



FICHE TECHNIQUE RESINE

Résine URETEK
Geoplus® A

Mai 2015



RESINE URETEK GEOPLUS®

1.1 Caractéristiques des produits de base

La résine polyuréthane expansive bi-composant dénommée URETEK Geoplus® appartient à la famille des polymères rigides à cellules fermées. Cette résine dont la formulation reste confidentielle, présente des caractéristiques très particulières précisées au paragraphe 2.2.

Mise au point pour une application exclusive d'URETEK, elle se classe dans la catégorie des polymères réticulés thermodurcis. Elle est produite à la suite d'une réaction exothermique de polymérisation entre deux composants mélangés dans des proportions volumétriques spécifiques.



Figure 2.1. Séquences de la réaction de polymérisation

Les deux composants de la résine URETEK Geoplus® sont :

- Geoplus A,
- Geoplus B.

Ces composés sont identifiés au niveau des cuves placées dans le camion atelier. Le mélange et la température sont gérés depuis le camion atelier par un système de pompage et de chauffage calibrés conformément aux prescriptions du fournisseur.

En cas de réaction en expansion libre (sans confinement), le volume de la résine peut atteindre jusqu'à 30 fois celui du mélange initial.

La masse volumique du mélange à l'état liquide est égale à 1070 kg/m^3 et est très proche de celle de l'eau (1000 kg/m^3). La résine expansée est, au contraire, caractérisée par une densité significativement plus faible, qui dépend de la pression de gonflement.

Après injection dans le sol, la résine forme un polyuréthane rigide thermodurci stable, non biodégradable et non polluant dont le poids volumique peut varier de $0,7 \text{ kN/m}^3$ à plus de $3,5 \text{ kN/m}^3$ (selon l'état de confinement) dans le cas d'utilisations courantes. Dans des conditions environnementales et structurales particulières (charges importantes) le poids volumique de la résine peut atteindre $5,0$ à $6,0 \text{ kN/m}^3$.

1.2 Caractéristiques de la résine expansive URETEK Geoplus®

De nombreux essais en laboratoire ont été effectués sur la résine URETEK Geoplus® afin de déterminer ses principales propriétés physiques et mécaniques

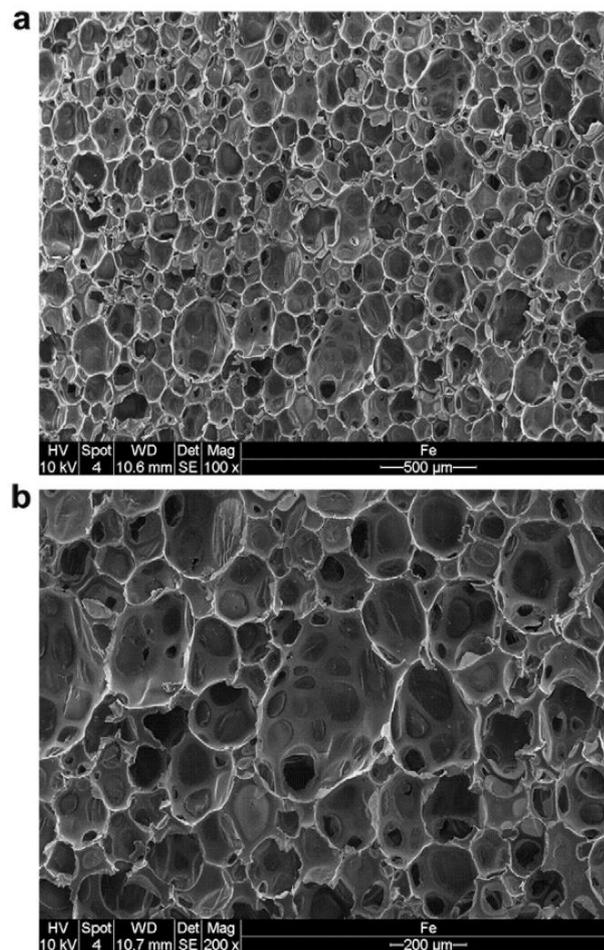


Figure 2.2. Image obtenue au microscope électronique de la résine polyuréthane URETEK Geoplus®, expansée sans confinement (masse volumique égale à 37 kg/m³). (a) Agrandissement $\times 100$; (b) Agrandissement $\times 200$. (Buzzi et al., 2008).

1.2.1 Pression de gonflement

La pression de gonflement de la résine a été étudiée en conditions œdométriques à l'aide d'un appareillage permettant l'injection du mélange à l'intérieur d'un cylindre métallique rigide muni d'un piston. Lors de l'expansion, compte tenu de la forte rigidité du contenant, le mélange pousse verticalement un piston qui, après une course de quelques centimètres, est bloqué par un élément transversal équipé d'un manomètre.

L'essai a été exécuté avec des échantillons de forme cylindrique (diamètre 80 mm, hauteur de 60 à 116 mm) de poids volumique compris entre 2,0 kN/m³ et 10,15 kN/m³.

La pression de gonflement maximale de la résine obtenue en conditions œdométriques est égale à 10,2 MPa. La relation empirique suivante a été directement déduite des résultats expérimentaux obtenus :

$$P = \exp[0,23 \cdot (\gamma_{rf} - 0,36)] - 1 \quad [1]$$

où :

P = pression de gonflement de la résine, déterminée dans des conditions œdométriques (exprimée en MPa) ;

γ_{rf} = poids par unité de volume (poids volumique ou encore poids spécifique) de la résine expansée (exprimé en kN/m^3).

Par ailleurs, Buzzi et al. (2008) ont rencontré des conditions de gonflement libre de la résine, ou pression de gonflement nulle, pour un poids spécifique $\gamma_{rf} = 37 \text{ kg/m}^3$. $g = 0,36 \text{ kN/m}^3$, où g est l'accélération de la pesanteur ($= 9,81 \text{ m/s}^2$). La relation empirique de l'équation [1] a été obtenue en minimisant l'erreur d'approximation des chiffres de Favaretti et al. (2004) et en imposant $\gamma_{rf} = 0,36 \text{ kN/m}^3$ pour $P = 0 \text{ kPa}$.

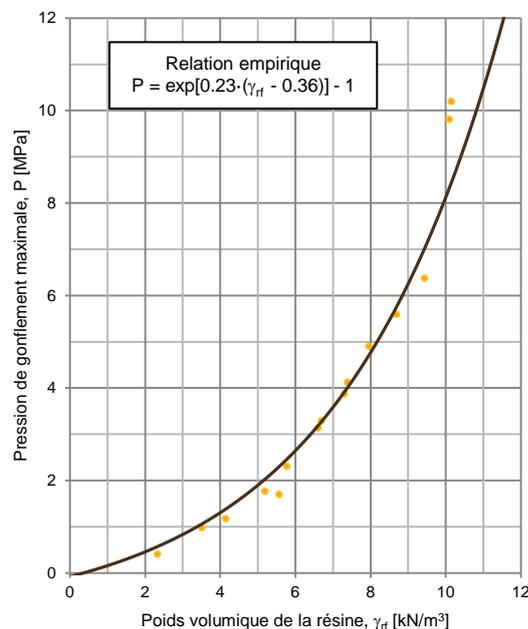


Figure 2.3. Pression de gonflement en fonction du poids volumique initial de l'échantillon.

Le degré d'expansion de la résine Geoplus® injectée dans le sol est compris entre 200 et 2000 % du volume initial. Ces valeurs constituent des seuils.

Rappelons que dans les cas courants, le poids spécifique de la résine injectée est compris entre 0,7 et 3,5 kN/m^3 .

1.2.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression a été évaluée en référence à la norme UNI 6350-68.

L'expérimentation a été effectuée sur des échantillons de forme cubique de 50 mm de côté et d'un poids volumique compris entre 0,5 kN/m^3 et 3.3 kN/m^3 .

Cinq échantillons ont été testés pour chacune des valeurs de poids volumique considérées, comprises entre 0,5 kN/m³ et 3.3 kN/m³. La résistance à la compression du mélange expansé est fortement corrélée au poids volumique initial. La résistance maximale a été mesurée non pas à la rupture propre et franche de l'échantillon, mais lors de sa perte d'alignement entre son axe vertical et celui du piston, rendant impossible la poursuite de l'essai.

En éliminant la force appliquée, l'échantillon a retrouvé ses dimensions géométriques et sa forme cubique initiale.

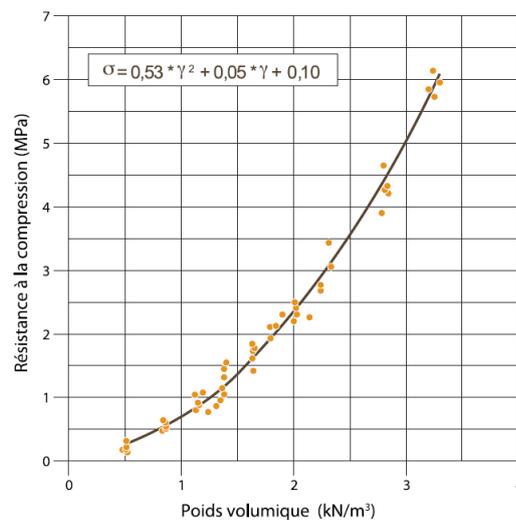


Figure 2.4. Résistance à la compression en fonction du poids volumique initial de l'échantillon (valeurs déterminées sur 55 échantillons).

Dans la plage des poids volumiques γ compris entre 0,5 kN/m³ et 3,3 kN/m³, des résistances à la compression ont été mesurées entre 0,2 MPa et 6,0 MPa. Les valeurs maximales de résistance ont été obtenues avec des déformations verticales comprises entre 3,5 % et 7 %.

1.2.3 Résistance à la traction

La résistance à la traction a été évaluée conformément à la norme UNI 8071.

L'expérimentation a été effectuée sur des échantillons en forme d'altère dont le poids volumique s'échelonnait entre 0,7 kN/m³ et 5,0 kN/m³.

La résistance à la traction du mélange expansé est là aussi fortement corrélée au poids volumique initial.

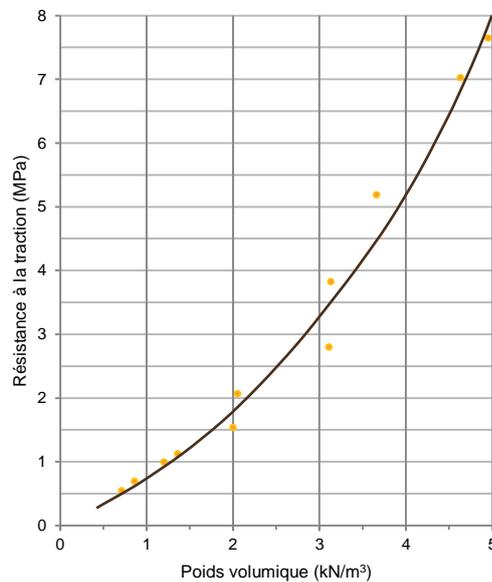


Figure 2.5. Résistance à la traction en fonction du poids volumique initial de l'échantillon.

1.2.4 Module d'élasticité

Le module d'élasticité de la résine expansive a été déterminé au moyen d'essais de compression verticale avec expansion latérale libre (norme UNI EN 6350-68) exécutés sur des échantillons de forme cubique de 50 mm de côté.

Cinq échantillons ont été testés pour chaque valeur de poids volumiques compris entre 0,5 kN/m³ et 3,3 kN/m³.

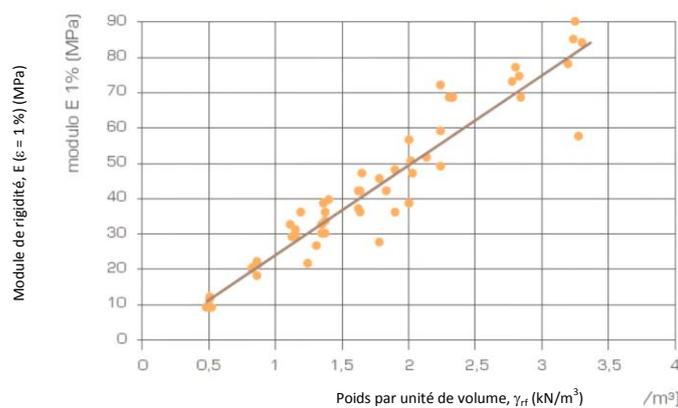


Figure 2.6. Module élastique en fonction du poids volumique initial de l'échantillon.

La valeur du module d'élasticité calculé en fonction d'une déformation verticale du 1 % varie de 10 à 90 MPa.

1.2.5 Autres caractéristiques mécaniques

La résine URETEK Geoplus® a fait l'objet d'évaluation d'autres propriétés mécaniques telles que :

- résistance à la flexion
- résistance à la compression triaxiale dynamique-cyclique,
- Evaluation de la déformation à 20-30 jours de la résine soumise à une charge constante – Influence de la densité.

1.2.6 Perméabilité

Buzzi et al. (2008) ont effectué des essais de conductivité hydraulique à la fois sur la résine URETEK Geoplus® pure et sur des échantillons constitués d'un mélange sol-résine. Pour la densité minimale ($0,36 \text{ kN/m}^3$), ou gonflement maximal, les valeurs de conductivité hydraulique mesurées étaient comprises entre $1 \cdot 10^{-9}$ et $1 \cdot 10^{-8}$ m/s sur la résine pure et indiquaient l'existence d'une porosité réduite interconnectée. Sur les échantillons de sol injecté, la conductivité hydraulique s'est avérée égale à environ 10^{-10} m/s.

À partir de ces résultats, il est possible de conclure que la structure de la résine est presque entièrement constituée d'alvéoles fermées et imperméables à l'eau. La conductivité hydraulique extrêmement faible, mesurée sur des échantillons de sols injectés, est due à la présence de micro-défauts aléatoires. Dans les conditions naturelles, le poids spécifique de la résine ne varie pas dans des conditions d'immersion dans l'eau, si ce n'est à la suite de processus de dégradation imposés artificiellement.

Cette résine peut donc être considérée comme étant presque imperméable et pratiquement étanche à l'eau.

1.2.7 Durabilité

Le concept de durabilité d'un matériau a été défini par la directive européenne concernant les matériaux de construction 89/106/EEC, Guidance Paper F approuvée en Décembre 2004 "Durability and the Construction Products Directive". La durabilité d'un produit est définie comme sa capacité à maintenir inaltérées ses propriétés au cours du temps sous l'influence d'actions prévisibles.

La durabilité d'un produit dépend de sa destination et de ses conditions d'utilisation.

En accord avec la directive européenne, l'évaluation de la durabilité du matériau polyuréthane URETEK Geoplus® a été évaluée sur la base du comportement du matériau sous l'influence des contraintes prévisibles du terrain injecté.

La résine URETEK Geoplus® est utilisée pour le traitement du sol. Il a donc fallu déterminer les contraintes auxquelles un terrain est normalement soumis et mettre en place les essais permettant d'étudier le comportement du matériau sous leurs influences.

Différentes sollicitations ont été identifiées :

- charges statiques de longue durée ;
- charges dynamiques ;
- présence possible de champignons et bactéries ;
- présence possible de composants chimiques.

Pour chacune de ces contraintes, un essai spécifique a été effectué.

- Comportement à long terme sous charge constante

L'étude a été réalisée sur des échantillons de résine prélevés après 4 ans d'enfouissement.

L'essai prévoyait, sur une période de 28 jours, l'application de charges verticales constantes (avec expansion latérale libre) sur des échantillons dont le poids volumique était compris entre 2,5 et 3,0 kN/m³. Cette étude comprenait 4 phases de chargement comprises entre 100 et 1100 kPa.

Les résultats sont reportés dans le diagramme suivant. Les déformations sont négligeables et toujours inférieures à 2 %.

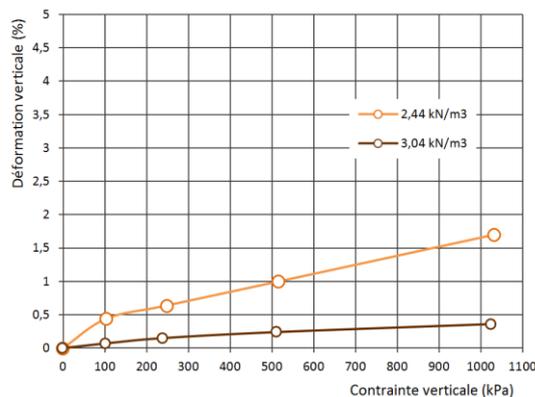


Figure 2.7. Courbes contraintes-déformations sur deux densités de résine différentes

- Comportement sous charges dynamiques

Les échantillons ont été soumis à des essais triaxiaux dynamiques cycliques avec une fréquence de 2Hz et un nombre de cycle de chargement/déchargement égal à 50000. La contrainte de confinement était nulle afin de simuler l'emploi de la résine à une faible profondeur dans le sol.

Pour chaque essai, il a été déterminé le module de résistance de la résine représentant le rapport entre la variation de la contrainte verticale appliquée et la déformation verticale induite, mesurée dans la zone de déformation élastique.

Les valeurs des modules sont relatées dans le tableau ci-après :

Essai	Poids volumique (kN/m ³)	Module de résistance (MPa)
A	0,98	24
B	1,67	55
C	2,06	70

- Résistance aux champignons et bactéries

La résine a été soumise à un test de résistance à l'attaque de champignons (moisissures) et de bactéries suivant la norme ASTM G21-96 et ASTM G22-76.

Les résultats mettent en évidence l'excellent comportement de la résine par rapport aux champignons et bactéries.

- Résistance aux agents chimiques

La résistance du polyuréthane expansé aux différents agents chimiques a été testée.

La résistance du matériau expansé aux agents chimiques a été évaluée en fonction de la perte de volume subie, suite à une exposition prolongée. Elle est évaluée selon les catégories suivantes:

- = Résistance excellente (perte de volume < 3%)
 - = Résistance bonne (entre 3% et 6%)
 - = Résistance moyenne (entre 6% et 15%)
 - = Résistance faible (entre 15% et 25%)
 - = aucune résistance
- Ne pas mettre en contact avec le matériau expansé.
Forte réaction solvante ou agression chimique (matériau détruit)

■■■■■ Acétate d'Indigotier	■■■■■ Hexane
■■■■■ Acétate de Butyle	■■■■■ Formaldéhyde
■■■■■ Acétate d'Éthyle	■■■■■ Gas-oil (gazole)
■■■■■ Acétone	■■■■■ Éthylène glycol 100%
■■■■■ Acide Acétique à 2%	■■■■■ Hydro. d'Ammonium con.
■■■■■ Acide Butyrique	■■■■■ Hydro. d'Ammonium 10%
■■■■■ Ac. Chlorhydrique con.	■■■■■ Hydroxyde de Potassium 1%
■■■■■ Ac. Chlorhydrique 25%	■■■■■ Hydroxyde de Sodium conc.
■■■■■ Ac. Chlorhydrique 10%	■■■■■ Isopropanol
■ Ac. Nitrique concentré*	■ Méthyl-éthyl-cétone
■■■■■ Ac. Nitrique à 10%	■■■■■ huile de lin
■ Ac. Sulfurique Conc.*	■■■■■ huile de lubrification
■■■■■ Ac. Sulfurique 10%	■■■■■ huiles minérales
■■■■■ Eau	■■■■■ Orthochlorobenzène
■■■■■ Eau de mer	■■■■■ Orthodichlorobenzène
■■■■■ Alcool Butylique	■■■■■ Soude caustique concentrée
■■■■■ Alcool Éthylrique	■■■■■ Soude caustique 25%
■■■■■ Alcool Méthylrique	■■■■■ Sulfate d'Ammonium 2%
■■■■■ Essence	■■■■■ Sulfure d'hydrogène saturé
■■■■■ Essence/Benzol 60/40	■■■■■ Sulfure d'hydrogène 80%
■■■■■ Benzol	■■■■■ Solution NaCl saturée
■■■■■ Kérosène	■■■■■ Solution NaCl 10%
■■■■■ Chlorate de Potassium 5%	■■■■■ Solvant pour vernis
■■■■■ Chlorure de Benzol	■■■■■ Styrène
■■■■■ Chlorure de Méthylène	■■■■■ Tétrachlorure de carbone
■■■■■ Combustible JD 4	■■■■■ Toluène
■■■■■ Combustible JD 5	■■■■■ Térébinthine
■■■■■ Di-isobutylène	■■■■■ Trichloréthylène
■■■■■ Di-isobutyl-cétone	■■■■■ Xylène

* Dans seulement 2 cas (acide nitrique concentré et acide sulfurique concentré) on ne peut pas parler de résistance car le matériau s'est complètement détruit au contact de ces acides concentrés. Néanmoins, ces composants chimiques sont très actifs et peuvent détruire quasiment tous les matériaux, y compris le métal.

Tableau 1 : Résistance du polyuréthane aux agressions chimiques.

Les résultats montrent une excellente résistance de la résine aux principaux produits testés (voir tableau 1 : *Résistance du polyuréthane aux agressions chimiques*) hormis aux acides concentrés.

1.2.8 Compatibilité environnementale

La résine URETEK Geoplus® respecte les normes en vigueur en matière d'environnement des sites.

Afin de confirmer le caractère inerte de la résine bi- composante, il a été procédé à une analyse selon les modalités de l'arrêté du 15 mars 2006 codifié à [l'article R. 541-65](#) du Code de l'environnement. Ce décret s'applique aux installations de stockage de déchets inertes régies par [l'article L. 541-30-1 du code de l'environnement](#). Pour l'application de ces dispositions, sont regardés comme des déchets inertes les déchets mentionnés au (e) de [l'article 2 de la directive 1999/31/CE du Conseil du 26 avril 1999](#) concernant la mise en décharge des déchets.

"(e) déchets inertes : les déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. La production totale de lixiviats et la teneur des déchets en polluants ainsi que l'écotoxicité des lixiviats doivent être négligeables et, en particulier, ne doivent pas porter atteinte à la qualité des eaux de surface et/ou des eaux souterraines".

Tableau 2 : Élaboration des résultats obtenus par analyse de l'éluat du test de lixiviation.

Paramètre	Unité de mesure	Valeur	Limite définie à l'annexe 2 tableau 1 de l'arrêté du 15/03/2006
Antimoine	mgSb/kg matière sèche	< 0.001	0.06
Arsenic	mgAs/kg matière sèche	< 0.01	0.5
Baryum	mgBa/kg matière sèche	1.43	20
Cadmium	mgCd/kg matière sèche	< 0.03	0.04
Chrome total	mgCr/kg matière sèche	< 0.1	0.5
Cuivre	mgCu/kg matière sèche	< 0.1	2
Mercure	mgHg/kg matière sèche	< 0.001	0.01
Molybdène	mgMo/kg matière sèche	< 0.1	0.5
Nickel	mgNi/kg matière sèche	< 0.2	0.4

Paramètre	Unité de mesure	Valeur	Limite définie à l'annexe 2 tableau 1 de l'arrêté du 15/03/2006
Plomb	mgPb/kg matière sèche	< 0.3	0.5
Sélénium	mgSe/kg matière sèche	0.01	0.1
Zinc	mgZn/kg matière sèche	0.67	4
Fluorures	mgF-/kg matière sèche	0.1	10
Indice phénols	mgphénol/kg matière sèche	< 0.1	1
COD	mgC/kg matière sèche	435	500
Fraction soluble	mgC/kg matière sèche	200	4000

COD : carbone organique dissous

La conclusion des analyses réalisées par le laboratoire est la suivante :

"Après lecture des tableaux 2 et 3, on remarquera que la seule valeur supérieure à la valeur limite imposée par la norme française, correspond au paramètre COT obtenu par l'analyse de la résine telle quelle (tableau 3). Néanmoins, l'aptitude à l'emploi de la résine n'en est pas compromise, puisque la valeur limite pour le COD, mesurée sur l'éluat du test de lixiviation, est respectée (tableau 2).

En conclusion, pour tous les paramètres les concentrations relevées sont inférieures aux valeurs limites indiquées par la norme française, définie par l'arrêté du 15 mars 2006".

1.2.8.1 Élaboration des données obtenues par analyse d'un échantillon de résine à haute densité, selon la norme française définie par l'arrêté du 15 mars 2006

L'échantillon d'origine, initialement sous forme de cubes compacts d'une densité égale à 240 kg/m³ a été broyé et passé au crible ; les résultats sur le solide tel quel (tableau 3) ont été obtenus par analyse du produit issu d'un criblage à 4 mm. Ce même produit a également fait l'objet d'un test de lixiviation avec un rapport liquide/solide sec de 10 l/kg, selon la norme française NF EN 12457-2 ; l'éluat du test de lixiviation, à sa propre valeur de pH, a fait l'objet des analyses présentées dans le tableau 2.

De plus, l'application de la méthode URETEK Deep Injections® n'endommage pas la végétation présente à proximité des volumes de terrain traité, comme démontré dans l'étude suivante (§ 2.3.8.2).

Tableau 3 : Élaboration des résultats obtenus par analyse de la résine telle quelle.

Paramètre	Unité de mesure	Valeur	Limite définie à l'annexe 2, tableau 2 de l'arrêté du 15/03/2006
COT	mgC/kg matière sèche	686000	30000
BTEX	mg/kg matière sèche	< 2.2	6
HAP (*)	mg/kg matière sèche	< 0.03	50
PCB (**)	mg/kg matière sèche	< 0.01	1
Hydrocarbures (C10 - C40)	mg/kg matière sèche	< 10	500

COT : carbone organique total
 BTEX : benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes
 HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques
 PCB : Byphényls polychlorés
 Hydrocarbures (C10 - C40) : Hydrocarbures dont la chaîne carbonée présente entre 10 et 40 atomes de carbone.

(*) Le paramètre "HAP" identifie une famille de composés pour lesquelles la norme italienne prévoit des limites pour chaque composé et une limite pour leur somme. La norme française ne prévoit pas de limite pour chacun des composés, mais une limite pour la somme. Dans la présente élaboration, ainsi que dans le rapport d'essai n° 075/2009, on a considéré les composés énumérés dans le décret législatif de la République italienne 152/2006, section IV, titre V, annexe 5, tableau 1, et on a calculé la somme des concentrations desdits composés.

(**) Le paramètre "PCB" identifie une famille de composés qui est exprimée normalement comme une somme de congénères ; la norme française prévoit que la famille à analyser contient 7 congénères. Dans la présente élaboration, ainsi que dans le rapport d'essai n° 075/2009, on a considéré 12 congénères.

1.2.8.2 Analyses réalisées en 2003 par le Laboratoire "Hygiene-Institut des Ruhrgebiets" (Institut pour l'hygiène et la médecine de l'environnement) 45879 Gelsenkirchen (Allemagne)

Afin de confirmer l'absence de nocivité des injections à l'aide de la résine URETEK Geoplus® et notamment par rapport à la croissance des plantes en milieu injecté, des analyses ont été réalisées en 2003 par le Laboratoire Hygiene-Institut des Ruhrgebiets de 45879 GELSENKIRCHEN.

Les conclusions sont les suivantes :

"En termes de toxicité pour les plantes, il peut être démontré qu'on ne commence à détecter un ralentissement du développement des plantes qu'à partir de 1000 grammes de résine pour 1 kg de sol, les plus sensibles étant les radis.

Cependant, la valeur IC-50 (Concentration de 50 %) est très largement supérieure au taux de concentration pris en compte par l'EC Guideline 67/548/EWG (Directives de la Communauté



Européenne) pour évaluer la toxicité de l'eau permettant la classification en toxique ou dangereux.

Ainsi, la désignation R54 (toxique pour les plantes) n'est pas applicable (un tel taux de concentration de produit dans le sol n'est jamais pris en compte dans l'appendice VI n°5.22 de EU Guideline 67/548/EEC). En clair, sont réputés dangereux et toxiques les produits qui, à faible taux de concentration dans le sol ont des effets nocifs sur l'eau et les plantes".

Le taux de concentration dans le sol de résine URETEK® suite aux injections ne dépasse pas 1,5 % (5 à 30 kg de résine par m³ de sol traité) soit 30 fois moins que l'IC 50 à partir duquel on commence à détecter un ralentissement de croissance sur les radis.

Enfin, la résine URETEK Geoplus a reçu l'agrément **Excell+** garantissant sa non nocivité en zone sensible.

Les injections URETEK® n'ont donc aucune incidence sur l'environnement.

