



**ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE LA VALORISATION
GEOTECHNIQUE DE PNEUS USAGES NON
RÉUTILISABLES (PUNR) ENTIERS DANS LE CADRE DE
RÉAMÉNAGEMENT DE CARRIÈRES**

**SYNTHESE DES TRAVAUX REALISES
PAR
LE BUREAU D'ETUDE ANTEA (2006)
ET
LE GROUPEMENT D'INTERET SCIENTIFIQUE EEDEMS
(2006-2007)**

A la demande et pour le compte des sociétés ALIAPUR et EUROVIA

	<p>Mandataire de gestion INSAVALOR</p>	<p>Janvier 2008 Référence EEDEMS : Ee/AL/01-08 Synthèse</p>
--	---	--

Auteur de la synthèse :

Robert MORETTO¹

Financements :

ALIAPUR
EUROVIA

Membres du comité de pilotage :

ABDELGHAFOUR Mohamed (POLDEN - INSAVALOR)
BAZIN Christine (POLDEN - INSAVALOR)
BONNEFOY Gérard (ANTEA)
CLAUZADE Catherine (ALIAPUR)
COURADIN Alain (LGCIE Coulomb 3 - INSA de Lyon)
de CAZENOVE Arthur (ALIAPUR)
DEGOUVE Frédéric (ANTEA)
DIDIER Gérard (LGCIE Coulomb 3 - INSA de Lyon)
LAMACHE Antoine (SMC)
MORETTO Robert (EEDEMS)
POGNANT Michel (EUROVIA)
SAUGET Alain (EUROVIA)

Durée des expérimentations et des études :

Janvier 2006 à décembre 2007

¹ Chef de projet : INSAVALOR EEDEMS – BP 2132 – 69603 Villeurbanne Cedex

SOMMAIRE

I.- PREAMBULE	3
II.- CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE	3
II.1. - Utilisation de PUNR entiers en réaménagement de carrière	3
II.2. - Objectifs de l'étude	5
II.3. - Choix expérimentaux	5
III.- CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES AVEC LES PUNR	7
III.1. - Matériaux utilisés en remblais sur un site en exploitation	7
III.2. - Trois matériaux naturels de différente nature géologique	7
IV.- DESCRIPTION DES INSTRUMENTATIONS MISES EN OEUVRE	8
IV.1. - Description des essais en laboratoire	10
IV.2. - Description des essais in-situ	14
V.- PROGRAMME ANALYTIQUE	15
V.1. - Paramètres et composés analysés	15
V.2. - Caractérisation écotoxicologique	16
VI.- RESULTATS DES ANALYSES	16
VI.1. - Comparaison des résultats concernant les alvéoles in-situ et les casiers en laboratoire contenant les remblais inertes du site de Feuguerolles	16
VI.2. - Essais en laboratoire : évolution du pH et de la conductivité	18
VI.3. - Essais en laboratoire : comparaison des résultats des essais en casiers lysimétriques et des essais en colonne de percolation (au laboratoire)	20
VI.3.1. - Analyse des résultats des essais en colonnes de percolation sur les différents types de remblais	20
VI.3.2. - Analyses des résultats et simulations	20
VI.3.3. - Extrapolation dans le temps du comportement en lysimètres des différents matériaux de remblaiement	24
VI.3.4. - Résultats des essais écotoxicologiques	25
VII.- CONCLUSIONS GENERALES	26
VIII.- BIBLIOGRAPHIE	27

I.- PREAMBULE

L'utilisation de Pneumatiques Usagés Non Réutilisables (PUNR) pour des travaux publics, des travaux de remblaiement ou de génie civil est considérée comme une opération de valorisation dans le cadre du décret n°2002-1653 du 24 décembre 2002 relatif à l'élimination des pneumatiques usagés (article 3).

Dans ce contexte réglementaire, la société EUROVIA a proposé l'utilisation de PUNR entiers pour la mise en sécurité et le réaménagement de carrières.

Si les dispositifs réglementaires autorisent cette filière de valorisation, les sociétés ALIAPUR et EUROVIA ont souhaité vérifier l'innocuité environnementale de cette application dans un contexte de mise en œuvre encadrée garantissant les propriétés géotechniques attendues.

La société ALIAPUR, constituée à l'initiative des principaux manufacturiers afin d'organiser la collecte, l'élimination et la valorisation des pneumatiques usagés (en application de l'article 12 du décret), s'est notamment fixée comme objectif de consacrer une partie de ses moyens à l'émergence et à la pérennisation de voies de valorisation des PUNR. Dans ce cadre, la société ALIAPUR a lancé plusieurs études afin d'apprécier l'impact environnemental de l'utilisation de ces matériaux en fin de vie.

Cette présente étude a pour but de permettre l'élaboration de préconisations d'utilisation des PUNR entiers en réaménagement de carrières et de manière générale en travaux de génie civil, avec les principales institutions publiques (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, DRIRE et ADEME). Cette étude s'inscrit également dans la démarche de normalisation AFNOR engagée depuis 2005 par ALIAPUR et l'ADEME pour un meilleur encadrement des applications de PUNR entiers en génie civil,

Cette démarche a été conduite suivant deux approches complémentaires menées pour le compte des sociétés ALIAPUR et EUROVIA. Une approche a été réalisée au laboratoire par le Groupement d'Intérêt Scientifique EEDEMS² sur la plateforme technologique EEDEMS implantée à l'INSA de Lyon. L'autre approche a été suivie par le Bureau d'Etude ANTEA sur un site utilisant des PUNR dans la carrière de la société SMC à Feuguerolles (Calvados).

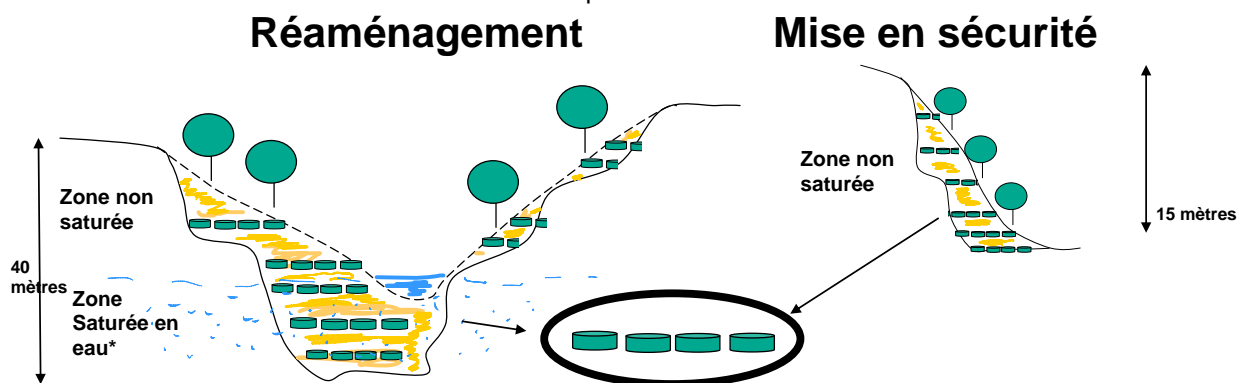
II.- CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

II.1. - Utilisation de PUNR entiers en réaménagement de carrière

Le réaménagement de carrières utilisant des PUNR est autorisé sous réserve d'une autorisation préfectorale. Cette pratique est encadrée en tenant compte du contexte géologique et hydrogéologique du site.

Du fait de la rigidité structurelle (équivalente aux remblais) et de la densité (inférieure aux remblais) des PUNR, cette application accélère les chantiers de réaménagement en assurant les mêmes performances géotechniques que des techniques classiques, voire des performances supérieures pour la sécurisation de fronts de taille. L'utilisation des PUNR en réaménagement de carrière se rencontre principalement dans deux cas :

- Le réaménagement d'anciennes carrières,
- La mise en sécurité de sites encore en exploitation.



Note : Les hauteurs de 40 et 15 mètres sont données à titre d'exemple.

² Plateforme technologique pour l'Evaluation Environnementale des Déchets, Matériaux et Sols pollués

Dans les deux cas, deux zones de gestion des PUNR associées sont distinguées :

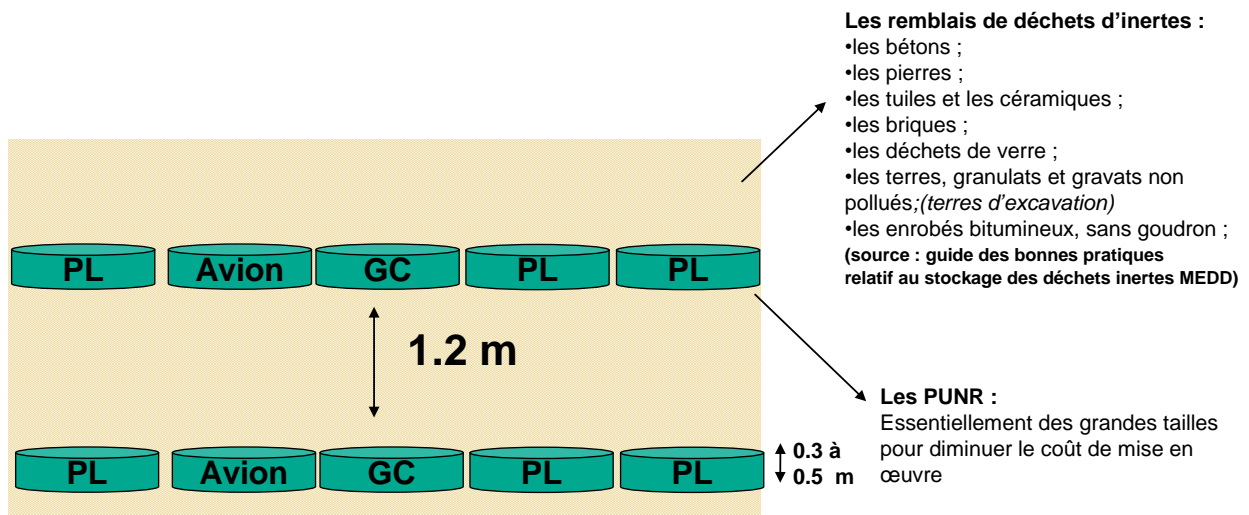
- la zone de réception et de stockage provisoire des PUNR,
- la zone de réaménagement où les PUNR sont associés à des matériaux inertes pour la reconstitution du site.

Dans le cadre d'un réaménagement de carrière autorisée comme centre de stockage de déchets inertes, ces déchets suivent les contrôles réglementaires à l'entrée du site (contrôle visuel). L'origine, les dimensions et la conformité des pneus sont également vérifiées à l'entrée du site, puis les pneus sont stockés temporairement. Les PUNR issus de la filière de recyclage ALIAPUR ont été préalablement triés pour cette voie de valorisation (choix des dimensions, PUNR non souillés). Pour la mise en œuvre du complexe, les remblais sont généralement bennés sur les rangs de pneus qui ont été placés pneu par pneu manuellement ou mécaniquement. Puis, le chargeur étale le remblais sur les pneus et ainsi de suite (sans compaction supplémentaire, ni mélange préalable).



Puis, le chargeur étale le remblais sur les pneus et ainsi de suite (sans compaction supplémentaire, ni mélange préalable).

La valorisation géotechnique des PUNR en réhabilitation de carrière est issue de la technique « PNEUSOL® ». Le procédé « PNEUSOL® » (thèse NGUYEN THANH LONG – 1993) consiste à superposer des pneus (reliés ou non entre eux) à les remplir de matériaux de remblais. Cette technique permet la réalisation d'ouvrages de soutènement, de remblais légers, d'ouvrages absorbants d'énergie comme protection contre les chutes de blocs et de répartiteurs de contraintes au-dessus de conduites enterrées. En vue de prévenir certains désordres et assurer la stabilité mécanique du complexe constitué, il convient de veiller à un mode d'exploitation assurant l'alternance de couches de matériaux inertes et de couches de PUNR disposés à plat.



Pneus de Poids Lourds (PL) – Pneus de Génie Civil (GC) – Pneus d'avions

II.2. - Objectifs de l'étude

Le programme de recherche a pour objectifs :

- **l'évaluation environnementale** dans les conditions les plus proches des **conditions réelles d'exploitation** de l'utilisation de PUNR entiers associés à des matériaux de différentes lithologies :
 - o remblais (déchets inertes),
 - o graves calcaires,
 - o graves siliceuses,
 - o terre argilo-limoneuse.
- la rédaction de recommandations d'utilisation des PUNR associés à des remblais dans le cadre de réaménagement de carrières, en fonction des résultats.

Les essais ont été mis en œuvre de façon à pouvoir identifier un éventuel enrichissement en substances qui seraient inhérentes à la nature chimique des PUNR, dans les eaux traversant le complexe (remblais-PUNR).

Le programme de recherche apportera des données qualitatives et quantitatives issues de retours d'expériences (bibliographies, études laboratoires et *in situ*) afin de valider sur le plan environnemental la solution proposée. Ces données permettront de rédiger des recommandations pour la gestion et l'exploitation des sites.

II.3. - Choix expérimentaux

Pour répondre à ces objectifs, la présente étude traite de l'évaluation des impacts environnementaux de cette application, le scénario principal retenu en terme d'impact environnemental concerne la migration d'éléments potentiellement polluants dans le milieu naturel par :

1. **percolation des eaux météoriques au travers du complexe PUNR/remblais inertes,**
2. ou **contact prolongé du complexe PUNR/remblais inertes avec une éventuelle nappe** d'eaux souterraines.

L'évaluation de l'impact environnemental de l'utilisation de PUNR entiers a été abordée en combinant 2 configurations expérimentales :

- une **approche in-situ,**
- des **expérimentations en laboratoire.**

La bibliographie sur ce sujet a permis d'identifier les paramètres pouvant influencer les résultats : le pH des eaux, le temps de contact (perméabilité des remblais et présence d'une nappe phréatique), la surface de contact (PUNR entiers, broyats de PUNR ou granulats de PUNR), la salinité, l'acidité des sols (siliceux, calcaire), l'immersion (nappe phréatique).

En effet, les **synthèses bibliographiques** effectuées par EEDEMS et ANTEA montrent que les **PUNR entiers** constituent des **matériaux très faiblement lixiviables**. Les teneurs trouvées dans les lixiviats sont en général très proches des seuils de quantification analytique et les retours d'expérience concernant des essais de lixiviation font état de l'absence de risques aux concentrations rencontrées. De plus, une étude réalisée en 2005 par EEDEMS pour le compte d'ALIAPUR et l'ADEME montre que, dans le cadre d'une valorisation de PUNR entiers poids lourds comme structure porteuse en bassin de rétention d'eaux pluviales, le contact prolongé des PUNR avec les eaux pluviales n'a pas d'impact avéré

sur la qualité physico-chimique et écotoxicologique des eaux (les substances recherchées sont toujours à des concentrations inférieures aux valeurs limites de référence : décret n°2001-1220 du 20/12/2001³).

C'est pourquoi, dans ce **contexte d'utilisation en réaménagement de carrière**, les **paramètres pris en compte** sont **l'immersion possible du complexe** (présence d'une nappe phréatique), le **temps de contact** (perméabilité des matériaux) et **l'acidité des sols**.

L'approche in-situ conduite sur le site SMC de la carrière de Feuguerolles (Calvados) a consisté en la réalisation de deux alvéoles tests mises en conditions réelles, soumises aux aléas météorologiques. L'une est représentée par un tas témoin constitué de remblais seuls (remblais utilisés en association avec les PUNR dans la carrière de Feuguerolles) et l'autre par un tas comportant des couches alternées de PUNR entiers et de remblais. Les alvéoles tests ont été soumises à la pluviométrie naturelle et à un arrosage supplémentaire important à partir des eaux d'exhaure de la carrière. Ce programme s'inscrit sur une durée de 2,5 ans et a pour but de **simuler sur un laps de temps réduit l'effet d'une pluviométrie représentative de plus de 20 ans sur des massifs de 4 mètres de hauteur**. Les résultats pris en compte dans cette synthèse concernent les 11 premiers mois et simulent l'effet d'une pluviométrie de 7 ans sur la disponibilité d'éléments et de substances susceptibles d'être relargués par les PUNR.

L'étude conduite en laboratoire a été menée sur 12 mois. Afin de **généraliser l'utilisation de cette voie de valorisation dans des contextes géologiques variés et prendre en compte les paramètres cités précédemment**, des matériaux de remblaiement de différentes natures lithologiques ont été mis en contact avec des PUNR en plus des matériaux identiques à ceux testés sur le site en exploitation (site SMC de Feuguerolles, Calvados). Les différents matériaux de remblaiement ont été conditionnés dans 5 casiers lysimétriques construits à l'abri des précipitations et mis en scénario pilotes sous un régime hydraulique contrôlé avec recirculation des percolats pour simuler le transfert au travers d'une hauteur de massif de matériaux représentative de celle d'un réaménagement de carrières. En effet, les matériaux de Feuguerolles ne constituant pas un référentiel en matière de matériaux de remblaiement, l'étude au laboratoire a été étendue à d'autres contextes géologiques afin de mettre en évidence d'éventuelles variations de comportement des PUNR lorsque ceux-ci sont mis en contact avec des lithologies à dominante, carbonatée, siliceuse ou argilo-limoneuse (matériaux naturels).

³ Décret no 2001-1220 du 20 décembre 2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles (exemples de substances visées par le décret : métaux, hydrocarbures aromatiques polycycliques, phénols, sulfates, nitrates,...)

III.- CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES AVEC LES PUNR

Conformément aux objectifs de l'étude, quatre types de matériaux associés aux PUNR ont été caractérisés précisément (granulométrie, perméabilité,...) :

1. remblais (déchets inertes),
2. graves calcaires,
3. graves siliceuses,
4. terre argilo-limoneuse.

Les PUNR utilisés dans les expérimentations sont classiquement utilisés en réaménagement de carrière et en travaux de génie civil de type PNEUSOL®. Ils correspondent à des pneus de grand diamètre de 1,2 à 1,6 mètre de diamètre.

III.1. - Matériaux utilisés en remblais sur un site en exploitation

Les matériaux utilisés dans les expérimentations menées au laboratoire et sur site sont représentatifs des matériaux utilisés en réaménagement de l'ancienne carrière SMC de Feuguerolles, aujourd'hui centre de stockage de déchets inertes. Dans le but d'appréhender les vitesses de transfert au travers des massifs reconstitués dans les expérimentations, les matériaux ont été caractérisés en laboratoire (EEDEMS) en vue de définir les valeurs moyennes :

- des grandes phases constitutives (éléments organiques, minéraux, origine anthropique),
- de densité (et de teneur en eau correspondante),
- d'indice des vides,
- de teneur en minéraux argileux,
- de perméabilité par infiltrométrie.

L'échantillon moyen reconstitué montre pour la fraction inférieure à 20 mm les résultats suivants :

- une teneur en eau de 14,7% +/- 1,2%
- un passant à 80 µm de 31% +/- 6%
- une valeur de bleu de 3,2 +/- 0,6
- une Classe GTR : B₆ (sables et graves, argileux à très argileux)
- une masse volumique de 1,44 T/m³.

Les résultats des essais de perméabilité réalisés à l'aide d'un infiltromètre montrent que les matériaux mis en place avec une énergie de compactage faible (10 kPa) et à faible teneur en eau (12,14%) ont une perméabilité assez importante et égale à 2.10⁻⁵ m/s.

Après application d'une contrainte de 50 kPa qui conduit à une densification certaine des matériaux, on constate que la perméabilité s'est très peu améliorée puisqu'elle est de 8.10⁻⁶ m/s.

En revanche, si la mise en œuvre est réalisée à plus forte teneur en eau (à la limite de la saturation) et au moyen d'un compactage plus dynamique, les performances hydrauliques de ces matériaux augmentent puisque la perméabilité est alors de 3.10⁻⁸ m/s. Ce résultat est cohérent compte tenu du pourcentage important d'éléments de granulométrie inférieure à 80 µm (35% de la fraction inférieure à 20 mm) et cette valeur devra être prise en considération dans le cadre de l'évolution du massif lors du réaménagement de la carrière du fait de la circulation des engins et d'un taux de saturation en eau évolutif en fonction des conditions météorologiques sur site.

III.2. - Trois matériaux naturels de différente nature géologique

Afin de prendre en considération l'acidité des sols et des vitesses de transfert des percolats qui peuvent être différentes selon la nature des matériaux de remblaiement utilisés, 3 autres types de matériaux ont été caractérisés du point de vue de leur nature lithologique et de leur perméabilité : matériaux carbonatés (graves à dominante carbonatée 0/10 mm), matériaux siliceux (graves à dominante siliceuse 0/10 mm) et matériaux limono-argileux (terre argilo-limoneuse), tous issus de carrières de la Région Rhône-Alpes et fournis par la société EUROVIA.

Ces matériaux sont des matériaux naturels et sont considérés comme exempts de toute trace de pollution et d'activité anthropique.

Les matériaux à dominante carbonatée et siliceuse présentent une perméabilité comparable de l'ordre de 4 à $5 \cdot 10^{-4}$ m/s, ce qui correspond à une perméabilité en accord avec le type de granulométrie. Concernant les matériaux limono-argileux, leur perméabilité, à 2 taux de compactage différents, est faible et voisine de celle des matériaux de Feuguerolles ($1,2 \cdot 10^{-5}$ à $5 \cdot 10^{-6}$ m/s) quelle que soit l'énergie de compactage (10 et 50 kPa).

Le transfert des eaux dans les matériaux granulaires siliceux et carbonatés s'effectuera donc beaucoup plus rapidement que dans les matériaux de Feuguerolles et les matériaux argilo-limoneux. De ce fait, le temps de contact des eaux de percolation avec les PUNR sera donc réduit dans les matériaux granulaires pouvant ainsi limiter les échanges.

IV.- DESCRIPTION DES INSTRUMENTATIONS MISES EN OEUVRE

Les instrumentations ont été construites de façon à identifier précisément l'enrichissement en substances qui seraient imputables à la présence des PUNR. Par conséquent pour les deux approches, l'influence des matériaux associés sur les eaux a été évaluée via la mise en place de témoins ou via des essais de percolations en colonne. Par ailleurs, pour répondre aux objectifs de l'étude, les instrumentations ont été conçues pour permettre la simulation des zones où l'eau percole à travers le complexe et les zones où le complexe est dans la nappe phréatique.

Ces approches ont été conduites dans deux contextes expérimentaux différents :

- d'une part, en simulant en extérieur et sur un laps de temps réduit les effets d'une pluviométrie représentative de plus de 20 ans sur des massifs de 4 mètres de hauteur ;
- et d'autre part en simulant en laboratoire dans des conditions contrôlées les effets d'une recirculation des percolats dans un laps de temps réduit sur le transfert au travers d'une hauteur de massif de matériaux représentative de celle d'un réaménagement de carrières.

La **corrélation entre les essais en laboratoire et les essais sur site** a été réalisée en comparant les résultats des deux approches utilisant les mêmes matériaux remblais de Feuguerolles.

Les casiers lysimétriques PUNR/remblais carbonatés ou siliceux ou argilo-limoneux sont conçus sur le même principe que le casier PUNR/remblais de Feuguerolles (seule la masse de matériaux varie légèrement) et des essais en colonnes de percolation ont été réalisés en substitution à l'édification de casiers témoins sans PUNR.

Synthèse des travaux relatifs à l'évaluation environnementale de la valorisation géotechnique de PUNR entiers dans le cadre de réaménagement de carrières

Le récapitulatif des principaux paramètres pris en compte dans ces expérimentations est donné par le Tableau 1.

	Sur site (Feuguerolles)		Au laboratoire				
	Alvéole témoin	Alvéole avec PUNR	Casier lys. témoin	Casier lys. avec PUNR	Casier lys. avec PUNR	Casier lys. avec PUNR	Casier lys. avec PUNR
Matériaux associés	Remblais de Feuguerolles	Remblais de Feuguerolles	Remblais de Feuguerolles	Remblais de Feuguerolles	Graves carbonatées	Graves siliceuses	Terre argilo-limoneuse
Géométrie des pilotes	Pyramide tronquée à base carrée	Pyramide tronquée à base carrée	Cube	Cube	Cube	Cube	Cube
Masse de matériaux de remblais (tonnes)	444,00	422,00	24,90	23,65	23,66	21,26	26,12
Nombre de PUNR	0	284	0	16	16	16	16
Masse de PUNR (tonnes)	0	19,028	0	1,072	1,072	1,072	1,072
Ratio masse remblais/masse PUNR	-	22,2	-	22,1	22,1	19,8	24,4
Hauteur de la nappe (m) (ZS)	0,50 à 1,30	0,50 à 1,30	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Ecoulement de la nappe	oui	oui	non	non	non	non	non
Recirculation de la nappe	non	non	oui	oui	oui	oui	oui
Volume d'eau total arrosage annuel (m ³)	1 300	1 300	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Surface arrosée (m ²)	16	16	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25
Volume d'eau d'arrosage annuel (m ³ /m ²)	81,25	81,25	0,832	0,832	0,832	0,832	0,832
Volume d'eau de pluie annuel (m ³)	215	215	0	0	0	0	0
Surface soumise à eau de pluie (m ²)	324	324	0	0	0	0	0
Volume d'eau de pluie annuel (m ³ /m ²)	0,664	0,664	0	0	0	0	0
Rapport Liquide /Solide final (m ³ /t)	3,4	3,43	0,2	0,21	0,21	0,23	0,19

Tableau 1 : Récapitulatif des principaux paramètres pris en compte dans les expérimentations ANTEA et EEDEMS sur les matériaux de Feuguerolles

*Note : Pour les alvéoles, les masses de matériaux de remblais sont données par rapport à un volume de matériaux estimé à 277 m³ (pyramide tronquée de base 12x12 et 4x4 et de hauteur 4 m) avec une densité humide de 1,6 ;
Pour les casiers lysimétriques, les masses de matériaux de remblais sont données suite au pesage lors de leur mise en œuvre.*

Il convient de noter que :

- le ratio masse de remblais sur masse de PUNR est **quasiment identique pour les 2 approches**,
- les 2 approches ont été conduites sur des **volumes d'eau d'arrosage différents, en cohérence avec les objectifs de chaque expérimentation** :
 - o sur site, l'eau d'arrosage est constituée d'eau d'exhaure de la carrière et d'eau de pluie, au laboratoire l'eau d'arrosage est l'eau du réseau d'Alimentation en Eau Potable,
 - o sur site la nappe bien que **peu mobile** circule jusqu'à un exutoire, en laboratoire l'eau de nappe est **recirculée** sur les casiers lysimétriques.

Note : Ces variantes d'un point de vue expérimental sont importantes à considérer pour l'interprétation des résultats.

IV.1. - Description des essais en laboratoire

Les essais de mise en scénario pilote réalisés sont des essais multiparamétriques sur des **casiers lysimétriques instrumentés de 2,5 m de côté (soit 15,5 m³)**.

Les cinq casiers lysimétriques ont été réalisés selon les principes ci-dessous :

1. un casier témoin constitué uniquement de remblais de Feuguerolles représentatifs de ceux utilisés en remblaiement dans la carrière,
2. un casier test constitué en 4 couches successives de remblais de Feuguerolles (issus du même lot que ceux utilisés pour l'alvéole témoin) et de PUNR entiers,
3. un casier test constitué en 4 couches successives de graves à dominante carbonatée (0/10 mm) et de PUNR entiers,
4. un casier test constitué en 4 couches successives de graves à dominante siliceuse (0/10 mm) et de PUNR entiers,
5. un casier test constitué en 4 couches successives de matériaux argilo-limoneux et de PUNR entiers,

Le comportement des PUNR est examiné sous les actions combinées :

- de la percolation au travers du massif et de l'ennoyage du pied des lysimètres **pour simuler une remontée de la nappe induisant un contact prolongé des PUNR** avec un niveau d'eau non circulant,
- de la **recirculation des eaux de la nappe (percolats) pour simuler le transfert des eaux au travers d'une épaisseur du complexe PUNR/remblais** assimilable aux conditions réelles (le complexe multicouche pouvant atteindre plus de 30 mètres).

Pour les 3 derniers casiers, il n'a pas été réalisé de casiers témoins (exemple : 15,5 m³ de graves siliceuses) mais des essais de percolation en colonnes.

En effet, dans la mesure où les matériaux naturels carbonatés, siliceux et argilo-limoneux sont considérés de nature homogène, calibrés et exempts d'éléments et de substances potentiellement polluantes d'origine anthropique puisque provenant de sites d'extraction de carrières. Ils ont été soumis à des essais en colonne de percolation. L'essai de percolation, tel que défini dans la norme européenne TS 14 405 issue des travaux du CEN TC 292, est recommandé dans la Directive Décharge 1999/31/CE pour caractériser le comportement des déchets/matériaux granulaires soumis à des conditions standards de percolation.

Après mise en œuvre des matériaux dans la colonne et remplissage en eau, la mise à l'équilibre est réalisée par circulation d'un volume correspondant au ratio liquide solide de 0,1 et ce durant 72 heures. L'équilibre est contrôlé par la mesure du pH à 64 et 72 heures. L'équilibre est considéré atteint lorsque la variation de pH sur un laps de temps de 8 heures est inférieure à 0,3 unité. La circulation et l'alimentation sont réalisées avec une vitesse égale à 15 cm/jour à fût vide tel que préconisé par la norme

Après les 72 heures de circulation et l'atteinte de l'équilibre, la circulation est arrêtée et la solution utilisée pour la circulation est prise pour le premier éluat. La colonne est ensuite alimentée en eau déminéralisée et les percolats sont collectés successivement. La totalité des éluats est collectée en 5 prélèvements consécutifs correspondant à des ratios "masse de liquide sortant de la colonne" / "masse sèche initiale de déchet" (ratio L/S, Liquide/Solide) cumulé 0,1 ; 1 ; 2 ; 5 et 10.

Géométrie et caractéristiques des casiers lysimétriques :

Chacun des 5 casiers lysimétriques constitué d'un bac cubique a été étanché à l'aide d'une géomembrane (Figure 1). Un géotextile de protection a été recouvert d'une couche de matériaux granulaires drainant avant dépôt des remblais et PUNR. Les casiers sont conçus de manière à accueillir 4 PUNR par rang soit au total 16 PUNR par casier (Figure 2).



Figure 1 : Vue lors de la confection des casiers lysimétriques

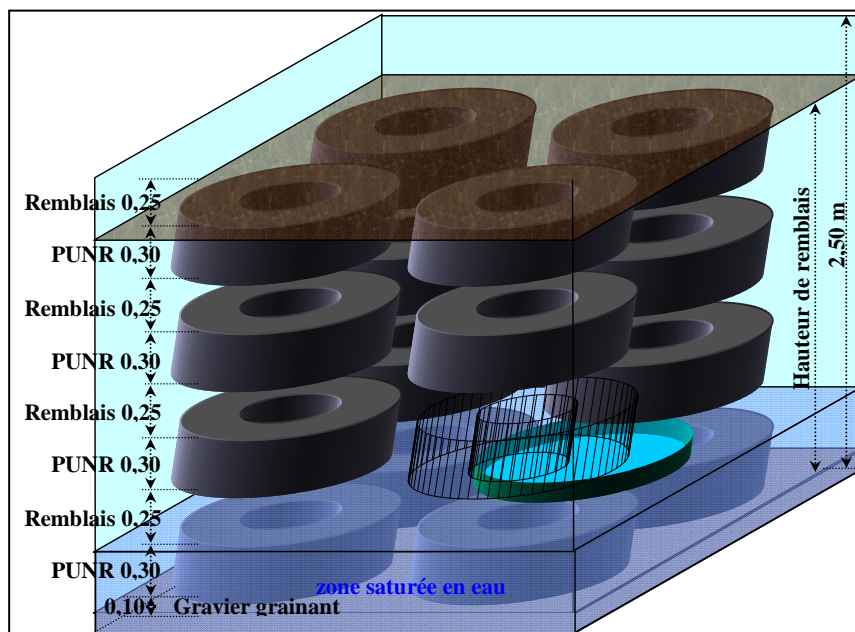


Figure 2 : Vue de l'empilement des pneus /remblais et positionnement vis-à-vis de la zone saturée en eau

Système d'arrosage et de collecte des échantillons

L'eau d'arrosage des casiers lysimétriques provient du réseau d'alimentation en eau potable. Le système d'arrosage est constitué de 8 buses d'arrosage et d'une pompe à débit constant de 3 600 l/h (Figure 3). Ce système d'arrosage mouille la totalité de la surface du lysimètre et fonctionne par recirculation des eaux récupérées après percolation.

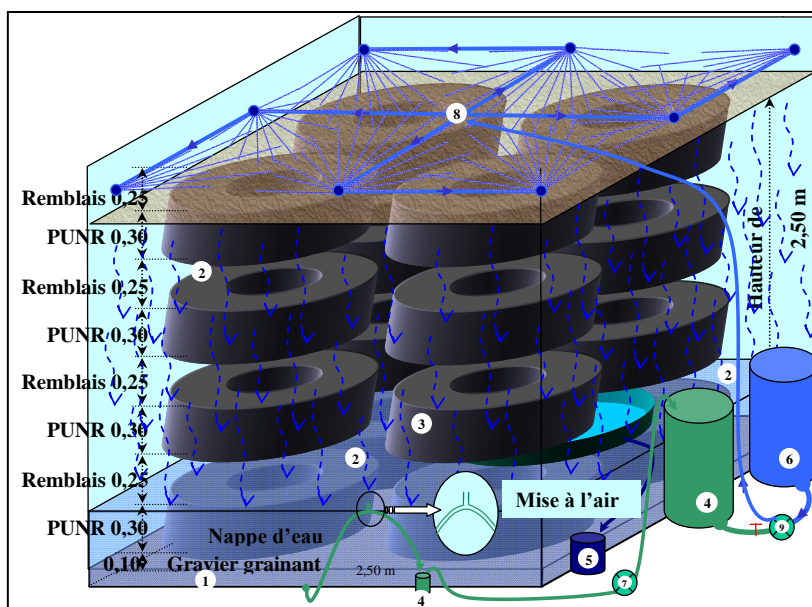


Figure 3 : Vue du casier lysimétrique avec le système d'arrosage

Légende : 1 = Niveau drainant en gravillons ; 2 = Matériaux de remblais ; 3 = PUNR PL ; 4 = Système de récupération des eaux de la zone saturée ; 5 = Système de récupération des eaux de percolation avant leur dilution dans la zone saturée ; 6 = Réservoir d'arrosage ; 7 = pompe de relevage des eaux de la zone saturée ; 8 = système d'arrosage ; 9 = Pompe d'arrosage.

Le système de collecte comporte 2 unités distinctes :

- la première prévue pour la collecte **des eaux de percolation** (zone non saturée dite **ZNS**) avant qu'elles n'atteignent la nappe consiste en un système de récupération mis en place dans l'intercalaire de remblais situé au dessus de la zone saturée (Figure 4 et Figure 3).

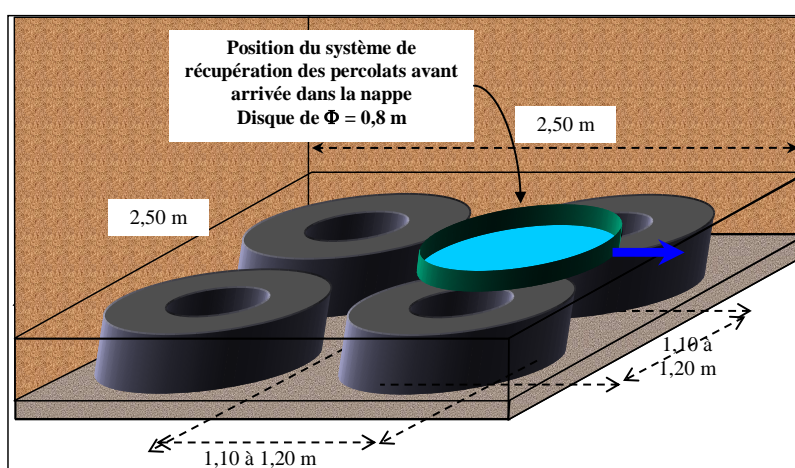


Figure 4 : Vue de la disposition des PUNR et du système de récupération des percolats

- la deuxième, constituée d'un bac fermé, d'une pompe péristaltique et d'un fût pour récupération des eaux de surverse de la nappe (zone saturée dite ZS), est reliée à un récipient extérieur qui sert de point de relevage (figure 5).



Figure 5 : Vue du système de recirculation des eaux de la nappe

Le système d'arrosage est mis en place au-dessus des casiers de façon à reproduire d'une manière contrôlée la pluviométrie (calculée par rapport à une pluviométrie moyenne annuelle d'environ 800 l/m^2). Le volume réel arrosé sur 12 mois d'exposition (de septembre 2006 à août 2007) est de 26 fois 200 litres soit 832 l/m^2 . Une nappe d'eau d'environ 43 cm de hauteur est constituée en fond de casier et mouille le premier rang de PUNR.

Le mode d'arrosage retenu est un mode régulier et identique sur les 12 mois d'exposition soit une semaine ouvrée d'arrosage intermittent (3 fois 20 minutes par jour à raison de $0,8 \text{ l/mn}$ soit $3,2 \text{ l/m}^2$) suivie d'une semaine d'égouttage. Les prélèvements sont réalisés juste avant le démarrage de la phase d'arrosage suivante, soit 2 fois par mois.

Les percolats de la ZS sont recueillis et mesurés dans un fût tampon qui sert à l'alimentation de l'arrosage en circulation. La perte d'eau par évaporation est compensée par un by-pass relié au réseau. Les percolats de la ZNS sont recueillis dans un autre récipient.

IV.2. - Description des essais in-situ

Les deux alvéoles pilotes ont été réalisées à une échelle « semi-technique » :

- une alvéole témoin constituée uniquement d'un tas de remblais de Feuguerolles représentatifs de ceux utilisés en remblaiement dans la carrière,
- une alvéole test constituée d'un tas en 4 couches successives de remblais de Feuguerolles (issus du même lot que ceux utilisés pour l'alvéole témoin) et de PUNR entiers.

Le comportement des PUNR est examiné sous les actions combinées :

- de **la percolation au travers du massif** des eaux météoriques associées à un arrosage forcé par les eaux d'exhaure de la carrière,
- de **l'ennoyage du pied des alvéoles pour simuler une remontée de la nappe** induisant un contact prolongé des PUNR avec un niveau d'eau peu circulant.

Géométrie et caractéristiques des alvéoles :

Un système en cuvette hors sol, constitué par des merlons, a été étanché au moyen d'une géomembrane. Un géotextile de protection a été recouvert d'une couche de matériaux granulaires drainant avant dépôt des remblais et PUNR. Les tas ont une géométrie carrée de 12 m de côté au sol (Figure 6). Ils présentent une base supérieure de 4 m de côté et une hauteur moyenne de 4 m. Le volume unitaire de chaque tas est d'environ 230 m³.



Figure 6 : Alvéoles en cours de remplissage

Le tas de l'alvéole test est mixte et est constitué de 4 couches successives de PUNR séparées par une épaisseur de matériaux. Chaque couche a une épaisseur de 1 mètre. La répartition par couche du nombre de PUNR est, de bas en haut, 130, 88, 45 et 21 (soit au total 284 PUNR).

Système d'arrosage et de collecte des échantillons

Les eaux d'arrosage proviennent :

- du bassin d'exhaure alimenté par le relevage des eaux de fond de carrière. Les eaux sont dirigées vers les 2 alvéoles puis réparties séparément vers chacune d'elles avec mesure volumétrique des débits. Les buses d'arrosage ont un débit de 8 litres/heure et le débit nominal de l'installation est de 2m³/h par alvéole.
- des eaux météoriques qui mouillent la partie sommitale et les flancs des alvéoles.

En terme de fonctionnement, une alternance de cycles et de purges est programmée de manière à maintenir le premier niveau de PUNR en permanence en contact avec l'eau. Les opérations de purge vers le milieu naturel via un bassin de décantation sont déclenchées en niveau haut soit au niveau du 2^{ème} rang de PUNR.

Les échantillons d'eaux pour analyses ont été prélevés sur une période de 11 mois.



Figure 7 : Détail de l'alvéole test

V.- PROGRAMME ANALYTIQUE

35 échantillons d'eau ont été prélevés. Au regard des études bibliographiques, des études récentes existantes et des réglementations française et européenne, **46 paramètres et composés ont été analysés.**

Des essais écotoxicologiques ont été réalisés en complément sur 5 échantillons issus des essais en laboratoire au terme de 11 mois de contact prolongé entre les eaux et les complexes Remblais/PUNR.

En effet, si les informations obtenues par analyses physico-chimiques peuvent être comparées à des valeurs limites réglementaires, elles ne sont pas directement interprétables en terme d'impact sur les êtres vivants. Par exemple, elles ne permettent pas à elles seules de mettre en évidence ou **de prédire d'éventuels effets de synergie entre des composés présents à des concentrations faibles, voire inférieures aux seuils de détection.**

De plus, l'évaluation écotoxicologique permet de **mettre en évidence d'éventuels impacts dus à des éléments ou des substances non recherchés dans les analyses chimiques.** Ces essais normalisés sont des moyens d'apprécier a contrario les conditions dans lesquelles il n'y a pas de risque écotoxique encouru, à court comme à plus long terme.

V.1. - Paramètres et composés analysés

Les paramètres et les composés analysés ont été choisis au regard des réglementations française et européennes concernant la qualité des eaux de surface, des eaux souterraine et de l'alimentation en eau potable :

- pH, conductivité,
- Ammonium, Cyanures totaux
- Cations : As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn, Ca, Al, Fe, Si, Co, Mn, Sn
- Anions : fluorures, chlorures, nitrates et sulfates
- les HAP, les HCT, l'Indice Phénol et le Carbone Organique Total.

Pour les alvéoles sur site, des échantillons des eaux d'exhaure et des eaux de la zone saturée ont été prélevés et analysés tous les 2 mois du 10 janvier 2006 au 17 novembre 2006.

Pour les casiers lysimétriques des échantillons issus des zones saturées et insaturées ont été prélevés et analysés tous les mois du 4 septembre 2006 au 3 septembre 2007. Les échantillons prélevés au laboratoire sont réalisés par mélange des deux prélèvements du mois au prorata des volumes récoltés. Le premier prélèvement est conservé au frais (à 4°C) en attendant la récolte du deuxième prélèvement. Après confection de l'échantillon, celui-ci est envoyé à l'analyse.

V.2. - Caractérisation écotoxicologique

Outre la complémentarité des essais ecotoxicologiques par rapport aux analyses physico-chimiques des eaux, ces essais correspondent également au contexte d'utilisation des PUNR. Par exemple, dans le cadre du réaménagement de la carrière de Feugueurolles, il est envisagé de réaliser un espace aquatique sous forme d'un petit étang alimenté en partie par les eaux de la nappe phréatique réceptionnant les eaux percolant au travers du massif de pneus-remblais. Trois essais permettant d'apprécier les éventuels effets aigus et chroniques sur les organismes aquatiques ont été réalisés sur le prélèvement du 11ème mois (juin 2007) sur les eaux de nappe (ZS) de chacun des 5 casiers lysimétriques. Les essais réalisés ont été réalisés conformément aux normes suivantes :

- 1) Détermination de la toxicité aiguë (inhibition de la mobilité de *Daphnia magna*)- NF EN ISO 6341, mai 1996 (T90-301).
- 2) Détermination de la toxicité chronique (inhibition de la croissance de la population de *Ceriodaphnia dubia*) - NF T90-376, décembre 2000
- 3) Evaluation de la toxicité chronique des éluats [inhibition de la croissance des algues d'eau douce avec *Pseudokirchneriella subcapitata* (anciennement *Selenastrum capricornutum*)] - NF EN ISO 28692, mai 1993.

VI.- RESULTATS DES ANALYSES

Dans un premier temps, afin de confirmer la cohérence des essais, **les résultats des analyses sur les alvéoles in situ et les casiers en laboratoire** ont été comparés. Cette comparaison a pour objectif de confirmer les tendances observées. Cette confrontation montre également **qu'il n'y a pas d'enrichissement notable dû à la présence des PUNR.**

Dans un second temps pour les autres matériaux associés aux PUNR et pour chaque composé, une comparaison des valeurs a été réalisée entre les **concentrations observées dans les échantillons issus des casiers lysimétriques et les essais en colonne sur les graves et les terres argilo-limoneuses.** Ces essais de percolations fixant le maximum relarguables par ces matériaux, la comparaison des résultats de ces essais permet d'évaluer un potentiel enrichissement dû uniquement à l'utilisation des PUNR.

Les résultats de ces simulations mettent en évidence que les PUNR ne contribuent pas significativement à l'évolution des concentrations. **La contribution des PUNR par rapport aux émissions des remblais, des graves et des terres argilo-loneuse n'est pas significative.**

VI.1. - Comparaison des résultats concernant les alvéoles in-situ et les casiers en laboratoire contenant les remblais inertes du site de Feuguerolles

Les tableaux ci-après donnent les résultats concernant les essais sur les matériaux du site d'exploitation (Feuguerolles) seuls et ces mêmes matériaux associés aux PUNR. Ces résultats permettent une comparaison entre les concentrations obtenues dans les eaux de nappe (ZS) pour les 2 approches expérimentales.

1) les matériaux inertes seuls :

Les résultats obtenus sur les matériaux de Feuguerolles seuls montrent généralement des teneurs plus fortes pour les essais menés au laboratoire. Cette différence est principalement due au fait que les essais menés sur site prennent en considération un volume d'eau d'arrosage 100 fois supérieur à celui du laboratoire avec de plus un écoulement ce qui entraîne un effet de dilution. En effet, dans les casiers lysimétriques au laboratoire la nappe est recirculée ce qui a généralement pour effet une augmentation de la concentration.

		Au laboratoire			Sur site		
		Min	Max	Moy.	Min	Max	Moy.
pH	U	8,14	8,17	8,03	7,00	9,30	8,43
Conductivité	µS/cm	1187	1306	1568	934	1320	1120
Aluminium	µg/l	4	319	75	6	79	37
Arsenic	µg/l	3	63	23	< 10	< 10	<10
Baryum	µg/l	64	246	185	29	69	42
Calcium	mg/l	194	426	308	-	-	-
Cadmium	µg/l	<14	<14	<14	< 0,5	< 0,5	<0,5
Cobalt	µg/l	5	49	18	-	-	-
Chrome	µg/l	6	19	8	< 1	4,0	2,3
Cuivre	µg/l	4	260	50	< 1	2	2
Fer	µg/l	1	145	28	12	140	53
Potassium	mg/l	14,7	30,2	22,9	-	-	-
Manganèse	µg/l	36	2346	873	1	92	24
Mercure	µg/l	<0,5	<0,5	<0,5	< 0,2	< 0,2	<0,2
Molybdène	µg/l	3	14	4	-	-	-
Sodium	mg/l	29,8	47,9	41,0	-	-	-
Nickel	µg/l	6	12	7	< 2	3,0	2,3
Plomb	µg/l	10	173	43	< 10	< 10	<10
Soufre	mg/l	100	239	187	110	150	136
Antimoine	µg/l	12	104	25	-	-	-
Sélénium	µg/l	<6	<6	<6	< 3	6	6
Silicium	mg/l	8,1	13,6	9,8	-	-	-
Etain	µg/l	39	65	43	< 5	< 5	<5
Zinc	µg/l	<1	284	142	< 1	9,0	3,8
Fluorures	µg/l	10	895	670	-	-	-
Chlorures	mg/l	39,5	75,3	58,8	-	-	-
Nitrates	mg/l	5,7	254,0	89,2	-	-	-
Sulfates	mg/l	306	718	525	200	450	350
MES	mg/l	<0,5	7,8	2,5	1,4	5,3	3,8
NH4+	mg/l	<3	<3	<3	-	-	-
NTK	mg/l	<3	<3	<3	0,7	6,8	2,5
DBO5	mg/l	<3	<3	<3	< 3	< 3	<3
DCO	mg/l	25	66	41	< 10	43	19
COT	mg/l	5,2	16,0	10,1	6,6	10,0	8,0
Cyanures totaux	µg/l	<10	<10	<10	-	-	-
Indice phénols	µg/l	< 20	< 20	<20	< 10	< 10	<10
HC (t) par CPG	µg/l	< 50	< 50	<50	< 50	170	<50
HAP Totaux	µg/l	<0,05	0,04	0,03	< 0,02	0,06	0,04

Tableau 2 : Concentrations des différents éléments et substances dans les eaux de nappe suite aux essais menés par EEDEMS et ANTEA (Min = concentration minimum relevée ; Max = concentration maximum relevée ; Moy. = concentration moyenne sur 12 prélèvements EEDEMS et sur 8 prélèvements ANTEA).

2) les matériaux inertes associés aux PUNR :

Pour les mêmes raisons, les résultats obtenus sur les matériaux de Feuguerolles associés aux PUNR montrent généralement des teneurs plus fortes pour les essais menés sur casiers lysimétriques de laboratoire.

Au laboratoire comme sur site, la comparaison des concentrations de chaque élément et substance analysées dans les eaux de nappe (ZS) montre **qu'il n'y a pas d'enrichissement notable dû à la présence des PUNR**. Les légères fluctuations de concentration sont probablement à mettre en relation avec les cinétiques de relargage des matériaux inertes (Feuguerolles).

		Au laboratoire			Sur site		
		Min	Max	Moy.	Min	Max	Moy.
pH	U	7,96	7,56	7,91	7,82	8,51	8,10
Conductivité (µS/cm)	µS/cm	1353	1618	1569	814	1900	1276
Aluminium	µg/l	4	511	116	8	33	14
Arsenic	µg/l	3	94	33	< 10	< 10	<10
Baryum	µg/l	53	267	185	42	66	52
Calcium	mg/l	176	384	296	-	-	-
Cadmium	µg/l	<14	<14	<14	< 0,5	< 0,5	<0,5
Cobalt	µg/l	5	98	20	-	-	-
Chrome	µg/l	6	17	7	< 1	9	3
Cuivre	µg/l	4	85	18	< 1	7,0	4,9
Fer	µg/l	1	88	34	< 1	41,0	23,9
Potassium	mg/l	18,3	26,6	23,2	-	-	-
Manganèse	µg/l	1	1153	526	2	69	16
Mercure	µg/l	<0,5	<0,5	<0,5	< 0,2	< 0,2	<0,2
Molybdène	µg/l	3	18	7	-	-	-
Sodium	mg/l	28,8	43,7	36,5	-	-	-
Nickel	µg/l	6	7	6	< 2	3,0	2,2
Plomb	µg/l	10	189	32	< 10	< 10	<10
Soufre	mg/l	125	267	187	110	200	161
Antimoine	µg/l	12	87	18	-	-	-
Sélénium	µg/l	<6	<6	<6	< 3	4	4
Silicium	mg/l	9,3	12,2	10,6	-	-	-
Etain	µg/l	39	56	40	< 5	< 5	<5
Zinc	µg/l	<1	262	160	< 1	41,0	12,6
Fluorures	µg/l	10	870	550	-	-	-
Chlorures	mg/l	40,6	64,5	55,3	-	-	-
Nitrates	mg/l	0,8	127,0	44,2	-	-	-
Sulfates	mg/l	388	644	527	220	650	398
MES	mg/l	0	13,3	4,7	3,2	6,4	4,4
NH4+	mg/l	<3	<3	<3	-	-	-
NTK	mg/l	<4	<4	<4	0,7	9,4	2,8
DBO5	mg/l	<3	8	8	< 3	< 3	<3
DCO	mg/l	37	68	42	12	34	22
COT	mg/l	2	15,8	10,2	6,4	9,8	8,4
Cyanures totaux	µg/l	<10	<10	<10	-	-	-
Indice phénols	µg/l	<20	25	25	< 10	< 10	<10
HC (t) par CPG	µg/l	<50	<50	<50	< 50	160	<50
HAP Totaux	µg/l	0,05	0,16	0,05	< 0,02	0,11	0,06

Tableau 3 : Concentrations des différents éléments et substances dans les eaux de nappe suite aux essais menés par EEDEMS et ANTEA (Min = concentration minimum relevée ; Max = concentration maximum relevée ; Moy. = concentration moyenne sur 12 prélèvements EEDEMS et sur 8 prélèvements ANTEA).

VI.2. - Essais en laboratoire : évolution du pH et de la conductivité

Les pH des éluats des essais colonnes réalisés sur les 4 matériaux varient dans une plage relativement réduite (7,3 à 8,1). Ce constat se retrouve au niveau des valeurs enregistrées pour les eaux de nappe (ZS) des casiers lysimétriques au laboratoire (figure 8) et des alvéoles sur site avec néanmoins pour les premiers des variations plus sensibles dans les zones non saturées (ZNS) probablement dues à une hydrodynamique de transfert complexe.

Bien que les matériaux naturels aient été choisis en fonction de leur nature lithologique et minéralogique (pôles siliceux et carbonatés), **les variations enregistrées sont trop faibles pour que le pH ait une influence significative au niveau d'une possible interaction entre les PUNR et la nature même des matériaux de remblaiement.**

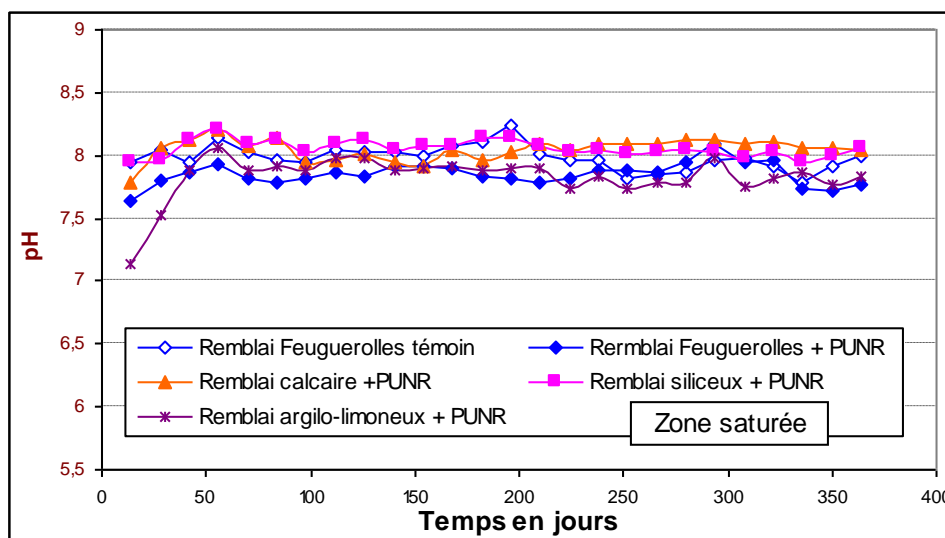


Figure 8 : Evolution du pH au cours du temps dans la zone saturée des lysimètres EEDEMS

Dans les essais colonne et du point de vue de la conductivité, le matériau argilo-limoneux se distingue très nettement des 3 autres en présentant les valeurs les plus élevées qui sont à mettre surtout en rapport avec des concentrations fortes en sulfates. Le même constat est effectué au niveau de la ZS sur les casiers lysimétriques au laboratoire (figure 9) avec néanmoins des valeurs plus élevées pour les 3 autres matériaux lesquelles peuvent probablement être mises en rapport avec des ratios L/S beaucoup plus faibles et des temps de séjour plus longs que pour les essais colonne.

Les valeurs obtenues sur les alvéoles implantées sur le site sont du même ordre que celles des casiers lysimétriques en laboratoire (courbes bleues). **On constate donc que la mise en contact des PUNR avec les différents types de matériaux n'entraîne aucune variation notable de la conductivité des eaux de nappes.**

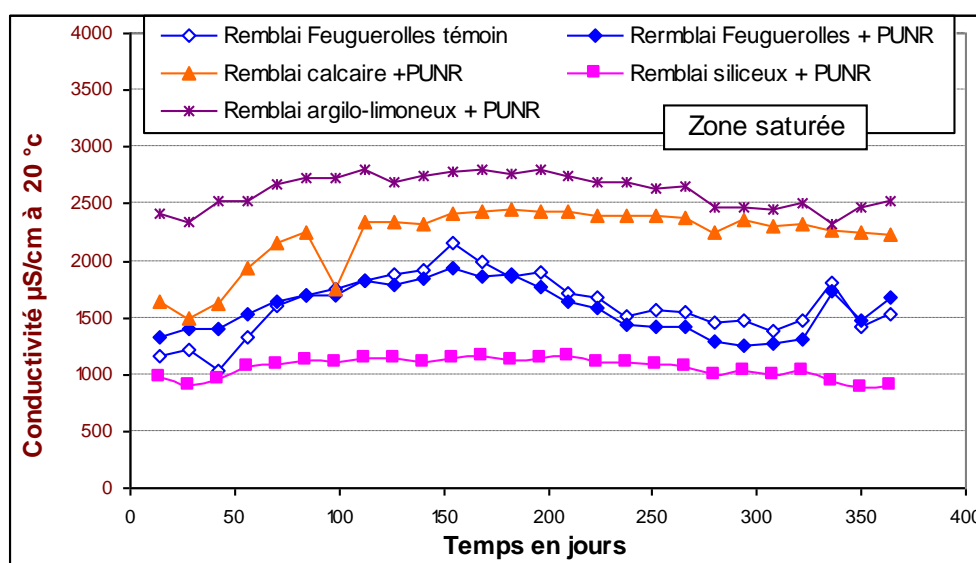
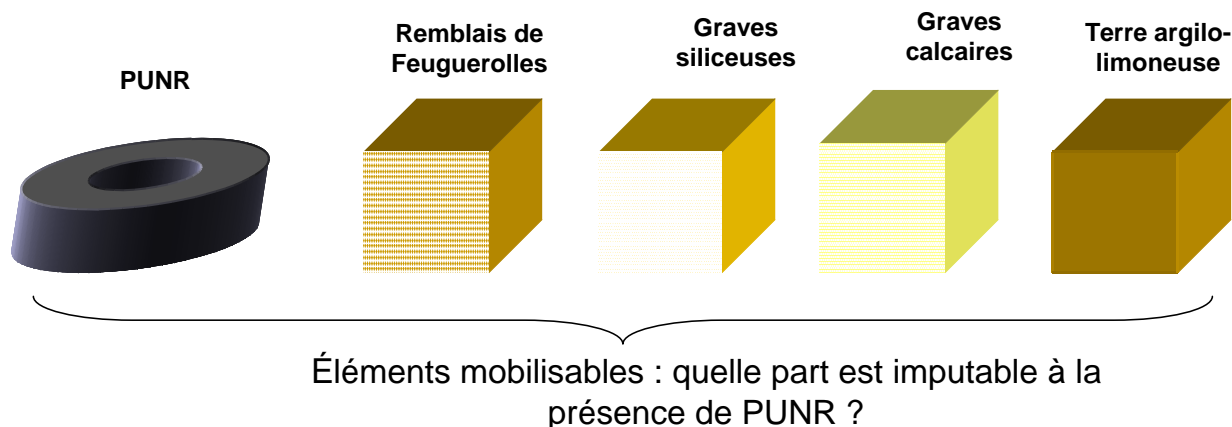


Figure 9 : Evolution de la conductivité au cours du temps dans la zone saturée des lysimètres EEDEMS

VI.3. - Essais en laboratoire : comparaison des résultats des essais en casiers lysimétriques et des essais en colonne de percolation (au laboratoire)

Les analyses réalisées concernent 4 matériaux inertes d'origine naturelle (seul le matériau de Feugueroles renferme quelques éléments d'origine anthropique). Pour autant, ces matériaux sont néanmoins susceptibles de relarguer des éléments mobilisables lorsqu'ils sont mis en contact avec de l'eau, au même titre que les PUNR.



L'approche analytique réalisée via les essais en colonne de percolation sur les 4 types de matériaux (sans association avec les PUNR) permet d'une part, d'appréhender le maximum mobilisable pour chaque élément considéré, et d'autre part d'établir par comparaison la part imputable aux PUNR quand ceux-ci sont mis en contact les différents matériaux.

VI.3.1. - Analyse des résultats des essais en colonnes de percolation sur les différents types de remblais

Les résultats analytiques issus des essais en colonnes montrent que **bon nombre d'éléments et composés chimiques recherchés sont non détectables, donc peu ou pas disponibles**, dans la mesure où leurs concentrations sont inférieures aux seuils de détection analytique.

Ainsi, dans les éluats et quel que soit le rapport L/S, les éléments cadmium, chrome, cuivre, mercure, sélénium, étain, azote Kjeldhal, cyanures et hydrocarbures totaux sont non détectables. Le nickel, généralement absent sur la plupart des percolats, peut néanmoins apparaître à l'état de traces dans certains percolats du remblai siliceux. Le plomb également n'est mesurable que sur un seul éluat pour les remblais siliceux et argilo-limoneux et sur deux éluats pour le remblai carbonaté (avec des valeurs inférieures à 50 µg). De même, l'antimoine n'est présent que dans le dernier éluat pour les remblais de Feugueroles et les remblais argilo-limoneux. L'arsenic est présent à l'état de traces, dans les matériaux naturels mais n'est détecté que dans un seul éluat sur cinq pour chacun des matériaux. Il est détecté dans quatre éluats pour le remblai de Feugueroles. Toutefois, toutes les valeurs sont inférieures à 38 µg/l. Le manganèse est quasiment non détectable à l'exception du remblai argilo-limoneux où il présente des concentrations non négligeables. L'ensemble des éluats analysés ne présente globalement aucune DCO détectable.

Par rapport aux 3 autres remblais, le remblai de Feugueroles montre des concentrations supérieures en Na, K, Co, As, Si d'une part et chlorures, fluorures et nitrates d'autre part. Le remblai siliceux montre les concentrations les plus fortes en Al et le remblai argileux-limoneux présente des concentrations supérieures en Ca et sulfates.

VI.3.2. - Analyses des résultats et simulations

La présente synthèse présente des **graphiques uniquement pour les composés significatifs**. En effet, **en présence ou non des PUNR**, les éléments comme le cadmium, le mercure, le sélénium, les cyanures totaux et les hydrocarbures totaux sont à des concentrations inférieures aux seuils de détection analytique dans tous les percolats. Le chrome, le cuivre, le nickel, l'antimoine et l'étain ne sont présents en concentrations mesurables qu'au maximum dans trois percolats sur douze. L'ammoniaque et l'azote Kjeldhal sont également en concentrations inférieures aux seuils de

détection analytique bien qu'ils n'aient été mesurés que sur quatre percolats par type de matériaux et par nature de percolats.

Concernant l'**indice phénol**, comme pour DBO (Demande Biologique en Oxygène), celui-ci a été mesuré sur les prélèvements des premier, troisième, sixième et treizième mois. **Seul le remblai argilo-limoneux présente trois teneurs mesurables**, une sur le premier percolat et deux sur les premiers prélèvements en zone saturée où la première est très élevée. Néanmoins cette valeur est probablement due à une interférence analytique.

Pour les 16 hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) analysés dans les eaux issus des 3 casiers contenant les remblais naturels et les PUNR, **les concentrations sont le plus souvent en dessous des limites de détection, sinon sous forme de traces**. Pour les deux casiers contenant les remblais de Feugueroles, la majorité des mesures est inférieure aux seuils de détection analytique ou à l'état de trace et seule une dizaine de valeurs sont supérieures à 20 nanogrammes/litre.

Pour les autres composés dont les concentrations sont plus significatives, les résultats obtenus sont présentés sur les mêmes diagrammes afin **d'identifier un enrichissement potentiel imputable à la présence de PUNR**. Pour ces simulations, la comparaison des résultats est principalement basée sur les courbes des quantités extraites cumulées. Les résultats sont ici exprimés en mg/kg de matière sèche et les courbes sont représentées en fonction du ratio liquide/solide qui atteint pour les essais colonnes la valeur de 10 l/kg pour le dernier prélèvement de chaque matériau.

Les résultats présentent une concordance pour les trois matériaux naturels, ce sont globalement les mêmes éléments qui présentent des valeurs élevées. La comparaison des résultats des deux casiers lysimétriques Feugueroles avec et sans PUNR donne par différence la part de pollution potentiellement imputable aux PUNR.

Les graphiques qui suivent sont donnés pour exemple pour certains éléments et représentent les teneurs cumulées en mg/kg de matière sèche. La légende affichée est commune à tous les résultats :

- résultats des essais en casiers lysimétriques sur les courbes de gauche (complexes avec PUNR sauf pour le casier témoin en remblais de Feugueroles seul),
- et résultats des essais en colonnes (courbes de droite, 4 matériaux minéraux).

Note 1 : Cette synthèse des résultats présente uniquement les résultats des analyses d'eaux dans la zone saturée (contact prolongé avec les complexes Remblais/PUNR). Les analyses d'eaux dans la zone insaturées sont cohérentes avec ces dernières en terme de concentrations mais présentent des variations plus importantes liées à l'instabilité des chemins préférentiels d'écoulements dans cette zone (étude EEDEMS).

➤ **Aluminium** : En observant la Figure 10 représentant l'aluminium, on peut remarquer que les courbes relatives aux remblais de Feugueroles en lysimètres sont relativement proches et sur les deux premiers tiers, c'est la courbe représentant le lysimètre témoin qui se situe au-dessus. A partir de cette observation on peut conclure que **les PUNR ne contribuent pas significativement à l'émission de l'aluminium**.

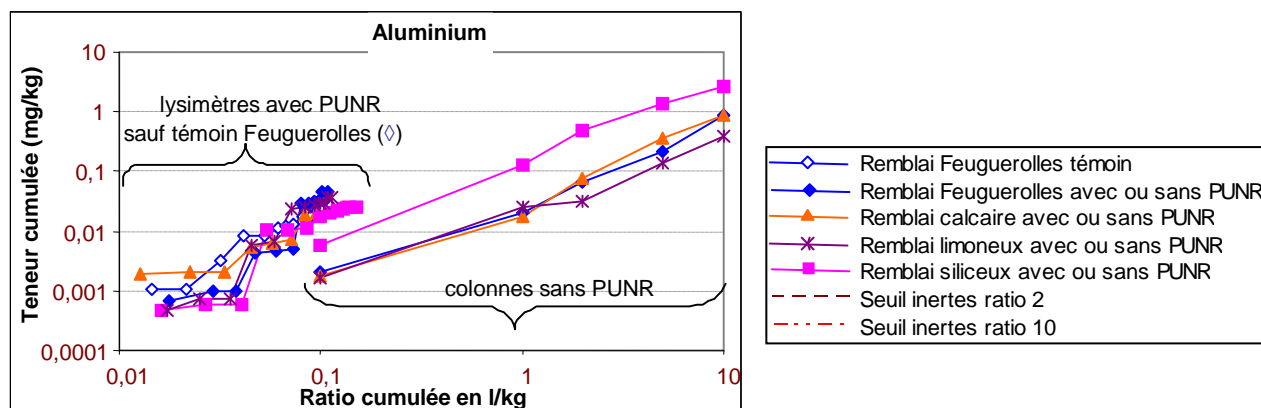


Figure 10 : Teneurs cumulées en Aluminium en fonction du ratio cumulé L/S (l/kg)

➤ **Baryum** : Les concentrations mesurées pour cet élément sont relativement faibles (<0,35 mg/l). Sur la Figure 11 les deux courbes représentant les remblais de Feugueroles avec et sans PUNR en casiers lysimétriques sont parallèles et quasi confondues. Les courbes cumulées des résultats en colonnes montrent des courbes resserrées dans la continuité de celles des lysimètres. Ici encore l'apport

des PUNR peut être considéré comme négligeable et le remblai de Feuguerolles relargue un peu plus de baryum que les matériaux naturels.

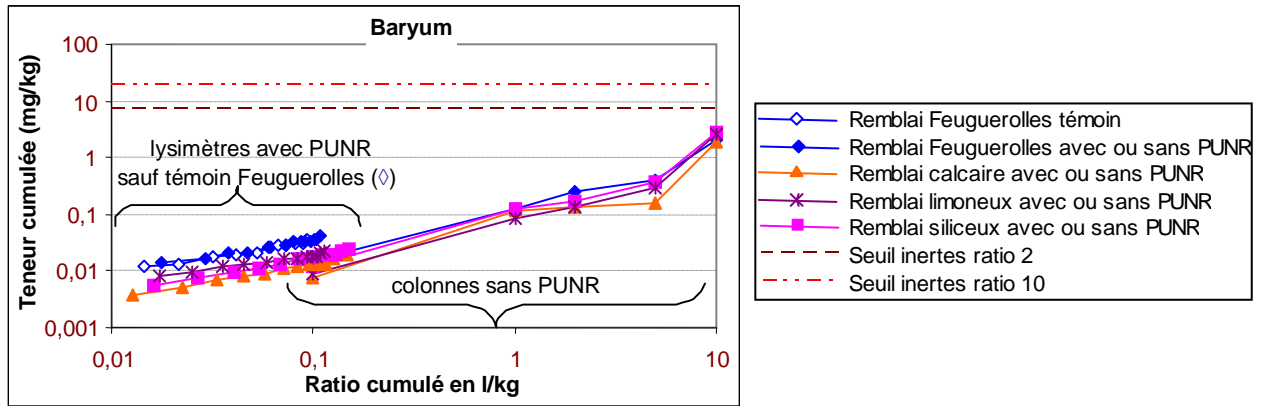


Figure 11 : Teneurs cumulées en Baryum en fonction du ratio cumulé L/S (l/kg)

➤ **Zinc** : Ce métal est prépondérant dans la composition des PUNR à des teneurs supérieures à 1%. Cependant, les courbes des remblais de Feuguerolles avec et sans PUNR sont proches entre elles et se situent au dessus des courbes des autres matériaux. Rien ne distingue nettement les différents matériaux entre eux (Figure 12). **L'apport des PUNR peut donc être considéré comme négligeable.**

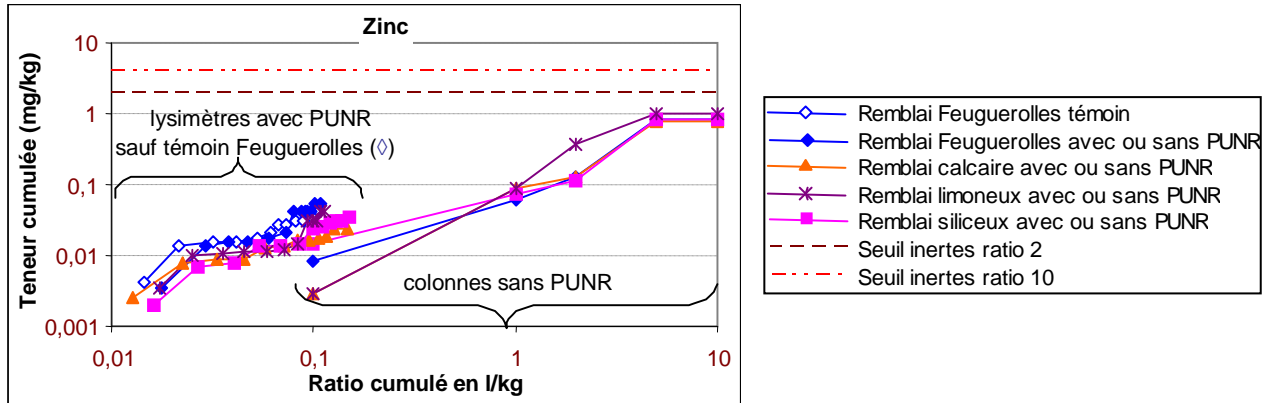


Figure 12 : Teneurs cumulées en Zinc en fonction du ratio cumulé L/S (l/kg)

Sulfates : Tous les matériaux étudiés sont naturellement riches en sulfates. Les concentrations mesurées sont toutes très élevées notamment dans les percolats (**ZNS**) même si les quantités extraites restent faibles du fait du faible ratio liquide/solide (Figure 13). **Les résultats ne montrent pas d'apport significatif des PUNR en sulfates.** On constate que hormis pour le remblai argilo-limoneux, les quantités totales extraites dans les lysimètres sont déjà très proches voire supérieures aux quantités extraites dans les colonnes. L'extrapolation des résultats à long terme dans ce cas de figure devrait se faire sur la base des quantités à estimer pour les colonnes pour des ratios supérieures à 10 (voir l'exemple du potassium au chapitre V.3.2.4).

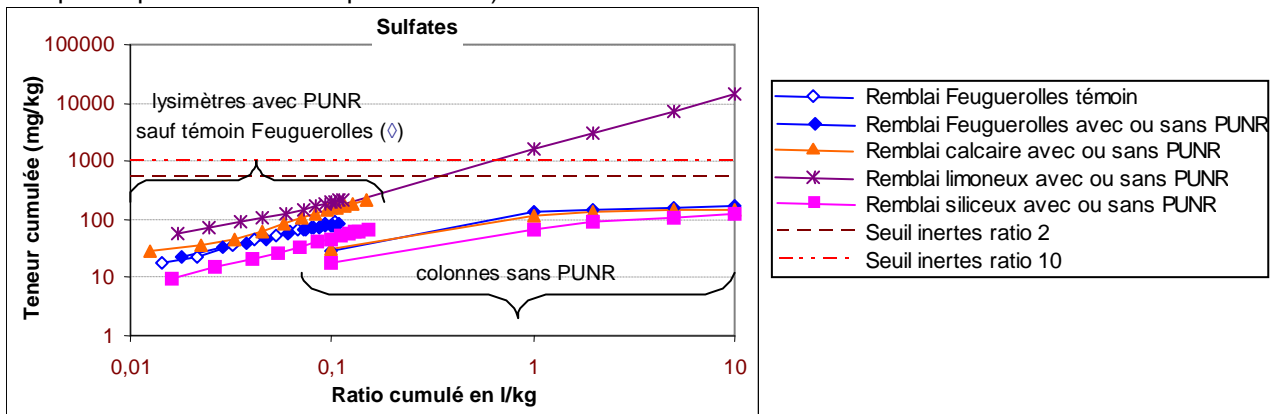


Figure 13 : Teneurs cumulées en Sulfates en fonction du ratio cumulé L/S (l/kg)

➤ **Fluorures et Chlorures** : pour ces deux composés les courbes des quantités extraites pour les remblais de Feuguerolles se situent bien au dessus des autres. Les deux courbes représentatives des remblais de Feuguerolles sans et avec PUNR sont quasi confondues (Figure 14), ce qui indique que **les PUNR n'entraînent aucun enrichissement en ces 2 anions**.

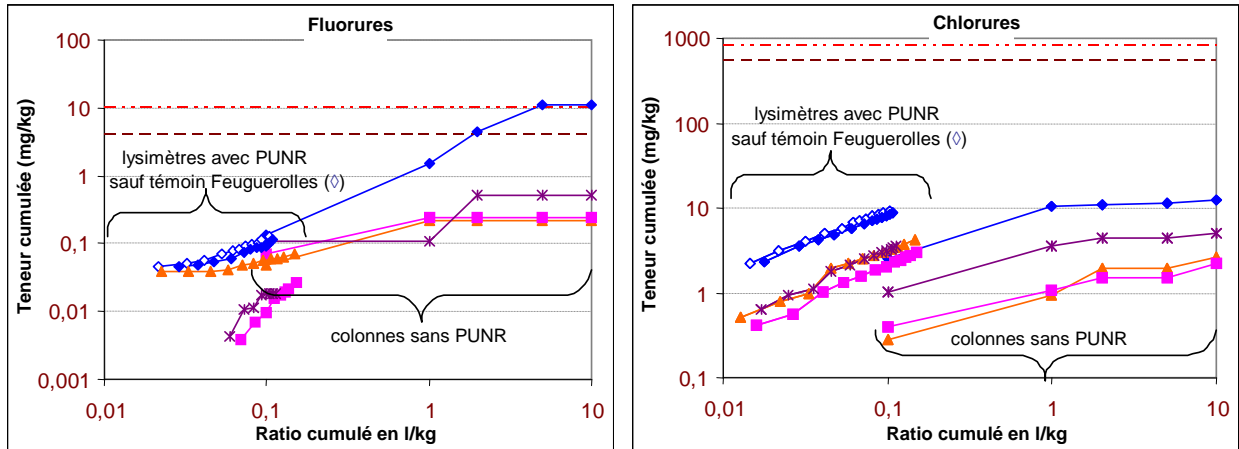


Figure 14 : Teneurs cumulées en Chlorures et Fluorures en fonction du ratio cumulé L/S (l/kg)

➤ **Manganèse** : Cet élément est présent dans la ZS (figures 15 et 16) durant les six premiers mois pour les remblais de Feuguerolles et les remblais carbonatés et siliceux. Toutes les courbes sont décroissantes. La similitude de ce phénomène dans les cinq cas montre qu'il y a précipitation du manganèse dans la zone saturée.

Dans le remblai argilo-limoneux, le manganèse est très présent dans la totalité des prélèvements. Le maximum atteint est de 11,6 mg/l. Néanmoins il décroît aussi à partir du quatrième mois. La courbe du remblai Feuguerolles + PUNR se situe bien plus bas que celle du casier témoin.

Ces résultats ne montrent aucune contribution des PUNR à l'apport en manganèse. Seul le remblai argilo-limoneux montre des teneurs élevées dues à la nature même du matériau (Figure 16).

Pour les autres matériaux, les concentrations mesurées en essais colonnes sont presque toutes non détectables d'où des courbes plates.

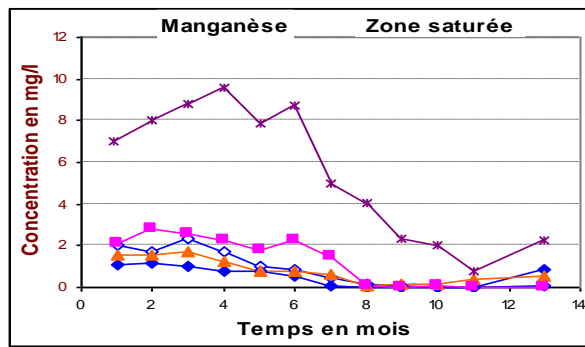


Figure 15 : Evolution des concentrations en Manganèse au cours du temps dans les lysimètres

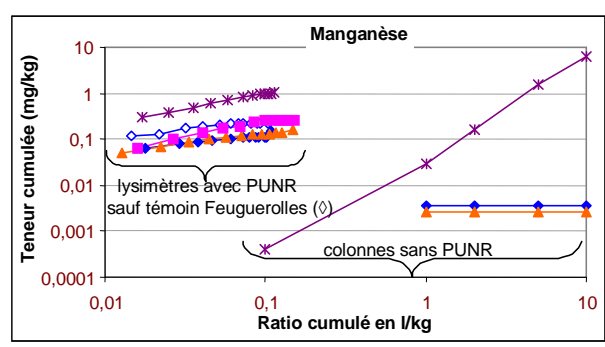
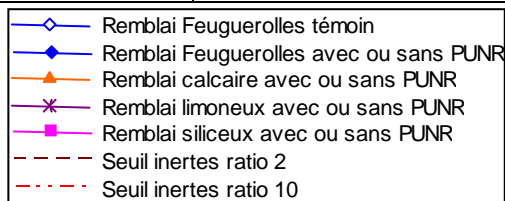


Figure 16 : Teneurs cumulées en Manganèse en fonction du ratio cumulé L/S (l/kg)



VI.3.3. - Extrapolation dans le temps du comportement en lysimètres des différents matériaux de remblaiement

Comme indiqué précédemment, la majorité des courbes correspondant aux éléments extraits en quantités significatives, notamment les éléments majeurs comme les chlorures, les nitrates, le silicium, le potassium et le calcium, présentent des allures comparables à celles du sodium (Figure 17).

Dans la mesure où les PUNR ne participent pas à l'enrichissement des percolats, il est intéressant ici de préciser certains points destinés à donner une explication concernant l'évolution des courbes de concentrations dans le temps, puisque les teneurs enregistrées sont imputables à des relargages inhérents aux matériaux de remblais eux-mêmes.

Ces courbes sont typiques des cas où les lysimètres sont arrosés par intermittences. Les massifs de matériaux disposent d'une période dite de relaxation qui permet de recharger le film d'eau liée à l'interface des grains. Dans ce cas les quantités extraites pour un ratio donné sont plus importantes et l'épuisement est accéléré. En revanche les deux types de courbes obtenues avec un arrosage continu ou intermittent, tendent vers les mêmes tangentes. Comme on peut voir sur la Figure 18 pour le potassium, les courbes des quantités extraites pour les colonnes (alimentation continue) n'ont pas encore atteint un palier pour le ratio de 10.

On simule donc ces paliers par extrapolation (continuité des courbes en pointillé) puis on extrapole les courbes des lysimètres vers les mêmes paliers. Pour cet exemple le ratio des lysimètres est d'environ 0,2 et les paliers sont atteints pour un ratio de 100. Les quantités correspondant aux paliers seront atteintes au bout de 500 ans dans les conditions des essais. Il est évident que sans modélisation géochimique, cela reste une indication de tendance.

Le cas du potassium est donné comme exemple. Nous ne ferons pas ici d'extrapolation pour les autres éléments dans la mesure où le relargage des remblais n'était pas l'objectif de l'étude.

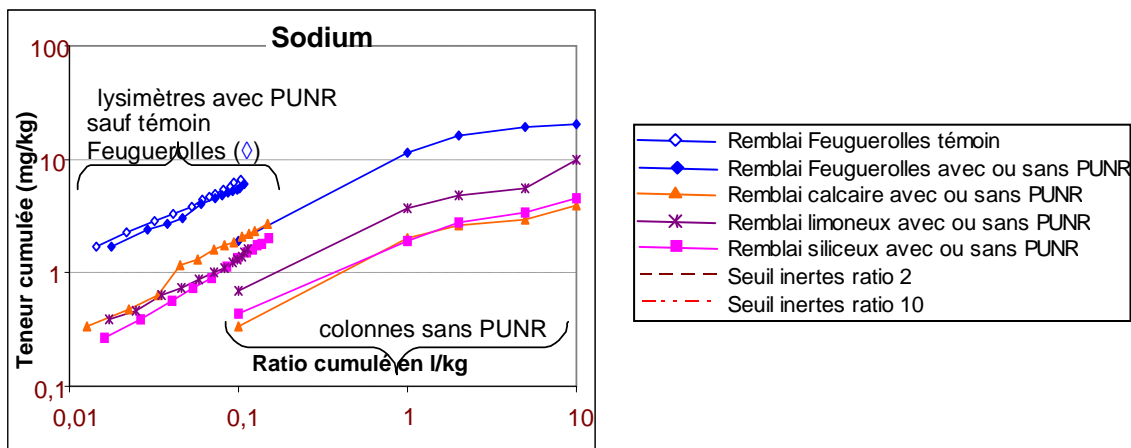


Figure 17 : Teneurs cumulées en Sodium en fonction du ratio cumulé L/S (l/kg)

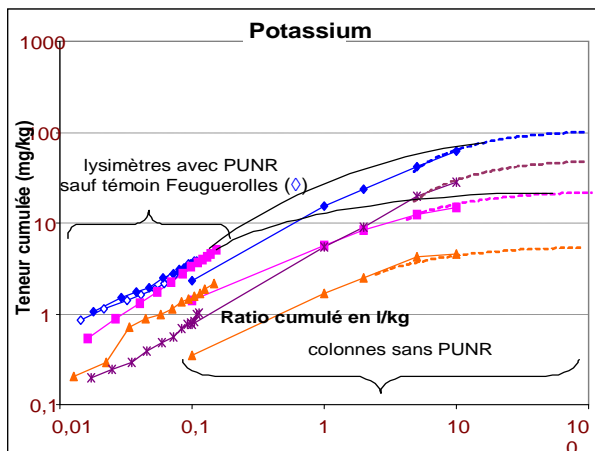


Figure 18 : Teneurs cumulées en Potassium en fonction du ratio cumulé L/S (l/kg)

VI.3.4. - Résultats des essais écotoxicologiques

Les conclusions des essais écotoxicologiques sont les suivants :

- L'essai de **toxicité aiguë** vis-à-vis des crustacés aquatiques *Daphnia magna* n'a montré **aucune toxicité en 24h**,
- L'essai de **toxicité chronique** vis-à-vis des algues vertes unicellulaires *Pseudokirchneriella subcapitata* n'a montré **aucune toxicité en 72h**,
- L'essai de **toxicité chronique** vis-à-vis du crustacé *Ceriodaphnia dubia* n'a montré **aucune toxicité significative**.

Essais de toxicité :	aiguë		chronique		chronique	
	<i>Daphnia magna</i>		<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>		<i>Ceriodaphnia dubia</i>	
	CE 50 24h *	UT	CE 50 72h **	UT	CE 20 5j	UT
Feuguerolles témoin sans PUNR	> 90%	< 1	> 80%	< 1,2	> 80%	< 1,2
Feuguerolles + PUNR	> 90%	< 1	> 80%	< 1,2	> 80%	< 1,2
Remblai carbonaté + PUNR	> 90%	< 1	> 80%	< 1,2	non quantifiable (***)	
Remblai siliceux + PUNR	> 90%	< 1	> 80%	< 1,2	> 80%	< 1,2
Remblai argilo-limoneux + PUNR	> 90%	< 1	> 80%	< 1,2	≥ 80%	≤ 1,2

Tableau 4 : Résultats des tests écotoxicologiques

(**) La CE50 est la concentration efficace en percolats qui provoque l'immobilisation de 50 % d'un lot de daphnies soumis au test pendant une période d'exposition de 24 heures.

(**) La CE50 est la concentration efficace en percolats qui provoque 50 % d'inhibition de la croissance d'une population d'algues par rapport à un témoin sans percolats après une période d'exposition de 72 heures.

(***) Les résultats de l'essai d'inhibition de la reproduction de *Ceriodaphnia dubia* par l'éluat de remblai carbonaté + PUNR ne permettent pas de calculer une CE20. En effet, l'hétérogénéité des réponses obtenues avec les 10 réplicats d'une même dilution et la dispersion des réponses d'une dilution à l'autre font que le coefficient de variation calculé autour de la CE20 ne permet pas de la valider (pour une CE20 calculée de 0,4%, l'intervalle de confiance est compris entre 7,4x10⁻²¹ et 6,46). Les Cériodaphnies étant particulièrement sensibles à la dureté et à la pression osmotique de l'eau, il est possible que l'effet de la matrice carbonatée soit prépondérant dans ce phénomène. En effet, la dureté des eaux de nappe des matériaux carbonatés est beaucoup plus forte (146 °TH) que celle des autres matériaux (95°TH pour les matériaux de Feuguerolles et 45° TH pour les siliceux).

VII.- CONCLUSIONS GENERALES

Pour aucune des substances analysées, il ne peut être établi de relation entre les taux de relargage et la présence des PUNR. Les différences observées au niveau des concentrations des percolats issus des casiers lysimétriques de laboratoire et des alvéoles sur site avec et sans PUNR sont trop ténues et donc non significatives d'un quelconque relargage (les courbes de concentrations des expérimentations témoins pouvant même se situer au dessus des courbes des expérimentations avec PUNR) et montrent ainsi que la **présence des PUNR n'entraîne aucun enrichissement dans la composition chimique des percolats.**

Les **essais écotoxicologiques** conduits sur les percolats issus de la zone saturée (contact permanent des eaux avec le complexe) ne **montrent pour leur part aucune toxicité significative vis à vis des organismes testés.**

En effet, les 2 approches complémentaires montrent que les concentrations en éléments observées dans les différents percolats (zone saturée et zone non saturée) proviennent essentiellement des matériaux de remblaiement utilisés et non pas des PUNR. La contribution des PUNR par rapport aux émissions des remblais eux-mêmes n'est pas significative. **Le temps de contact de l'eau avec les complexes PUNR entiers-Remblais et la nature lithologique des matériaux de remblaiement n'ont pas montré d'influences significatives sur les résultats.**

Les résultats d'ensemble permettent donc de confirmer l'innocuité environnementale de l'utilisation de PUNR entiers en réaménagement de carrière comme dans le cadre de travaux de génie civil utilisant la technique PNEUSOL®.

Dans le cadre d'une valorisation de PUNR entiers en mise en sécurité et réaménagement de carrière, utilisant la technique PNEUSOL®, outre le fait qu'une méthodologie de mise en œuvre des PUNR devra prendre en compte la stabilité géotechnique de l'ouvrage constitué, il pourrait être défini un programme de suivi environnemental adapté à l'ouvrage en phases d'exploitation et post-exploitation.

Un cahier des charges établi sur la base des résultats acquis et restituant des préconisations d'utilisation de PUNR entiers en génie civil, pourra être élaboré de façon précise en concertation avec les principales institutions publiques (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, DRIRE et ADEME).

VIII.- BIBLIOGRAPHIE

ANTEA/EUROVIA n°A 44456 / A (décembre 2006) CAEP050026 : Valorisation géotechnique de PUNR dans le cadre de réaménagement de carrières - Evaluation environnementale et recommandations.

BLIC. (2004) : Literature study on substances leached from shredded and whole used tyres. Bruxelles : *The European Association of the Rubber Industry*, 30p.

EEDEMS/ALIAPUR/EUROVIA (janvier 2008) : Evaluation environnementale de la valorisation géotechnique de PUNR entiers (en association avec des matériaux de remblaiement de différentes lithologies) dans le cadre de réaménagement de carrières.

EEDEMS/EOS/ALIAPUR/ADEME (juin 2005) : Utilisation des pneumatiques usagés en l'état ou broyés dans le contexte des centres de stockage de déchets pour le drainage eau-lixiviats-biogaz et la protection des organes d'étanchéité : Etat de l'art technique, économique et réglementaire dans les domaines d'application envisagés.

EEDEMS/SLEG/ALIAPUR/ADEME (juillet 2006) : Valorisation des pneumatiques usagés poids lourds non réutilisables comme éléments de structure de bassins souterrains de rétention – Evaluation environnementale et technique.

Horner J.M. (1996) : Environmental Health Implications of Heavy Metal Pollution from Car Tires. *Reviews on Environmental Health*, 11(4), pp.175–178.

Millef W. L., Chadik P.A. (1993) : A study of waste tire leachability in potential disposal and usage environments. *University of Florida Department of Environmental Engineering Sciences*, 128 p.

Ministère de l'écologie et du développement durable. (2002) : "Décret n° 2002-1563 du 24 décembre 2002 relatif à l'élimination des pneumatiques usagés." *J.O n° 303 du 29 décembre 2002*, 21954.

Ministère de l'écologie et du développement durable. (juin 2004) - Guide de bonnes pratiques relatif aux installations de stockage de déchets inertes issus du BTP.

MWH NEW ZEALAND. (2004) : End-of-Life Tyre Management: Storage Options. *Final Report for the Ministry for the Environment*, p.36

Nguyen Thanh Long (décembre 1993) - Thèse INSA – Le PNEUSOL® : Recherches – Réalisations – Perspectives

Zelibor J.L. (1991) : Leachate from tire samples. Washington : Scrap Tire Management Council, 22 p.