

## PNEUS

### Mise à jour de la version : octobre 2013

1	Définition .....	1
2	Lois, normes, guides .....	1
3	Origine, formation, stockage.....	4
4	Caractéristiques physico-chimiques .....	9
5	Caractéristiques géotechniques .....	11
6	Caractéristiques environnementales .....	11
7	Aspects sanitaires .....	14
8	Usages (Types d'infrastructures).....	15
9	Références bibliographique.....	27
10	Auteurs et relecteurs.....	32

## 1 Définition

L'ensemble des pneumatiques usagés des véhicules (PU) comprend les Pneumatiques Usagés Réutilisables (PUR) et les Pneumatiques Usagés Non Réutilisables (PUNR). Les PUR sont destinés au rechapage ou au marché des pneus d'occasion (France et export). Les PUNR doivent être traités. Les pneumatiques PUNR sont des déchets non dangereux et classés dans la rubrique 16 01 03 de la liste des déchets (liste unique définie dans le code de l'environnement, Livre V : Prévention des pollutions, des risques et des nuisances, Titre IV : Déchets Chapitre 1er : Dispositions générales relatives à la prévention et à la gestion des déchets, article R541-8, Annexe II)

Les pneumatiques concernés par cette rubrique sont des Pneumatiques Usagés Non Réutilisables (PUNR). Un pneumatique est déclaré non réutilisable par les professionnels du secteur ([ALIAPURwww.aliapur.fr](http://www.aliapur.fr)) lorsqu'il ne remplit plus sa fonction initiale définie par « la mobilité en toute sécurité ».

## 2 Lois, normes, guides

### 2.1 Textes

Historiquement depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2002, il n'est plus possible de mettre en décharge les pneus entiers ou déchiquetés. L'arrêté du 9 septembre 1997 relatif aux décharges existantes et aux nouvelles installations de stockage de déchets ménagers et assimilés n'autorise la mise en décharge que pour les déchets ultimes (loi n° 92-646 du 13 juillet 1992). Les installations de stockage des PU sont soumises à la réglementation ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement).

Le menu généralités du site OFIR traite du cadre général du code de l'environnement et des obligations en matière de gestion de déchets. Les articles R 543-137 à 152 du Code de l'Environnement sont plus particulièrement relatifs à la gestion des déchets de pneumatiques. Ces articles de la section 8 du Code de l'Environnement remplacent le décret n°2002-1563 du 24 décembre 2002. Ils ont été modifiés par l'article 23 du Décret 2011-828 du 11 juillet 2011 portant diverses dispositions relatives à la prévention et à la gestion des déchets.

- [Le décret n° 2002-1563 du 24 décembre 2002](#) relatif à l'élimination des pneumatiques usagés a été publié au Journal Officiel n° 303 du 29 décembre 2002. Ce décret organisait l'ensemble des opérations d'élimination des PU à l'exception de ceux équipant ou ayant équipé les cycles et cyclomoteurs. Il impliquait l'ensemble des acteurs de la filière, des producteurs aux éliminateurs (collecteurs, valorisateurs) en passant par les distributeurs et les détenteurs ainsi que les institutionnels.
- [L'arrêté du 8 décembre 2003](#) relatif à la collecte des pneus usagés (ramassage, regroupement, tri) fixait les conditions de délivrance préfectorale de l'agrément. En outre, tous les stocks de PU au 01/07/2004 devraient être éliminés au plus tard au 01/07/2009.

La responsabilité des producteurs dans la filière est fortement accentuée aujourd'hui.

## 2.2 Normes françaises et européennes

Au niveau européen, un atelier européen CWA (CEN Workshop Agreement) a été créé en mars 2000 pour travailler sur la valorisation et le recyclage des produits issus des PU et a produit un document final en 2003 [AFNOR, 2003]. Ce document traitait de la production de matériaux issus de pneumatiques usagés et fournissait une classification de ces matériaux en vue de faciliter leurs spécifications dans les différentes applications représentatives. Il ne traite pas de la performance opérationnelle ou de l'utilisation de ces matériaux, ni des applications elles-mêmes. La démarche qui s'en est suivie visait à transformer ce document en norme, soit en créant un nouveau Comité Technique (TC) du **CEN**, soit en consultant le Bureau Technique (BT) du CEN pour transformation directe en norme.

**Les normes relatives aux pneus usagés non réutilisables disponibles à ce jour sont listées ci-après.** AFNOR (Association Française de Normalisation), indices :

*XP T 47 500\_ AC CWA 14243 (2003).*

Indice de classement : T47500

Titre : Matériaux issus de pneumatiques usés et leurs applications.

*XP T47-765 (2011-09-01)*

Indice de classement : T47-765

Titre : Pneus Usagés Non Réutilisables (PUNR) - Caractérisation des granulats issus de procédés de granulation - Guide pour une campagne d'essai

*XP T47-757 (2008-11-01)*

Indice de classement : T47-757

Titre : Pneus usagés non réutilisables (PUNR) - Détermination du format des produits issus du broyage primaire - Méthode d'évaluation de barbules

*XP T47-760 (2010-06-01)*

Indice de classement : T47-760

Titre : Pneus usagés non réutilisables (PUNR) - Caractérisation de produits issus du broyage primaire - Guide pour une campagne d'essais

*XP T47-759 (2009-12-01)*

Indice de classement : T47-759

Titre : Pneus usagés non réutilisables (PUNR) - Échantillonnage et Prélèvement de produits issus du broyage primaire - Scénario tas en mouvement

*XP T47-756 (2009-01-01)*

Indice de classement : T47-756

Titre : Pneus usagés non réutilisables (PUNR) - Échantillonnage et prélèvement de produits issus du broyage primaire - Scénario convoyeur

*XP T47-762-1 (2011-12-01)*

Indice de classement : T47-762-1

Titre : Pneus usagés non réutilisables (PUNR) - Échantillonnage et prélèvement de fils métalliques issus de broyage primaire ou granulation - Partie 1 : scénario convoyeur

*XP T47-753 (2007-10-01)*

Indice de classement : T47-753

Titre : Pneus usagés non réutilisables (PUNR) - Détermination du format des produits issus du broyage primaire - Méthode basée sur la mesure automatisée de la plus grande longueur projetée

*XP T47-752 (2007-02-01)*

Indice de classement : T47-752

Titre : Pneus usagés non réutilisables (PUNR) - Détermination de la granulométrie des granulats issus de PUNR (Pneus Usagés Non Réutilisables) - Méthode basée sur le tamisage mécanique des produits

*XP T47-754 (2007-12-01)*

Indice de classement : T47-754

Titre : Pneus usagés non réutilisables (PUNR) - Détermination du taux de fils métalliques ferreux dans les granulats issus de PUNR - Méthode basée sur le tri magnétique des produits

*XP T47-755 (2008-06-01)*

Indice de classement : T47-755

Titre : Pneus usagés non réutilisables (PUNR) - Échantillonnage de granulats issus de PUNR - Méthode basée sur la réalisation d'un échantillon représentatif du contenu d'un big-bag par prélèvements successifs à différentes hauteurs

*XP T47-758 (2010-06-01)*

Indice de classement : T47-758

Titre : Pneus usagés non réutilisables (PUNR) - Détermination séparée des taux de fibres textiles libres et liées dans les granulats issus de PUNR à l'issue de procédés de granulation - Méthode basée sur une séparation manuelle après tamisage mécanique des produits

*XP T47-761-1 (2011-07-01)*

Indice de classement : T47-761-1

Titre : Pneus usagés non réutilisables (PUNR) - Détermination du taux d'impuretés résiduelles des fils métalliques ferreux issus du broyage primaire ou de la granulation de PUNR - Méthode de référence basée sur la décomposition thermique en atmosphère inerte

*XP T47-751 (2006-07-01)*

Indice de classement : T47-751

Titre : Pneumatiques usagés non réutilisables (PUNR) - Détermination du format des produits issus du broyage primaire - Méthode manuelle basée sur la mesure de la plus grande longueur projetée 500. AC CWA 14243, 2003. « Matériaux issus de pneumatiques usés et leurs applications. »

### **3 Origine, formation, stockage**

Les pneumatiques proviennent principalement de l'industrie automobile. La répartition par origine de détenteur [ADEME – ETRA 1999] est la suivante :

- professionnels du pneu
- garages et stations services
- grande et moyenne distribution

#### **3.1 - Origine et constitution d'un pneumatique**

La coupe d'un pneumatique (Figure 1) montre des profilés de gomme, des nappes de fils en acier ou en textile croisés ou parallèles et des tringles constituées d'assemblages de fils métalliques. Pour les pneumatiques à structure radiale développés à l'origine par Michelin (95% du marché dans l'UE en 2000 selon ETRA [ADEME, 2000]), la nappe- carcasse - l'enveloppe (2) - est composée de minces câbles en fibres textiles disposés en arceaux droits et collés au caoutchouc. Les nappes-ceinture - (6) sous la bande de roulement - sont armées de câbles en acier très fins, croisées obliquement et collées l'une sur l'autre. Les textiles utilisés majoritairement sont la rayonne, le polyester, le nylon et l'aramide. Le pneumatique est ainsi un composite formé d'assemblage de différentes structures, soit de 15 à 20 produits semi-finis et près de 200 matières premières. Ces structures doivent assurer des fonctions bien définies du pneumatique [ADEME, ETRA, 1999].

Les pneumatiques classiques (Figure 1) sont constitués principalement de :



- 1- Gomme intérieure d'étanchéité
- 2- une nappe-carcasse,
- 3 - retournement de la nappe carcasse
- 4 - talon et tringle métallique
- 5 - flanc
- 6 - nappes ceintures
- 7 - une bande de roulement sculptée,

**Figure 1** - Schéma d'un pneumatique. Le pneu, un matériau composite.  
(Source : internet)

Le pneu est constitué principalement de caoutchouc. Sa constitution varie peu entre les pneus tourisme et poids lourd (Tableau 1).

En Europe, selon ALIAPUR, un pneu tourisme parcourt en moyenne 40 000 km. Un pneu poids lourd parcourt 300 000 km et jusqu'à 1 million de km après rechapages.

Matériaux	Pneu Tourisme	Pneu Poids lourd
Elastomère	48 %	45 %
Noir de carbone	22 %	22 %
Acier	15 %	25 %
Textile	5 %	0%
Oxyde de zinc	1%	2 %
Soufre	1%	1%
Autres	8 %	5 %

**Tableau 1** – Constitution moyenne des pneus [ETRA, 2010]

La quantité de pneumatiques usagés s'exprime généralement en masse (tonne). Le Tableau 2 donne à titre indicatif, d'après une étude de l'ADEME, le poids moyen unitaire des pneus selon le type de véhicule, ainsi que les quantités générées de PU par an.

Type de véhicule	Masse (kg)	Nombre de pneus/(t/an)
Véhicules de tourisme	6,25	160
Véhicules utilitaires légers	11	91
Camions	50	20
Semi-remorques	55/80	12/18
Véhicules agricoles	100	10
Engins de travaux publics	100	10

**Tableau 2** – Masse moyenne unitaire des différents types de pneus usagés [ADEME, 2000]

Plus récemment en 2004, ALIAPUR a défini quatre catégories de pneus PU en fonction de leur poids :

**Catégorie A**, pour un poids moyen : 6,5 kg

(Tourisme dont 4x4 tous terrains, enveloppes de secours spéciales ou galettes, camionnettes dont 4x4 tous terrains, petit agricole-agraires roues directrices, motos routières-non routières-trial) ;

**Catégorie B**, pour un poids moyen : 53 kg

(Manutention inférieure à 60 kg, poids lourds, remorque agricole) ;

**Catégorie C**, pour un poids moyen : 77 kg

(Pneumatiques agraires roues motrices, travaux publics, manutention comprise entre 60 et 200 kg) ;

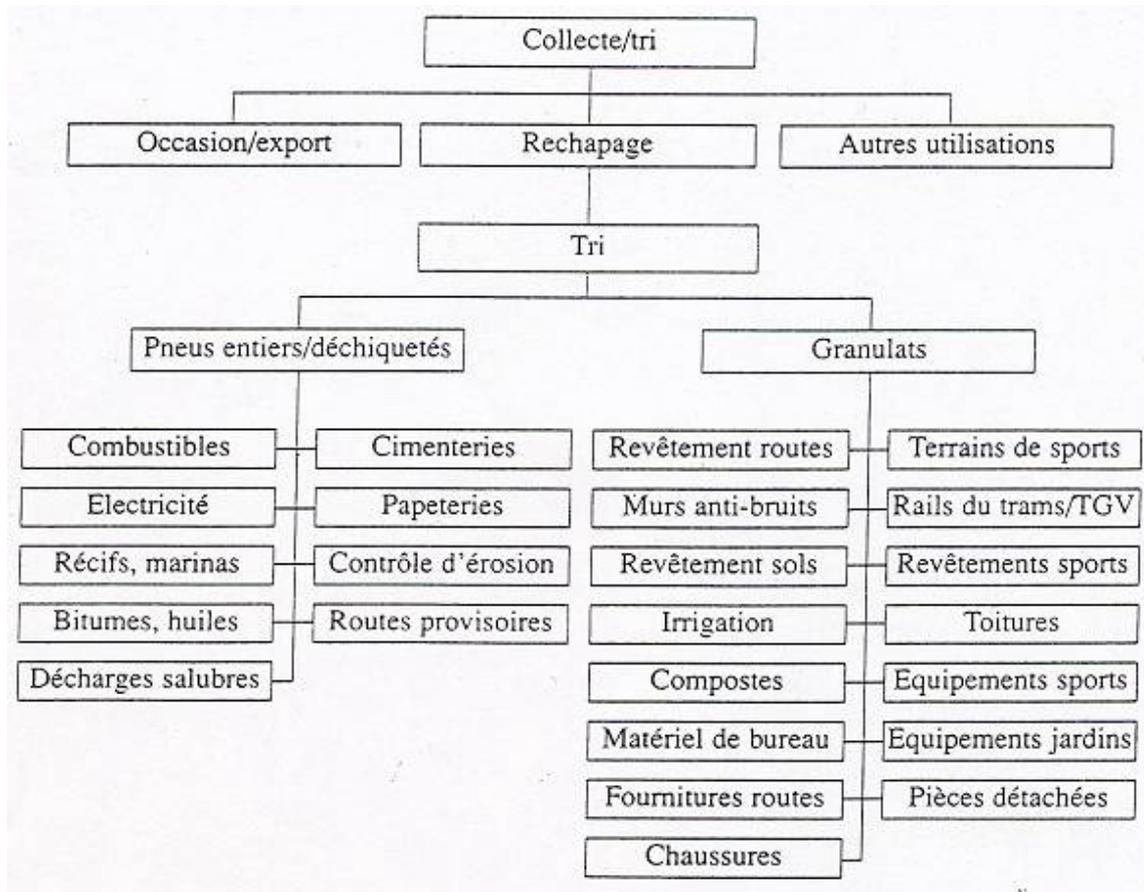
**Catégorie D**, pour un poids moyen : 365 kg

(Génie civil, manutention supérieures à 200 kg).

### 3.2 – Filières de valorisation des PUNR

Différentes étapes sont organisées avant l'entrée dans la filière de valorisation : la collecte, le tri, le transport et le stockage ; elles concernent les pneumatiques entiers. Le critère technique de tri entre les PUR et les PUNR porte sur la profondeur de la sculpture et l'intégrité de la structure de l'enveloppe. Pour homogénéiser la procédure, une démarche de certification unique au niveau européen des collecteurs dans les opérations de tri des PU a été proposée par l'European Tyre Recycling Association (ETRA), [ETRA, 2002]. Selon l'ADEME, un professionnel du tri peut dégager 20 à 40 % d'un lot de pneus usagés PU sous forme de PUR. La situation du rechapage est actuellement délicate du fait de la présence et de la concurrence des pneus neufs à bas prix.

Pour les PUNR, deux voies de valorisation sont pratiquées après pré-traitement : la valorisation énergétique et la valorisation matière (Figure 2).

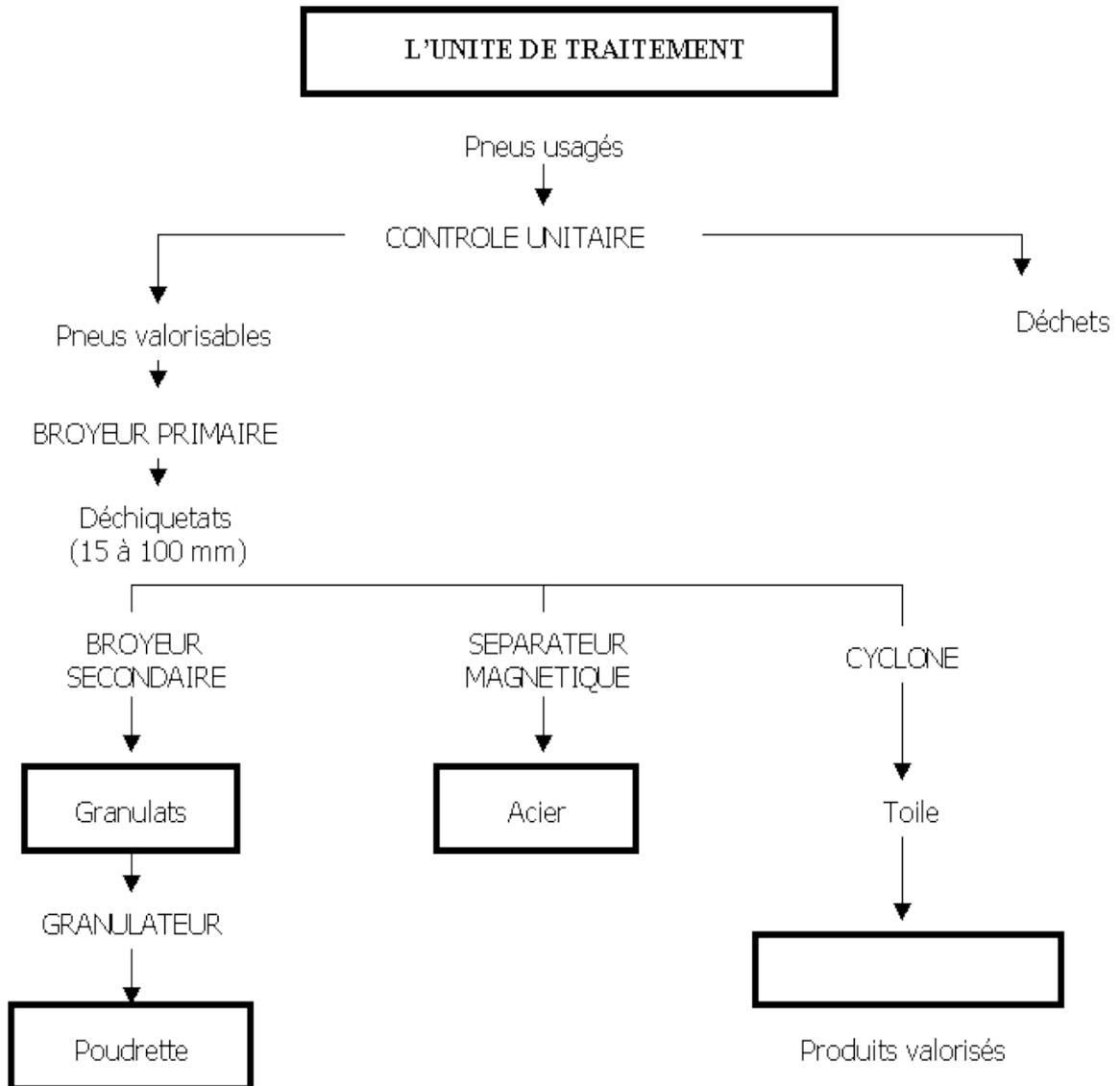


**Figure 2 - Schéma des différentes filières de valorisation [ETRA, 1999]**

Les définitions des demi-produits proposées ci-dessous sont celles retenues dans le CWA 14243 [Bertolini, 2002].

- La valorisation énergétique comme combustible a été développée notamment aux Etats-Unis et au Japon est désigné par FDP (Fuel Dérivé du Pneu). Elle utilise le fort pouvoir calorifique du caoutchouc du pneu (34 MJ/kg), équivalent à celui du charbon, dans les chaudières industrielles, les centrales thermiques, les unités d'incinération et les cimenteries. En France, cette filière a démarré en 1993. Mais elle croît faiblement, et reste actuellement limitée, en termes de volumes éliminés. En 2008, l'entrée en vigueur de la directive sur l'incinération des déchets a réduit, voire interrompu la valorisation des pneumatiques usagés dans des anciens fours à procédés « humides », par manque de disponibilité de technologies de réduction des émissions.
- La valorisation matière intervient sous différentes formes (exemple en Figure 3) et porte soit sur des pneumatiques entiers, soit sur des demi-produits en l'état, déchiquetés ou broyés. La recyclabilité des matériaux constituant les pneus reste très limitée. Le recyclage des pneus porte sur la toile, l'acier et la gomme. La valorisation de la toile se heurte actuellement à la très forte

concurrence des textiles usagés, qui sont de meilleure qualité. Le caoutchouc régénéré, obtenu par dévulcanisation du caoutchouc, est utilisé en complément du caoutchouc vierge dans des applications industrielles, mais son utilisation reste très limitée à cause des problèmes techniques liés au produit. La valorisation en demi-produits est plus prometteuse. Les domaines concernés sont l'industrie, la fabrication des pièces moulées, de produits d'étanchéité, d'isolation phonique (granulats, poudrettes) et, pour le génie civil, les sols sportifs, les sols amortissants, les enrobés, les ouvrages en terre (granulats, poudrettes, pneus entiers, déchiquetés). Pour ces demi-produits, le matériau est soit du caoutchouc, soit du pneu découpé.



**Figure 3** - Schéma d'une filière de valorisation matière [Interstate 880/Dixon Landing Road, 2001]

- Une autre voie encore peu développée, la thermolyse, permet à la fois la valorisation énergétique et la production des matières dérivées.

Selon l'ETRA (European Tyre Recycling Association), la valorisation dans le domaine du génie civil représentait en 1999 9 % en moyenne de la filière de valorisation des PUNR dans l'Union européenne, soit 230 000 tonnes par an [ADEME, 2000].

## 4 Caractéristiques physico-chimiques

La matière de base du pneumatique est composée principalement d'élastomère naturel (caoutchouc) ou synthétique (copolymère de styrène-butadiène ou autres issus de la pétrochimie) à laquelle on ajoute des charges (noir de carbone), des plastifiants, des antioxydants et des agents de vulcanisation tels que l'oxyde de zinc ou le soufre.

**Caractéristiques générales** [Michelin - Doc PU9903] : quelques caractéristiques générales du pneu sont indiquées ci-dessous :

- Humidité, < 1 % en poids ;
- métaux lourds, < 0,1 % en poids (excepté pour le Zn) ;
- température d'inflammation,  $338 \pm 8$  ° C ;
- température d'auto inflammation,  $465 \pm 8$  ° C ;
- pouvoir calorifique, 32-34 MJ/kg.

**Composition moyenne en poids des matériaux du pneu** : le Tableau 3 donne la composition moyenne élémentaire en pourcentage massique du pneu.

Eléments	Pneu Tourisme	Pneu Poids lourd	
Carbone (C)	71 %	62 %	ALIAPUR
Hydrogène (H)	7 %	6 %	
Oxygène (O)	4 %	3 %	
Azote (N)	0.5 %	0.5 %	
Soufre (S)	1 %	1 %	
Fer (Fe)	15,5 %	25,5 %	
Zinc (Zn)	1 %	2 %	
Halogènes (Chlore, Brome)	< 0,1 %	< 0,1 %	(Smolders et Degryse, 2002) et (Michelin, 1999)
Cuivre (Cu)	< 0,1 %	< 0,1 %	
Cobalt (Co)	< 0,05 %	< 0,03 %	
Plomb (Pb)	< 50 ppm	< 50 ppm	
Cadmium (Cd)	< 3 ppm	< 3 ppm	
Chrome (Cr)	< 100 ppm	< 180 ppm	
Nickel (Ni)	< 200 ppm	< 300 ppm	
Mercure (Hg)	Non détectable	Non détectable	
Sélénium (Se)	Non détectable	Non détectable	
Te+Sb+Se+V+Cr+Ni+Hg+As+P b+Co+Sn	< 1000 ppm	< 1000 ppm	
PCP	Non détectable (< 0,5 ppm)	Non détectable (< 0,5 ppm)	
PCB-PCT *	Non détectable (< 0,5 ppm)	Non détectable (< 0,5 ppm)	
Zinc (Zn)	> 0,8	> 1,6	

\*PCB Polychlorobiphényle – PCT Polychloroterphényle

**Tableau 3** – Composition moyenne élémentaire du pneu en % massique ou ppm des éléments présents dans le pneu selon différentes sources.

## 5 Caractéristiques géotechniques

Compte tenu du contexte normatif et réglementaire, il existe peu de données sur les caractéristiques des produits issus des pneus usagés. Le tableau 4 donne les caractéristiques mécaniques de la bande de roulement et des flancs des pneumatiques PUNR. Ces caractéristiques ont été déterminées dans le cadre de la réalisation des ouvrages PNEUSOL<sup>®</sup> [Long, 1985].

La masse volumique moyenne d'un pneu entier et du broyat est respectivement de 0,15 t/m<sup>3</sup> et de 0,5 t/m<sup>3</sup>.

	Résistance à la traction	
	Moyenne (kN)	Ecart-type (kN)
Bande de roulement	56	24
Flanc	25	10

**Tableau 4** – Caractéristiques mécaniques des éléments -d'un PUNR

Dans le cas des granulats calibrés, la masse volumique sèche du produit compacté est de l'ordre de 0,60 t/m<sup>3</sup> dans le cas du granulat 15/25 mm NIKOPNEU [CER – LMS, 2003].

## 6 Caractéristiques environnementales

### 6.1 Effets sur les écosystèmes

Comme ils ne présentent pas de propriétés dangereuses, les éléments constitutifs des pneus ne sont pas intrinsèquement nocifs. Toutefois, ils peuvent comporter des risques pour la santé publique et l'environnement s'ils ne sont pas convenablement gérés et éliminés» [UNEP, 2011].

Les pneus usés sont des déchets volumineux qui sont difficiles à compacter, à collecter et à éliminer. Incorrectement traités, ils défigurent le paysage et peuvent bloquer les canaux de circulation, les ruisseaux entraînant ainsi des modifications de l'écoulement des eaux qui peuvent à leur tour être des facteurs d'érosion, d'envasement et d'inondation» [UNEP, 2011].

« Parce qu'ils retiennent la chaleur et ont une structure ouverte, les amoncellements de pneus accroissent le risque qu'un incendie causé par un acte délibéré ou un accident. Un tel incendie est difficile à maîtriser et à éteindre et peut rejeter des fumées, autres produits toxiques qui polluent l'air, les sols et les cours d'eau» [UNEP, 2011].

## 6.2 Acceptabilité environnementale

Les travaux publiés dans les revues internationales sur les pneus dans le cadre de leur première utilisation, s'intéressent tout à la fois aux particules d'usure (poussières), à leur composition et à leurs impacts sur l'air, l'eau, les sédiments. Les impacts plus particulièrement étudiés sont la toxicité et l'écotoxicité [Wik et al, 2009]. Bien que ces travaux considèrent les effets du trafic routier les substances analysées qui nécessitent des suivis sont plus particulièrement le zinc et les composés organiques.

Pour ces matériaux réalisés à base de pneus recyclés, vérifier l'acceptabilité environnementale a amené à la réalisation d'études de :

- Caractérisation physico-chimique des lixiviats ;
- Tests écotoxiques sur les lixiviats ;
- Mesure des émissions dans l'air des COV et du formaldéhyde

Dans une étude menée en 2007, Wik a suivi une approche inédite pour déterminer les éléments toxiques pouvant s'échapper de la gomme des pneus au contact de l'eau. Plusieurs formulations de gommes utilisant différents additifs ont été préparées, dont on a tiré des lixiviats aqueux que l'on a ensuite soumis à des essais de toxicité normalisés avec *Daphnia magna*. Les résultats ont montré une forte influence des additifs chimiques choisis sur la toxicité des lixiviats dont il convient de tenir compte à l'avenir, lors de l'élaboration de nouvelles gommes, pour réduire leur impact potentiel sur l'environnement» [UNEP, 2011].

Si l'on se base sur les travaux disponibles dans la littérature et réalisés par ALIAPUR et différents auteurs de revues scientifiques.

Des travaux relatifs à l'acceptabilité environnementale ont été réalisés sous l'égide d'ALIAPUR. Plusieurs types d'ouvrage ont aussi pu être étudiés sous l'angle des rejets vers l'environnement, les résultats principaux obtenus dans le cadre sont résumés ci-après

## 6.3 Condition de fabrication et de mise en œuvre

C'est surtout le suivi environnemental qui a fait l'objet de différentes études et plusieurs types d'applications ci-dessous ont par contre fait l'objet d'un suivi détaillé des rejets vers l'environnement.

## 6.4 Suivi environnemental

### Granulats de pneus

Les impacts environnementaux de l'utilisation de granulats de pneus comme matériau de remplissage dans les terrains de sport en gazon synthétique ont été examinés [Aliapur, 2007]. Axées sur les éléments et substances chimiques présents dans les matériaux de remplissage, en particulier ceux provenant de pneus usés, ces

études se sont penchées sur les paramètres physico-chimiques suivants : cyanures totaux, indice phénol, hydrocarbures totaux, 16 hydrocarbures aromatiques polycycliques, carbone organique total, Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Zn, fluorures, nitrates, ammonium, chlorures, sulfates, pH et conductivité. Les résultats des mesures faites sur les paramètres physico-chimiques identifiés et des essais écotoxicologiques montrent qu'après une année d'expérimentation, les percolats des gazons synthétiques utilisant des granulats en élastomère vierge ou issus de pneus usés ne sont pas susceptibles d'avoir des effets à court ou moyen terme sur les ressources en eau » [UNEP, 2011].

### **Réaménagements de carrière**

En France, une étude concernant le réaménagement de carrière avec des pneus PUNR entiers (procédé PNEUSOL) a été réalisée [ANTEA et EEDEMS, 2006]. Deux types d'essais ont été réalisés : des essais de percolation in-situ effectués sur des alvéoles pilotes contenant des pneus et arrosées avec les eaux d'exhaure de la carrière et des essais de lixiviation en laboratoire utilisant des casiers lysimétriques. De cette étude il ressort que la contribution des PUNR aux émissions des remblais, des graves et des terres n'est pas parue comme significative.

### **Gazons synthétiques**

Aliapur [2012] a publié des résultats d'études afin d'évaluer les rejets d'un gazon synthétique à base de PUNR, du point de vue de son comportement à la lixiviation et de ses émissions dans l'air. Différents types d'essais ont été réalisés ([https://www.aliapur.fr/uploads/pdfs/gazon-synthetique-evaluation-environnementale-2007-2011\\_1.pdf](https://www.aliapur.fr/uploads/pdfs/gazon-synthetique-evaluation-environnementale-2007-2011_1.pdf)) et notamment des essais de lixiviation sur des systèmes complets (fibres, sable, colle et matériaux de remplissage) de gazons synthétiques (EPDM, PUNR) ; Ces mesures ont en outre permis de réaliser des études sanitaires INERIS selon plusieurs scénarios types d'exposition.

Les sols testés qui comprennent un sol de référence pour l'acceptation sont trouvés comparables en terme de lixiviats et les tests écotoxiques réalisés n'ont pas mis en avant d'écotoxicité des lixiviats. Les émissions de COV sont un peu plus importantes dans le cas des sols en EPDM (type d'élastomère à base d'éthylène, propylène, diène et monomère) que des sols à base de PUNR.

### **Bassins de rétention et bassins infiltrants**

La valorisation des PUNR dans des bassins de rétention a fait l'objet d'études poussées de la part d'Aliapur. Ces études ont été réalisées par le groupement scientifique EEDEMS (Evaluation Environnementale des Déchets, Matériaux et Sols Pollués) ; elles consistent dans la réalisation d'une expérimentation in situ avec : suivi de la lixiviation à long terme, caractérisation chimique des lixiviats et tests d'écotoxicité (test daphnies NF EN ISO 6341, tests vers de terre NF EN ISO 17512-1, test algues NF T90-375 et test orge NF X31-201) sur ces mêmes lixiviats. Afin de reproduire les effets d'un arrosage régulier d'espaces verts engazonnés, des essais ont également été menés à plus long terme sur des espèces végétales terrestres du type gazon Ray Grass.

L'ensemble de ces essais n'a révélé aucun problème qui pourrait s'apparenter à une contamination des eaux avec lesquels les PUNR se trouvent en contact.

Du point de vue de la caractérisation physico-chimique, ont été recherchés pH, conductivité, ammonium, nitrates, cyanures totaux, métaux : As, Ba, Cd, Co, Cr, Cr-VI, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn, sulfates, chlorures, fluorures, 16 HAP hydrocarbures totaux, indice phénol, carbone total, carbone inorganique total, carbone organique total.

L'analyse des résultats montre que les différentes substances recherchées (métaux, hydrocarbures, ...) sont toujours à des concentrations inférieures aux valeurs limites légales de référence et inférieures aux valeurs limites de potabilisation des eaux.

Les essais écotoxiques n'ont montré aucune toxicité de l'eau du bassin de rétention à court et moyen terme.

Les essais sur les gazons enfin, n'ont montré aucun impact sur la germination et la croissance.

### **Sols équestres**

Concernant les sols équestres, des mesures de particules dans l'air ont été réalisées au cours des essais effectués sur les sols équestres à base de granulats de PUNR. Ces mesures ont permis de montrer que l'un des intérêts majeurs des sols équestres à base de granulats de PUNR est que ce type de sol émet moins de poussières dans l'air que les sols traditionnels à base de sable [Alliapur, 2010]

## **7 Aspects sanitaires**

Les PU ne sont pas des déchets dangereux. Mais leur stockage aérien non contrôlé peut constituer une source de nuisances (esthétique, développement de larves, de moustiques, de rongeurs...) et présente des risques potentiels d'incendie et donc de pollution et de sécurité.

Incorrectement gérés, les déchets de pneus constituent un gîte idéal pour les rongeurs et des sites de reproduction pour les moustiques. Leur forme arrondie, à laquelle s'ajoute leur imperméabilité, leur permet de retenir l'eau et d'autres débris (par exemple, des feuilles en décomposition) durant de longues périodes, offrant ainsi des conditions idéales pour la croissance des larves des moustiques » [UNEP, 2011].

Les pneus usés transportés d'un endroit à l'autre facilitent non seulement la dissémination de moustiques qui, sans eux, auraient une aire de répartition limitée, mais aussi la pénétration d'espèces allogènes qui sont souvent plus difficiles à contenir, ce qui accroît le risque de maladies» [UNEP, 2011].

En 1995, l'Institut Pasteur de Lille (France) a procédé à des études de la toxicité de la poudrette de caoutchouc provenant de carcasses de pneus pour *S. capricornutum* (algue), *Daphnia magna* (crustacé), et *Brachydanio rerio* (poisson), conformément aux normes ISO 8692, 6341 et 7346. Une étude complémentaire de détermination de la toxicité aiguë selon la norme ISO 11268/1, menée par l'Institut Pasteur de Lyon, a examiné les effets de la poudrette de caoutchouc obtenue à partir de pneus sur des vers de terre placés dans un substrat défini. Aucun de ces essais n'a mis en évidence une quelconque toxicité [UNEP, 2011]».

D'après le rapport de l'UNEP (2011), « il convient de tenir compte non seulement de la toxicité aiguë ou à court terme mais aussi de la toxicité à long terme. Les études portant sur cette dernière montrent que certains types de pneus, par exemple ceux qui possèdent une forte teneur en huiles aromatiques peuvent, dans certaines conditions, laisser échapper des quantités considérables d'hydrocarbures aromatiques polycycliques qui, s'infiltrant dans l'environnement aquatique [STEPHENSEN et al, 2003]».

En 2005, Wik et Dave se sont penchés sur la possibilité d'utiliser l'essai de toxicité sur *Daphnia magna* selon la norme ISO 6341 comme test de présélection pour l'éco-étiquetage des pneus tourisme. À la base, le problème visé était les effets toxiques sur les organismes aquatiques que peuvent produire les particules d'usure des pneus et, en particulier, les huiles fortement aromatiques qu'elles contiennent. Les résultats obtenus après 24 et 48 h d'exposition montrent que tous les pneus sont toxiques pour *Daphnia magna* et que la toxicité peut varier d'un facteur de 100 d'un pneu à l'autre. Étant donné que ce chiffre a été obtenu avec 12 pneus choisis au hasard, la variance totale pour l'ensemble des pneus présents sur le marché devrait être beaucoup plus élevée. La différence de toxicité entre les pneus d'été et les pneus d'hiver était considérable ». [l'UNEP, 2011]

A partir des travaux de la littérature sur l'exposition de la poudrette en caoutchouc par ingestion, inhalation ou contact cutané et à partir d'expérimentation menée par Hofstra 2007, l'auteur conclut en l'absence de risque pour la santé par exposition au pneu issu de voiture occasion, utilisé dans la pelouse artificielle des terrains de sport » [UNEP, 2011].

Globalement, la valorisation de pneus peut présenter des risques pour les écosystèmes. En 2005, Wik et Göran ont montré l'intérêt du test daphnia pour caractériser la dangerosité des pneus de différentes origines. Wik, et Dave [2009] ont ensuite effectué une revue de la littérature et l'évaluation des risques. Il semble que les éléments problématiques soient les métaux notamment le Zn plus que les composés organique [Kanematsu , 2009, Azizian, 2003]. Des restrictions d'usage pourraient donc réduire les risques : éloignement des eaux de surface, couverture de sol suffisante pour les eaux souterraines [Warmerdam, 2006] » [UNEP, 2011].

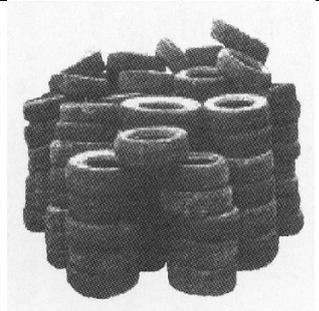
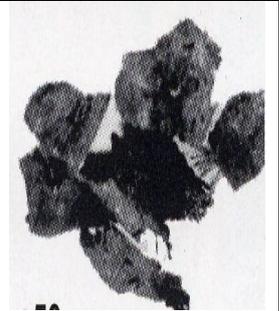
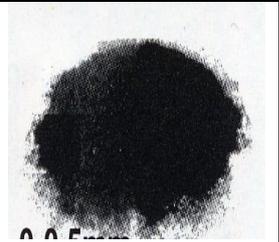
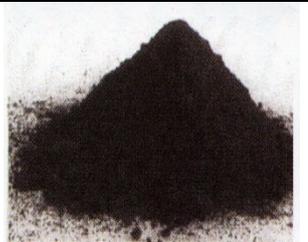
## **8 Usages (Types d'infrastructures)**

### **8.1 – Mode d'élaboration et type d'usage**

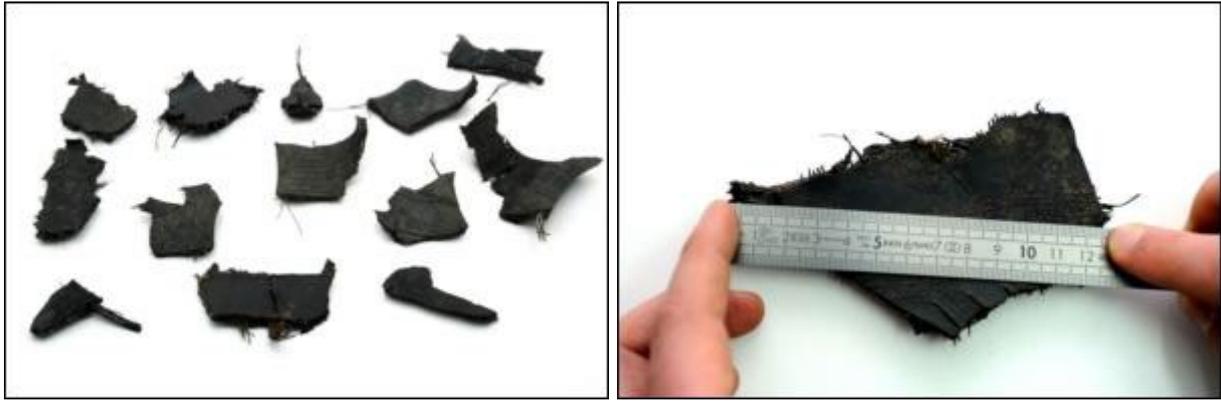
Sur un total d'environ 300 000 tonnes de pneus usagés collectées chaque année par la filière Aliapur, 29% sont destinées à une valorisation énergétique. Sur un total d'environ 300 000 tonnes de pneus usagés collectées chaque année par la filière Aliapur, 16% sont destinées à la réutilisation. Le tri de ces pneus s'effectue directement après chaque collecte par les collecteurs agréés de la filière. La possible valorisation matière est détaillée ci-après.

Déjà en 2002 les PUNR étaient utilisés sous différentes formes dans les applications en infrastructures routières : pneus entiers (< 5 %) et demi-produits (> 95 % : pneus découpés, déchiquetés, granulats ou poudrettes).

Les ouvrages concernés par l'utilisation de PUNR sont les couches de forme, les remblais, les murs de soutènement, les dispositifs de protection de berges, les structures-réservoirs, les drains, les couches de roulement ; des précisions sont apportées ci-après. En effet, la valorisation dans le domaine du génie civil et sa validation scientifique ou technique se sont beaucoup développées dans les années 80 même en l'absence de normes ou de documents réglementaires concernant ces applications. La figure 4a montre les différentes granulométries et formes obtenues dans le cadre de ces actions de valorisation lors des premiers travaux sur le recyclage dans ce domaine. Aujourd'hui s'ajoutent les broyats qui sont constitués d'éléments de tailles variées, Figure 4b.

			
Pneus entiers	Pneus déchiquetés Dimension > 50 mm	Pneus déchiquetés Dimension 10- 50 mm	Granulats 7/15 mm
			
Granulats 2/7 mm	Granulats 0,5/2 mm	Poudrettes 0/0,5 mm	Poudrette < 50 μm

a) source [Antoine, 2002]



b) Broyats 25 mm / 350 mm , ( source Aliapur )



c) Fibres textiles, (source Aliapur)

**Figure 4** - Exemples de demi-produits issus des pneumatiques

### Applications visées :

L'utilisation de pneus usagés entiers de grandes dimensions (agricoles et génie civil) pour la réhabilitation de carrières après exploitation a longtemps été marquée par des pratiques peu et mal encadrées. C'est pour cette raison qu'Aliapur a décidé, en 2005, d'identifier de façon précise des préconisations d'utilisation de pneus usagés comme remblais en réaménagement de carrière (technique de type Pneusol® décrite ci-après) et, surtout, d'en étudier les impacts environnementaux.

### Broyats, pneus entiers

L'emploi de broyats de pneus usagés est couramment utilisé dans la construction de remblais légers. Les broyats utilisés doivent répondre à des critères spécifiques et précis en fonction de leur granulométrie, de leur poids, de leur masse volumique, de leur résistance au cisaillement, de la compressibilité et du coefficient de poussée latérale des terres au repos. Afin de s'adapter à ces particularités, le type de broyats

doit être caractérisé au cas par cas, ce que permet le logiciel Visiopur développé par Aliapur.

De plus d'autres applications principales sont à mentionner en lien avec les infrastructures : Aciérie, fonderie, cimenterie (combustible alternatif)

## **Granulats**

Citons les applications principales :

Gazons synthétiques, Aires de jeux, Sols sportifs, Sols équestres, Panneaux et sols industriels, Tapis antivibratoires et amortisseurs de chocs (tramway), Objets moulés, mobilier urbain, roues et roulettes Bétons, Ecrans acoustiques, Filtration des eaux usées.

## **Fibres textiles, poudrette**

Les fibres textiles issues des pneus sont obtenues lors de la transformation des broyats en granulats. Pour que des granulats de pneus usagés puissent être valorisés dans les différentes filières de production industrielles, ils doivent présenter une qualité constante et optimale. Après les phases de broyage successives, les granulats sont débarrassés de leurs fibres textiles par aspiration après séparation. Le poids des fibres n'excède pas 6% du poids total du pneu, selon qu'il s'agisse de pneus de voiture ou de pneus poids-lourds.

Incorporée dans le bitume ou associés aux enrobés, la poudrette de pneu usagé permet d'améliorer les caractéristiques acoustiques de l'enrobé ainsi que sa résistance à la fissuration lors du gel/dégel. De même, ils favorisent l'adhérence des véhicules.

On peut également intégrer dans ces enrobés les fibres textiles issues du pneu, après nettoyage et traitement de celles-ci. Plusieurs études ont été réalisées afin de vérifier les caractéristiques de ce produit et d'en optimiser le dosage. Il en résulte que l'incorporation des fibres traitées permet d'améliorer de 20% la résistance à la fatigue du revêtement, entraînant ainsi une augmentation de la durée de vie de l'enrobé de plusieurs années [Études Aliapur, Ademe, PR Industrie, RINCENT BTP – 2005].

Etude des mélanges ternaires. L'étude des mélanges à chaud granulats/bitume/fibres a permis de vérifier l'homogénéité de la dispersion des fibres au sein du

mélange, de définir la procédure de mélange. Elle a par ailleurs confirmé tout l'intérêt d'un traitement de surface des fibres permettant d'obtenir plusieurs effets:

- assurer un bon enrobage des fibres dans les enrobés bitumineux,
- renforcer la liaison enrobés/ fibres.
- obtenir une bonne dispersion lors du malaxage.
- augmenter la densité pour réduire les coûts de transport.
- faciliter le dosage

Les techniques de mise en œuvre et différentes pratiques utiles à connaître sont décrites ci-dessous

## **8.2 - Remblais et ouvrages en terre**

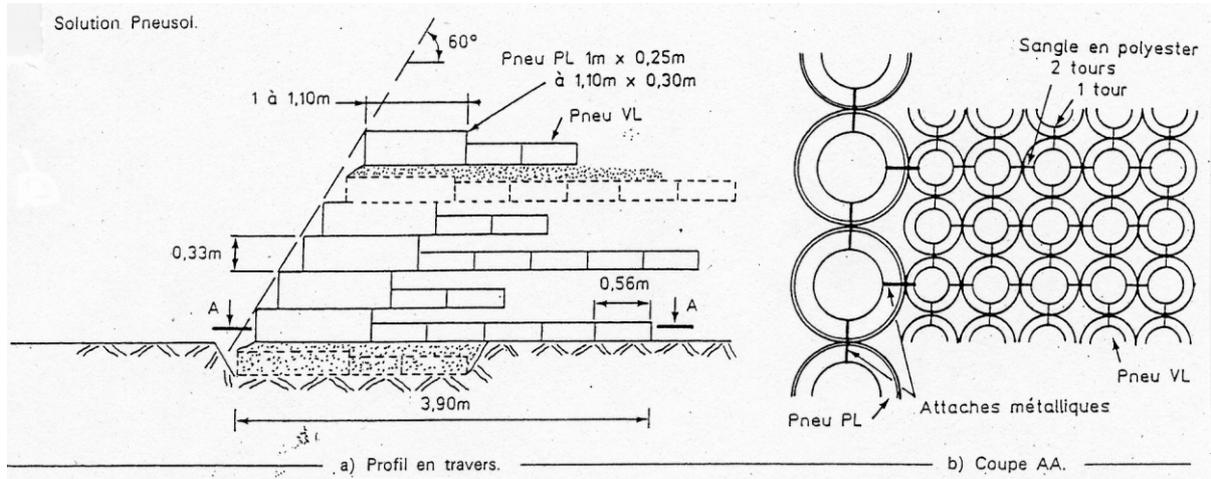
Ce sont principalement les ouvrages géotechniques : remblais routiers, ouvrages de soutènement, murs anti-bruit, massifs renforcés, dispositifs de protection de berges... Ces applications sont opérationnelles et certaines ont fait l'objet de brevets.

Dans ces applications, le pneu est utilisé soit entier, soit uniquement avec la bande de roulement, soit uniquement avec les flancs découpés, soit sous forme de déchiquetés ou de granulats. Les pneus peuvent être des pneus tourisme ou poids lourds. Au plan de la durabilité, des études citées dans [Long, 1985] ont montré que le vieillissement du caoutchouc du pneumatique est lié principalement aux actions de la lumière, de la chaleur, de l'ozone et de l'acidité du milieu. Pour les ouvrages géotechniques, ces facteurs ne jouent pas un rôle déterminant compte tenu de la nature du sol rencontré et du type d'ouvrage réalisé, ainsi que du niveau ou de l'intensité des facteurs cités. Dans ce domaine d'application, le volume consommé serait de l'ordre de 15 000 tonnes par an [ADEME, 2001].

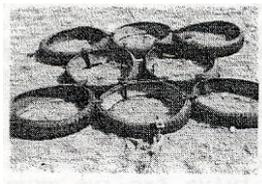
### **• Le PNEUSOL<sup>®</sup> [Long, 1985 ; SETRA, 1989]**

Le PNEUSOL<sup>®</sup> est formé par l'association de pneus PUNR (poids lourds ou tourisme) entiers partiellement découpés (enlèvement d'un flanc) (Figure 5) ou totalement découpés (deux flancs et une bande de roulement) et de sols. Les éléments de pneus sont utilisés comme renforts du massif de sol rapporté. Les bandes de roulement ou les flancs sont découpés et associés en nappe par des attaches. Ces bandes peuvent être posées sur champ ou aplaties (Figure 6). Dans le cas de l'emploi des flancs, ceux-ci sont posés à plat. Cette technique, développée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées par N.T. Long, est largement diffusée

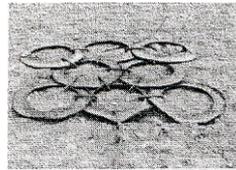
depuis 1982. Plusieurs centaines d'ouvrages ont été construits en France et à l'étranger.



**Figure 5** Schéma d'un remblai PNEUSOL [Long, 1985]



(a)



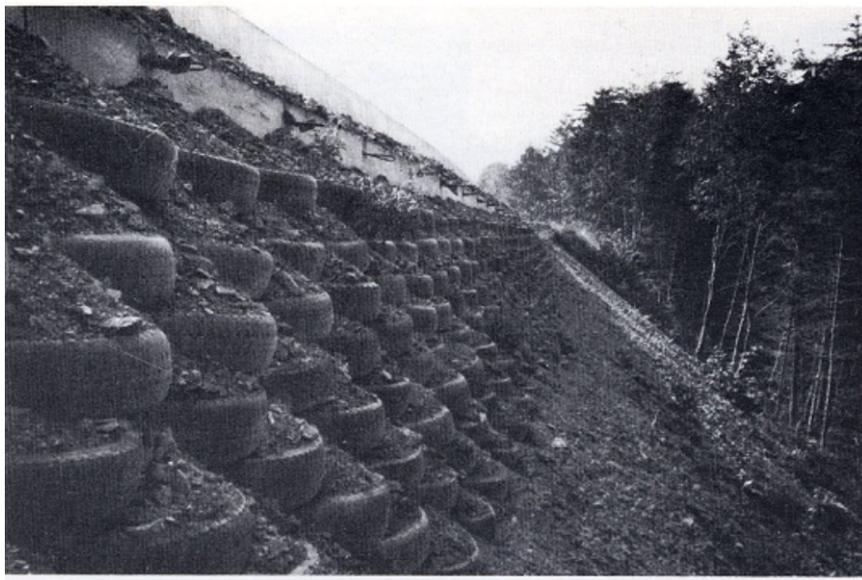
(b)

**Figure 6** Vue des dispositions des éléments du pneu dans le remblai : Bande de roulement (a) et flancs (b) [Cartier et al, 1981]

Les différentes applications concernent des ouvrages de soutènement, des ouvrages réducteurs de poussées ou de charges, des murs anti-bruit (Figure 7), des ouvrages de protection des berges et des pentes de talus (Figure 8).



**Figure 7** - Vue d'un mur anti-bruit PNEUSOL<sup>®</sup> [Long, 1985]



**Figure 8** - Vue d'un remblai PNEUSOL<sup>®</sup> [Beaumont et al, 1987]

L'avantage essentiel de ce type d'ouvrage, outre ses performances techniques, est essentiellement sa simplicité d'exécution et l'adaptabilité des ouvrages au relief et à la déformabilité du terrain.

▪ **Le PNEUSOL léger** [Long et Valeux, 1989]

C'est une technique dérivée de la technique PNEUSOL<sup>®</sup> traditionnelle. On utilise les pneus poids lourds entiers. Les pneus sont disposés par nappe. Seul le volume correspondant à la jante est remblayé par du sol. Le poids volumique du PNEUSOL allégé varie de 6 à 8 kN/m<sup>3</sup> et dépend de la couche de sol intercalaire. Les principales applications concernent des remblais allégés, des ouvrages d'absorbeurs d'énergie, des ouvrages répartiteurs de contraintes.

• **Le PNEURESIL<sup>®</sup>** [ANRED, 1987 ; Coulet et Perrin, 1989 a]

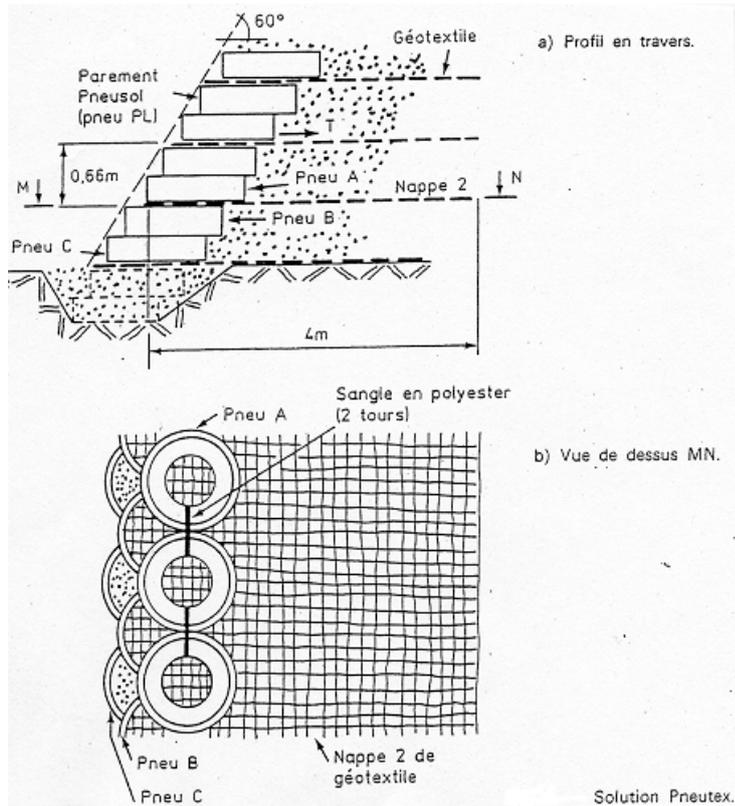
Le PNEURESIL<sup>®</sup> (Réalisation Souple Isolante Légère à l'aide de PNEU au rebut) a fait l'objet d'un brevet dont le développement était assuré par le bureau d'étude INGEVAL à Veyssilieu (38), l'entreprise Bianco et Cie à Ugine (73) et le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lyon à Bron (69). C'est une technique utilisant des pneus entiers sans remplissage, ni liaisonnement pour des applications en remblai allégé. Les pneus sont empilés les uns sur les autres. Le poids volumique du PNEURESIL<sup>®</sup> est de l'ordre de 3,5 kN/m<sup>3</sup>. Le procédé valorise 5 pneus poids lourds ou 25 pneus véhicules légers par m<sup>3</sup> de remblai.

• **L'ARMAPNEUSOL<sup>®</sup>** [Coulet et Perrin, 1992]

C'est également une technique qui dérive de la technique PNEUSOL traditionnelle. Il fait l'objet d'un brevet LCPC – Forézienne d'Entreprise (Saint Etienne – 42). Les pneus sont des pneus de poids lourds entiers avec un flanc en face supérieure découpé, remplis de sol. Il s'agit d'une technique de massif de sol renforcé par des nappes de treillis soudés. Les pneus sont disposés horizontalement et longitudinalement et jouent le rôle de parement. Dans le sens vertical, les lits de pneus sont décalés d'un niveau à un autre. Les éléments de renforts sont disposés horizontalement et pincés entre deux rangs de pneus. La pente de talus de l'ouvrage est relativement raide, de l'ordre de 75°.

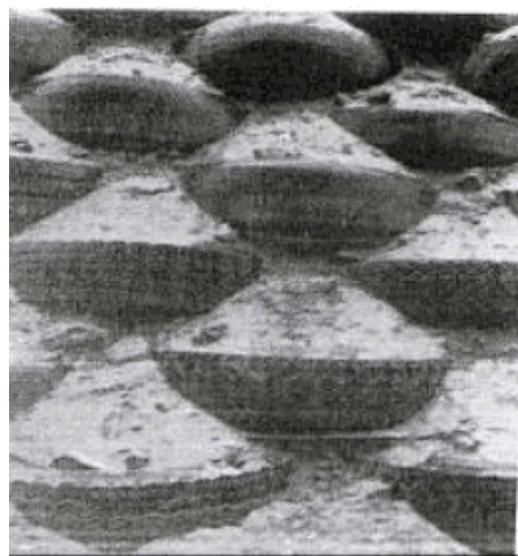
• **Le PNEUTEX<sup>®</sup>** [Mathieu et Marchal, 1989], [Coulet et Perrin, 1989 b]

C'est également une technique de renforcement de sol dérivée de la technique PNEUSOL<sup>®</sup> traditionnelle. Le principe (Figure 9) s'apparente à celui de la technique ARMAPNEUSOL<sup>®</sup>.



**Figure 9** Schéma d'un remblai PNEUTEX<sup>®</sup> [Mathieu et Marchal, 1989]

Les pneus sont des pneus poids lourds entiers avec un flanc en face supérieure découpé. Le renforcement du massif de sol est assuré par des nappes de géotextile. Les pneus sont disposés horizontalement et longitudinalement et jouent le rôle de parement. Les nappes de géotextile de renfort sont disposées horizontalement et pincées entre deux rangs de pneus (Figure 10). Le premier ouvrage de merlon de protection a été construit en 1989 [Mathieu et Marchal, 1989].





**Figure 10** - Vue d'un remblai PNEUTEX<sup>®</sup> [Coulet et Perrin, 1989]

### • Les GABIONS

Les pneus usagés entiers (en particulier les pneus poids lourds) sont comprimés et encagés par un grillage métallique sous forme de ballots (Figure 11) et utilisés ensuite comme matériau dans les ouvrages de type murs et remblais. Cette technique (Figures 12) utilise également les demi-produits comme les déchiquetats et les granulats.



**Figure 11** - Utilisation en gabion des pneus entiers [ADEME, 2001]



**Figure 12** Utilisation en gabion et en vrac des granulats de pneus sous forme de pastille [CER – LMS, 2003 ; Luong et al, 2003]

### ▪ Les structures réservoirs

Des structures réservoirs hydrauliques constituées de pneus entiers ou de demi-produits en vrac ont été réalisées. Cette application est en cours de développement.

### ▪ Drains

Dans ce type d'application, les granulats en vrac sont utilisés directement dans des tranchées drainantes.

### **8.3 - Couches de chaussée**

Les pneus sont utilisés sous forme de granulats ou de poudrettes pour la fabrication des enrobés destinés aux couches de roulement des routes. Les différentes fractions granulométriques utilisées sont : 0/0,5 mm ; 0,5/2 mm ; 2/7 mm et 7/15 mm.

#### **▪ Le bitume - caoutchouc**

La première application en France date de 1965 au Pecq (département 78). Mais l'idée a été ensuite abandonnée. Le procédé s'est développé aux États-Unis et a fait l'objet d'un brevet de Mc Donald. Un colloque international a été organisé en octobre 1981 à San Antonio (Texas – USA). Le développement de cette technique en France, pour des applications en enduit, date de 1982. Des enduits épais, des enrobés spéciaux (notamment drainants) et des bétons bitumineux minces ou très minces ont été réalisés. Le principe consiste à incorporer la poudrette de caoutchouc 0,2/1 mm ou 2 mm dans le bitume pour améliorer ses performances physico-mécaniques. Le dosage est de 15 à 20 %. En France, cette utilisation se développe peu, face à l'emploi généralisé des polymères dans les liants modifiés, plus économiques et plus pratiques [Bense, 1984 ; ADEME – ETRA, 1999]. Néanmoins, il existe de nombreuses applications à l'étranger, notamment au Portugal, au Brésil, aux États-Unis et au Canada.

#### **▪ Les enrobés aux liants hydrocarbonés**

La poudrette est incorporée comme granulats dans le mélange lors de la fabrication de l'enrobé. Cette application vise à améliorer les caractéristiques acoustiques ou drainantes de l'enrobé. Le dosage est de l'ordre de quelques pourcents. Le gain en niveau de bruit routier annoncé par les fabricants peut atteindre de l'ordre de 5 dB en fonction du BB de référence. Les poudrettes rentrent également dans la fabrication des enrobés drainants [ADEME – ETRA, 1999 ; Ballié, 1999 et Antoine, 2002].

### **8.4 Autres ouvrages**

#### **▪ Mélange avec les autres liants**

Il s'agit d'un mélange à base de poudrette ou de granulats de caoutchouc avec un liant hydraulique ou un liant à base de polymère. Ce développement est plus récent.

Les applications visées sont les sols sportifs ou industriels souples, les écrans acoustiques, les dalles amortissantes, les dalles isolantes...(exemple : procédé TRAC® [Oger et al, 2002]). L'ajout de gomme de pneumatique améliore l'élasticité du matériau, permettant une meilleure absorption des chocs et une diminution des vibrations sous sollicitation.

Les caractéristiques du mélange sont fonction de la nature des granulats de caoutchouc et de la nature et de la quantité de liant. La composition dépend des applications et des performances recherchées.

#### • Mélange avec le sol

Les déchetats de pneus sont intégrés en mélange dans le sol pour constituer le matériau de remblai ou de couche de forme [Interstate 880/Dixon Landing, 2001]. En France, il n'est pas signalé d'ouvrages réalisés selon cette technique.

## 9 Références bibliographique

### 9.1 Publications citées dans le texte

ALIAPUR et al., 2007. Environmental and health assessment of the use of elastomer granulates (virgin and from used tyres) as filling in third-generation artificial turf. ALIAPUR, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), Fieldturf Tarkett, EEDEMS.

Alliapur Analyse du Cycle de Vie de neuf voies de valorisation des PUNR Document de référence Publication juin 2010 – R&D Aliapur ©

ANTEA et EEDEMS, 2006

Antoine J-P., 2002. « MICROPHONE ®, CITYCHAPE ®, DRAINOPHONE ®, EPSIBEL ®. Une gamme complète de revêtement silencieux. » revue RGRA (Revue Générale des Routes et Aérodrômes).

Azizian Mohammad F., Nelson Peter O., Thayumanavan Pugazhendhi, Williamson Kenneth J. Environmental impact of highway construction and repair materials on surface and ground waters: Case study: crumb rubber asphalt concrete Original Research Article

Waste Management, Volume 23, Issue 8, 2003, Pages 719-728 :

Ballie M., 1999. « COLSOFT ® absorbe le bruit et recycle les pneus. Bilan des performances acoustiques. » Revue RGRA (Revue Générale des Routes et Aérodrômes) n° 779.

Ballie M., 2000. « Enrobés non bruyants pour couches de roulement utilisant des poudrettes de caoutchouc issues de recyclage des pneumatiques usagés.

Caractéristiques de surface des chaussées. » Nantes, IVe symposium international « SURF 2000 », AIRPC.

Bertolini G., 2002. « Commerce extérieur – Matériaux et produits de récupération. » Environnement et Technique n° 219.

Cartier G., Long N-T., Pouget P., Bargillat R., Cudennec J-P., 1981. « Déchets urbains et pneumatiques usagés en génie civil. » Congrès international de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondation, Stockholm, et 1984 Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées Spécial XI, France.

CETE 2008 : « Plancher expérimentale sol-copeaux de pneus, déviation de RD 935 » Etudes géotechniques, dossier N° 20-65-040-2002/20-046/03-304, Avril 2008.

ETRA (European Tyre Recycling Association) News, 2002. Volume 6, Issue 2.  
ETRA (European Tyre Recycling Association), 2000. « Introduction to tyre recycling 2010 », Publication 2010 ETRA, 20 p.

Hofstra, 2007. Environmental and health risks of rubber infill rubber crumb from car tyres as infill on artificial turf. A833860/R20060318

Interstate 880/Dixon Landing Road - Californie – USA, 2001. « Utilisation des déchetats de pneus en couche de forme pour allègement de la structure .» Revue RGRA n° 798.

Kanematsu Masakazu, Hayashi, Ai. Denison Michael S, Young Thomas M.  
Characterization and potential environmental risks of leachate from shredded rubber mulches Original Research Article *Chemosphere*, Volume 76, Issue 7, August 2009, Pages 952-958

Lemesle J-P., Entreprise J Lefebvre, 1999. « La Route : La plus grande carrière de France – Recyclage et valorisation des sous - produits dans l'industrie routière. » Revue Travaux n° 758.

Long N-T., Delmas P., Pouget P., 1984. « Soutènement avec armature. Utilisation de pneumatiques usagés. » Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°129, France.

Long N-T., 1985. « Le PNEUSOL. » Rapport des Laboratoires GT 7 LCPC (Laboratoire central des ponts et chaussées), 36 p.

Luong M-P., Eytard J-C., Khay M., Vincelas G., Papachristou D., 2003.  
« Transmissibilité vibratoire d'un géomatériau de recyclage. » Communication au Colloque National Parasismique, Palaiseau, France.

Mathieu Y., Marchal J., 1989. « Déviation de la route nationale 90 à Aigueblanche – Réalisation d'un massif renforcé par géotextile et parement Pneusol : le Pneutex. » Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°162.

MICHELIN, 1999. « Michelin, Le pneu et l'environnement. » Revue RGRA (revue générale des routes et aérodromes), Hors série n°1, pp 90 à 93.

Oger P., Christory J-P., Petitgrand J-C. , 2002. « TRAC<sup>®</sup> : un matériau innovant pour le BTP. » Revue RGRA (Revue Générale des Routes et Aérodrômes) n° 810.

Oger, 2007 : « Procédé antivibratoire SUBTRAC élaboré à partir de granulats issus du broyage de PUNR : application aux plates-formes de tramway » P. Oger, journée technique nationale 16 octobre 2007.

[Sheehan PJ, Warmerdam JM, Ogle S, Humphrey DN, Patenaude SM](#) Evaluating the risk to aquatic ecosystems posed by leachate from tire shred fill in roads using toxicity tests, toxicity identification evaluations, and groundwater modeling.. Environ Toxicol Chem. 2006 Feb;25(2):400-11. :

Smolders E , Degryse F., 2002. "Fate and effect of zinc from tire debris in soil." Environ. Sci .Technol. 36, p 3706 à 3710.

UNEP, 2011

Wik Anna, Dave Göran Environmental labeling of car tires—toxicity to *Daphnia magna* can be used as a screening method Original Research Article Chemosphere, Volume 58, Issue 5, February 2005, Pages 645-651:

Wik A, 2007. Toxic components leaching from tire rubber. Bull. Environ Contam Toxicol 79:114–119.

Wik Anna, Dave Göran Occurrence and effects of tire wear particles in the environment – A critical review and an initial risk assessment Review Article Environmental Pollution, Volume 157, Issue 1, January 2009, Pages 1-11

Wik A, Nilsson E, Källqvist T, Tobiesen A, Dave G Toxicity assessment of sequential leachates of tire powder using a battery of toxicity tests and toxicity identification evaluations.. Chemosphere. 2009 Nov;77(7):922-7. Epub 2009 Sep 15. :

## 9.2 Documents techniques

ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), 1998.  
« Valorisation des pneumatiques usagés en Haute Normandie. » Fiche Région Haute Normandie - ADEME.

ADEME, 2000. « Etude de marché des granulats, poudrettes et déchetats de pneus usagés en France. » Rapport final.

ADEME, 2001. « Du pneu à la poudrette. » Plaquette ADEME.

ADEME, Comité des Constructeurs français d'Automobile (CCFA), Chambre syndicale Internationale de l'Automobile et du Motocycle (CSIAM), 2002.  
« Pneumatiques usagés : état des lieux. » Journée technique. Route Actualité n° 120, décembre 2002.

ADEME – ETRA (European Tyre Recycling Association), 1999. « Pneumatiques usagés – Mettez la gomme sur la valorisation. » Journées techniques ADEME – ETRA, recueil des interventions, Paris, 192 p.

ANRED (Agence Nationale pour la Récupération et l'Élimination des déchets)– Département Industrie IPD/BP, 1987. « Le procédé PNEURESIL<sup>®</sup>. » Note de présentation ANRED.

Beaumont J., Long N-T., Piona I., Ursat P., 1987. « Mur PNEUSOL – Efficacité acoustique. » Rapport LRPC (Laboratoire régional des ponts et chaussées) de Strasbourg, 33 p.

Bense P., 1984. « Utilisation des caoutchoucs de pneumatiques en technique routière. Compatibilité entre les liants hydrocarbonés traditionnels et la poudrette de pneus cryobroyés. » Rapport du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy, CETE (Centre d'Étude technique de l'Équipement) de l'Est, France, 152 p.

CER (Centre d'Expérimentation Routière) – LMS (Laboratoire de Mécanique des Solides) de l'École Polytechnique, 2003. « Caractérisation du comportement d'une structure de remblai en granulats NIKOPNEU. » Rapport interne – CER – LMS.

Coulet C., Perrin J., 1989 a). « Réemploi de pneumatiques usagés en technique routière – Procédé PNEURESIL<sup>®</sup>, Epagny (74) – RN 508 – Franchissement du canal de Calvi. » Fiche Région Rhône-Alpes/ADEME.

Coulet C., Perrin J., 1989 b). « Réemploi de pneumatiques usagés en technique routière – Procédé PNEUTEX<sup>®</sup>, Aigueblanche (73) – RN 90 – Merlon de protection contre les chutes de blocs. » Fiche Région Rhône-Alpes/ADEME.

Coulet C., Perrin J., 1992. « Soutènement avec parement en pneus usagés – Procédé ARMAPNEUSOL<sup>®</sup>, Bretelle – Déviation autoroutière de St-Chamond (42). » Fiche Région Rhone-Alpes/ADEME.

ETRA (European Tyre Recycling Association), 1999. « La valorisation des pneumatiques usagés. » Brochure ETRA/ADEME. 16 p.

European specifications CWA 14243, 2002. “Innovative Materials, Products and Applications from Post-Consumer Tyres.” Plaquette CEN (Comité Européen de Normalisation )/ETRA (European Tyre Recycling Association).

Faure M., 1985. « Les utilisations routières de la poudrette de caoutchouc. Recyclage du caoutchouc et des matières plastiques. » LRPC Clermont Ferrand. Journée technique ADEME.

Ground Engineering, 2002. « Utilisation des pneus compressés et conditionnés sous forme pde gabions en Grande Bretagne. »

Long N-T., Valeux J-C., 1989. « Le PNEUSOL léger. » Rapport des Laboratoires GT 37 LCPC, 51 p.

Norauto, Association Les Eco Maires, 2002. « Le recyclage des pneumatiques usagés. » Actes de la matinée-débat du 24 septembre 2002 au Sénat (Paris).

SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes), 1989. « Le PNEUSOL (Soutènement-Répartiteur de contraintes). » Note d'Information Technique n° 47.

SHULMAN V-L., ETRA (European Type Recycling Association), 2000. "Introduction to tyre recycling."

STEPHENSEN, Eiríkur et al., 2003. Environmental Toxicology and Chemistry, Vol. 22, No. 12, pp. 2926–2931.

UNEP, 2011. « Directives techniques révisées pour la gestion écologiquement rationnelle des pneus usés et des déchets de pneus ». UNEP/CHW.10/6/Add.1/Rev.1

Ursat P., 1998. « Remblai PNEUSOL sur buse MATIERE - RN 67 – Chaumont. » Note du LRPC de Nancy. 19 p.

### **9.3 Sites internet**

Société anonyme créée le 30 janvier 2002 par les principaux manufacturiers du pneumatique : Bridgestone, Firestone, Continental, Dunlop, Goodyear, Michelin, Kleber, Pirelli

Adresse : 60 rue Auber 94400 Vitry Sur Seine

Tél : 01 46 70 97 67 – Fax : 01 46 70 97 68 mël : [contact@aliapur.fr](mailto:contact@aliapur.fr)

<https://www.aliapur.fr/fr/>

Association Environnement Commerce Automobile : Feu Vert, Midas, Norauto, Service automobile Carrefour et Speedy (distributeurs) – 30 000 tonnes/ an

75 rue Saint Lazare 75009 Paris

## 10 Auteurs et relecteurs

<b>Pneus</b>	
Auteurs OFRIR1	Matoren Khay (CER Rouen)
Relecture d'experts et contributeurs OFRIR1	Jean-Claude Auriol (LCPC), Yves Brosseau (LCPC), François de Larrard (LCPC), Jérémie Domas (INERIS), Guillaume Gay (INERIS), Agnès Jullien (LCPC), Vincent Lédée (LCPC), Michel Legret (LCPC), Patrice Piantone (BRGM)
Relecture comité de pilotage	Daniel Berrebi (FNTP/USIRF), Laurent Château (ADEME), Pierre Dupont (SETRA), Jean-Pierre Lemesle (FNTP), Frédéric Leray ((Ministère de l'équipement/DR), Alain Millotte (ADP)
Auteurs OFRIR2	Agnès Jullien (IFSTTAR), Jean-Luc Rzakiewa (LR Toulouse)
Relecture d'experts et contributeurs OFRIR2	Véronique Cérézo (IFSTTAR), Céline Chouteau (CETE Nord-Picardie), Guillaume Gay (INERIS), Chantal Proust (Université Orléans)
Relecture bureau	Rabia Badreddine (INERIS), Laurent Château (ADEME)
Date de mise en ligne, version finale	Janvier 2014