Figure n°2).



Source : Syndicat Général des fondeurs de France

Figure 2 : Quantité de sables usés non-traités en fonderie (destinés à être stocker ou recyclés en dehors de la fonderie).

Pour comparer ces ordres de grandeurs avec ceux fournis par d'autres pays, l'analyse des 20 fonderies polonaises les plus importantes effectuée en 2005 par Danko J. *et al.* (2008) indique qu'environ 50% du sable usé de fonderie était recyclé ; Le reste était directement mis en dépôt. En tenant compte de toutes les fonderies polonaises restantes, les auteurs estiment que 250.000 à 350.000 tonnes environ de sables usés de fonderie sont mis en décharge chaque année [Danko R., 2010] pour une proportion de 1000 kg de sable utilisés pour mouler 1 tonne d'acier avec approximativement 20% de sable neuf pour 80% de sable usé régénéré.

Aux Etats-Unis, deux mille fonderies ont été enquêtées en 2007 [Dayton *et al.* 2010]. Les résultats ont révélé que 93 % produisent des alliages de métaux ferreux ou aluminiques générant 9,4 millions de tonnes de déchets de sables de fonderie usés chaque année. Seulement 28% d'entre eux sont avantageusement réemployés pour la construction ou les routes si bien que le département de conservation des ressources de l'agence américaine de protection de l'environnement (U.S. EPA/ ORCR : Environmental Protection Agency / Office of Resource Conservation and Recovery) a identifié les sables usés de fonderie (SFS : Spent Foundry Sands) comme étant le matériau à promouvoir en priorité pour l'utilisation à grands volumes, en particulier pour améliorer la structure des sols [AFS, 2007]

Dans le même temps, les industriels ont développé depuis les années 1980 de nouveaux débouchés pour les sables usés de fonderie, autres que leur stockage dans un centre spécialisé :

- l'industrie cimentière comme matière secondaire
- l'industrie du béton manufacturé comme addition dans les parpaings, de tuiles et de briques
- La fabrication de verre et de laine de verre.
- La fabrication de béton asphaltique et d'asphalte ;
- La confection de géosynthétiques de confinement de déchets
- Le compostage industriel de déchets ménagers (sables usé utilisé comme matériau densifiant utilisé dans les andains)
- L'agriculture et l'horticulture pour l'amendement minéral de sols et l'amélioration de la qualité structurale des sols argileux.

3.4 Stockage :

Lorsque les sables de fonderie sont trop usés pour être réutilisés dans la confection des moules en fonderie, ou lorsque la fonderie ne possède pas d'unité de régénération adaptée aux sables coproduits, ces derniers sont stockés. Avant cette étape, ils sont analysés et caractérisés. Selon les résultats d'analyses, ils seront stockés dans le site de stockage le plus adapté conformément aux réglementations en vigueur.

Si les sables de fonderie stockés ne sont pas dangereux, ils peuvent être utilisés pour l'élaboration de matériaux routiers (usage routier) ou dans la réhabilitation du site de fonderie.

Actuellement des filières biologiques de traitement des sables phénolés. Ces retours d'expériences sont régulièrement exposés par la profession. Citons notamment l'article de Duquet (2004) décrivant les diverses voies de valorisation des sables à vert utilisées en France et dans d'autres pays.

Traitement des sables phénolés.

Etant donné que la législation européenne concernant la mise en décharge des déchets est de plus en plus stricte pour, les industriels de la fonderie tentent actuellement de développer des alternatives technologiques au stockage des sables contenant des résines phénoliques. Un programme de recherche unissant la Division Fonderie du groupe Renault et le BRGM a porté sur l'étude d'un procédé d'inertage des sables phénolés par biodégradation en présence de micro-organismes rigoureusement sélectionnés [Gillaizeau *et al.*, 1999] permettant de détruire les molécules organiques et par ce fait de rendre les sables usés inertes et utilisables non seulement dans les infrastructures routières mais aussi en agriculture. Ces travaux ont permis de concevoir une installation industrielle pour déphénoler des sables usés, même très riches en phénols, en dessous du seuil d'acceptation de l'arrêté du 16 juillet 1991 et espérer des traitements à plus grande échelle. Le procédé de diminution de la teneur en phénol par traitement biologique ouvre la possibilité de valoriser en technique routière la presque totalité de sables de moulage produits par les fonderies (sables contenant jusqu'à 50 mg de phénols par kg).

3.5 Le recyclage des sables de fonderie usés-usage routier

Les sables de fonderie peuvent être utilisés en techniques routière sous réserve de respecter les critères environnementaux liés à leur teneur intrinsèque en éléments polluants (cf. paragraphe n°7.2), les critères liés à l'environnement immédiat de l'ouvrage routier (zones inondables, zone de captage en eau potable, ... cf. paragraphe n°7.3) et les critères liés aux caractéristiques techniques du sable (. paragraphe n°6).

Ils peuvent être utilisés dans des remblais routiers, des assises de chaussées sous forme de graves non traitées, sables traités ou graves traitées, dans des enrobés en faible proportion, des plates-formes industrielles et comblement des tranchées. Citons comme exemple, l'emploi dans la couche de fondation de la RN 80 [Vulcano-Greullet *et al.*, 2011, Yazoghli-Marzouk *et al.* 2012], dans le recalibrage et renforcement de la RD 113 [Mauget G. et Luminet J.P., 2005] et la RD 980 (couche de forme et couche de base, Vulcano-Greullet N., 2007).

4 Caractéristiques Physico-chimiques

4.1 Les sables de moulage

L'industrie de la fonderie utilise de nombreux types de sables [Aron *et al.*, 1993] qui servent à confectionner des moules et des noyaux pour le moulage de ces pièces métalliques. En général le sable siliceux complété par un liant minéral ou organique. Les sables de moulage doivent présenter diverses qualités :

- une plasticité et une cohésion, pour donner une empreinte fine et durable ;
- des propriétés réfractaires, pour supporter, sans décomposition ni déformation, le contact du métal fondu, surtout pour les éléments de noyaux ;
- une porosité et une perméabilité, pour permettre aux gaz formés lors de la coulée du métal une évacuation facile à travers la masse du moule.

Les sables sont d'origine naturelle (sable de Fontainebleau, sable de Hagenu en Alsace) constitués principalement de grains de silice pure (quartz) ou exceptionnellement d'autres minéraux comme la chromite, le zircon, l'olivine.... Ils ne présentent généralement pas plus de 0,5% d'impuretés (oxyde de fer, aluminium, ...) ainsi qu'une très faible quantité d'argile. Pour des questions tant de prise de liant que de rejets, le pH des sables mesurés dans l'éluat est sensiblement neutre.

Lors de l'élaboration du sable de moulage, différentes catégories de liants sont mélangées au sable d'origine selon les applications envisagées et le type d'alliage. Les principaux sables de moulage sont répertoriés ci-dessous :

- Sables à l'argile

L'incorporation de 5% à 10% d'argile est très utilisée pour la confection des moules, appelé « moulage à vert ». Il peut s'agir d'argiles réfractaires comme la kaolinite et l'halloyste, mais également d'argiles plus fines et plus plastiques comme les bentonites (calciques ou sodiques) et les illites.

- Sables au silicate de soude

L'incorporation de 3% à 4% de silicate de soude est utilisée pour la confection de grandes séries de moules et de noyaux et assurer ainsi une certaine rigidité. Ces mélanges sont durcis, soit par injection de gaz carbonique, soit par incorporation de laitier de haut fourneau, soit par des esters organiques.

- Sables au ciment

L'incorporation de 8% à 10% de ciment (généralement du ciment Portland) est utilisée pour la confection de moules de grande dimension. La vitesse de la prise peut être accélérée par des adjuvants appropriés.

- Sables à la résine

Les résines sont utilisées à faible dosage, de l'ordre de 2%, comme liant organique.

On distingue plusieurs familles :

- Les huiles siccatives (l'huile de lin) durcies par étuvage ou par adjonction d'un catalyseur d'oxydation (oxyde de manganèse ou de cobalt).

- Les résines thermodurcissables durcies en présence d'un catalyseur acide et d'une température de 200°C à 300°C. La prise du mélange est très rapide, ce qui est intéressant pour les grandes séries.
- Résines phénol-formol (procédé « Croning »)
- Résines urée-formol-phénol (procédé « Boite chaude »)
- Résines furanniques (mélange urée-phénol-alcool furfurylique)
- Les résines polymérisant à froid (résines furanniques, résines polyuréthanes) durcies par des acides forts ou des injections de produits aminés.
- Résines polyuréthane (mélange de phénol et isocyanate procédé « Croning »)
- Divers adjuvants (houille pulvérisée, farine de bois, sucre, mélasse).

Les quelques compositions de sables de moulage trouvées dans la littérature sont reportées dans le Tableau n°2.

	Sable silico-argileux (%)	Sable à noyaux (%)	Sable à noyaux (%)
Silice	88,7	98,8	98,2
Bentonite sodique activée	6,7	--	--
Noir minéral	1,2	--	--
Eau	3,4	--	--
Résine polyuréthane	--	1,2	--
Résine phénolique	--	--	1,8

Tableau n°2 : Exemples de composition de sable de moulage [Aron *et al.*, 1993].

4.2 Les sables usés.

Les sables usés, disponibles pour une réutilisation en technique routière, résultent du traitement thermique des sables de moulage à haute température (parfois plus de 1000°C) lors de la coulée du métal en fusion suivie d'un traitement chimique par des adjuvants (huile, noir de carbone ...) afin de faciliter le démoulage des pièces.

Etant donné que les sables usés sont des résidus de calcination d'un mélange quasi-inerte thermiquement, ils présentent des caractéristiques minéralogiques et pétrographiques semblables à celles des sables de moulage d'origines [Platret *et al.*, 1984].

Les sables usés sont essentiellement constitués de quartz [SiO₂] accompagné d'une faible proportion d'argile (1 à 5%), sous forme de bentonite (mélange de montmorillonite, micacés et kaolinite), et accessoirement de chromites [(Mg,Fe)Cr₂O₄]. Dans certains cas, on peut détecter des traces d'adjuvant de démoulage tels que le noir de carbone ou des produits organiques de toutes natures (paraffines, graisses aux silicones-esters, sulfonates,...).

L'agence de la protection de l'environnement États-Unienne EPA (Environmental Protection Agency) a publié, dans un rapport récent [US EPA, 2009] des ordres de grandeurs de composition des sables de fonderie exprimés en taux d'oxydes (Tableau 3).

Composé	Taux (%)
Dioxyde de silicone	87,91
Oxyde d'aluminium	4,70
Oxyde de fer	0,94
Oxyde de calcium	0,14
Oxyde de magnésium	0,30
Trioxyde de sulfure	0,09
Oxyde de sodium	0,19
Oxyde de potassium	0,25
Dioxyde de titanium	0,15
Pentoxyde de phosphore	0,00
Oxyde de manganèse III	0,02
Oxyde de strontium	0,03

Source : AFS (1991) as cited in FHWA (2008)

Tableau 3: Composition typique du sable de fonderie exprimé en taux d'oxydes [US EPA, 2009]

Une étude réalisée par le CETE de Lyon, en collaboration avec IFSTTAR [Vulcano-Greullet *et al*, 2011] présente les résultats d'analyses chimiques suivants :

Technique d'analyse	Analyse chimique élémentaire (RX)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	MnO	TiO ₂	Na ₂ O
Moyenne (%)	81,6	3,0	4,5	1,0	0,4	0,4	0,2	0,1	0,1
Technique d'analyse	Attaque micro-ondes et analyse élémentaire ICP AES (ISO DIS 11885) ; Hg selon NF EN 1483								
	Fe	Al	Pb	Cu	Cr	Ni	Hg		
Moyenne (mg/kg)	1915 2,0	9449,0	79,9	39,0	37,5	22,2	<0,2 0		

Tableau 4: Exemple de résultats d'analyse chimique d'un sable de fonderie (ancienne fonderie "Ideal Standard" fabrication de radiateurs (1977-1985), [Vulcano-Greullet *et al*, 2011])

Il est important de signaler que les sables usés peuvent également contenir des corps étrangers (billes de métal, bavures, supports de noyaux, ...dont la littérature ne mentionne pas de chiffres quantifiés), si les déchets issus du traitement de régénération des sables de moulage (déchets métalliques, refus de criblage, dépoussiérage) ne sont pas convenablement gérés et stockés par type ou famille. Auparavant et dans les vieux stocks de sables à proximité des usines (désignés également crassiers), tous ces déchets étaient mélangés avec les sables usés. Actuellement, cette pratique disparaît au profit du tri sélectif et d'une recherche de valorisation des déchets.

Il arrive que les sables usés soient dépourvus de phénols, mais qu'ils contiennent des additifs en quantité notable (huiles, résines, agents mouillants, ...) ou des éléments solubles (Fluor, Cyanure...). Ils peuvent également contenir des quantités importantes de métaux lourds, comme le nickel et le chrome, deux éléments d'alliage fréquemment rencontrés dans les aciers. En effet, la coulée du métal en fusion à haute température

dans le moule peut générer des transferts de substances dangereuses entre l'alliage (mélange optimisé de multiples métaux) et le sable de moulage.

Le Tableau n°5 recense les différentes catégories de substances, éventuellement présentes dans un sable usé, dont le taux peut considérablement varier selon le procédé de moulage ou le type d'alliage à mouler.

Nature de la substance	Origine de la substance	Commentaires
Indice phénol	Liant à base de résine phénolique	Dosage obligatoire Arrêté du 16/07/1991
Matières organiques	Liant à la résine organique	Le taux varie entre un sable brut et un sable brûlé
Métaux solubles	Nature de l'alliage coulée	Ex: Fe, Cu, Mg, Zn, Pb,...
Autres éléments solubles	Nature des additifs Décomposition des liants organiques Solubilisation des liants minéraux	Ex : Fluorure, Ammonium, ... Ex : Cyanure, ... Ex : Silice, Alcalins, ...

Tableau n°5 : Liste des substances éventuellement présentes dans un sable usé.

L'agence de la protection de l'environnement américaine US EPA a publié des compositions en micropolluants minéraux et organiques (tableau 6) trouvés dans les sables usés de fonderie.

Element	Compositio n moyenne du sable de fonderie (mg/kg)	HAP	Compositio n moyenne du sable de fonderie (mg/kg)	Phénols	Compositio n moyenne du sable de fonderie (mg/kg)
Aluminium	5100,000	Acénathène	0,169	2-sec-butyl-4,g- dinitrophénol	0,110
Arsenic	1,700	Acenaphthylène	0,059	4-chloro-3-méthylphénol	0,101
Brome	11,500	Anthracène	0,309	2-chlorophénol	0,060
Baryum	8,810	Benzanthracène	0,058	2,4-dichlorophénol	0,070
Béryllium	0,169	Benzo[b]fluorenth ène	0,060	2,6-dichlorophénol	0,030
Calcium	1890,000	Benzo[k]fluorenth ène	0,065	2,4-diméthylphénol	0,996
Cadmium	0,068	Benzo[ghi]perylèn e	0,070	2,4-dinitrophénol	0,126
Cobalt	1,260	Benzo[a]pyrène	0,100	2-méthylphénol	1,794
Chrome	17,600	Chrysène	0,046	3 et 4-méthylphénol	0,830
Cuivre	21,200	Dibenz[ah]anthrac ène	0,081	2-méthyl-4,6- dinitrophénol	0,080
Fer	9200,000	Fluorenthène	0,054	2-nitrophénol	0,050
Potassium	388,000	Fluorène	0,294	4-nitrophénol	0,220
Magnésium	1260,000	Idenopyrène	0,070	Pentachlorophénol	0,120
Manganèse	112,000	Naphtalène	2,438	Phénol	7,000
Molybdène	2,980	Pyrène	0,140	2,3,4,6-tétrachlorophénol	0,050
Sodium	930,000			2,4,6-trichlorophénol	0,060
Nickel	15,200			2,4,5-trichlorophénol	0,070
Phosphore	51,200				
Plomb	4,380				
Soufre	616,000				
Antimoine	0,304				
Sélénium	0,206				
Thallium	0,041				
Vanadium	3,440				
Zinc	20,00				

Source : Risk Assessment of Spent Foundry Sands in soil-related applications, US EPA Office of Ressource Conservation and recovery, Mai 2009

Tableau 6: Composition typique des sables de fonderie : métaux, Hydrocarbures aromatiques polycycliques et phénols [US EPA, 2009]

Parmi les micropolluants minéraux, les métaux lourds sont plus abondants dans les sables usés issus de fonderies d'alliages de métaux non ferreux. Les sables usés des fonderies de laiton ou de bronze, en particulier, peuvent contenir des concentrations élevées en cadmium, plomb, cuivre, nickel et zinc (Turner Fairbank Highway Research Center). Parmi les produits Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP – PAH dans le tableau), le naphthalène est le plus abondant, suivi du phénanthrène. Certains produits phénoliques sont également fréquemment retrouvés tels que les 2-, 3-, and 4-méthylphénol, and 2,4-diméthylphénol. Les phénols sont formés par réarrangement et décomposition à haute température des liants organiques au cours de la coulée de processus de coulée du métal.

4.3 Particularités des sables au contact des métaux.

Les sables usés peuvent contenir des métaux lourds, comme le nickel et le chrome, deux éléments fréquents dans les aciers. En effet, la coulée du métal en fusion à haute température dans le moule peut générer des transferts de substances entre l'alliage (mélange optimisé de multiples métaux) et le sable de moulage.

4.4 Particularités des sables à la résine.

Certains sables usés, issus des sables de moulage à la résine, peuvent contenir des matières organiques plus ou moins dégradées par la coulée, dont la présence de phénol.

5 Caractéristiques géotechniques

5.1 Sables usés bruts.

L'industrie de la fonderie utilise des sables de silice très propres et de granulométrie parfaitement définie au niveau de la forme des grains (la plus arrondie possible), de la répartition granulaire (peu étalée) et de la finesse (entre 0,1 et 1mm).

Les sables usés présentent également une granulométrie peu étalée, comprise en moyenne entre 200 et 400 μm , mais qui peut être perturbée aux deux extrémités de la courbe granulométrique (Figure n°3) :



Figure n°3 : Exemple de distribution granulométrique de 2 sables usés [CETE Nord Picardie, 2002].

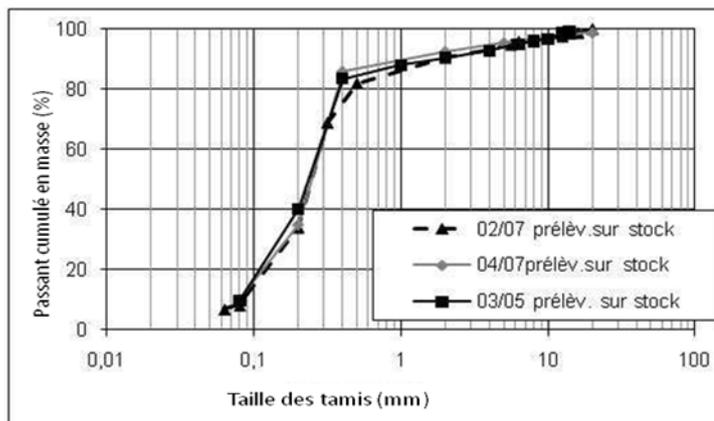


Figure 4: Exemple de distribution granulométrique d'un sable de fonderie utilisé produit par l'ancienne fonderie « Ideal Standard » (1977-1985) ayant fait l'objet d'utilisations en technique routière [Vulcano-Greullet *et al.*, 2011].

- Les gros éléments correspondent à des inclusions métalliques ou à des morceaux de moules non détruits. La présence de ces éléments dépend du procédé de récupération des sables usés de chaque usine et des conditions de stockage de tous les déchets générés lors du recyclage des sables. Les refus de criblage sont parfois réintroduits dans le stock de sables usés.
- Les fines proviennent du système de dépoussiérage des ateliers ou de l'incorporation d'argile (1 à 5%) comme liant dans la conception du sable de moulage. Ce paramètre peut faire varier dans de grandes proportions la propreté des sables usés, traduite par les paramètres PS (P 18-597 Détermination de la propreté des sables) ou VB (NF EN 933-9 Essai au bleu de méthylène).

	Sable de grenailage	Sable de moulage	Sable d'ébarbage	Sable au phénol
Passant à 2mm	100%	99%	100%	100%
Passant à 80µm	7%	12%	1,7%	10%
Valeur au bleu (g pour 100g de fines)	1,3	14,6	1,25	14
Optimum Proctor Normal	1,53	1,71	1,67	1,8
Teneur en eau	14,5%	15%	17%	10%

Tableau 7: Exemple de caractéristiques ayant fait l'objet d'utilisations en technique routière.

La classification des sables usés se fait selon la norme NF P 11-300 de septembre 1992. Classés dans la famille « F₉ : Autres sous-produits industriels », les sables usés peuvent être assimilés, en terme de comportement, aux classes des matériaux naturels, sous réserve de vérification au cas par cas :

- Sables à l'argile : classe B2 à B5
- Sables au silicate : classe B1 à D1
- Sables aux liants organiques : classe B1 à D1

Classification selon la norme NF P 11 300	F9 assimilé à to B2
Essai au bleu de méthylène (VBS)	0,71 g de bleu/ kg de sable 0/2 mm
Masse volumique réelle	2,600 T/m ³
Teneur en eau de la fraction 0/5mm (W _{nat} %)	12,6

Tableau 8 : Exemple de propriétés physiques d'un sable de fonderie usé produit par l'ancienne fonderie « Ideal Standard » (1977-1985) ayant fait l'objet d'utilisations en technique routière [Vulcano-Greullet *et al.*, 2011].

La portance des sables usés s'apparente à celle des sables fins et sablons. Difficilement traficables à l'état sec, ils deviennent impraticables à l'état saturé. Aux deux bornes de la plage des teneurs en eau, les engins de chantier poinçonnent et s'enlisent dans la couche en cours de mise en œuvre. Il convient de maintenir une teneur en eau suffisante, à définir au cas par cas, permettant à la fois une bonne traficabilité et une bonne compacité.

La nature du sable de moulage et la gestion ultérieure des sables usés (mélange éventuel avec d'autres matériaux) conduisent à des variations importantes en terme de référence de compactage. Il importe donc, avant tout chantier important, d'identifier les lots de même provenance afin de bien situer leurs caractéristiques de mise en œuvre.

5.2 Sables usés traités aux liants hydrauliques.

Les études de traitement aux liants (laitier, chaux, ciment) mettent évidence que la présence dans les sables usés de divers produits minéraux et organiques, plus ou moins détruits par la coulée, peut modifier la prise hydraulique jusqu'à son blocage total [Brouwet *et al.*, 1985]. De plus, ces mélanges présentent des comportements très différents :

- suivant l'origine du sable usé pour un même liant ;
- suivant le liant pour une même origine de sable de moulage.

Etant donné le manque d'information sur la nature du liant et la difficulté de recenser toutes les interactions possibles, le retour d'expérience des études du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées préconise une étude systématique préalablement au chantier, pour :

- tester les dosages dans la formulation envisagée (sable usé/sable correcteur/ciment/eau) ;
- comparer les résultats (temps de prise et résistance à la compression) à ceux obtenus sur une formule témoin ne contenant pas de sable usé.

Cette approche permet d'éviter les risques d'incompatibilité avec un sable usé susceptible d'emploi en assise de chaussée (Tableau n°9) et de valider le choix du liant hydraulique disponible sur le marché [Vecoven *et al.*, 1990].

Rc (MPa)	Sable d'origine	Sable de moulage avant coulée		Sable de moulage après coulée	
	R _{témoin}	R ₁	R ₁ / R _{témoin}	R ₂	R ₂ / R _{témoin}
7j	0,87	0,82	0,94	0,63	0,72
12j	1,22	1,06	0,87	0,80	0,65
28j	1,73	1,56	0,90	1,09	0,63

Rc : Résistance à la compression ; R_{témoin} : résistance à la compression du sable d'origine ; R₁ : Résistance à la compression du sable avant coulée ; R₂ : résistance à la compression du sable après coulée

Tableau 9 : Etude préalable d'un sable usé traité au ciment [Vecoven *et al.*, 1990].

6 Caractéristiques environnementales

6.1 Acceptabilité environnementale

Pas de ressources bibliographiques sur les caractéristiques environnementales des sables de fonderie selon les exigences du guide SETRA « Acceptabilité de matériaux alternatifs en techniques routières » (2011).

6.2 Effets sur les écosystèmes des sables de fonderie valorisés en techniques routières

Dans le cas de la ressource en eau, le **bon état biologique** peut être caractérisé par une méthode standardisé l'IBGN (indice biologique global normalisé) et le bon état chimique par des analyses chimiques.

La méthode IBGN utilise différents macro-invertébrés aquatiques comme indicateurs. L'indice peut prendre une valeur variant de 0 à 20. Il se base sur la présence ou l'absence de certains taxons bio-indicateurs (groupe d'espèces ayant la même sensibilité) sensibles à la pollution comme les plécoptères ou résistant à la pollution.

Cette méthode a été utilisée lors d'une expérimentation menée par le CETE de Lyon entre 2008-2011 sur les effets de l'emploi de sables de fonderies en couche de forme sur un cours d'eau longeant la route expérimentale de 4km de long. Les sables de fonderie ont été traité au liant hydraulique (5.5%) et mis en œuvre sur une épaisseur de 46 cm (Figure 5).

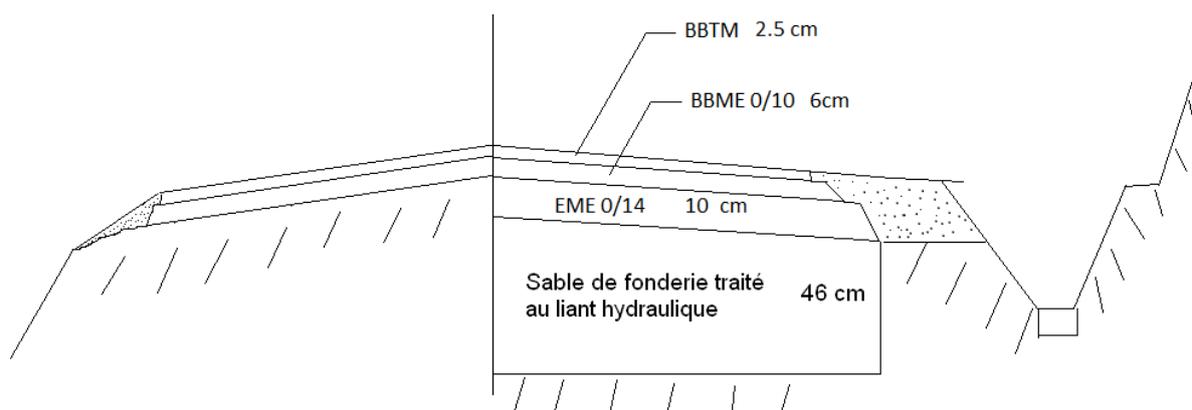


Figure 5 : Structure de la route expérimentale [Vulcano-Greullet *et al.*, 2011]

Les analyses hydrobiologiques ont été menées entre 2008 et 2011, en amont (considéré comme référence) et en aval [Vulcano-Greullet *et al.*, 2011].

Le tableau 12 montre que le cours d'eau suivi a une bonne qualité hydro-biologique. L'indicateur faunistique est entre 8 et 9, c'est la valeur maximum pour un taxon sensible et la diversité taxonomique est globalement 25 dans les prélèvements en amont et en aval, ce qui signifie que la qualité biologique de l'eau est excellente. Absence d'effet mesurable de la route expérimentale sur la qualité hydro—bio du cours d'eau.

	IBGN*/20	IG	Diversité	Robustesse
07/2007 amont	11	7	15	0
07/2007 aval	12	7	20	-1
06/2008 amont	14	9	19	-1
06/2008 aval	15	8	25	-1
09/2008 amont	16	9	26	0
09/2008 aval	17	9	31	0
06/2009 amont	15	8	26	-1
06/2009 aval	16	8	29	0
09/2009 amont	14	8	23	-1
09/2009 aval	16	9	26	-1

*qualité du cours d'eau: très bien (20-17); bien (16-13); acceptable (12-9); mauvaise (8-5); très mauvaise (4-0)

Tableau 12: Indice IBGN : Qualité biologique du cours d'eau de 2007 à 2009 [Vulcano-Greullet *et al.*, 2011].

6.3 Suivi environnemental

6.3.1 Source de substances.

Lors de la valorisation d'un sable de fonderie utilisé en technique routière, l'analyse des émissions peut être réalisée en premier temps dans un laboratoire via des essais de lixiviation et percolation du matériau routier (sable de fonderie utilisé traité ou non mis en œuvre dans le corps de chaussée). Dans un second temps, l'émission de substances peut être suivie in-situ, dans le cadre d'un chantier expérimental (ou plot). Un exemple de schéma de plot (plot utilisé dans un chantier expérimental dans la Saône et Loire) est présenté dans la figure 5 :

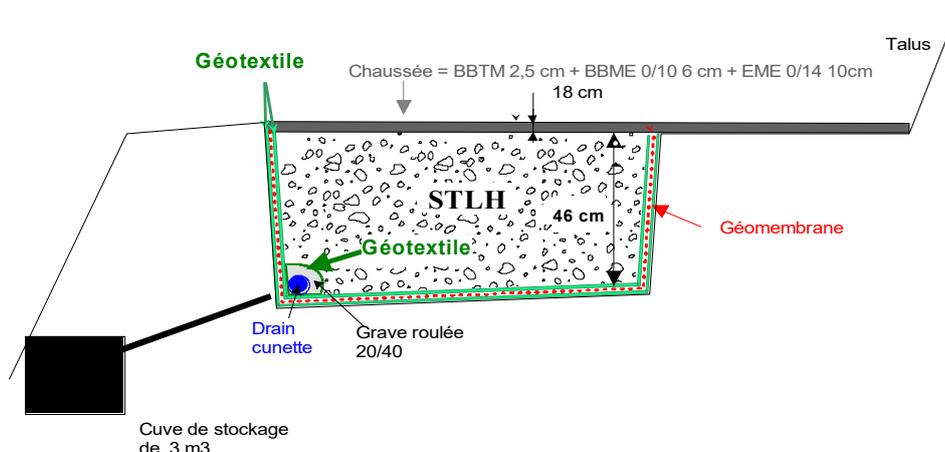


Figure 5 : Coupe transversale schématique d'un plot expérimental [Vulcano-Greullet *et al.*, 2011]

Les eaux collectées dans la cuve de stockage sont suivies régulièrement dans le temps par des mesures des volumes collectés et par des analyses physico-chimiques.

Un exemple d'analyse physico-chimique des eaux collectées est présenté dans le tableau 11. Il s'agit d'un exemple de résultat obtenu dans le cadre du suivi dans le temps (2007-2011) d'un chantier expérimental, où des sables de fonderie à vert usés traité à 5.5% par un liant hydraulique ont été mis en œuvre en technique routière :

Identification	Valeur min	Valeur moyenne	Valeur max
pH (unité pH)	10,2	12,22	12,65
Cond (µS/cm)	316	5030,30	10710,00
DCO (mg/l)	33	150,95	262,00
Cl (mg/l)	8	27,39	55,80
SO4 (mg/l)	8,06	57,71	138,00
Phénol (mg/l)	0,05	0,22	0,37
Cr VI (mg/l)	0,05	0,05	0,05
Cr (µg/l)	1,3	11,97	39,70
Pb (µg/l)	1,4	5,57	15,10
Ni (µg/l)	12,2	258,38	569,00
Cu (µg/l)	5,9	25,46	113,00
Cd (µg/l)	0	0,0	0,00
Zn (mg/l)	0,05	0,06	0,06

Tableau 16 : Exemple d'analyses physico-chimiques d'eau collectée dans des plots contenant des sables de fonderie traité au liant hydraulique [Vulcano-Greullet *et al.*, 2011]

Le retour d'expérience du réseau des LPC [Vecoven, 1985] a mis en évidence qu'un traitement aux liants hydrauliques (ciment et laitier prébroyé activé à la chaux) peut fixer des substances (fer, ammonium) et limiter leurs relargages dans les eaux d'infiltration. Cependant, ces observations restent limitées à quelques études particulières et elles doivent être confirmées par un examen spécifique à chaque chantier.

Notons que la doctrine environnementale veut qu'un traitement ne vise que l'atteinte de performances mécaniques nécessaires à l'usage et non la rétention d'éléments polluants dans le but de respecter un référentiel environnemental. Le respect des exigences du guide SETRA (2011) est un préalable avant d'envisager un traitement.

6.3.2 Condition de fabrication et de mise en œuvre

Pas de données sur ce sujet

7 Aspects sanitaires

Risques de silicose :

Compte tenu de leur composition minéralogique et chimique, les travailleurs utilisant des sables de fonderie usés pourraient risquer, en premier lieu, d'être exposés à de la poussière de silice. La poussière de silice est en effet depuis longtemps reconnue comme un risque professionnel majeur, entraînant des invalidités et des décès (par

silicose) parmi les travailleurs dans plusieurs secteurs tels que les domaines des mines et carrières, les industries des matériaux réfractaires, des poteries et des fonderies. Si de nombreuses études sanitaires ont été menées pour les travaux de sablage, de concassage et de minage de roches massives, s'agissant des sables de fonderie, aucun travail significatif n'est accessible à ce jour. Une seule étude expérimentale ponctuelle a été menée dans l'état nord américain de l'Indiana lors de la mise en œuvre d'un remblai routier fabriqué à partir de sable de fonderie usés mélangé avec des poussières de filtres à air [Afzal W. *et al.*, 2002]. Les ouvriers avaient alerté les chercheurs sur la façon dont les nuages de poussière se formaient en phase chantier. (cf. photo).



Figure 5 : Photo illustrant la mise en place des capteurs de mesure d'exposition aux poussières de silice dans un chantier de l'état de l'Indiana – remblai en mélange de sable de fonderie usé et de poussières de filtres [Afzal W. *et al.*, 2002].

L'étude a révélé que les niveaux d'exposition des ouvriers tels que calculés selon les limites d'exposition (PEL : permissiv exposition limits) de l'office de la protection de la santé (OSHA : Occupation Health and Safety Administration) n'atteignaient jamais le taux de surexposition. (cf. tableau 17).

Echantillon n°	Exposition (mg/m ³)	Gravité	Commentaire
1	0.488	0.58	<1.0 pas de surexposition
2	0.368	0.76	<1.0 pas de surexposition
3	0.534	0.40	<1.0 pas de surexposition
4	1.031	0.86	<1.0 pas de surexposition

Tableau 17: Les résultats sur des échantillons humains pour l'exposition et la gravité [Afzal W. *et al.*, 2002].

Par ailleurs, les résultats ont montré qu'un sable de fonderie usé pouvait contenir en pourcentage massique entre 15 et 30% de taux de poussière respirable (pour une limite autorisée de 20%). Il a été établi en l'occurrence que les spécificités du sable utilisé sur ce chantier étaient telles que moins de 20% des poussières respirées correspondaient à des particules fines inférieures à 5 micromètres (particules les plus impliquées dans les risques de maladies). L'étude a montré que cette proportion pouvait diminuer d'un facteur 2 en prenant la précaution de limiter l'incorporation de poussières de filtre à air dans le sable de fonderie. Cependant, les auteurs de cette étude insistent sur son

caractère très ponctuel et regrettent de n'avoir pas eu l'occasion de suivre d'autres chantiers utilisant des sables de fonderies.

8 Utilisation dans les infrastructures routières

8.1 Conditions de mise en œuvre (Critères de recyclage liés à l'environnement immédiat de l'ouvrage routier)

En absence d'un guide d'application des sables de fonderie en technique routière, on peut se référer aux conditions cités par le CETIF [Duquet B., 2010] et s'inspirer de celles citées dans l'annexe I de l'arrêté ministériel du 18 novembre 2011 relatif au recyclage en technique routière des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux:

- en dehors des zones inondables et à une distance minimale de 50 cm des plus hautes eaux cinquantennales, ou à défaut des plus hautes eaux connues ;
- à une distance minimale de 30 m de tout cours d'eau, y compris les étangs et les lacs. Cette distance est portée à 60 mètres si l'altitude du lit du cours d'eau est inférieure de plus de 20 mètres à celle de la base de l'ouvrage ;
- en dehors des périmètres de protection rapprochés des captages d'alimentation en eau potable ;
- en dehors des zones répertoriées comme présentant une sensibilité particulière vis-à-vis des milieux aquatiques. Sont notamment concernées :
 - o les zones couvertes par une servitude d'utilité publique instituée, en application de [l'article L.211-12 du code de l'environnement](#), au titre de la protection de la ressource en eau ;
 - o les zones désignées comme zone de protection des habitats des espèces, de la faune et de la flore sauvages en application de [l'article L.414-1 du code de l'environnement](#) ;
 - o les parcs nationaux
- en dehors des zones de karsts affleurants.
- De limiter la dispersion des sables de fonderies en privilégiant leur réemploi dans des chantiers importants
- Lors du stockage, limiter au maximum possible l'exposition aux intempéries

8.2 Utilisation en remblais.

Le guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme classe ce matériau en F9.

En raison de leur granulométrie homométrique, les sables usés ne présentent pas une bonne cohésion propre et peuvent poser des problèmes de traficabilité. Le retour d'expérience sur des chantiers expérimentaux, suivi par le réseau des LPC (Vecoven et al., 1982), a permis d'établir quelques précautions d'emploi :

- un contrôle de la teneur en eau dans les sables, comprise entre 10 et 15%, permettant une mise en œuvre optimale ;
- un compactage moyen à l'aide d'engins vibrants ou à pneus ;
- une protection des talus (sol très érodable) par placage de terre végétale engazonnée pour lutter contre le ravinement et les ruissellements d'eau ;

- une mise en œuvre d'une couche de forme mince pour assurer la traficabilité de surface.

Par ailleurs, l'utilisation de tels sables est interdite pour le remblaiement de carrières et d'excavations lorsque des interactions avec les eaux souterraines sont possibles.

Une étude électrochimique a été réalisée afin d'examiner l'agressivité des extraits aqueux de sables d'origine et de sables usés (2 à base d'argile et 6 à la résine) sur des éléments métalliques (fonte grise, fonte ductile, acier galvanisé). Les mesures des résistances de polarisation et les tracés de courbes potentio-cinétiques ne révèlent pas un risque de développement de corrosion des conduits d'adduction d'eau ou d'assainissement en contact direct avec des sables d'origine et des sables usés. Ces derniers peuvent donc être utilisés sans risque de dommages en remblaiement de tranchées [Loos, 1984].

Mais compte tenu de la diversité des matériaux constituant les conduites métalliques enterrées, de la complexité des phénomènes de corrosion et de la qualité hétérogène des sables usés, cette étude recommande seulement de surveiller, pour une application particulière, les paramètres susceptibles de favoriser la corrosion : pH, gaz dissous, conductivité des sels solubles (Cl^- , SO_4^{2-} , ...).

La norme A05-252 de juillet 1990 (corrosion des métaux par les sols) précise les critères d'acceptation des matériaux de remblai au contact d'éléments de structure en acier au carbone en contact permanent avec ces remblais.

8.3 Utilisation en assises de chaussées

Le retour d'expérience sur des chantiers expérimentaux, suivi par le réseau des LPC [Genet, 1996], a permis de tester, sans problèmes particuliers, des mélanges contenant des sables usés jusqu'à :

- 15% dans une grave non traité ;
- 15% dans un sable traité aux liants hydrauliques ;
- 20% dans une grave traitée aux liants hydrauliques.

Il est important de s'assurer que la présence de produits organiques n'a pas un effet inhibiteur sur certains liants hydrauliques routiers.

Quelles que soient la technique de chaussée envisagée, la maîtrise de la qualité des sables usés (origine, conditions de stockage, granularité, argilosité,...) est prépondérante. Toute variation notable aura une incidence sur les performances du produit fini.

8.4 Utilisation dans les techniques d'enrobés

Les sables usés peuvent être utilisés comme constituant en substitution partielle du sable traditionnellement incorporé dans les formules d'enrobé.

Une étude de faisabilité, réalisée par le réseau des LPC [Genet, 1996], a eu pour objectif d'appréhender l'incidence d'un sable usé, incorporé à 10% dans une formule, sur le comportement d'un enrobé. Il en résulte un enrobé beaucoup plus maniable (essai PCG), de compacité plus élevée (essai Duriez) et de faible résistance à l'orniérage par rapport à une formule de béton bitumineux de caractéristiques connus.

En limitant le domaine d'emploi sur des revêtements peu circulés (voirie de lotissement, trottoirs, parking VL, cour, ...) sans dépasser un dosage de 10% dans une formule d'enrobé, les sables usés peuvent être incorporés dans des matériaux traités aux liants hydrocarbonés. Pas de mesures faites sur les émissions lors de l'élaboration en centrale d'enrobage

9 Bibliographie

9.1 Publications

AFS: American Foundry Society (2007) Foundry industry benchmarking survey: industry practices regarding the disposal and beneficial reuse of foundry sand.

Afzal, Waseem and Jacko, Robert B. (2002), "Worker Exposure to Airborne Contaminates When Using Waste Foundry Sand in the Construction of Road Embankments". Joint Transportation Research Program. Paper 229.
<http://docs.lib.purdue.edu/jtrp/229>

Aron R., Briand Y., Verge J., 1993. « Les sables de fonderie – Nature, régénération, recyclage, réutilisation. » Document interne ADEME , Novembre 1993, 33p.

BIPE Conseil, 1996. « ENVIROSCOPE – L'environnement dans les fonderies. » juin 1996, 72p.

Coz A., Andrés A., Soriano S., Viguri J.R., Ruiz M.C., Irabien J.A. (2009) « Influence of commercial and residual sorbents and silicates as additives on the stabilisation/solidification of organic and inorganic industrial waste» Journal of Hazardous Materials, Volume 164, Issues 2-3, 30 May 2009, Pages 755-761

Dańko J., Dańko R., Holtzer M.: «Reclamation of used sands in foundry production». Metallurgy, vol. 42, br. 3, Zagreb, (July/ September) 2003, pp. 173 – 178.

Dańko J. , Holtzer M., Dańko R., Grabowska B.: «Analysis and structure of wastes generated in Polish foundries». Archives of Foundry Engineering. Polish Academy of Sciences. Commission of Foundry Engineering; ISSN 1897-3310 . 2008 vol. 8 spec. iss. 2 pp. 5–9.

Dańko R. (2010) « Unconventional methods of reclamation of used moulding sands» Archives of Foundry engineering Volume 10 , Issue 3 / 2010 , p 29 – 34

Dayton E.A., Whitacre S.D., Dungan R.S., Basta N.T. (2010) Characterization of physical and chemical properties of spent foundry sands pertinent to beneficial use in manufactured soils Plant and soil, vol. 329, no1-2, pp. 27-33

Deng A., Tikalsky P-J. (2008) Geotechnical and leaching properties of flowable fill incorporating waste foundry sand Waste Management, Volume 28, Issue 11, November 2008, Pages 2161-2170

Devaux P., Vecoven J., 1984. « Les déchets de sables de fonderie en technique routière. » Bulletin de l'association Internationale de géologie de l'Ingénieur n°30, pp 375-378.

Dungan R.S., Huwe J., Chaney R.L. (2009) Concentrations of PCDD/PCDFs and PCBs in spent foundry sands *Chemosphere*, Volume 75, Issue 9, May 2009, Pages 1232-1235

Dungan R.S., Dees N.H. (2009) The characterization of total and leachable metals in foundry molding sands *Journal of Environmental Management*, Volume 90, Issue 1, January 2009, Pages 539-548

Duquet B., Gestion des déchets de sables à vert et en mélange: valorisation. *Fonderie Fondateur d'aujourd'hui* – N° 235 – mai 2004 p 32-40.

Gillaizeau O., Gallone T., Battaglia F., Dictor M.-C., Fourcher S. Hau J.-M., Morin D., 1999. « Traitement biologique des sables contenant des résines phénoliques. » *Hommes & Fonderies*, Avril 1999, n°292, pp18-20.

Guney Y., Aydilek A.H., Demirkan M.M. (2006) Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases *Waste Management*, Volume 26, Issue 9, 2006, Pages 932-945

Jasson Philippe (2005) "Sables et matériaux de moulage de fonderie", *Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques*, Vol. M 3575, pp.1-23.

Laine-Ylijoki J., Wahlström M., Orkas J. (2000), Assessment of environmental impacts of foundry waste in utilisation and disposal *Waste Management Series*, Volume 1, 2000, Pages 449-461

Lamotte Josselin, SOFREMINES, Colbaux Alain, CTIF « Recyclage des sables à vert uses par voie hydraulique. Point bibliographique et approche économique », *Fonderie Fondateur d'aujourd'hui*, N°272, février 2008.

Margoux et al., 2000. « Traitement par biodégradation des phénols dans les sables de fonderie en vue de leur valorisation dans les sous-couches routières. » rapport final ADEME, Janvier 2000, 50p.

Platret G., Millet J., Witier P., 1984. « Analyses des sables de fonderie », *Compte rendu d'étude du LCPC Paris*, Septembre 1984, 18p.

Rimoux L. (2006), « Valorisation des déchets de fonderie. Aspects réglementaires au niveau international et perspectives françaises ». *Fonderie Fondateur d'aujourd'hui* – N° 257 – août-sept 2006 p 43-49.

Torralba B. (2010), «La valorisation des sables de fonderie en techniques routières ». *Fonderie magazine* n° 4 – avril 2010 p42-47

Vanden Bossche J-P. « Typologie et qualité biologique du réseau hydrographique de Wallonie basées sur les assemblages des macro-invertébrés » Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles, septembre 2005.

Vulcano-Greullet N., Yazoghli-Marzouk O., Crosnier J., Cantegrit L. Frieteyre L., Nouvion-Duporey S., Jullien A. "Recycling foundry by-product in road construction: geotechnical et environmental properties", Congress Sustainability through resource concervation and recycling, 05/2011, Falmouth, Royaume Uni.

Yazoghli-Marzouk O., Jullien A. Ropert C. "Environmental assessment of foundry sands reuse scenario", 4th International conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation (wasteeng) 10-13 spetembre 2012, Porto, Portugal.

9.2 Documents techniques

Bernard, Vecoven J., 1986. « Les sables de fonderie : Suivi du chantier CD 250 ISSANS RAYMANS. » Compte rendu d'étude du LRPC de Autun, Février 1986, 16p.

Brouwet J., Vecoven J., Moset, 1985. « Traitement des sables de fonderie par un liant.» Compte rendu d'étude du LRPC de Autun, Juin 1985, 13p.

Centre Technique de l'industrie de la Fonderie (CTIF), 1982. « Comité sols et déchets solides. Campagne d'essais »

CETE Nord-Pas-de-Calais, Mines de Douai., 2002. « Guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et co-produits industriels (PREDIS). Guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des sables de fonderie. Décembre 2002, 21p.

Chevalier, 1995. « Utilisation de sable de grenailage de fonderie en remblai de tranchée. » Compte rendu de planche d'essais Renault, 1995, 9p.

Devaux P., 1984. « Les sables de fonderie : Utilisation en technique routière. » Compte rendu d'étude du LRPC de Strasbourg, Mai 1984, 17p.

Duquet B. « Utiliser les déchets dans les travaux publics, valorisation des sables de fonderie-réglementation-expérimentations et opérations pilote », CTIF, 2010.

Genet, 1996. « Valorisation des sables de fonderie en technique de chaussées : Etude de faisabilité. » Compte rendu d'étude du LRPC de Autun, Juillet 1996, 15p.

Genet, 1998. « Bilan des études et suivi de chantier RN 81. » Compte rendu d'étude du LRPC de Autun, Février 1998, 18p.

Guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et co-produits industriels. « Plan Régional d'Elimination des Déchets Industriels et des Déchets de Soins à Risques (PREDIS), Nord-pas-de-Calais », 1996. 140p.

Guide technique régional Nord/Pas de Calais « Filières de valorisation des déchets du BTP et des co-produits industriels de la région Nord-Pas de Calais », Guide d'aide à la décision à destination des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre et bureaux de contrôles », Juin 2011.

Hervy S., Lefort M., 2000. « Etude de valorisation d'un sable de fonderie phénolé,. » Compte rendu d'étude du LROP, Janvier 2000, 6p.

La décision du Conseil n° 2003/33/CE du 19 décembre 2002 pour l'admission des déchets en décharges

L'arrêté 28/10/2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes

L'article L.211-12 du code de l'environnement modifié par la loi n°2010-874 du 27 juillet 2010

L'article L.414-1 du code de l'environnement modifié par la loi n°2010-788 du 12 juillet 2010

La circulaire environnementale 01/2004 opération de dragage

Le guide ESR version 2 : VCI US sol, VCI UNS sol

Loos G., 1984. « Essais électrochimiques sur les sables de fonderie. » Compte rendu d'étude du LRPC de Strasbourg, Mars 1984, 19p.

Mauget G., Luminet J. P. « Réutilisation des sables de fonderie en Haute-Marne pour le renforcement des chaussées à faible trafic », Revue Générale des Routes et des Aéroports, n°837, mars 2005.

Rimoux L., CTIF, « Valorisation des déchets de fonderie. Aspects réglementaires au niveau international et perspectives françaises », Fonderie Fondateur d'aujourd'hui - N°257 - août-septembre 2006

Vecoven J., 1985. « Effets des polluants des sables de fonderie traités aux liants hydrauliques. » Compte rendu d'étude du LRPC de Autun, Septembre 1985, 6p.

Vecoven J., Baillie, 1990. « Etude préalable de sables de fonderie traités au ciment. » Compte rendu d'étude du LRPC de Autun, Février 1990, 7p.

Vecoven J., Fleury, 1982. « Les sables de fonderie : Usine Peugeot à Monbéliard. » Compte rendu d'étude du LRPC de Autun, Février 1982, 27p.

Catalogue des matériaux de substitution en Bourgogne, DRE Bourgogne, octobre 2004, 30 pages.

Guide d'utilisation des matériaux de Haute Normandie ; DRE Haute Normandie et CETE Normandie Centre, mars 2000,

Vulcano-Greullet N. "Valorisation des sables de fonderie sur route départementale, RD 980", rapport de recherche n°07/19145, avril 2007, CETE de Lyon, department Laboratoire d'Autun.

U.S. EPA Office of Resource Conservation and Recovery. Risk Assessment of Spent Foundry Sands in Soil-Related Applications. May 2009

Yazoghli-Marzouk O. « Application du guide Sétra : Acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière », Journée RST Déchet, 07/12/2010.

9.3 Normes

A05-252 juillet 1990 ; Corrosion par les sols – Aciers galvanisés ou non mis en contact de matériaux naturels de remblai (sols)

NF CEN/TS 14405 (2005). Caractérisation des déchets – Essai de comportement à la lixiviation – Essai de percolation à écoulement ascendant (dans des conditions spécifiées).

NF EN 933-9 Août 1999 ; Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 9 : qualification des fines. Essai au bleu de méthylène.

NF EN 12457-2 décembre 2002 ; Caractérisation des déchets – Lixiviation – Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues. Partie 2 : Essai en bûchée unique avec un rapport liquide-solide de 10l/kg et une granularité inférieure à 4mm (sans ou avec réduction de la granularité)

NF P 11-300 septembre 1992 ; classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

NF T 90-112 Détermination de l'indice de phénol

P 18-597 Décembre 1990 ; Granulats - Détermination de la propreté des sables : équivalent de sable à 10 % de fines

XP P 18-540 octobre 1997 ; Granulats : définitions, conformité, spécifications.

X 31-210 décembre 1992 ; Déchets – Essai de lixiviation

La directive cadre sur l'eau (DCE) 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil, du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau

9.4 Sites internet

Cahiers Sectoriels Technologies & Environnement, « LA FONDERIE 2 », Observatoire des Technologies :

http://mrw.wallonie.be/dgtre/DIRECTION_GENERALE.HTM

Dossier thématique « RECYCLAGE DES SABLES », Centre technique des Industries de la Fonderie : <https://www.ctif.com/?s=recyclage+des+sables>

Planifier et améliorer la gestion des déchets du BTP dans la région Nord/Pas-de-Calais :

http://www.nord.equipement.gouv.fr/Eau_environment-risques/dechets_btp/divers/deplBTP.pdf

Portail état-unien sur les matériaux de recyclages dont les sables de fonderie du RMRC (Recycled Materials Resource Center) : <https://rmrc.wisc.edu>

Portail état-unien sur l'utilisation en techniques routières des matériaux de recyclages dont les sables de fonderie du TFHRC (Turner-Fairbank Highway Research Centre) Foundry sand. : <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/fs1.cfm>

Portail britannique : Aggregates Information Service. (2002). The re-use of foundry sand as an aggregate :

Projet européen SAMARIS : <http://samaris.zag.si>

Le consortium FIRST : <https://highways.dot.gov/public-roads/januaryfebruary-2005/recycled-roadways>

Auteurs et relecteurs

Auteurs OFRIR1	Philippe Touzé (LCPC)
Relecture d'experts OFRIR1	Jean-Claude Auriol (LCPC), Yves Brosseau (LCPC), François de Larrard (LCPC), Jérémie Domas (INERIS), Guillaume Gay (INERIS), Agnès Jullien (LCPC), Vincent Lédée (LCPC), Patrice Piantone (BRGM), Pierre Silvestre (CETE Lyon)
Relecture comité de pilotage	Laurent Château (ADEME), Delphine Chevalier (SETRA), Pierre Dupont (SETRA), Frédéric Leray (Ministère de l'environnement),
Auteurs OFRIR2	Oumaya Marzouk (CETE Lyon), Catherine Neel (CETE Lyon/ DL Clermont-Ferrand)
Relecture d'experts OFRIR2	Céline Chouteau (CETE Nord-Picardie), Guillaume Gay (INERIS)
Relecture bureau	Laurent Château (ADEME), Guillaume Gay (INERIS), Agnès Jullien (IFSTTAR)
Date de mise en ligne, version finale	18 juin 2013