



Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE

Thème 3

Comportement environnemental des bétons recyclés : étude de la variabilité et de la dynamique du relargage des bétons recyclés

Auteur :
E. Vernus
L. GONZALES
INSAVALOR

R/15/RECY/028
LC/14/RECY/51
Octobre 2015

Site internet : www.pnrecybeton.fr

Président : Jacques ROUDIER

Directeur : Horacio COLINA

Directeur Scientifique : François DE LARRARD

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr, tél. : 01 44 13 32 79



Projet National de recherche et développement

FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : Comportement environnemental des bétons recyclés : étude de la variabilité et de la dynamique du relargage des bétons recyclés

RAPPORT N° : R/15/RECY/028

DATE D'ETABLISSEMENT : Octobre 2015

AUTEUR(S) : E. Vernus – L. Gonzales

ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : INSAVALOR

THEME DE RATTACHEMENT : 3

LETTRE DE COMMANDE : LC/14/RECY/51

Site internet : www.pnrecybeton.fr

Président : Jacques ROUDIER

Directeur : Horacio COLINA

Directeur Scientifique : François DE LARRARD

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr, tél. : 01 44 13 32 79

Résumé

Ce document vise à porter à la connaissance des partenaires du PN Recybéton d'une part les principaux travaux scientifiques menés sur le thème du relargage de bétons contenant des granulats recyclés au cours des dix dernières années et d'autre part la vérification des différences observables entre le comportement à la lixiviation des éléments potentiellement polluants contenus dans des bétons à base de granulats recyclés par rapport au comportement de bétons à base de granulats naturels.

La caractérisation de l'émission de substances dans l'eau à partir de matériaux de construction relève de l'Exigence Fondamentale n°3 « Hygiène, Santé et Environnement » du Règlement n°305/2011 du 9 Mars 2011 qui s'appuie sur les travaux du CEN TC351 « Produits de construction : Evaluation de l'émission de substances dangereuses » pour développer des méthodes d'évaluation normalisées pour les Etats membres en matière d'émission de substances dangereuses réglementées. L'essai préconisé par le CEN TC351 pour les matériaux monolithiques (TS2) est celui qui a été retenu dans cette étude pour caractériser le comportement des différentes formulations de béton en conditions dynamiques.

Les résultats de variation observée du relargage des matériaux fragmentés permettent de montrer que l'apport de granulats recyclés, dans les conditions du programme RECYBETON, ne se traduit pas par une modification significative du relargage. Ces résultats sont cohérents avec les travaux de recherche recensés sur le comportement à la lixiviation des bétons recyclés.

En conditions dynamiques, seuls le baryum, les chlorures et les sulfates présentent des concentrations détectables dans les éluats. L'évolution de leur relargage dans le temps est caractéristique d'un mécanisme de relargage par diffusion ce qui est cohérent avec la bibliographie.

Toutes les formulations testées au cours de cette étude se sont montrées conformes aux valeurs limites définies dans le projet d'Arrêté de sortie de statut de déchet des granulats issus de déchets du BTP pour un usage routier de type 3 (le plus restrictif). Par conséquent, ces matériaux, en fin de vie, pourraient être valorisés en technique routière quelque soit leur taux d'incorporation de granulats recyclés, dans les conditions de formulation du programme RECYBETON. Ces résultats peuvent permettre de répondre à l'Exigence Fondamentale n°7 a) « La réutilisation ou la recyclabilité des ouvrages de construction, de leurs matériaux et de leurs parties après démolition » en considérant (hors contamination durant leur vie en œuvre) que les bétons incorporant des granulats recyclés présentent des caractéristiques de relargage d'éléments dans l'eau conformes aux conditions acceptables pour un usage en technique routière.

D'après la bibliographie, le paramètre déterminant du relargage de ces matériaux est le pH et des facteurs d'environnement tels que l'exposition à la carbonatation ou encore aux sels de déverglaçage peuvent accroître l'émission de substances dans l'eau. La vérification de l'influence de la carbonatation sur le relargage des bétons recyclés et du béton témoin pourraient donc être une perspective de complément intéressant pour cette étude.

Summary

This report aims firstly to bring to the attention of the partners of PN Recybeton on the main scientific work done about leaching of concrete containing recycled aggregates over the last ten years. Secondly the observable differences between the leaching behaviour of concrete containing recycled aggregates and the behaviour of concrete made of natural aggregates have been studied.

Characterization of emissions of substances in water from construction materials depends on the fundamental requirement n ° 3 "Hygiene, health and environment" of the Regulation n ° 305/2011 March 9, 2011, which relies on the work of the CEN TC351 " Construction products : Evaluation of the emission of hazardous substances " to develop methods of assessment for Member States concerning emissions of regulated dangerous substances. The test advocated by the CEN TC351 for monolithic materials (TS2) has been adopted in this study to characterize the behaviour of the different formulations of concrete in dynamic conditions.

The results of observed variation in the leaching of fragmented materials show that the recycled aggregates, as defined in the RECYBETON program, do not result in a significant change of leaching. These results are consistent with the research publications on recycled concrete leaching behaviour.

In dynamic conditions, only barium, chlorides and sulphates are detected in the eluates. The evolution of their leaching as a function of time is typically that of a diffusion-controlled leaching mechanism which is consistent with the bibliography.

All formulations tested in this study are shown to comply with the limit values set out in the draft decree's on end of waste for aggregates prepared from demolition waste for road use of type 3 (most restrictive). Therefore, at the end of their life, these materials as defined in the PN RECYBETON may be recovered in road construction regardless of the amount of recycled aggregates they contain. These results may meet the fundamental requirement n ° 7A) « re-use or recyclability of the construction works, their materials and their parts after demolition » considering (except the case of contamination during their use) that concrete incorporating recycled aggregates have leaching characteristics acceptable for their reuse in road construction.

According to the bibliography, the decisive parameter of the leaching of these materials is the pH and environmental factors such as their exposure to carbonation or de-icing salt that can increase the emission of substances into the water. The verification of the influence of carbonation on the leaching of recycled/non-recycled concrete could be a prospect of interesting complement for this study.

Sommaire

Introduction	5
Partie bibliographique	
1 Contexte réglementaire et normatif.....	7
1.1 Le Règlement Produits de Construction	7
1.2 Substances concernées	8
1.3 Contexte normatif : le CEN/TC351	9
1.3.1 Le mandat M/366.....	9
1.3.2 Nature des produits concernés	10
1.3.3 Nature des essais proposés	10
1.4 Perspectives d'évolution réglementaire	13
2 Revue bibliographique WASCON 2012	15
3 Comportement à la lixiviation comparé entre béton et béton recyclé	15
3.1 Caractérisation du comportement à la lixiviation en fonction du pH.....	16
3.2 Caractérisation du comportement à la lixiviation à moyen terme (essai sur monolithe)	17
3.3 Caractérisation du comportement à la lixiviation à l'échelle pilote	18
4 Critères de sortie de statut de déchet	20
Références bibliographiques.....	24
Partie expérimentale	
1 Objectifs des travaux	29
2 Déroulement des travaux.....	29
3 Variabilité du relargage.....	30
3.1 Mode opératoire	30
3.2 Résultats et interprétation.....	30
3.3 Rapprochement des résultats expérimentaux avec la bibliographie	33
4 Caractérisation de la dynamique de relargage.....	34
4.1 Mode opératoire	34
4.2 Résultats et interprétation.....	35
Cas du baryum	37
Cas des chlorures.....	37
Cas des sulfates.....	38
4.3 Rapprochement des résultats expérimentaux avec la bibliographie	38
5 Caractérisation des matériaux au regard de leur gestion en fin de vie	39
Conclusion.....	41

Annexes

Annexe 1- Fiches techniques d'élaboration des matériaux testés (IFSTTAR)	42
Annexe 2- Rappel des objectifs généraux des essais de lixiviation.....	46
Annexe 3- Résultats des essais de lixiviation EN 12457-2 sur les éprouvettes de béton	50
Annexe 4- Résultats des essais de lixiviation sur monolithe sur les éprouvettes de béton	51
Eprouvette témoin N°1410	51
Eprouvette d'essai N°1416 – 30% Gravillons recyclés.....	53
Eprouvette d'essai N°1422 – 100% Granulats recyclés	55

Table des figures

FIGURE 1 - RESULTATS DE CARACTERISATION DU PH, DE LA CONDUCTIVITE, DU POTENTIEL D'OXYDO-REDUCTION ET DE LA FRACTION SOLUBLE DES 3 EPROUVETTES DE CHAQUE FORMULATION DE BETON.....	31
FIGURE 2 - RESULTATS DE CARACTERISATION DE LA FRACTION LIXIVIABLE EN CR, CrVI, BA, CU, MO, PB, CHLORURES ET SULFATES DES 3 EPROUVETTES DE CHAQUE FORMULATION DE BETON	32
FIGURE 3 - RESULTATS DE CARACTERISATION DU PH, DE LA CONDUCTIVITE, DU POTENTIEL D'OXYDO-REDUCTION DES 3 FORMULATIONS DE BETON AU COURS DE L'ESSAI DE LIXIVIATION SUR MONOLITHE	35
FIGURE 4 - RESULTATS DE CARACTERISATION DE LA COMPOSITION EN BARYUM, CHLORURES ET SULFATES DES ELUATS DE MONOLITHES EN FONCTION DU TEMPS POUR LES TROIS FORMULATIONS DE BETON TESTEES	36

Table des tableaux

TABLEAU 1 - EXEMPLES D'ESSAIS DE LIXIVIATION SPECIFIQUES AUX MATERIAUX DE CONSTRUCTION	9
TABLEAU 2 – PERIODICITE DE RENOUELEMENT DE L'ELUAT DU TEST DE LIXIVIATION DYNAMIQUE.....	34
TABLEAU 3 - COMPARAISON DES FRACTIONS LIXIVIALES DE L'ENSEMBLE DES MATERIAUX TESTES AVEC LES VALEURS DE REFERENCE POUR LA VALORISATION EN TECHNIQUE ROUTIERE	39

Introduction

Ce document vise à porter à la connaissance des partenaires du PN Recybéton d'une part les principaux travaux scientifiques menés sur le thème du relargage de bétons contenant des granulats recyclés au cours des dix dernières années et d'autre part la vérification des différences observables entre le comportement à la lixiviation des éléments potentiellement polluants contenus dans des béton à base de granulats recyclés par rapport au comportement de bétons à base de granulats naturels.

Ce rapport est donc constitué en deux parties distinctes.

La première partie, bibliographique, présente en préambule, de manière synthétique, la réglementation et la normalisation européennes dans le cadre de l'évaluation de l'émission de substances dangereuses dans l'eau à partir de produits de construction.

En première approche, une synthèse de la revue bibliographique menée dans le cadre du congrès WASCON 2012 sur l'utilisation de matériaux alternatifs en construction est présentée.

Les plus récents articles scientifiques présentant les caractéristiques environnementales comparées des bétons contenant des granulats recyclés avec celles des bétons contenant uniquement des granulats naturels sont ensuite étudiés.

Les éléments de caractérisation du comportement à la lixiviation des bétons recyclés sont examinés au travers d'articles dont l'objectif consiste à produire une modélisation de ce comportement.

Des travaux menés récemment au moyen d'ouvrages expérimentaux à base de granulats de béton recyclé sont également commentés.

Enfin, le dernier chapitre de cette première partie de rapport présente l'état des procédures en cours en vue de la sortie de statut de déchet des granulats élaborés à partir de déchets du bâtiment et des travaux publics pour un usage routier.

La seconde partie du rapport présente l'objectif des travaux expérimentaux réalisés sur les différentes formulations de bétons, le déroulement des travaux, les protocoles et résultats des essais visant à estimer, en première approche la variabilité de la fraction lixiviable des formulations de béton, leur rapprochement avec les connaissances disponibles dans la bibliographie et enfin la caractérisation du relargage des matériaux sous leur forme monolithique en conditions dynamiques.

Partie bibliographique

1 Contexte réglementaire et normatif

1.1 *Le Règlement Produits de Construction*

La réglementation concernant l'émission dans l'eau de substances dangereuses par des produits de construction relève notamment du [Règlement « Produits de Construction »](#) (CEE, 2011) mais également d'autres textes législatifs comme par exemple les directives « Eaux », qui précisent les conditions à respecter pour les différents types d'eaux de surface ou souterraines (CEE, 1975) (CEE, 1998) (CEE, 2000) ou des textes spécifiques aux différents types de produits comme la directive « Biocides » (CEE, 1998), qui s'applique à tous les produits (e.g. bois traités, membranes bitumineuses traitées avec des biocides etc.) susceptibles d'émettre des biocides - pesticides à usage non agricole (e.g. anhydride borique, tétraborate de disodium, acide borique, phosphore d'aluminium, tébuconazole, propiconazole etc.).

Le **Règlement « Produits de Construction » (RPC)** vise à harmoniser les réglementations des états membres afin de faciliter la libre circulation des produits de construction à l'intérieur de l'Union Européenne. Le RPC prévoit le **marquage CE** réglementaire des produits de construction qui atteste que les ouvrages dans lesquels ces produits sont incorporés satisfont les **sept exigences fondamentales (EF) du RPC** :

1. Résistance mécanique et stabilité,
2. Sécurité en cas d'incendie,
3. Hygiène, santé et environnement,
4. Sécurité d'utilisation et accessibilité,
5. Protection contre le bruit,
6. Economie d'énergie et isolation thermique,
7. Utilisation durable des ressources naturelles.

Ces exigences essentielles ne s'adressent pas directement aux produits faisant l'objet du règlement, mais s'appliquent aux ouvrages dont ces produits font partie.

Ainsi, l'**EF n° 3 "Hygiène, Santé et Environnement"** prévoit que "les ouvrages de construction doivent être conçus et construits de manière à ne pas constituer, tout au long de leur cycle de vie, une menace pour l'hygiène ou la santé et la sécurité des travailleurs, des occupants ou des voisins et à ne pas avoir d'impact excessif sur la qualité de l'environnement, ni sur le climat tout au long de leur cycle de vie, que ce soit au cours de leur construction, de leur usage ou de leur démolition, du fait notamment :

- a) d'un dégagement de gaz toxiques ;
- b) de l'émission, à l'intérieur ou à l'extérieur, de substances dangereuses, de composés organiques volatiles (COV), de gaz à effet de serres ou de particules dangereuses ;
- c) de l'émission de radiations dangereuses ;
- d) du rejet de substances dangereuses dans les eaux souterraines, dans les eaux marines, les eaux de surface ou dans le sol ;
- e) du rejet de substances dangereuses dans l'eau potable ou de substances ayant un impact négatif sur l'eau potable ;

- f) d'une mauvaise évacuation des eaux usées, de l'émission de gaz de combustion ou d'une mauvaise élimination de déchets solides ou liquides ;
- g) de l'humidité dans des parties de l'ouvrage de construction ou sur les surfaces intérieures de l'ouvrage de construction. »

L'EF n°7 « Utilisation durable des ressources naturelles » précise que « les ouvrages doivent être conçus, construits et démolis de manière à assurer une utilisation durable des ressources naturelles et, en particulier, à permettre :

- a) La réutilisation ou la recyclabilité des ouvrages de construction, de leurs matériaux et de leurs parties après démolition ;
- b) La durabilité des ouvrages de construction ;
- c) L'utilisation, dans les ouvrages de construction, de matières premières primaires et secondaires respectueuses de l'environnement ».

Pour donner une forme concrète aux EF, la Commission Européenne a adopté en 1993 des textes de référence, appelés "**Documents interprétatifs**" spécifiques à chaque EF (documents téléchargeables depuis le site internet du RPC <http://www.rpcnet.fr/>). Dans le document interprétatif concernant l'EF n° 3 "**Hygiène, Santé et Environnement**", on trouve des indications de base pour la vérification de la conformité à cette condition essentielle. Il prévoit que l'impact sur l'environnement doit être considéré dans chaque phase du cycle de vie du produit mais ce document interprétatif s'applique seulement à **la phase vie en œuvre**. Les exigences pour la prévention ou la limitation de l'impact de l'ouvrage sur l'environnement (l'air, le sol et l'eau) peuvent être exprimées, selon ce document, par des **méthodes de mesure** (ou méthodes de calcul, le cas échéant) **de la lixiviation, de la dispersion ou des émissions des polluants** ainsi que par une conception appropriée de l'ouvrage. Pour divers produits de construction, les caractéristiques qu'il faut prendre en compte sont présentées. Par exemple, pour des produits utilisés « *en fondations, piles, murs externes, planchers externes, toits, matériaux granulaires* » il faut considérer les caractéristiques suivantes :

- « dégagement des polluants dans l'air extérieur, les sols et l'eau, compte tenu, le cas échéant, de la concentration de polluants dans le produit ;
- facteur de réduction des émissions obtenu par étanchement ».

1.2 Substances concernées

L'ensemble des substances dangereuses dites « réglementées » c'est à dire faisant l'objet d'une réglementation dans au moins un état membre est concerné par ce règlement. Une base de données rassemblant l'ensemble de ces substances a été établie par le groupe d'experts « Substances dangereuses » (EGDS) de la Commission Européenne. Ce document référencé DS 041 liste les substances dangereuses pour l'air, l'eau et le sol susceptibles d'être associées avec des produits de construction. Ce document est rendu public par la Commission européenne sous le lien : <http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/cp-ds/>

1.3 Contexte normatif : le CEN/TC351

Les textes législatifs définissent des exigences à respecter mais ne fournissent pas les moyens à utiliser par les fabricants pour apporter la preuve que leurs produits satisfont ces exigences. C'est la normalisation qui vient en aide à ce propos. Ainsi, pour répondre aux EF du RPC, un nombre significatif de **normes européennes harmonisées** ont été adoptées et plusieurs sont en préparation. Cependant, le respect de l'EF n° 3, notamment relatif aux émissions des substances dans l'eau, n'est soutenu que par très peu de normes spécifiques (voir *Tableau 1*).

Tableau 1 - Exemples d'essais de lixiviation spécifiques aux matériaux de construction

Essai	Domaine d'application	Conditions opératoires	Résultats
NF EN 1744-3 2002	Granulats	Echantillon : granulaire $\phi < 32$ mm Lixiviant : eau déminéralisée Durée : 24 heures L/S = 10L/kg ; Agitation : oui	pH, conductivité, concentration en inorganiques et organiques
XP P 41-250-1 2001	Matériaux organiques en contact avec l'eau destinée à la consommation humaine	Echantillon : monolithique préconditionné par rinçage dynamique pendant (60±5) min suivi par un contact de 24 heures avec de l'eau de minéralisation moyenne. Lixiviant : eau chlorée ou non chlorée Durée : une ou périodes successives de 24h. L/A en fonction du produit ; Agitation : non	odeur, flaveur, conductivité, pH, carbone organique total et consommation en chlore
XP P 41-260-1 2001	Matériaux à base de ciment en contact avec l'eau destinée à la consommation humaine	Echantillon : monolithique préconditionné par contacts successifs de 3 fois (24±1)h, 1 fois (72±1) h puis 1 fois (24±1) h avec de l'eau de minéralisation moyenne Lixiviant : eau chlorée ou non chlorée Durée : une ou périodes successives de 24h. L/A en fonction du produit ; Agitation : non	odeur, flaveur, conductivité, pH, aluminium, calcium, TAC, carbone organique total et consommation en chlore
NEN 7375 2004	Matériaux de construction et déchets à l'état monolithique	Echantillon : monolithique $\phi > 40$ mm ou $A > 75$ cm ² Lixiviant : eau déminéralisée, renouvellement séquentiel (0,25 ; 1 ; 2,25 ; 4 ; 9 ; 16 ; 36 ; 64 jours) Durée : 64 jours L/V : $2V < L < 5V$ ou $50A_0 < L < 200A_0$; Agitation : non	pH, conductivité, concentration en inorganiques et COD
CEN/TC351 TS2 2009	Matériaux de construction à l'état monolithique	Echantillon : monolithique, plaque ou feuille de dimension minimale 40mm ayant une face d'au moins 75cm ² (monolithe) ou 100cm ² (plaque ou feuille) Lixiviant : eau déminéralisée, renouvellement séquentiel (0,08 ; 1 ; 2,25 ; 8 ; 15 ; 28 ; 36 jours) Durée : 36 jours L/A : 8 ml/cm ² ; Agitation : non	pH, conductivité, concentration en inorganiques et COD

L = volume de lixiviant ; V = volume de l'échantillon ; A = surface de l'échantillon en contact avec le lixiviant ; A₀ = surface de l'échantillon non couverte par le lixiviant ; S = masse de l'échantillon à l'état sec ; ϕ = diamètre des particules

1.3.1 Le mandat M/366

En 2005, la Commission Européenne a initié un travail, concrétisé par le **mandat M/366** adressé au CEN et par la création d'un nouveau comité technique (**CEN TC 351 Produits de construction : Evaluation de l'émission de substances dangereuses**), visant à intégrer la problématique des « *émissions de substances dangereuses par les produits de construction...*, qui peuvent avoir une incidence néfaste sur la santé humaine et l'environnement ».

Le mandat **réclame la préparation des normes** qui vont permettre « l'évaluation de la performance en matière d'émission de substances dangereuses réglementées dans l'air intérieur, le sol, les eaux souterraines et les eaux de surface par les produits de construction, dans des conditions d'utilisation normales. Les méthodes de mesure/d'essai faisant l'objet de mandats auront, autant que possible, un caractère **horizontal**, c'est-à-dire applicables à une ou plusieurs familles concernées de produits de construction ». Une famille de produits de construction est définie comme étant l'ensemble des produits destinés à remplir les mêmes fonctions, une fois mis en œuvre.

D'après le mandat M/366 du CEN, l'objectif des travaux du TC351 consiste à développer des méthodes d'évaluation normalisées selon une approche horizontale en vue d'harmoniser les différentes approches des Etats membres en matière d'émission de substances dangereuses réglementées dans le cadre du Règlement 305/2011 sur les produits de construction.

La prise en compte des conditions d'utilisation projetées pour ces produits dans l'élaboration de ces méthodes est un des principaux impératifs imposés au Comité Technique (TC).

Les méthodes d'évaluation qui font l'objet des travaux du TC351 portent sur les émissions dans l'air intérieur, le sol, les eaux de surface et les eaux souterraines.

La caractérisation des émissions dans l'eau, via notamment des essais de lixiviation vise à permettre :

- D'anticiper et se préparer aux évolutions réglementaires :
 - disposer des informations qui accompagneront le marquage CE des produits,
 - constituer un éventuel dossier de demande de classement de ses produits sur une liste « WT – Without Testing » / « Sans essais » ou liste « WFT – Without Further Testing » / « Sans Essais complémentaires » en vue de marquage CE.
- Compléter les évaluations environnementales, notamment basés sur l'analyse de cycle de vie et peuvent être intégrés dans la Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES),

Elle peut également être utilisée pour une étude approfondie afin de répondre à certaines attentes des utilisateurs (par exemple fournir des informations sur la qualité des eaux de ruissellement après passage sur le produit).

il n'a pas encore été acté la façon dont les producteurs devront déclarer le niveau d'émission de SDR : classes, valeur déclarée.... Il n'est pas non plus établi si le mode de déclaration incombera au comité technique du CEN en charge de la norme produit considérée ou à la commission européenne...

1.3.2 Nature des produits concernés

L'ensemble des produits de construction faisant l'objet de normes harmonisées est concerné par ces travaux de normalisation. L'ensemble des producteurs de produits de construction est également concerné (même si leurs produits ne font pas l'objet de normes harmonisées) car les appels d'offres font de plus en plus références à ces normes harmonisées. Néanmoins, seuls les produits susceptibles d'émettre des substances dans les sols et les eaux souterraines au cours de leur utilisation prévue sont concernés par les travaux sur l'émission de substances dangereuses dans les eaux et les sols.

1.3.3 Nature des essais proposés

En terme de procédures de lixiviation, les 3 principaux documents travaillés dans le cadre de « groupe d'expert EGDS » et discutés ensuite en comité AFNOR « SDR » (Substances Dangereuses Réglementées, groupe miroir national) et au WG1 de la commission CEN TC351 ont été :

1.3.3.1 – CEN TS 16637-1 : document guide

Il s'agit d'un guide destiné aux Comités Techniques spécifiques de chaque produit de construction (« TC produits ») censé permettre l'orientation vers le choix du bon essai de lixiviation adapté au produit et à son usage en œuvre (à l'exception du transport de l'eau potable et des eaux usées).

Les « TC produits » seront tenus d'appliquer les normes des essais développés au sein du TC 351 pour leurs produits faisant l'objet d'une norme harmonisée, afin de quantifier l'émission de substances réglementées dans le sol, les eaux de surface et les eaux souterraines. Le CEN TS 16637-1 est destiné à fonctionner comme un guide, qui doit théoriquement permettre de choisir entre les différentes options prévues. Le CEN TS 16637-1 a pour objectif de fournir les informations nécessaires à un TC concernant la ou les méthode(s) d'essai pertinente(s) permettant au producteur de disposer des données nécessaires au marquage CE. La modélisation en matière d'évaluation de l'impact environnemental de ces émissions ne fait pas partie de ce processus. L'objectif ultime pour les producteurs est la possibilité d'associer chacun de leurs produits à une classe de relargage conformément aux exigences légales du ou des Etats membres dans lesquels ils souhaitent commercialiser leurs produits. Les réglementations nationales existantes sont rassemblées dans une base de données européenne : "CP-DS" (construction products – dangerous substances) consultable sur le site internet :

<http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/cp-ds/>

1.3.3.2 – CEN TS 16637-2 : essai de lixiviation surfacique

Il s'agit d'un essai de lixiviation dynamique pour la détermination du relargage de substances dépendant de la surface des matériaux de type monolithique, sous forme de plaques ou de feuille.

Cet essai a pour objectif de déterminer les conditions d'émission de substances minérales (non volatiles) en fonction du temps à partir de matériaux monolithiques, de plaques ou de feuilles lorsqu'ils sont mis en contact avec une solution aqueuse. Il n'a pas pour objectif de simuler une situation réelle. Il n'est pas suffisant, à lui seul, pour caractériser le comportement à la lixiviation d'un matériau de construction en conditions spécifiées. En revanche, il permet d'identifier le type de mécanisme qui régit l'émission des différentes substances parmi les principaux mécanismes connus : le lessivage de surface, la dissolution contrôlée par la limite de solubilité, la diffusion par les pores et la surface, la dissolution de la matrice. Il permet également d'évaluer l'acceptabilité environnementale du relargage surfacique par rapport à des valeurs limites qui restent à définir en France.

Le principe du test consiste à placer une quantité de matériau de surface connue en présence d'un volume d'eau déminéralisée (d'autres lixiviants sont aussi envisageables) proportionnel (selon un facteur de 8 ml/cm²) à la surface de matériau exposé, pendant une durée d'exposition progressive en fonction de l'avancement de l'essai de sorte que le relargage ne puisse pas être limité par la saturation de la solution. Entre chaque durée d'exposition, l'éluat est extrait en totalité pour analyse et remplacé par le même volume de solution fraîchement préparée. Le test prévoit la production de 7 éluats successifs sur une durée totale d'essai de 36 jours.

Le test concerne des fractions de matériau pour essai de taille régulière et de dimension minimale de 40 mm dans toutes les directions ou des produits sous forme de plaque ou de feuille ayant une surface minimale exposée de 100 cm². Cette méthode d'essai ne concerne pas les métaux, revêtements métalliques et revêtement organiques.

En annexe de cette méthode d'essai est présentée une autre méthode, directement issue du test hollandais connu sous l'appellation CGLT (Compacted Granular Leach Test) dans la normalisation « Déchets » applicable pour les produits de construction constitués de particules de très faible porosité dont la conductivité hydraulique est trop faible pour permettre la réalisation d'un essai de percolation (TS3). Le produit est porté au taux d'humidité correspondant à son taux de saturation après compactage, puis placé dans un récipient cylindrique, compacté et mis en contact avec l'éluant à sa surface. L'éluat est renouvelé périodiquement selon un programme qui n'est pas spécifié en annexe du document CEN TS 16637-2 mais qui pourrait reprendre le programme défini pour l'essai sur monolithe.

A ce jour, la méthode TS-2 n'a fait l'objet que d'une campagne de robustesse afin de la publier en « technical specification ». Pour pouvoir la passer en norme EN et donc la valider, il reste à réaliser des essais d'inter comparaisons entre différents laboratoires européens (phase de validation).

1.3.3.3 – prCEN TS-3 : essai de percolation

Il s'agit d'un essai de percolation pour les produits de construction au travers desquels l'eau percole dans les conditions d'exposition de leur vie en œuvre.

Cet essai a pour objectif de déterminer les conditions d'émission de substances minérales (non volatiles) dans l'eau de matériaux percolants lorsqu'ils sont mis en contact avec une solution aqueuse dans des conditions standardisées. Il n'a pas pour objectif de simuler une situation réelle. Il n'est pas suffisant, à lui seul, pour caractériser le comportement à la lixiviation d'un matériau de construction en conditions spécifiées. En revanche, il permet d'identifier le type de mécanisme qui régit l'émission des différentes substances parmi les principaux mécanismes connus : essentiellement l'entraînement par lessivage (wash-out) et le relargage sous l'influence d'interactions avec la matrice, en conditions approchant l'équilibre local entre le matériau de construction et la solution de percolation. Il permet également d'évaluer l'acceptabilité environnementale du relargage par percolation par rapport à des valeurs limites qui restent à définir en France.

Le principe du protocole d'essai est basé sur l'essai de percolation à flux ascendant en colonne déjà existant au niveau européen pour les déchets sous la référence EN TS14405. Les principales étapes de l'essai consistent en une mise en place du matériau dans la colonne selon un mode de compactage spécifié, une saturation de la colonne de matériau par l'eau déminéralisée alimentant la colonne selon un courant ascendant, une période d'équilibrage du système par le maintien de l'ensemble du dispositif au repos durant 2 jours, la mise en circulation de la solution de lixiviation et la collecte les éluats successifs pour analyse.

1.4 Perspectives d'évolution réglementaire

Les produits de construction doivent répondre aux exigences réglementaires en se basant sur les documents normatifs et le respect de ces exigences est assuré par la conformité aux textes réglementaires définissant les seuils à respecter.

A l'heure actuelle en France, il n'y a pas de texte législatif imposant des seuils pour les émissions dans l'eau des produits de construction.

Au niveau européen, les réglementations applicables dans les États membres en ce qui concerne les substances dangereuses réglementées sont collectées sur la base suivante : http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/cp-ds/index_en.htm. Seuls deux pays disposent d'une réglementation spécifique concernant l'émission de substances dans l'eau pour des produits de construction : il s'agit de l'Allemagne (DIBt Guidelines « Assessment of the effects of construction products on soil and groundwater », 2000) et des Pays Bas avec le Soil Quality Decree (2007) qui a remplacé le Building Materials Decree (1999).

En ce qui concerne les matériaux en contact avec les eaux potables, en France, la mise sur le marché de ces matériaux et leur utilisation sont encadrés par les articles R 1321-48 et -49 du code de la santé publique. Les preuves de conformité sanitaire des matériaux et objets utilisés dans les installations fixes de production, de traitement et de distribution d'eau destinée à la consommation humaine, exigées par la réglementation, dépendent :

- de la nature des matériaux (matériaux organiques, matériaux à base de liants hydrauliques, matériaux métalliques, *etc.*) et
- de leurs usages (canalisations, réservoirs, joints et raccords, accessoires, *etc.*).

L'évaluation de la conformité sanitaire est basée sur des règles de composition ou de conformité de la formulation vis-à-vis de listes positives de référence, la réalisation d'essais de migration et le respect de critères d'acceptabilité définis dans la réglementation.

Au niveau européen, bien que la réglementation relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine d'une part et aux produits de construction d'autre part définissent des exigences relatives à l'innocuité sanitaire des matériaux en contact avec les eaux destinées à la consommation humaine, elles ne sont pas suffisamment précises pour permettre un dispositif réglementaire européen harmonisé. Des travaux de coopération entre la France, l'Allemagne, le Royaume-Uni et les Pays-Bas sont en cours dans ce domaine (travaux dits des 4 MS-Member States), l'objectif étant, à terme, d'adopter des pratiques communes ou directement comparables.

2 Revue bibliographique WASCON 2012

Après plus de 20 ans de conférences WASCON (Waste in construction) organisées tous les trois ans depuis 1991 par l'ISCOWA (International Society for Construction with Alternative materials), une revue des travaux présentés lors de ces conférences a été préparée par Vandecasteele & al. Lors du congrès WASCON 2012 qui s'est tenu à Göteborg. La base de données LeachXS™ sur le relargage de substances à partir de produits de construction incorporant des matériaux alternatifs a été présentée à cette occasion par Van der sloot & al. (Van der Sloot H., 2012).

Ces conférences ont permis et encouragé de nombreux échanges d'information dans le monde entier autour de l'évaluation environnementale de l'utilisation de ressources alternatives en construction, principalement au travers de l'évaluation du comportement à la lixiviation.

Les auteurs de cette revue annoncent que trois ressources alternatives ont particulièrement focalisé l'attention lors de ces conférences. Il s'agit des cendres volantes de charbon, des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères et des déchets de construction et de démolition.

La base de données intégrée dans le modèle LeachXS™ Lite rassemble les informations collectées notamment sur la base de travaux présentés à WASCON au cours des dix dernières années. Parmi ces données, il en a été recensé 146 portant sur le relargage de béton recyclé en fonction du ratio Liquide / Solide et 109 portant sur le relargage de béton recyclé en fonction du pH. Cette base de donnée est téléchargeable sous le lien : <http://www.vanderbilt.edu/leaching/leach-xs-lite/>

3 Comportement à la lixiviation comparé entre béton et béton recyclé

Des études portant sur la caractérisation du comportement à la lixiviation des granulats recyclés et des formulations de bétons utilisant ces granulats ont été réalisés au cours de ces dernières années. Parmi ces études se trouvent ceux de Galvin et al., 2014, 2013, 2012 ; Engelsen et al., 2012, 2010, 2009, Mulugeta et al, 2011 ; Marion et al., 2005 ; Sani et al. 2005 ; Van der Sloot et al., 2002 , 2001, 2000 .

Ces études visent à mieux comprendre l'effet de l'incorporation de granulats recyclés dans le béton, notamment sur l'augmentation de la quantité d'éléments polluants et en conséquence le risque de relargage des métaux lourds (Cr, Pb, As, Cu, Mo, Sb, Ni, Zn), des sulfates et des chlorures.

Afin de caractériser le comportement de ces éléments, les études expérimentales ont choisi des essais de lixiviation en prenant en compte différents paramètres tels que l'influence du pH, le ratio L/S, les concentrations d'équilibre, le temps de contact, etc. Pour interpréter les résultats, les auteurs se sont appuyés sur des outils de modélisation géochimique. Cette modélisation permet de prédire les réactions intervenant dans la lixiviation des éléments qui dépendent de leur spéciation en solution et dans la phase solide.

3.1 Caractérisation du comportement à la lixiviation en fonction du pH

Chen et al., 2013, Galvin et al., 2012, 2013 et Engelsen et al, 2010, 2009, ont effectué des études approfondies sur la dépendance du comportement au pH des éléments polluants contenus dans les granulats de béton recyclé et des formulations du béton classique.

Les différents tests utilisés dans ces études pour caractériser l'influence du pH sur la lixiviation de ces matériaux sont le test UNE-EN 12457-3, le Dutch leaching test NEN 7341 et le test CEN / TS 14429.

Parmi les éléments analysés se trouvent ceux spécifiés par la directive européenne d'enfouissement (Council Decision 2003/33/EC), y compris des éléments formant des cations (Cd, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, Hg) et ceux qui forment des oxyanions (As, Cr, Mo, Sb, Se et V) en solution.

L'étude de **Engelsen et al., 2009, 2010** qui cherchait à comparer le comportement des granulats de béton recyclés avec des formulations de béton classiques a montré que les quantités de métaux relargués sont faibles à pH élevé dans les deux types de matériaux en raison des interactions avec les phases hydratées (C-S-H). Pour tous les éléments qui forment des oxyanions, les minima et maxima de solubilité ont été trouvés respectivement à pH 4-6 et au pH 8-11. A des valeurs de pH très basiques (> 12) ces oxyanions peuvent être intégrés dans la structure de phases hydratées mais aussi dans d'autres phases telles que l'ettringite, hydrocalumite, monophases (AFm) limitant ainsi la lixiviation (Chrysochoou and Dermatas, 2007).

Pour les éléments formant des cations (Cd, Cu, Pb et Zn) une réduction de la lixiviation est observée dans la plage de pH 7-10, tandis qu'en dessous de pH 7 le relargage augmente.

A partir de ces données, la modélisation du comportement à la lixiviation en fonction du pH, par Engelsen et son équipe, a permis d'identifier les principaux mécanismes de rétention/mobilisation. Le logiciel de gestion de données et de modélisation LeachXSTM a été utilisé pour ce propos. Les données peuvent être comparées avec les critères réglementaires européens ou à des données de lixiviation d'autres matériaux inclus dans cette base de données. En outre, le système a intégré le code géochimique de spéciation et de modélisation de transport ORCHESTRA avec lequel la saturation minérale, la spéciation de la solution et les phénomènes de sorption peuvent être caractérisés sur la base de modèles d'équilibre et de données thermodynamiques. Les concentrations à l'équilibre des espèces mesurées dans le lixiviat lors du test CEN / TS 14429 ont été utilisées comme données d'entrée dans le modèle.

Les résultats montrent qu'aucune différence sur la caractérisation du comportement à la lixiviation du béton classique et du béton recyclé n'a été retrouvée.

Pour les cations métalliques étudiés, le modèle a montré que la formation des hydroxydes et les interactions avec les phases cimentaires hydratées dans la plage de pH 9 –11.5 sont à la base des processus de rétention de ces éléments. Entre pH 7-9, l'adsorption sur les oxy-hydroxydes de Fe (HFO) et d'Alumine amorphes (AAM) peut aussi limiter la lixiviation du Cu, Cr, Pb et Sb. Dans la gamme de pH acide, les concentrations prédites et mesurées approchent toutes deux la fraction maximale disponible.

Pour les éléments qui forment des oxyanions, la modélisation montre que les interactions avec les phases de type sulfates-aluminates contrôlent la lixiviation. Pour le Cr et le Mo, l'ettringite est la phase qui contrôle la lixiviation de ces éléments à pH \sim 11.5. Dans la région de pH 5-10, l'adsorption sur les oxy-hydroxydes de Fe (HFO) et d'Alumine amorphes (AAM) limite la lixiviation.

L'étude de **Galvin et al., 2012 et 2013** cherchait à caractériser le comportement des différents types de échantillons issu de déchets de béton concassé. Les résultats de lixiviation des éléments ont été comparés avec les seuils imposés par la directive européenne sur la mise en décharge malgré des conditions d'essai différentes. A partir de cette comparaison, les études ont déduit que les matériaux testés par la procédure européenne (EN 12457-3) peuvent être classés comme inertes. Cependant, le test Néerlandais «Availability Test» (NEN 7341) classerait ces matériaux comme déchets non dangereux.

Les éléments le plus critiques du point de vue environnemental ont été identifiés et classés dans deux groupes : le premier groupe se compose des éléments dont leur lixiviation était très proche des limites réglementaires (Ni, Cr et Sb, Zn et Cu). Le deuxième groupe comprend les éléments considérés comme ceux qui représentent le moins de risque pour l'environnement en raison de leur faible lixiviation (Mo, Se, As, Ba, Hg, Pb et Cd).

Pour la plupart des cations métalliques analysés, le relargage le plus important a été obtenu à des valeurs de pH en dessous de 7, en accord avec ce qui a été déjà observé par Engelsen et al., 2010. Les concentrations d'As, Cd, Pb, Cu, et Zn lixiviées ont montré une forte dépendance au pH des éluats.

3.2 Caractérisation du comportement à la lixiviation à moyen terme (essai sur monolithe)

En plus de l'évaluation du comportement en fonction du pH, d'autres études se sont intéressées à l'évaluation du comportement à long terme des bétons formulés avec de granulats recyclés.

Galvin et al., 2014 ont mené une étude sur des échantillons de béton fabriqués avec différents pourcentages de remplacement de gravier naturel par de granulats de béton recyclés. Pour caractériser le comportement à la lixiviation deux tests ont été utilisés : le test de disponibilité (NEN 7341) qui permet d'identifier la fraction des granulats potentiellement disponibles à la lixiviation et le « diffusion test» (NEN 7345) qui permet de mesurer les éléments qui sont relargués par diffusion, principal mécanisme de relargage dans les matériaux monolithiques.

Les résultats du test de disponibilité « Availability Test » confirment ceux décrits précédemment (cf.3.1) : la lixiviation du Zn, du Cu, du Ni, du Pb et du Cd augmente quand le pH baisse (7-4) avec une lixiviation plus importante à pH 4. Un comportement inverse est observé pour les éléments formant des oxyanions tels qu'As, Cr, Mo, Se et Sb. Ces éléments montrent une augmentation de lixiviation à des valeurs de pH neutre et basiques.

La comparaison des résultats du test de disponibilité entre les granulats naturels et recyclés, conclut que le relargage des éléments les plus concernés par la réglementation est plus important dans les matériaux recyclés.

En ce qui concerne les résultats de l'essai de diffusion (« tank test » NEN 7375 sur matériau monolithique qui a inspiré le protocole CEN TS 16637-2), ils montrent que le comportement des cations métalliques et des oxyanions est indépendante du type de béton ou du pourcentage de remplacement de granulats naturels. Les principaux mécanismes de relargage identifiés sont la diffusion pour les oxyanions, à l'exception du Cr et du Mo pour qui, comme pour le Zn et Cu (espèces les plus mobiles), le mécanisme prépondérant est l'épuisement. Les courbes de diffusion sont similaires quel que soit le type de béton et le pourcentage de remplacement.

En effet, **le pourcentage de remplacement ne montre pas une influence directe sur la lixiviation des éléments**. Les auteurs ont montré qu'un béton sans remplacement (0%) présentait les valeurs de relargage les plus basses pour tous les éléments. Cependant, le béton préparé avec 100% de remplacement ne montrait pas les valeurs maximales de relargage. **Les différences dans le relargage étaient directement liées aux variations du pH des formulations**.

3.3 Caractérisation du comportement à la lixiviation à l'échelle pilote

A l'heure actuelle, peu d'études à échelle pilote sur l'utilisation de béton recyclé dans des ouvrages du BTP sont citées dans la littérature. Les principales études sur le suivi de l'évolution des ouvrages pilotes avec apport de granulats recyclés sont celles de Chen et al., 2012 ; Engelsen et al., 2012 et Mulugeta et al., 2011 et concernent leur utilisation dans des couches de base ou de fondation. Ces travaux sont présentés ici comme complément d'information étant entendu que ce type d'usage n'entre pas dans le champ d'application du PN Recybéton : ces études portent sur des granulats issus de béton recyclés et utilisés sous forme non liée, ainsi les conditions de pH au contact de ces granulats sont très différentes de celles des bétons contenant des granulats recyclés. Ces travaux ne sont donc pas extrapolables pour le PN Recybéton.

Dans l'étude menée par **Chen et al., 2012**, des sections de chaussée ont été construites et des lysimètres ont été placés sous la couche de base pour étudier les lixiviats de percolation et mesurer les éléments relargués. Trois cellules expérimentales ont été installées et pavées : une cellule avec 100% de remplacement par des granulats recyclés, une deuxième avec 50% de granulats naturels et 50% de granulats recyclés et une dernière cellule qui contenait 100% de granulats naturels.

Après sept mois de suivi, le pH des trois cellules varie entre 6.5 et 8.4. Ces valeurs de pH sont expliquées par la carbonatation du matériau. L'eau de percolation peut apporter du dioxyde de carbone dissous qui aide à neutraliser le milieu alcalin de la couche de base, et l'écoulement préférentiel pourrait aussi permettre, en cas de fortes pluies, de « rincer » la couche.

Les concentrations en éléments polluants dans les lixiviats ont été comparées avec le niveau maximum de contaminant (MCL) requis dans la norme pour l'eau potable de l'EPA. Les concentrations d'As, Cr, Pb, et Se dépassent les niveaux maximaux de contaminants (MCL) de la norme pour l'eau potable (EPA). Le Cr et le Pb dépassent la MCL dans le premier lixiviat et sporadiquement par la suite de l'essai, tandis que l'As et le Se dépassent la MCL tout au long de la période d'essai. Les auteurs estiment que l'émission de polluants dans les trois dispositifs pilote ne présente pas de différences significatives.

Le comportement de l'As, du Cr, et du Se est attribué à la formation d'oxyanions qui ont tendance à avoir une solubilité plus élevée sur le front de carbonatation. Mulugeta et al., 2011, avaient déjà observée que la solubilité de ces éléments augmente lorsque le pH diminue à cause de la carbonatation du matériau. En effet, les oxyanions liés aux structures de phases cimentaires hydratées sont libérés lors de la dégradation de ces phases.

D'autre part, **Engelsen et al., 2012** ont étudié le comportement des éléments majeurs et des éléments trace métalliques des granulats de béton recyclés utilisés dans une sous-couche routière asphaltée et dans une sous-couche routière non recouverte, directement exposés à l'air et la pluie. Les résultats ont été comparés à une sous-couche recouverte de référence fabriquée avec de granulats naturels.

Les principaux résultats de l'étude montrent que la nature alcaline du béton confère à l'eau interstitielle un pH autour 13 pour les trois sous couches testées. Le pH de l'eau d'infiltration de la sous-couche recouverte a diminué plus lentement que celui de la sous-couche non recouverte. Au bout de deux ans et demi d'exposition, le pH moyen de la sous couche recouverte était en dessous de 10, alors que le même pH a été atteint dans la première année pour la sous couche non recouverte.

Au cours des 100 premiers jours d'exposition, les concentrations du Cr, du Cu et du V relarguées sont significativement plus élevées pour les ouvrages avec granulats de béton recyclés que pour celle avec des granulats naturels. Avec le temps toutes les concentrations relarguées ont diminuée et ne dépassent pas les valeurs seuils Norvégiennes « Class I: Insignificantly polluted » et « Class II: Moderately polluted ».

En ce qui concerne la caractérisation du comportement à la lixiviation des éléments traces en fonction du pH, elle a montré dans certains cas les mêmes tendances que celles décrites auparavant, lors du tests de lixiviation en laboratoire (Engelsen et al., 2009, 2010) : Dans la plage de pH 9–11, le relargage du Cu et du Ni diminuent, ceci étant probablement dû à un effet combiné entre la diffusion contrôlée et l'adsorption sur les HFO et les AAM. Le Cr, le Mo et le V présents dans leur forme anionique (oxyanions) sont plus relargués à ces valeurs de pH tandis qu'à pH 10–13, une diminution du relargage est observée ce qui indique leur fixation dans les sulfoaluminates de calcium.

Quand le pH baisse autour de 8, les concentrations relarguées diminuent pour tous les éléments (Cr, Cu, Mo, Ni et V). A part les réactions de sorption, les facteurs physiques comme la formation du front de carbonatation et l'épuisement (formation d'une couche lessivée) peuvent limiter le relargage de ces éléments. Quand une couche carbonatée est formée, une densification du système de pores se produit. La formation de cette couche peut réduire la connectivité entre l'eau d'infiltration et l'eau interstitielle de la pâte de ciment (non carbonatée) dans les particules du granulat ce qui interrompt le gradient de diffusion. (Meza et al., 2009)

D'autre part, l'étude a montré certains effets saisonniers sur le relargage du Cr et du Mo qui sont probablement liés à l'utilisation de sel. En effet, l'utilisation du sel de dégivrage (NaCl) pendant l'hiver peut induire l'augmentation de la lixiviation du CrO_4^{2-} et du MoO_4^{2-} (Kayhanian et al., 2009 ; Avudainayagam et al., 2001). Pendant l'hiver, de plus fortes concentrations de ces éléments dans l'eau d'infiltration ont été obtenus pour les sous couches avec des granulats de béton recyclés (pH 8.8 – 9.6) par rapport au sous couche de référence avec de granulats naturels (7.1 – 7.7).

4 Critères de sortie de statut de déchet

La révision de 2008 de la directive cadre sur les déchets (DCE) de l'Union européenne introduit la possibilité d'établir les critères selon lesquels certains déchets pourraient sortir de leur statut de déchet. Si tous les critères sont respectés, le matériau ne sera plus considéré comme un déchet, mais plutôt comme un produit soumis au libre-échange pour des utilisations spécifiques. Ce point peut concerner le PN Recybéton pour la vérification des caractéristiques environnementales des granulats destinés à la valorisation dans des produits en béton mais les usages prévus sont pour l'instant uniquement routiers. Ce sujet concerne également la fin de vie des matériaux du PN Recybéton en vue de leur valorisation.

Selon l'article 6 de la DCE, un déchet peut cesser de l'être quand il subit une récupération, y compris le recyclage, ou une valorisation en répondant aux critères spécifiques qui sont définis à partir des conditions suivantes :

- a) le matériau est couramment utilisé à des fins spécifiques ;
- b) un marché ou une demande existe pour l'utilisation du matériau ;
- c) le matériau remplit les exigences techniques aux fins spécifiques et respecte la législation et les normes applicables aux produits ;
- d) l'utilisation du matériau ne génèrera pas d'impacts défavorables sur la santé humaine et/ou l'environnement.

Les critères comprennent des valeurs seuils pour les polluants et doivent prendre en compte les possibles effets environnementaux du matériau.

Les granulats dérivés de déchets, y compris les déchets de démolition sont essentiellement utilisés en construction routière dans plusieurs États membres de l'UE, sous réserve de leur conformité aux conditions et critères relevant des réglementations nationales sur les déchets. L'obtention du statut EoW (End of Waste) au niveau européen pour ce type de granulats en technique routière pourrait donc améliorer les possibilités de recyclage et diminuer l'épuisement de granulats naturels. Cependant, ils restent encore des doutes à lever sur la conformité des granulats aux exigences énumérées ci-dessus. Un guide d'application aux déchets du BTP du Guide SETRA « Acceptabilité de l'utilisation de matériaux alternatifs en technique routière – Evaluation environnementale » devrait prochainement être publié.

La DCE autorise les différents États membres à développer des critères nationaux pour les déchets qui remplissent les conditions (a) - (d) car les critères de l'UE n'ont pas encore été développés. Les principales controverses liées à l'obtention du statut EoW pour les granulats semblent être associés à l'accomplissement du point (d): « *l'utilisation du matériau ne génèrera pas d'impacts défavorables sur la santé humaine et/ou l'environnement* » et à la nécessité de définir de méthodologies d'évaluation appropriées et de fixer les valeurs seuils, en particulier sur la lixiviation.

Hjelmar et al., 2013, ont abordé ces points et proposé une méthodologie pour le développement de critères EOW et des conditions d'utilisation des granulats en usage non lié qui prendrait en compte les possibles impacts sur l'environnement à cause de la lixiviation et la migration de substances potentiellement nocives.

Ils ont dans un premier temps abordé les implications et les conséquences de la réglementation « EoW » pour les granulats. Ensuite ils ont développé un modèle conceptuel pour l'évaluation du risque/ impact des granulats (naturels ou recyclés) sur l'environnement ou sur la santé humaine. Deux approches sont discutées entre « l'utilisation sans restriction » et « l'utilisation selon des conditions imposées » sous le concept EoW et les conséquences en termes de seuils de lixiviation.

Un exercice sur le calcul des valeurs limites de lixiviation pour "l'utilisation sans restriction" de granulats dérivés de déchets sous forme non liée a montré que, pour garantir un niveau de protection de la qualité des eaux satisfaisant dans des conditions d'utilisation les plus défavorables, les valeurs restent très basses et restrictives, et pour de nombreuses substances avec des ordres de grandeur inférieurs à la réglementation européenne pour la mise en décharge. De ce fait très peu, sinon aucun des granulats dérivés de déchets pourront être conformes à ces critères.

A ce propos, les auteurs suggèrent que les critères EoW soient définis à partir de conditions spécifiques d'utilisation telles que :

- Le matériau ne peut qu'être utilisé à des fins spécifiques ;
- Le matériau doit être repris à la fin de son cycle de vie ;
- Une distance minimale doit être respectée entre l'ouvrage contenant le matériau et le niveau des eaux souterraines et des eaux superficielles ;
- Des restrictions doivent être fixées quand à l'épaisseur de l'ouvrage (cas de sous-couche routière)
- Des restrictions doivent être fixées quand à la longueur et la largeur de l'ouvrage (cas de sous-couche routière)
- Des restrictions doivent être fixées quand au taux d'infiltration des eaux dans l'ouvrage.

Finalement, une méthodologie pour définir des seuils de lixiviation plus réels a été décrite. La méthodologie est composée de 8 étapes et elle intègre les effets atténuants des diverses mesures qui réduisent l'impact potentiel sur l'environnement de l'utilisation en construction de granulats recyclés.

Cette méthodologie a été publiée par le JRC (Joint Research Center) de la Commission européenne en Septembre 2014 (Saveyn H., 2014)

En France, un projet d'arrêté fixant les critères de sortie de statut de déchet pour les granulats élaborés à partir de déchets du bâtiment et des travaux publics pour un usage routier a été soumis à une consultation publique du 1^{er} août au 12 septembre 2014. Ce projet concerne les travaux du PN Recybéton pour l'utilisation des granulats recyclés en béton de couche de roulement.

Ce projet d'arrêté fixe des critères sur les déchets entrants, sur les matériaux après valorisation et sur l'organisation de l'installation classée souhaitant faire de la sortie de statut de déchet. Les granulats ne perdent leur statut de déchet que si l'ensemble des critères sont remplis et vérifiés avant la sortie du site de production. Les granulats de béton y sont identifiés en tant que famille de granulats. Leur utilisation en béton de couche de roulement est prévue sous le terme d'usage « non recouvert non revêtu ». Une attestation de conformité, dans laquelle le producteur des granulats s'engage à respecter les critères du présent projet d'arrêté, est transmise au détenteur suivant.

Les valeurs limites en fraction lixiviable proposées pour définir les conditions de sortie de statut de déchet des granulats de béton liés pour un usage en couche de roulement (usage routier de type 3), seul type d'usage routier concerné par le PN Recybéton, sont les suivantes :

Valeurs limites à respecter pour la famille « BETON »	
Analyse en lixiviation (NF EN 12457-2 ou NF EN 12457-4) exprimée en mg/kg de matière sèche	
Paramètres	Usage routier de type 3
As	0,6
Ba	25
Cd	0,05
Cr total	0,6
Cu	3
Hg	0,01
Mo	0,6
Ni	0,5
Pb	0,6
Sb	0,08
Se	0,1
Zn	5
Fluorures	13
Chlorures	1000
Sulfates	1300

(*) Pour les installations fonctionnant en continu et dont la production répond aux conditions fixées à la section 3.3 de la présente annexe, il est possible d'utiliser, de manière alternative, le tableau D pour la vérification de la conformité de la production vis-à-vis du paramètre « sulfates ».

(**) Jusqu'au 31/12/2016, l'échantillon est jugé conforme vis-à-vis du paramètre sulfates si la teneur mesurée est inférieure à 1800 mg/kg de matière sèche. Ce délai de deux ans laissera le temps aux plateformes de recyclage de généraliser les bonnes pratiques qui permettent de respecter la valeur de 1300 mg/kg en sulfates, issue de la campagne de caractérisation de ces matériaux.

Cas du paramètre sulfate associé aux usages de type 3 pour les matériaux produits en continu

Pour les installations fonctionnant en continu, la conformité environnementale peut être prononcée pour le paramètre « sulfates » à l'aide du tableau ci-dessous, à condition que la production réponde aux conditions suivantes :

- l'installation a une capacité de production de granulats de la famille BETON supérieure à 10000 tonnes par an et fonctionne en continu ;
- les granulats sont produits à partir d'un stock unique homogénéisé pour lequel l'installation possède une procédure documentée spécifique de réception et de mise en stock des déchets du BTP admis ;
- les granulats sont produits selon un processus d'élaboration continu faisant l'objet d'une procédure documentée spécifique

Valeurs limites à respecter pour le paramètre « Sulfates »			
Analyse en lixiviation (NF EN 12457-2 ou NF EN 12457-4) exprimée en mg/kg de matière sèche			
Paramètre	Valeur à respecter par au moins 80% des échantillons sur les 24 derniers mois de production	Valeur à respecter par au moins 95% des échantillons sur les 24 derniers mois de production	Valeur à respecter par au moins 100% des échantillons sur les 24 derniers mois de production
Sulfates	1000*	2000**	3000***

(*) Jusqu'au 31/12/2016, l'échantillon est jugé conforme vis-à-vis du paramètre « sulfates » si la teneur mesurée est inférieure à 1500 mg/kg de matière sèche.

(**) Jusqu'au 31/12/2016, l'échantillon est jugé conforme vis-à-vis du paramètre « sulfates » si la teneur mesurée est inférieure à 3000 mg/kg de matière sèche.

(***) Jusqu'au 31/12/2016, l'échantillon est jugé conforme vis-à-vis du paramètre « sulfates » si la teneur mesurée est inférieure à 4500 mg/kg de matière sèche.

Les valeurs limites en contenu total en composés organiques proposées pour définir les conditions de sortie de statut de déchet des granulats de béton liés pour un usage en couche de roulement (usage routier de type 3) sont les suivantes :

Valeurs limites à respecter pour la famille « BETON »	
Analyse en contenu total exprimée en mg/kg de matière sèche	
Paramètres	Usage routier de type 3
Hydrocarbures (C10-C40)	500

Références bibliographiques

- Association Française de Normalisation (AFNOR). (1994). Travaux de bâtiments - Ouvrages en maçonnerie de petits éléments. P10-202 (DTU 20.1). Paris : AFNOR, 119p.
- Avudainayagam S, Naidu R, Kookana RS, Alston AM, McClure S, Smith LH. (2001). Effects of electrolyte composition on chromium desorption in soils contaminated by tannery waste. *Australian Journal of Soil Research*, 39: 1077–89.
- Chen, J., & Brown, B. (2012). UNIVERSITY OF WISCONSIN SYSTEM SOLID WASTE RESEARCH PROGRAM Student Project Report Leaching Characteristics of Recycled Aggregate used as Road Base May 2012 Student Investigators : Jiannan Chen , Brigitte Brown Advisors : Tuncer B . Edil , James Tinjum Un, (May), 1–22.
- Chrysochoou, M., & Dermatas, D. (2006). Evaluation of ettringite and hydrocalumite formation for heavy metal immobilization: Literature review and experimental study. *Journal of Hazardous Materials*, 136(1), 20–33.
- Engelsen, C. J., Van Der Sloot, H. a., Wibetoe, G., Justnes, H., Lund, W., & Stoltenberg-Hansson, E. (2010). Leaching characterisation and geochemical modelling of minor and trace elements released from recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, 40(12), 1639–1649.
- Engelsen, C. J., van der Sloot, H. a., Wibetoe, G., Petkovic, G., Stoltenberg-Hansson, E., & Lund, W. (2009). Release of major elements from recycled concrete aggregates and geochemical modelling. *Cement and Concrete Research*, 39, 446–459.
- Engelsen, C. J., Wibetoe, G., van der Sloot, H. a., Lund, W., & Petkovic, G. (2012). Field site leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction. *Science of the Total Environment*, 427-428, 86–97.
- Galvín, A. P., Agrela, F., Ayuso, J., Beltrán, M. G., & Barbudo, A. (2014). Leaching assessment of concrete made of recycled coarse aggregate: physical and environmental characterisation of aggregates and hardened concrete. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 34(9), 1693–704.
- Galvín, A. P., Ayuso, J., Agrela, F., Barbudo, A., & Jiménez, J. R. (2013). Analysis of leaching procedures for environmental risk assessment of recycled aggregate use in unpaved roads. *Construction and Building Materials*, 40, 1207–1214.
- Galvín, A. P., Ayuso, J., Jiménez, J. R., & Agrela, F. (2012). Comparison of batch leaching tests and influence of pH on the release of metals from construction and demolition wastes. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 32(1), 88–95.
- Kayhanian M, Vichare A, Green PG, Harvey J. (2009). Leachability of dissolved chromium in asphalt and concrete surfacing materials. *Journal of Environmental Management*.90:3574–80.

- Marion, A., De Laneve, M., De Grauw, A. (2005). Study of the leaching behaviour of paving concretes: quantification of heavy metal content in leachates issued from tank test using demineralized water. *Cement and Concrete Research*, 35, 951–957.
- Meza SL, van der Sloot H, Kosson DS.(2009). The effects of intermittent unsaturated wetting on the release of constituents from construction demolition debris. *Environmental Engineering Science*. 26:463–9.
- Mulugeta, M., Engelsen, C. J., Wibetoe, G., & Lund, W. (2011). Charge-based fractionation of oxyanion-forming metals and metalloids leached from recycled concrete aggregates of different degrees of carbonation: A comparison of laboratory and field leaching tests. *Waste Management*, 31(2), 253–258.
- Sani, D., Moriconi, G., Fava, G., & Corinaldesi, V. (2005). Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 25(2), 177–82.
- Saveyn H., E. P. (2014). *Study on methodological aspects regarding limit values for pollutants in aggregates in the context of the possible development of end-of-waste criteria under the EU Waste Framework Directive*. European Commission, JRC-IPTS. Luxembourg: Publication Office of the European Union.
- Van der Sloot, H. . (2000). Comparison of the characteristic leaching behavior of cements using standard (EN 196-1) cement mortar and an assessment of their long-term environmental behavior in construction products during service life and recycling. *Cement and Concrete Research*, 30(7), 1079–1096.
- Van der Sloot, H. ., Hoede, D., Cresswell, D. J. ., & Barton, J. . (2001). Leaching behaviour of synthetic aggregates. *Waste Management*, 21(3), 221–228.
- Van der Sloot, H. a. (2002). Characterization of the leaching behaviour of concrete mortars and of cement-stabilized wastes with different waste loading for long term environmental assessment. *Waste Management*, 22, 181–186.
- Van der Sloot H., K. D. (2012). A reference database in LeachXS Lite for release of substances from construction products including alternative materials. *WASCON* (pp. 1-10). Göteborg: ISCOWA.
- Conseil des Communautés Européennes (CCE). Directive 75/440/CEE du 16 juin 1975 concernant la qualité requise des eaux superficielles destinées à la production d'eau alimentaire dans les Etats membres. Journal officiel des Communautés Européennes n° L 194 du 25 juillet 1975 p. 26 – 31.
- Conseil des Communautés Européennes (CCE). Directive européenne n° 89/677/CEE du 21 décembre 1989, portant huitième modification de la directive 76/769/CEE concernant le rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des états membres relatives à la limitation de la mise sur le marché et de l'emploi de certaines substances et préparations dangereuses. Journal Officiel des Communautés Européennes n° L 398 du 30 décembre 1989b p.19 – 23.

Conseil des Communautés Européennes (CCE). Directive 94/60/CEE portant quatorzième modification de la dir. 76/769/CEE du 27.07.1976 concernant le rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des États membres relatives à la limitation de la mise sur le marché et de l'emploi de certaines substances et préparations dangereuses. Journal Officiel des Communautés Européennes n° L 365 du 31 décembre 1994, p.1 - 9.

Conseil des Communautés Européennes (CCE). Directive européenne n° 98/83/CEE du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinée à la consommation humaine, Journal Officiel des Communautés Européennes n° L 330 du 5 décembre 1998a, p.1-10

Conseil des Communautés Européennes (CCE). Directive européenne n° 98/8/CEE relative à la mise sur le marché des produits biocides. Journal Officiel des Communautés Européennes n° L 131 du 5 mai 1998b, p. 11 – 23.

Conseil des Communautés Européennes (CCE). Directive européenne n° 2000/60/CEE « Directive Cadre Eau ». Journal Officiel des Communautés Européennes n° L 327 du 22 décembre 2000, p.1-72.

Conseil des Communautés Européennes (CCE). Directive 2001/90/CEE du 26 octobre 2001 portant septième adaptation au progrès technique (créosote) de l'annexe I de la directive 76/769/CEE du Conseil concernant le rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des États membres relatives à la limitation de la mise sur le marché et de l'emploi de certaines substances et préparations dangereuses, Journal Officiel des Communautés Européennes L 283 du 27 octobre 2001, p. 41-43.

Conseil des Communautés Européennes (CCE). Règlement n° 305/2011 du Parlement européen et du Conseil du 9 mars 2011 établissant des conditions harmonisées de commercialisation pour les produits de construction et abrogeant la directive 89/106/CEE du Conseil « Règlement Produits de Construction ». Journal Officiel des Communautés Européennes n° L 88 du 4 Avril 2011, p.5-43.

Centre Scientifique Technique du Bâtiment (CSTB), Réglementation Européenne des Produits de Construction, Paris : CSTB, 2004a. Disponible sur : www.dpcnet.org

Centre Scientifique Technique du Bâtiment (CSTB). Espace Avis Techniques, Paris : CSTB, 2004b. Disponible sur : <http://www.cstb.fr/app/atec/atec-cstb/faq.asp>

INSA de Lyon. Comportement à la lixiviation – Principes et méthodes, site internet de e-learning disponible sur : <http://tice.insa-lyon.fr/lixiviation/>

Comité Européen de Normalisation. Caractérisation des déchets – Essai de comportement à la lixiviation – Influence du pH sur la lixiviation avec ajout initial d'acide/base. CEN/TS 14429, mai 2006

Comité Européen de Normalisation. Caractérisation des déchets – Essai de comportement à la lixiviation – Influence du pH sur la lixiviation avec contrôle continu du pH. CEN/TS 14997, décembre 2006

Comité Européen de Normalisation. Caractérisation des déchets – Essai de comportement à la lixiviation – Essai de percolation à écoulement ascendant. CEN/TS 14405, juillet 2005

Comité Européen de Normalisation. Caractérisation des déchets – Essai de comportement à la lixiviation pour la caractérisation de base – Essai de lixiviation dynamique des monolithes avec renouvellement périodique du lixiviant prCEN/TS 15863, janvier 2009 (projet de norme en cours de validation)

Comité Européen de Normalisation. Caractérisation des déchets – Essai de comportement à la lixiviation pour la caractérisation de base – Essai de lixiviation dynamique des monolithes avec renouvellement continu du lixiviant prCEN/TS 15864, janvier 2009 (projet de norme en cours de révision)

Comité Européen de Normalisation. Caractérisation des déchets – Prélèvement des déchets - Partie 1 : guide relatif au choix et à l'application des critères d'échantillonnage dans diverses conditions CEN/TR 15310-1 ; Partie 2 : guide relatif aux techniques d'échantillonnage CEN/TR 15310-2 ; Partie 3 : guide relatif aux procédures de sous-échantillonnage sur le terrain CEN/TR 15310-3 ; Partie 4 : guide relatif aux procédures d'emballage de stockage, de conservation, de transport et de livraison des échantillons CEN/TR 15310-4 ; Partie 5 : guide relatif au processus d'élaboration d'un plan d'échantillonnage CEN/TR 15310-5, mars 2007

Comité Européen de Normalisation. Caractérisation des déchets – Lixiviation – Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues – Partie 1 : essai en bûchée unique avec un rapport liquide/solide de 2 l/kg et une granularité inférieure à 4 mm EN 12457-1 ; Partie 2 : essai en bûchée unique avec un rapport liquide/solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 4 mm EN 12457-2 ; Partie 3 : essai en bûchée double avec un rapport liquide/solide de 2 l/kg et de 8 l/kg pour des matériaux à forte teneur en solides et une granularité inférieure à 4 mm EN 12457-3 ; Partie 4 : essai en bûchée unique avec un rapport liquide/solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 10 mm EN 12457-4, décembre 2002

Comité Européen de Normalisation. Caractérisation des déchets – Essai de lixiviation de conformité – Essai de lixiviation en une étape à un ratio liquide sur surface (L/A) fixe prCEN/TS 15862, Octobre 2012.

Comité Européen de Normalisation. Produits de construction - Évaluation de l'émission de substances dangereuses - Partie 1 : Guide pour la spécification des essais de lixiviation et des étapes supplémentaires d'essai. CEN TS 16637-1 : 2014

Comité Européen de Normalisation. Produits de construction - Évaluation de l'émission de substances dangereuses - Partie 2 : Essai horizontal de lixiviation dynamique des surfaces. CEN TS 16637-2 : 2014

Comité Européen de Normalisation. Produits de Construction –Évaluation de l'émission de substances dangereuses - Partie 2 : Essai horizontal de percolation ascendant. prCEN TS 16637-3 (projet de norme)

Partie expérimentale

1 Objectifs des travaux

L'étude consiste à caractériser les éventuelles différences de comportement à la lixiviation existantes entre des bétons élaborés avec des granulats recyclés du programme Recybéton et des bétons élaborés avec des granulats de carrière. Ces caractéristiques seront observées au moyen d'essais de lixiviation sur matériau fragmenté en batch d'une part et sur matériau monolithique en conditions dynamiques d'autre part.

2 Déroulement des travaux

Sur la base des indications fournies par les partenaires du programme Recybéton, les formulations suivantes ont été réalisées par l'IFSTTAR et adressées à PROVADEMSE :

- BPE CEMII C25/30 témoin
- BPE « Recybéton » C25/30 OS 30G
- BPE « Recybéton » C25/30 100S 100G

Les caractéristiques détaillées de composition des formulations sont présentées sous forme de fiches constituées par l'IFSTTAR placées en Annexe 1- Fiches techniques d'élaboration des matériaux testés (IFSTTAR). Les principales matières premières employées par l'IFSTTAR pour ces formulations sont les suivantes :

- Ciment : CEM II/A-L 42,5 Rochefort (HOLCIM)
- Filler calcaire : Betocarb HP EB
- Sable et gravillons naturels de référence du programme RECYBETON
- Sable et gravillons recyclés de référence du programme RECYBETON

Les matériaux ont été coulés par l'IFSTTAR dans des moules carton de diamètre 11 cm et de hauteur 22cm. Ils ont été conservés dans leur moule durant 90 jours avant la réalisation des essais. Le choix des moules en carton a été décidé en vue de limiter la fissuration de peau et de protéger les matériaux lors de leur transport (à environ 77 jours de cure).

Les éprouvettes ont été fournies par l'IFSTTAR à PROVADEMSE deux semaines avant la fin de cure. Les éprouvettes ont été démoulées et les essais lancés après 90 jours de cure.

Au total, 6 éprouvettes de chaque formulation ont été réalisées :

- Trois d'entre-elles sont destinées à l'étude de variabilité du relargage, en première approche, au moyen de l'essai de lixiviation normalisé pour les déchets fragmentés EN 12457-2,
- Une d'entre elles à la caractérisation de la dynamique de relargage selon l'essai de lixiviation sur monolithe tel qu'il a été défini dans le cadre des travaux du CEN TC351 (Produits de construction – Evaluation de l'émission de substances dangereuses règlementées) sous le code TS2
- Les deux éprouvettes restantes ont été conservées dans leur moule pour d'éventuels essais complémentaires.

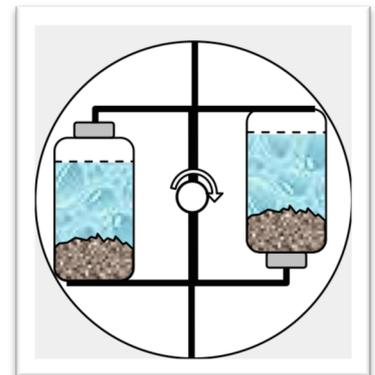
3 Variabilité du relargage

Les essais ont été menés en vue d'observer et de comparer, en première approche, la gamme de variation des résultats de relargage de la formulation témoin d'une part et celle des résultats de relargage des deux formulations d'essai d'autre part. Les résultats de ces essais permettent par ailleurs de caractériser le niveau de relargage de ces matériaux vis-à-vis des valeurs limites acceptables pour leur gestion en fin de vie.

Pour chaque formulation, 3 éprouvettes ont été broyées après 90 jours de cure, et testées séparément selon l'essai de lixiviation EN 12457-2. Chacun des 9 éluats a été analysé pour en déterminer la concentration des éléments suivants : As, Ba, Cd, Cr, CrVI, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn, ainsi que des chlorures, fluorures et sulfates. La fraction soluble globale de chacun des éluats a également été déterminée.

3.1 Mode opératoire

Une masse d'échantillon concassé et tamisé à 4 mm d'au moins 100 ± 5 g (dans notre cas 150 g) en équivalent sec est pesée directement dans le flacon de lixiviation. Une quantité de lixiviant (eau déminéralisée) permettant d'obtenir un rapport liquide-solide L/S = 10 l/kg à 2% près est ajoutée. Le flacon est ensuite mis dans un dispositif d'agitation par retournement à 30 t/mn. L'échantillon est agité pendant $24 \pm 0,5$ h, puis il est laissé 15 mn au repos pour permettre la décantation des solides. L'éluat est filtré à 0,45 μ m.



Dispositif d'agitation

L'essai a été réalisé de cette manière sur les trois matériaux étudiés.

Les éluats ont été analysés par ICP-MS par EUROFINs après filtration conformément au protocole normalisé.

3.2 Résultats et interprétation

Les résultats de caractérisation du pH, de la conductivité, du potentiel d'oxydo-réduction et de la fraction soluble globale de chacun des éluats sont présentés ci-après sous forme d'histogrammes. L'ensemble des résultats sont rassemblés sous la forme d'un tableau en Annexe 3- Résultats des essais de lixiviation EN 12457-2 sur les éprouvettes de béton.

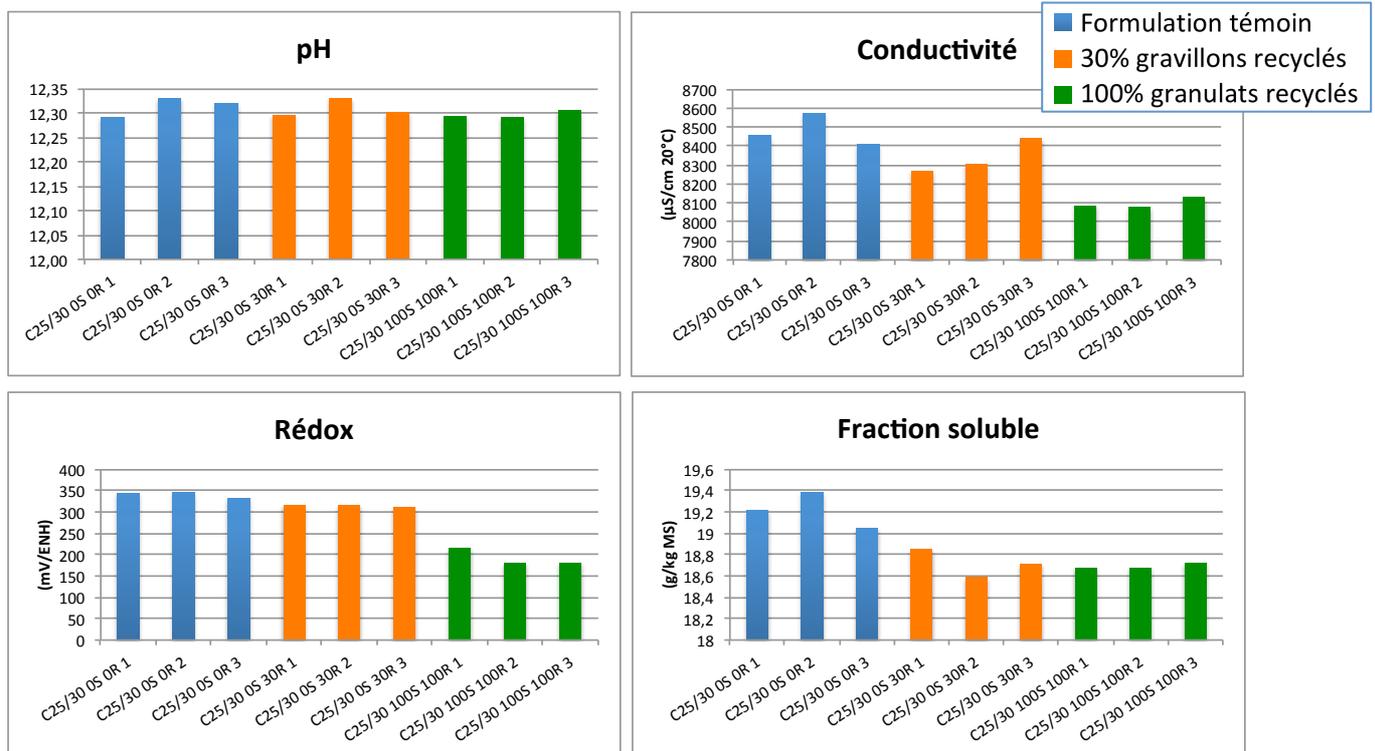


Figure 1 - Résultats de caractérisation du pH, de la conductivité, du potentiel d'oxydo-réduction et de la fraction soluble des 3 éprouvettes de chaque formulation de béton

Les résultats de caractérisation du pH, de la conductivité, du potentiel d'oxydo-réduction et de la fraction soluble globale des éluats de chaque formulation montrent que ces paramètres varient très peu d'une éprouvette à l'autre pour une même formulation.

Bien que le nombre d'échantillons ne permet pas une interprétation statistique, il apparaît que :

- le pH reste compris, pour l'ensemble des éprouvettes testées, entre 12,29 et 12,33 unités pH ce qui constitue une valeur particulièrement constante ;
- la conductivité, le potentiel d'oxydo-réduction et la fraction soluble globale de la formulation comprenant 100% de granulats recyclés paraissent globalement légèrement inférieurs aux mêmes paramètres obtenus avec la formulation témoin. Dans le cas de la formulation comprenant seulement 30% de gravillons recyclés, les paramètres semblent se placer à un niveau intermédiaire entre les deux premiers. Néanmoins, les niveaux de ces paramètres restent compris dans le même ordre de grandeur.

Ainsi, d'après ces tendances, l'apport de granulats recyclés dans les conditions du programme RECYBETON se traduirait par une légère diminution de l'émission globale de sels minéraux, électriquement conducteurs et une légère diminution du caractère oxydant de leur solution.

Les résultats d'analyse des métaux et anions relargués dans chacun des éluats sont exprimés en termes de fraction lixiviable, rapportée à la masse sèche de matériau, et représentés ci-après sous forme

d'histogrammes. L'ensemble des résultats sont rassemblés sous la forme d'un tableau en Annexe 3- Résultats des essais de lixiviation EN 12457-2 sur les éprouvettes de béton.

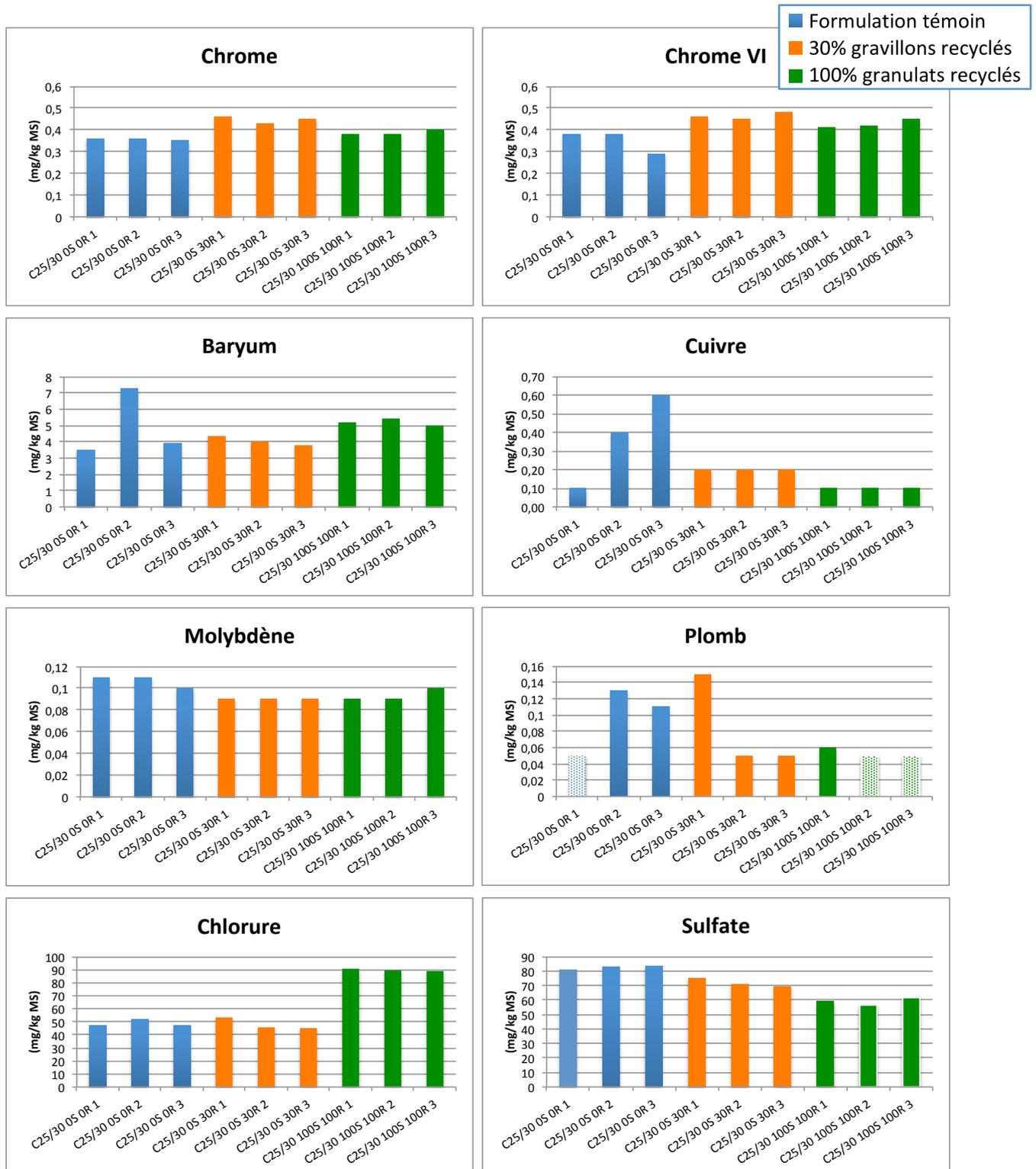


Figure 2 - Résultats de caractérisation de la fraction lixiviable en Cr, CrVI, Ba, Cu, Mo, Pb, chlorures et sulfates des 3 éprouvettes de chaque formulation de béton

Les résultats de caractérisation de la fraction lixiviable en métaux et anions de chaque formulation montrent relativement peu de différences d'une éprouvette à l'autre pour une même formulation à l'exception du baryum, du cuivre et du plomb pour l'échantillon témoin et du plomb pour l'échantillon contenant 30% de gravillons recyclés.

Les éléments antimoine, arsenic, cadmium, mercure, nickel et sélénium n'ont été détectés dans aucun des éluats de chaque formulation. Des fluorures n'ont été détectés que dans un seul des trois éluats de la formulation témoin. Du zinc n'a été détecté, en concentration très proche de la limite de détection, que dans un seul des trois éluats de la formulation témoin et de la formulation contenant 30% de gravillons recyclés. Enfin, le plomb n'a pas été décelé en concentration détectable dans l'un des trois éluats de l'échantillon témoin et dans deux des trois éluats de l'échantillon contenant 100% de granulats recyclés.

La représentation graphique des résultats tend à montrer que l'apport de granulats recyclés, dans les conditions du programme RECYBETON, ne se traduit pas par une modification significative du relargage de chrome (y compris chrome hexavalent), de baryum et de molybdène. En revanche, ces résultats tendent aussi à montrer que cet apport de granulats recyclés dans la formulation des bétons pourrait se traduire par un relargage légèrement diminué en cuivre, plomb et sulfates et légèrement augmenté en chlorures.

3.3 Rapprochement des résultats expérimentaux avec la bibliographie

Ces résultats confirment les indications observées dans la bibliographie quant à l'absence de différence significative entre relargage de béton classique et recyclé. Ils confirment également le positionnement de ces matériaux comme conformes aux valeurs limites pour une valorisation en technique routière et en particulier en couche de roulement béton.

Au regard du Règlement Produits de Construction, ces résultats peuvent permettre de répondre à l'Exigence Fondamentale n°7 a) « La réutilisation ou la recyclabilité des ouvrages de construction, de leurs matériaux et de leurs parties après démolition » en considérant (hors contamination durant leur vie en œuvre) que les bétons incorporant des granulats recyclés présentent des caractéristiques de relargage d'éléments dans l'eau conformes aux conditions acceptables pour un usage en technique routière.

4 Caractérisation de la dynamique de relargage

Les essais ont été menés en vue d'observer et de comparer la dynamique du relargage des principaux paramètres de la fraction soluble des bétons témoins d'une part et des bétons recyclés d'autre part en conditions d'essai normalisées.

Une éprouvette de chaque formulation a été découpée aux dimensions 4 x 4 x 4 cm puis testée selon le protocole du CEN TS 16637-2 « Évaluation de l'émission de substances dangereuses - Partie 2 : Essai horizontal de lixiviation dynamique des surfaces ». Chacun des 7 éluats de chaque test a été analysé pour en déterminer la concentration des éléments suivants : As, Ba, Cd, Cr, CrVI, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn, ainsi que des chlorures, fluorures et sulfates.

4.1 Mode opératoire

La prise d'essai du produit est placée dans un réacteur de type batch dans lequel la surface du matériau exposée est complètement immergée dans un lixiviant. Le lixiviant (eau déminéralisée) est introduit dans le réacteur jusqu'à un volume donné de liquide correspondant à un ratio L / A (liquide/surface) de 8 l/m², et renouvelé à des intervalles de temps prédéterminés. La durée totale de l'essai est fixée à 36 jours. Les éluats sont collectés à intervalles de temps fixes selon la périodicité suivante :

Étape / Fraction	Durée de l'étape spécifique, en jours	Durée depuis le démarrage de l'essai (t ₀), en jours
1	0.08	0.08
2	0.92	1.00
3	1.25	2.25
4	5.75	8.0
5	7	15.0
6	13	28.0
7	8	36.0

Tableau 2 – Périodicité de renouvellement de l'éluat du test de lixiviation dynamique pour matériaux de construction monolithiques

Les fractions de l'éluat sont filtrées à 0,45µm et analysés selon les normes en vigueur. Les résultats du test sont exprimés en fonction du temps, en termes de concentration en éléments dans l'éluat, de masse d'élément relarguée cumulativement par unité de masse sèche de matériau et par unité de surface géométrique des matériaux exposé au lessivage.

Les principaux mécanismes de lixiviation qui peuvent être distingués et identifiés sont:

- diffusion (à travers les pores et/ou la surface la plus grande) ;
- dissolution de substances / relargage contrôlé par la solubilité ;
- lessivage de surface initial
- dissolution de la matrice.

4.2 Résultats et interprétation

Les résultats de caractérisation du pH, de la conductivité, du potentiel d'oxydo-réduction et de la fraction soluble globale de chacun des éluats sont présentés ci-après sous forme de courbes en fonction du temps. L'ensemble des résultats sont rassemblés sous la forme d'un tableau en Annexe 4- Résultats des essais de lixiviation sur monolithe sur les éprouvettes de béton.

Ces résultats portent sur une seule éprouvette de chaque formulation. Il ne serait donc pas prudent de généraliser l'interprétation de ces résultats sans mettre en œuvre de tels essais sur un nombre d'échantillons statistiquement significatif.

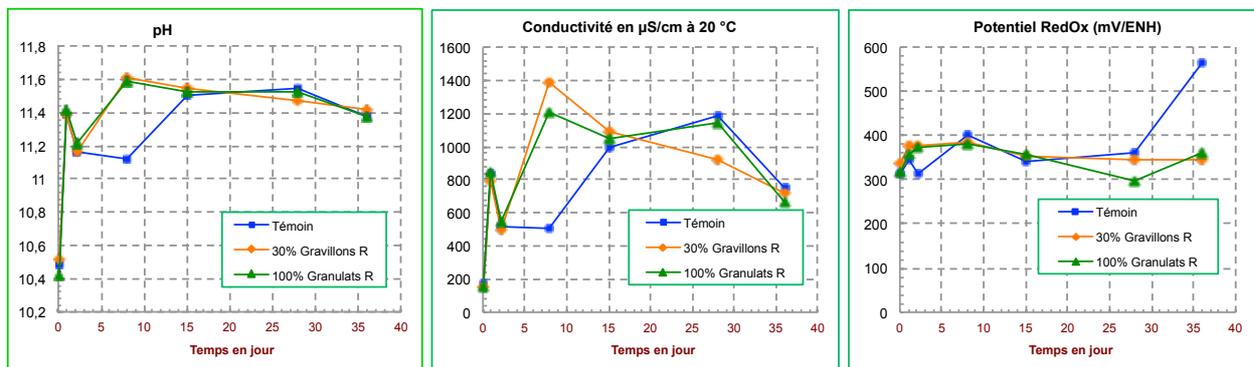


Figure 3 - Résultats de caractérisation du pH, de la conductivité, du potentiel d'oxydo-réduction des 3 formulations de béton au cours de l'essai de lixiviation sur monolithe

Les résultats de caractérisation du pH, de la conductivité, du potentiel d'oxydo-réduction des éluats de chaque formulation montrent que ces paramètres varient relativement peu au cours du temps. Ces paramètres apparaissent très proches d'une formulation à l'autre.

Les seules différences observées entre les formulations témoin et recyclé portent sur l'évolution du pH et de la conductivité autour de 8 jours d'essai : les bétons recyclés présentent un pH et une conductivité supérieurs au béton témoin durant cette période avant de rejoindre les mêmes valeurs.

La conductivité des éluats de béton recyclé semble présenter un pic autour de 8 jours d'essai avant de revenir progressivement au niveau initial. Ce pic n'apparaît, dans le cas du béton témoin, qu'autour de 28 jours.

Les valeurs de pH de ces éluats sont entre 0,7 et 1,0 unité pH inférieures à celles des éluats de l'essai de lixiviation sur matériau fragmenté (EN 12457). De la même manière, la conductivité électrique de ces éluats est de l'ordre de 8 fois inférieure à celle des éluats sur matériau fragmenté (EN 12457). Ces différences s'expliquent par la différence de surface d'échange, beaucoup plus importante dans le cas de l'essai sur matériaux fragmentés que sur matériaux monolithiques. Une autre explication relève également de la différence de rapport L/S, de l'ordre de 45 L/Kg par renouvellement.

Les résultats d'analyse des métaux et anions relargués au cours de l'essai par les matériaux monolithiques sont exprimés sous forme de courbes ci-après en termes de concentration (mg/l), de masse relarguée cumulée par unité de masse sèche de matériau (mg/kg MS) et de masse relarguée

cumulée par unité de surface de matériau exposée (mg/m²). L'ensemble des résultats sont rassemblés sous la forme d'un tableau en Annexe 4- Résultats des essais de lixiviation sur monolithe sur les éprouvettes de béton.

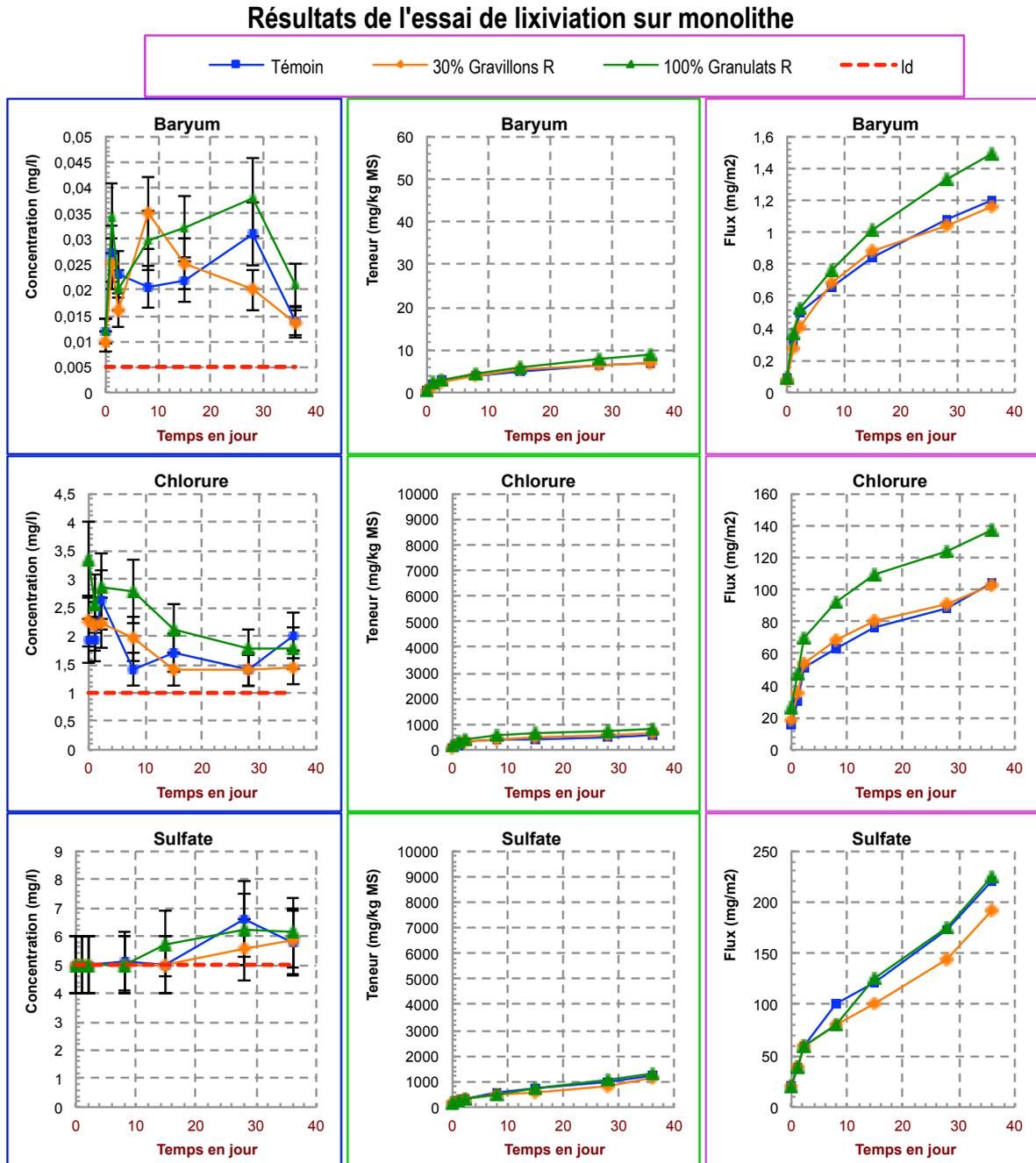


Figure 4 - Résultats de caractérisation de la composition en baryum, chlorures et sulfates des éluats de monolithes en fonction du temps pour les trois formulations de béton testées

La composition des éluats en antimoine, arsenic, cadmium, chrome, chrome hexavalent, cuivre, mercure molybdène, nickel, plomb, sélénium, zinc et fluorures n'est pas représentée ici car elle est inférieure ou égale à la limite de détection. Ainsi, seuls le baryum, les chlorures et les sulfates ont pu être mesurés dans ces éluats.

Cas du baryum

La **concentration** en baryum reste relativement faible et ne présente pas d'évolution significative en fonction du temps d'essai ni de différence significative entre les trois formulations.

Le **relargage cumulé en baryum rapporté à la masse** de matériau tend à se stabiliser à près de 10 mg/kg MS alors que, à titre de comparaison, les valeurs limites acceptables pour une valorisation en technique routière (Guide SETRA, évaluation par un essai dynamique conçu pour des matériaux granulaires à un ratio L/S de 10) sont de 28 et 56 mg/kg selon le scénario d'usage.

Le **relargage surfacique** en baryum des matériaux atteint entre 1,2 et 1,5 mg/m² au bout de 36 jours d'essai. Les « plus fortes » valeurs sont obtenues avec le béton contenant 100% de granulats recyclés. La formulation à 30% de gravillons recyclés présente exactement la même courbe de relargage surfacique cumulé que la formulation témoin.

L'évolution des courbes de relargage cumulé (massique ou surfacique) en fonction du temps d'essai est typique d'un modèle de relargage par diffusion.

Cas des chlorures

La **concentration** en chlorures reste relativement faible, de l'ordre de quelques mg/l et tend à diminuer au cours des 15 premiers jours d'essais pour les trois formulations. La formulation contenant 100% de granulats recyclés est celle qui présente les « plus fortes » concentrations. La formulation contenant 30% de gravillons recyclés ne présente pas de relargage significativement différent de la formulation témoin.

Le **relargage cumulé en chlorures rapporté à la masse** de matériau tend à se stabiliser à près de 1000 mg/kg MS alors que les valeurs limites acceptables pour une valorisation en technique routière (Guide SETRA, évaluation par un essai dynamique conçu pour des matériaux granulaires à un ratio L/S de 10) sont de 5000 et 10000 mg/kg selon le scénario d'usage.

Le **relargage surfacique** en chlorures des matériaux atteint entre 100 et 140 mg/m² au bout de 36 jours d'essai. Les « plus fortes » valeurs sont obtenues avec le béton contenant 100% de granulats recyclés. La formulation à 30% de gravillons recyclés présente exactement la même courbe de relargage surfacique cumulé que la formulation témoin.

L'évolution des courbes de relargage cumulé (massique ou surfacique) en fonction du temps d'essai est typique d'un modèle de relargage par diffusion.

Cas des sulfates

La **concentration** en sulfates reste très faible puisque très proche de la limite de détection, son évolution en fonction du temps d'essai est très réduite et il n'est pas possible d'établir de différence significative entre les trois formulations.

Le **relargage cumulé en sulfates rapporté à la masse** de matériau approche 1200 à 1400 mg/kg MS à 36 jours alors que les valeurs limites acceptables pour une valorisation en technique routière (Guide SETRA, évaluation par un essai dynamique conçu pour des matériaux granulaires à un ratio L/S de 10) sont de 5000 et 10000 mg/kg selon le scénario d'usage.

Le **relargage surfacique** en sulfates des matériaux atteint entre 200 à 230 mg/m² au bout de 36 jours d'essai. L'apport de granulats recyclés dans la formulation ne se traduit pas par une différence de relargage surfacique des sulfates.

L'évolution des courbes de relargage cumulé (massique ou surfacique) en fonction du temps d'essai est typique d'un modèle de relargage par diffusion.

4.3 Rapprochement des résultats expérimentaux avec la bibliographie

Ces résultats sont cohérents, en termes de modèle de relargage, avec ceux présentés dans la partie bibliographique (**Galvin et al., 2014**) puisqu'on retrouve les profils d'évolution de la masse relarguée cumulée caractéristiques d'un mécanisme de relargage par diffusion pour les anions (chlorures et sulfates), qui paraît s'appliquer également au cas du baryum, quelque soit le type de béton et le taux de substitution par des granulats recyclés.

En revanche nos résultats montrent que les formulations « RECYBETON » présentent un moindre niveau de relargage que les travaux de **Galvin et al., 2014** qui avaient montré des différences de relargage dues aux variations du pH des formulations.

Dans notre cas, les formulations présentent les mêmes valeurs de pH ce qui expliquerait l'absence de différences significatives de relargage.

L'effet de la carbonatation (ou encore du contact avec des sels de déverglaçage) mis en évidence par divers auteurs d'essais à l'échelle pilote n'est pas observé lors de nos essais compte tenu des conditions prévues pour protéger le matériau de tels effets (immersion totale et permanente). De tels effets pourraient être à l'origine de modifications du pH à la surface des matériaux et de ce fait à l'origine de relargages potentiellement plus importants. La vérification de l'influence de la carbonatation sur le relargage des bétons recyclés et du béton témoin pourraient être une perspective de complément pour cette étude.

5 Caractérisation des matériaux au regard de leur gestion en fin de vie

Les résultats des essais menés dans le cadre de l'étude de variabilité (cf. 3 Variabilité du relargage) permettent également de caractériser la fraction lixiviable des différentes formulations par rapport aux valeurs de références définies pour la valorisation des matériaux en fin de vie dans des usages routiers.

Les fractions lixiviables en éléments métalliques et en anions de l'ensemble des éprouvettes testées (valeurs minimales et maximales) sont comparées dans le tableau ci-après aux valeurs de référence définies en termes de fraction lixiviable dans le cadre de l'acceptabilité environnementale d'une utilisation en technique routière (valeurs limites associées à la caractérisation environnementale de niveau 1) et du projet d'arrêté de sortie de statut de déchet pour un usage en technique routière.

Paramètres	Unités	Min	Max	Guide SETRA Caractérisation environnementale Niveau 1* / seuils ISDI	Guide d'application Usage type 3 pour la famille "Béton" / Seuils SSD
Chlorures (Cl)	mg/kg MS	45	90,4	800	1000
Sulfates	mg/kg MS	56,5	83,4	1000	1300
Fluorures	mg/kg MS	<5	13	10	13
Antimoine	mg/kg MS	<0,2	<0,2	0,06	0,08
Arsenic	mg/kg MS	<0,05	<0,05	0,5	0,6
Baryum	mg/kg MS	3,47	7,27	20	25
Cadmium	mg/kg MS	<0,05	<0,05	0,04	0,05
Chrome	mg/kg MS	0,35	0,46	0,5	0,6
Cuivre	mg/kg MS	0,1	0,6	2	3
Molybdène	mg/kg MS	0,09	0,11	0,5	0,6
Nickel	mg/kg MS	<0,05	<0,05	0,4	0,5
Plomb	mg/kg MS	<0,05	0,15	0,5	0,6
Sélénium	mg/kg MS	<0,1	<0,1	0,1	0,1
Zinc	mg/kg MS	0,2	0,3	4	5
Mercure	mg/kg MS	<0,002	<0,002	0,01	0,01

* limites à respecter par au moins 80% des échantillons pour une utilisation en technique routière

** limites à respecter pour les usages en couches de roulement des matériaux issus des déchets du BTP

Tableau 3 - Comparaison des fractions lixiviables de l'ensemble des matériaux testés avec les valeurs de référence pour la valorisation en technique routière

Ces résultats montrent que l'ensemble des formulations sont conformes aux valeurs limites définies dans le projet d'Arrêté de sortie de statut de déchet des granulats issus de déchets du BTP pour un usage en couche de roulement (usage type 3) qui est l'usage le plus restrictif vis-à-vis du relargage d'éléments minéraux.

L'ensemble des formulations sauf une (une des trois formulations témoin) sont conformes aux valeurs limites permettant de justifier toutes les utilisations prévues dans le guide SETRA « Acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière – Evaluation environnementale ».

Par conséquent, ces matériaux, en fin de vie, pourraient être a priori valorisés en technique routière quelque soit leur taux d'incorporation de granulats recyclés, dans les conditions du programme RECYBETON.

Il convient de considérer ces résultats avec prudence avant leur généralisation, en tenant compte notamment du fait que les essais ont été réalisés sur des bétons jeunes et par conséquent de l'absence de vieillissement des éprouvettes.

De plus, en ce qui concerne l'évaluation de l'aptitude à la valorisation de ces matériaux à une utilisation en couche de roulement béton, il est indiqué au §2.2.3.2.2 du guide d'application en projet que « si le matériau alternatif est traité avec du ciment, un liant hydraulique routier et/ou à la chaux, la vérification de la conformité du matériau routier avec le référentiel d'acceptabilité environnementale n'est pas nécessaire ».

Conclusion

La revue bibliographique des travaux de recherche sur le comportement à la lixiviation des bétons recyclés a montré que celui-ci était peu différent du comportement à la lixiviation de bétons à base de granulats naturels et que le paramètre déterminant du relargage de ces matériaux est le pH. Les facteurs d'environnement tels que l'exposition à la carbonatation ou encore aux sels de déverglaçage peuvent avoir une action défavorable sur l'émission de substances dans l'eau.

Les résultats de variation observée du relargage des matériaux fragmentés montrent que l'apport de granulats recyclés, dans les conditions du programme RECYBETON, ne se traduit pas par une modification significative du relargage sauf un relargage légèrement diminué en cuivre, plomb et sulfates et légèrement augmenté en chlorures.

En conditions dynamiques, seuls le baryum, les chlorures et les sulfates présentent des concentrations détectables dans les éluats. L'évolution de leur relargage dans le temps est caractéristique d'un mécanisme de relargage par diffusion. Les conditions de pH restant très proches, les niveaux de relargage sont très peu différents entre les trois formulations.

En l'absence de procédure officielle définissant les conditions acceptables d'un point de vue environnemental du niveau de relargage par diffusion de matériaux de construction, il n'est pas possible de positionner les différents matériaux étudiés ici au regard de l'exigence fondamentale EF 3 vis-à-vis de l'émission de substances dans l'eau.

En ce qui concerne la fin de vie des matériaux, l'ensemble des formulations testées au cours de cette étude se sont montrées conformes aux valeurs limites définies dans le projet d'Arrêté de sortie de statut de déchet des granulats issus de déchets du BTP pour un usage routier de type 3 (le plus restrictif). L'ensemble des formulations sauf une (une des trois formulations témoin) sont conformes aux valeurs limites permettant de justifier toutes les utilisations prévues dans le guide SETRA « Acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière – Evaluation environnementale ».

Par conséquent, ces matériaux, en fin de vie, pourraient être valorisés en technique routière quelque soit leur taux d'incorporation de granulats recyclés, dans les conditions de formulation du programme RECYBETON. Ces résultats obtenus sur les matériaux granulaires issus du concassage du béton recyclé peuvent permettre de répondre à l'Exigence Fondamentale n°7 a)¹ sous réserve que la carbonatation modifie peu le comportement au relargage des métaux, en considérant (hors contamination durant leur vie en œuvre) que les bétons incorporant des granulats recyclés présentent des caractéristiques de relargage d'éléments dans l'eau conformes aux conditions acceptables pour un usage en technique routière.

La vérification de l'influence de la carbonatation sur le relargage des bétons recyclés et du béton témoin pourraient être une perspective de complément pour cette étude.

¹ « La réutilisation ou la recyclabilité des ouvrages de construction, de leurs matériaux et de leurs parties après démolition »

Annexes

Annexe 1- Fiches techniques d'élaboration des matériaux testés (IFSTTAR)



Groupe MIT	Gâchée de béton Feuille d'essai
-------------------	--

Date : 12/08/2014	N° d'affaire : MIT 12-22, RPW0F12554, PN Recyt	Nom gâchée : C30-DR-DR-vernus
-----------------------------	--	---

Description sommaire de l'essai :

beton fabriquées pour M Vernus cf mail du 9 juillet 2014

Taux de remplissage envisagé (en l): 20

Formule théorique sur granulats secs en kg/m3			Teneur en eau		Masse humide (en kg)
N° Lot	Constituant	Masse	<input type="checkbox"/>		
	Eau d'ajout	190			3,699
MH13-005	Cem I/A-L 42.5 N Rochefort	270	<input type="checkbox"/>		5,400
MH12-034	Filler Calc Bertocarb HP EB	45	<input type="checkbox"/>		0,900
MH12-133	Sable Sandrancourt 0/4	780	<input checked="" type="checkbox"/>	0,29%	15,648
MH14-127	Sable recyclé 0/4 ECN		<input type="checkbox"/>		
MH12-134	Gravillon Givet 4/10	267	<input checked="" type="checkbox"/>	0,29%	5,355
MH12-131	Gravillon recycle 4/10		<input type="checkbox"/>		
MH12-135	Gravillon Givet 6,3/20	820	<input checked="" type="checkbox"/>	0,25%	16,441
MH12-132	Gravillon recycle 10/20		<input type="checkbox"/>		
MH12-145	Sp MC PowerFlow 3140	1,31	<input type="checkbox"/>		0,026
			<input type="checkbox"/>		
			<input type="checkbox"/>		

Protocole de fabrication utilisé :

0' - 1' malaxage à sec
1' - 1'30" introduction eau+ adjuvants
1'30"-5'00 malaxage

Enregistrements effectués :

Eprouvettes réalisées :

Affaissement en cm (NFP 18-451)
13

Air occlus en % (NFP 18-353)

Densité :

Aéromètre	kg
Aéromètre + béton	kg
Aéromètre+ béton+eau	kg
Masse vol.	kg/m ³

Remarques et décisions :

Opérateur(s) :
(Nom+Signature)



Groupe MIT	Gâchée de béton Feuille d'essai
-------------------	--

Date : 12/08/2014	N° d'affaire : MIT 12-22, RPWDF 12554, PN Recyt	Nom gâchée : C30-0R-30R-Vernus
-----------------------------	---	--

A.L. :

Description sommaire de l'essai :

beton fabriqué pour M Vernus cf mail du 9 juillet 2014

Taux de remplissage envisagé (en l):

20

Formule théorique sur granulats secs en kg/m3			Teneur en eau	Masse humide (en kg)
N° Lot	Constituant	Masse		
	Eau d'ajout	210		3,712
MH13-005	Cem II/A-L 42.5 N Rochefort	276	<input type="checkbox"/>	5,520
MH-12-034	Filler Calc Bertocarb HP EB	31	<input type="checkbox"/>	0,620
MH12-133	Sable Sandrancourt 0/4	813	<input checked="" type="checkbox"/> 0,29%	16,307
MH14-127	Sable recyclé 0/4 ECN	0	<input type="checkbox"/>	0,000
MH12-134	Gravillon Givet 4/10	228	<input checked="" type="checkbox"/> 0,28%	4,573
MH12-131	Gravillon recycle 4/10		<input type="checkbox"/>	
MH12-135	Gravillon Givet 6,3/20	462	<input checked="" type="checkbox"/> 0,25%	9,263
MH12-132	Gravillon recycle 10/20	296	<input checked="" type="checkbox"/> 6,64%	6,325
MH12-145	Sp MC PowerFlow 3140	1,51	<input type="checkbox"/>	0,030
			<input type="checkbox"/>	
			<input type="checkbox"/>	

Protocole de fabrication utilisé :

0' - 1' malaxage à sec
1' - 1'30" introduction eau+ adjuvants
1'30"-5'00 malaxage

Enregistrements effectués :

--

Echantillons réalisés :

--

Affaissement en cm (NFP 18-451)

21

Air occlus en % (NFP 18-353)

--

Remarques et décisions :

--

Densité :

Aéromètre	kg
Aéromètre + béton	kg
Aéromètre+ béton+eau	kg
Masse vol.	kg/m ³

Opérateur(s) :
(Nom+Signature)

--



Groupe MIT	Gâchée de béton Feuille d'essai
-------------------	--

Date : 12/08/2014	N° d'affaire : MIT 12-22, RPW0F12554, PN Recyt	Nom gâchée : C30-100R-100R-Vernus
-----------------------------	--	---

Alvol

Description sommaire de l'essai :

beton fabriqué pour M Vernus cf mail du 9 juillet 2014
--

Taux de remplissage envisagé (en l):

20

Formule théorique sur granulats secs en kg/m ³			Teneur en eau	Masse humide (en kg)
N° Lot	Constituant	Masse		
	Eau d'ajout	303		3,722
MH13-005	Cem III/A-L 42.5 N Rochefort	326	<input type="checkbox"/>	6,520
MH12-034	Filler Calc Bertocarb HP EB	50	<input type="checkbox"/>	1,000
MH12-133	Sable Sandrancourt 0/4		<input type="checkbox"/>	
MH14-127	Sable recyclé 0/4	673	<input checked="" type="checkbox"/> 9,89%	14,791
MH12-134	Gravillon Givet 4/10		<input type="checkbox"/>	
MH12-131	Gravillon recycle 4/10	304	<input checked="" type="checkbox"/> 6,61%	6,482
MH12-135	Gravillon Givet 6,3/20		<input type="checkbox"/>	
MH12-132	Gravillon recycle 10/20	442	<input checked="" type="checkbox"/> 6,84%	9,444
MH12-145	Sp MC PowerFlow 3140	1,18	<input type="checkbox"/>	0,024
MH 13-002	Ret Centrament retard 370	2,6	<input type="checkbox"/>	0,052
			<input type="checkbox"/>	

Protocole de fabrication utilisé :

0' - 1' malaxage à sec 1' - 1'30" introduction eau+ adjuvants 1'30"-5'00 malaxage

Enregistrements effectués :

--

Eprouvettes réalisées :

--

Affaissement en cm (NFP 18-451)

2-1

Air occlus en % (NFP 18-353)

--

Remarques et décisions :

--

Densité :

Aéromètre	kg
Aéromètre + béton	kg
Aéromètre+ béton+eau	kg
Masse vol.	kg/m ³

Opérateur(s) :
(Nom+Signature)

--

Annexe 2- Rappel des objectifs généraux des essais de lixiviation

L'objectif général des essais de lixiviation est de quantifier la mobilité des espèces chimiques (polluantes ou non) présentes dans des matrices solides (déchets ou matériaux à base de déchets par exemple) dans un lixiviant donné.

Le comité technique (TC 292) chargé de la caractérisation des déchets au CEN (Comité Européen de Normalisation) spécifie que le but des essais de caractérisation et de détermination des constituants qui peuvent être lixiviés à partir des déchets est d'identifier les propriétés des déchets vis-à-vis de la lixiviation. Tous les aspects importants du comportement à la lixiviation ne peuvent pas être pris en compte en une seule norme et les essais permettant de caractériser le comportement des déchets peuvent généralement être classés en trois catégories :

- Les essais de « caractérisation de base » ont pour but d'obtenir des informations sur les propriétés caractéristiques des déchets et sur leur comportement à court et à long terme dans les conditions imposées par le scénario² considéré. Les rapports liquide / Solide (L/S), la composition du lixiviant, les facteurs contrôlant la lixivabilité comme le pH, le potentiel redox, la capacité de complexation et les paramètres physiques sont pris en compte dans ces essais. Ces essais de caractérisation de base peuvent eux-mêmes être classés en deux catégories :
 - les **essais statiques** visant à atteindre l'équilibre pour un certain nombre de paramètres (tels que le pH) : l'essai normalisé XP CEN/TS 14429 et l'essai normalisé XP CEN/TS 14997 ;
 - les **essais dynamiques** visant à déterminer la dynamique de relargage du matériau dans des conditions standards : l'essai normalisé de percolation NF CEN/TS 14405 sur déchets granulaires et les essais normalisés CEN/TS 15863 et CEN/TS 15864 sur les déchets monolithiques qui repose sur deux modes de renouvellement du lixiviant : en batch (liquide renouvelé périodiquement) et en continu (liquide renouvelé en continu)
- Les essais de « conformité » servent à déterminer si le déchet est en conformité avec des seuils de référence spécifiques. Ces essais sont focalisés sur des variables-clés et sur le comportement à la lixiviation identifié par les essais de caractérisation de base.
- Les essais de « vérification in situ » servent à vérifier rapidement que le déchet est le même que celui qui a subi le / les essai(s) de conformité. Ces essais de vérification sur place sont généralement des essais de lixiviation très courts (10 minutes), mais également des contrôles de température ou de radioactivité, ...

² Scénario : Description d'un ensemble de conditions normales et exceptionnelles pertinentes pour une situation particulière de stockage ou d'utilisation de déchets/matériaux dans le milieu naturel, en vue de la détermination du comportement à la lixiviation sur une période spécifiée

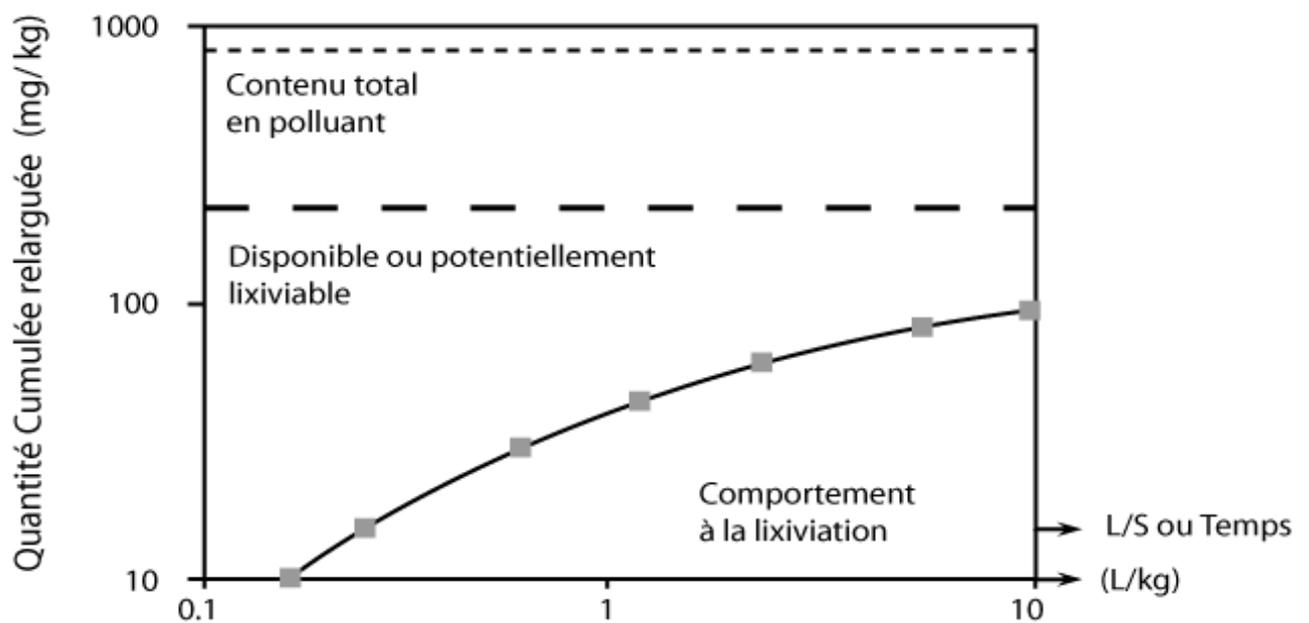
Quels que soient les pays concernés et les normes existantes, la mise en œuvre d'un test de lixiviation est constituée des étapes suivantes :

1. Constitution d'un échantillon représentatif du déchet brut à tester (selon le Fascicule de Documentation FD CEN/TR 15310 de Mars 2007) ;
2. Détermination de l'état physique du déchet : solide (massif ou granulaire) ou boueux . Cette opération peut être suivie selon les cas d'un concassage ou broyage du déchet pour obtenir une taille de particule maximale (10 mm, 4 mm ou 1 mm selon les cas)
3. Détermination de paramètres globaux caractéristiques de la matrice déchet testée : couleur, taux d'humidité, fraction soluble , COT, contenu en polluant total (Métaux Lourds, Composés Organiques ou Minéraux Toxiques, ...)
4. Choix de l'agent lixiviant (eau déminéralisée ou solutions aqueuses à pH contrôlé initial ou régulé tout au long du test), choix du rapport L/S (constant ou variable en fonction du temps t de contact Liquide/Solide) et du mode de renouvellement (périodique ou continu)
5. Mise en route du processus contact/extraction selon un temps déterminé avec ou sans répétition (conformément à 4.)
6. Séparation Liquide/Solide par filtration ou centrifugation pour obtenir le lixiviat ou n fractions d'éluats (L1, L2, L3,...Li, ...Ln) destinés à l'analyse chimique ou à des tests spécifiques d'écotoxicité
7. Analyses, tests et résultats – A partir des valeurs de concentrations des composés polluants relargués on procède :
 - Soit (cas de la conformité) à une comparaison des valeurs de concentrations ou de relargage rapporté à la masse ou à la surface d'échange obtenus avec les différentes valeurs réglementaires (mise en décharge, valorisation).
 - Soit (cas de la caractérisation de base) à une interprétation des courbes obtenues (concentrations ou quantités cumulées relarguées en fonction du temps, ou en fonction du pH ou du ratio L/S ...) ce qui permet d'identifier les principaux mécanismes de relargage et d'alimenter les différents modèles de comportement à la lixiviation.

Les différents paramètres qui varient d'un essai à l'autre sont :

- L'état physique de l'échantillon testé : granulaire ou massif (monolithique). Selon les besoins, un matériau massif peut être broyé à une granulométrie maximum donnée pour subir un essai de lixiviation donné.
- La nature de l'agent lixiviant : il peut s'agir d'eau pure (eau désionisée et saturée en air à 20°C) ou de solutions aqueuses contenant des espèces chimiques (acides, bases, sels, complexants,) à des concentrations fixées.

- Le rapport Liquide / Solide peut être soit fixé au départ du test (exemple L/S = 10 l/kg) soit varier de façon continue tout au long du test de lixiviation (le rapport peut ainsi varier de 0 à plus de 100 très facilement). Il est nécessaire pour comparer des potentiels polluants de fixer ce rapport par unité de masse de matière sèche.
- Le nombre d'étapes successives de lixiviation : après une première étape de lixiviation (en particulier dans le cas de tests où le rapport Eau/Matrice (masse sèche) est fixé) certains essais prévoient de répéter successivement plusieurs fois la lixiviation.
- En faisant varier la durée t de chaque opération de lixiviation on vise soit à établir une cinétique de mise en solution voire à observer un état d'équilibre



- Les conditions bio-physico-chimiques : les paramètres qui déterminent ces conditions sont de manière générale : la température T , l'état de saturation en eau (saturé ou non saturé), le pH (régulé ou non), le potentiel redox E_h (régulé ou non), la concentration en sels, le carbone organique dissous (COD), la présence ou non de micro-organismes, ...
- L'agitation de la solution : mécanique ou par recirculation d'eau

Par ailleurs, le protocole de test doit fournir une ou plusieurs valeurs numériques de L/S (cumulées ou non) en l/kg ou cm^3/cm^2 :

- Soit à partir de la quantité de liquide mise en jeu par rapport au solide sec mis en jeu initialement (essais en batch : EN 12457/1 à 4 ou TS 14429)

- Soit à partir de la quantité de liquide (éluat ou percolat) sortant du réacteur par rapport au solide sec introduit initialement dans le réacteur (essais dynamiques TS 14405 ou TS15864, lysimètres, ...).

Dans la mesure où le débit sortant du réacteur est constant, le ratio L/S est fonction du temps t (la masse de solide S sec m_0 en kg est aussi supposée rester constante tout au long de l'essai).

Remarque : Quel que soit l'essai de lixiviation mis en œuvre, il ne peut être considéré comme un essai suffisant pour, à lui seul, déterminer le comportement et l'impact des déchets ou matériaux testés sur l'environnement.

Annexe 3- Résultats des essais de lixiviation EN 12457-2 sur les éprouvettes de béton

Résultats des lixiviations standards selon la norme NF EN 12457-2			 									
Laboratoire : PROVADEMSE			Essais réalisés sur 150 g d'équivalent masse sèche broyé à 4 mm									
Matériau/Déchet : Eprouvette Beton												
dimension (cm) : 11 x 22 cm												
Date : nov.-14												
Référence de lixiviation			Témoïn			0S 30G			100S 100G			
pH			1410-lix	1411-lix	1412-lix	1416-lix	1417-lix	1418-lix	1422-lix	1423-lix	1424-lix	
pH			12,29	12,33	12,32	12,30	12,33	12,30	12,29	12,29	12,31	
Conductivité $\mu\text{S/cm}$			8455,00	8573	8407	8271	8305	8441	8088	8079	8131	
Potentiel RedOx mV			344,0	345,0	331,0	315,6	316,0	311,0	216,0	181,0	182,0	
fraction soluble mg/l			1,921	1,938	1,905	1,885	1,859	1,871	1,868	1,868	1,872	
fraction soluble g/kg MS			19,2	19,4	19,1	18,8	18,6	18,7	18,7	18,7	18,7	
Fraction lixiviable en mg/kg MS												
n°	Elément	symp	1410-lix	1411-lix	1412-lix	1416-lix	1417-lix	1418-lix	1422-lix	1423-lix	1424-lix	
1	Antimoine	Sb	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	
2	Arsenic	As	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
3	Baryum	Ba	3,470	7,270	3,890	4,360	4,010	3,780	5,160	5,410	4,980	
4	Cadmium	Cd	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	
5	Chrome	Cr	0,360	0,360	0,350	0,460	0,430	0,450	0,380	0,380	0,400	
6	Chrome VI	CrVI	0,380	0,380	0,290	0,460	0,450	0,480	0,410	0,420	0,450	
7	Cuivre	Cu	0,100	0,400	0,600	0,200	0,200	0,200	0,100	0,100	0,100	
8	Mercure	Hg	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	
9	Molybdène	Mo	0,110	0,110	0,100	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,100	
10	Nickel	Ni	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
11	Plomb	Pb	<0,05	0,130	0,110	0,150	0,050	0,050	0,060	<0,05	<0,05	
12	Sélénium	Se	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
13	Zinc	Zn	<0,2	0,300	<0,2	0,200	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
14	Fluorure	F-	13,000	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	
15	Chlorure	Cl-	47,200	52,100	47,100	53,400	45,700	45,000	90,400	89,800	88,800	
16	Sulfate	SO ₄ ²⁻	80,800	82,800	83,400	75,400	71,100	69,300	59,300	56,500	61,600	

Annexe 4- Résultats des essais de lixiviation sur monolithe sur les éprouvettes de béton
Eprouvette témoin N°1410

Résultats expérimentaux - Essai TS2								
Laboratoire :	PROVADEMSE	Masse humide initiale	g	129,85				
Matériau/Déchet :	1410	Taux de matière sèche	%	95,13%				
dimension (cm) :	3,8 x 3,93 x 3,8	Masse sèche	g	123,53				
Date :	nov. - déc.-14	Surface exposée	cm ²	708,93				
Référence de lixiviation		Eluat 1	Eluat 2	Eluat 3	Eluat 4	Eluat 5	Eluat 6	Eluat 7
Volume d'éluat	litre	5671	5671	5671	5671	5671	5671	5671
Durée de contact	jour	0,08	0,92	1,25	5,75	7	13	8
Contact cumulé	jour	0,08	1,00	2,25	8,00	15	28	36
L/S de la séquence	l/kg	45,91	45,91	45,91	45,91	45,91	45,91	45,91
L/S cumulé	l/kg	45,91	91,83	137,74	183,65	229,56	275,48	321,39
L/A de la séquence	l/m ²	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
L/A cumulé	l/m ²	8,00	16,00	24,00	32,00	40,00	48,00	56,00
pH		10,48	11,39	11,16	11,12	11,50	11,55	11,38
Conductivité	µS/cm	179,20	841,10	511,80	505,60	993,00	1183,10	752,00
Potentiel RedOx	mV	311,80	345,00	313,00	401,00	343,00	362,00	566,00


Concentration en mg/l

n°	Elément	symp	ld	Eluat 1	Eluat 2	Eluat 3	Eluat 4	Eluat 5	Eluat 6	Eluat 7
1*	Antimoine	Sb	0,0002	<0,0002	0,00023	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
2*	Arsenic	As	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
3	Baryum	Ba	0,005	0,012	0,027	0,023	0,021	0,022	0,031	0,014
4*	Cadmium	Cd	0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
5*	Chrome	Cr	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
6*	Chrome VI	CrVI	0,010	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,012	<0,01
7*	Cuivre	Cu	0,010	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
8*	Mercure	Hg	0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
9*	Molybdène	Mo	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,007	<0,005	<0,005
10*	Nickel	Ni	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
11*	Plomb	Pb	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
12*	Sélénium	Se	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
13*	Zinc	Zn	0,020	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
14*	Fluorure	F-	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
15	Chlorure	Cl-	1,0	1,910	1,940	2,640	1,410	1,690	1,410	2,010
16	Sulfate	SO4 ²⁻	5,0	<5,00	<5,00	<5,00	5,120	<5,00	6,600	5,780

Quantités extraites cumulées en mg/kg

n°	Elément	symb		Eluat 1	Eluat 2	Eluat 3	Eluat 4	Eluat 5	Eluat 6	Eluat 7
1*	Antimoine	Sb		0,005	0,01515	0,020	0,024	0,029	0,034	0,038
2*	Arsenic	As		0,115	0,230	0,344	0,459	0,574	0,689	0,803
3	Baryum	Ba		0,551	1,791	2,847	3,797	4,807	6,230	6,873
4*	Cadmium	Cd		0,005	0,009	0,014	0,018	0,023	0,028	0,032
5*	Chrome	Cr		0,115	0,230	0,344	0,459	0,574	0,689	0,803
6*	Chrome VI	CrVI		0,230	0,459	0,689	0,918	1,148	1,699	1,928
7*	Cuivre	Cu		0,230	0,459	0,689	0,918	1,148	1,377	1,607
8*	Mercure	Hg		0,005	0,009	0,014	0,018	0,023	0,028	0,032
9*	Molybdène	Mo		0,115	0,230	0,344	0,459	0,781	0,895	1,010
10*	Nickel	Ni		0,115	0,230	0,344	0,459	0,574	0,689	0,803
11*	Plomb	Pb		0,115	0,230	0,344	0,459	0,574	0,689	0,803
12*	Sélénium	Se		0,115	0,230	0,344	0,459	0,574	0,689	0,803
13*	Zinc	Zn		0,459	0,918	1,377	1,837	2,296	2,755	3,214
14*	Fluorure	F-		11,478	22,956	34,435	45,913	57,391	68,869	80,347
15	Chlorure	Cl-		87,693	176,764	297,973	362,710	440,303	505,040	597,324
16	Sulfate	SO4 ²⁻		114,782	229,563	344,345	579,418	694,200	997,223	1262,599

Quantités extraites cumulées en mg/m2

n°	Elément	symb		Eluat 1	Eluat 2	Eluat 3	Eluat 4	Eluat 5	Eluat 6	Eluat 7
1*	Antimoine	Sb		0,0008	0,0026	0,0034	0,0042	0,005	0,006	0,007
2*	Arsenic	As		0,0200	0,040	0,060	0,080	0,100	0,120	0,140
3	Baryum	Ba		0,096	0,312	0,496	0,662	0,838	1,086	1,198
4*	Cadmium	Cd		0,0008	0,0016	0,0024	0,0032	0,004	0,005	0,006
5*	Chrome	Cr		0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,140
6*	Chrome VI	CrVI		0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,30	0,336
7*	Cuivre	Cu		0,040	0,080	0,120	0,160	0,200	0,240	0,280
8*	Mercure	Hg		0,0008	0,0016	0,0024	0,0032	0,004	0,005	0,006
9*	Molybdène	Mo		0,020	0,040	0,060	0,080	0,136	0,156	0,176
10*	Nickel	Ni		0,020	0,040	0,060	0,080	0,100	0,120	0,140
11*	Plomb	Pb		0,0200	0,0400	0,060	0,080	0,100	0,120	0,140
12*	Sélénium	Se		0,0200	0,0400	0,060	0,080	0,100	0,120	0,140
13*	Zinc	Zn		0,080	0,160	0,240	0,320	0,400	0,480	0,560
14*	Fluorure	F-		2,00	4,00	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0
15	Chlorure	Cl-		15,3	30,8	51,9	63	77	88	104
16	Sulfate	SO4 ²⁻		20	40	60	101	121	174	220

Eprouvette d'essai N°1416 – 30% Gravillons recyclés

Résultats expérimentaux - Essai TS2								
Laboratoire :	PROVADEMSE	Masse humide initie	g	129,48				
Matériau/Déchet :	1416	Taux de matière sèr	%	95,38%				
dimension (cm) :	3,95 x 3,95 x 3,82	Masse sèche	g	123,50				
Date :	nov. - déc.-14	Surface exposée	cm ²	732,49				
Référence de lixiviation		Eluat 1	Eluat 2	Eluat 3	Eluat 4	Eluat 5	Eluat 6	Eluat 7
Volume d'éluat	ml	5860	5860	5860	5860	5860	5860	5860
Durée de contact	jour	0,08	0,92	1,25	5,75	7	13	8
Contact cumulé	jour	0,08	1,00	2,25	8,00	15	28	36
L/S de la séquence	ml/g	47,45	47,45	47,45	47,45	47,45	47,45	47,45
L/S cumulé	ml/g	47,45	94,90	142,35	189,80	237,25	284,70	332,15
L/A de la séquence	l/m ²	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
L/A cumulé	l/m ²	8,00	16,00	24,00	32,00	40,00	48,00	56,00
pH		10,51	11,39	11,16	11,61	11,55	11,47	11,42
Conductivité	µS/cm	156,80	788,60	499,50	1393,00	1096,00	915,80	718,30
Potentiel RedOx (mV/ENH)	mV	337,90	376,50	376,50	386,00	352,00	347,00	344,50

Concentration en mg/l

n°	Elément	symp	0,0002	Eluat 1	Eluat 2	Eluat 3	Eluat 4	Eluat 5	Eluat 6	Eluat 7
1*	Antimoine	Sb	0,0002	<0,0002	0,00022	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
2*	Arsenic	As	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
3	Baryum	Ba	0,005	0,010	0,025	0,016	0,035	0,025	0,020	0,013
4*	Cadmium	Cd	0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
5*	Chrome	Cr	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
6*	Chrome VI	CrVI	0,010	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010	<0,01
7*	Cuivre	Cu	0,0100	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
8*	Mercure	Hg	0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
9*	Molybdène	Mo	0,0050	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005	<0,005	<0,0002
10*	Nickel	Ni	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
11*	Plomb	Pb	0,0050	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
12*	Sélénium	Se	0,0050	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
13*	Zinc	Zn	0,020	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
14*	Fluorure	F-	0,500	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
15	Chlorure	Cl-	1,000	2,270	2,170	2,240	1,950	1,410	1,400	1,440
16	Sulfate	SO4 ²⁻	5,000	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	5,530	5,840

Quantités extraites cumulées en mg/kg

n°	Elément	symb		Eluat 1	Eluat 2	Eluat 3	Eluat 4	Eluat 5	Eluat 6	Eluat 7
1*	Antimoine	Sb		0,005	0,01518	0,020	0,025	0,029	0,034	0,039
2*	Arsenic	As		0,119	0,237	0,356	0,474	0,593	0,712	0,830
3	Baryum	Ba		0,474	1,661	2,420	4,076	5,262	6,211	6,847
4*	Cadmium	Cd		0,005	0,009	0,014	0,019	0,024	0,028	0,033
5*	Chrome	Cr		0,119	0,237	0,356	0,474	0,593	0,712	0,830
6*	Chrome VI	CrVI		0,237	0,474	0,712	0,949	1,186	1,661	1,898
7*	Cuivre	Cu		0,237	0,474	0,712	0,949	1,186	1,423	1,661
8*	Mercure	Hg		0,005	0,009	0,014	0,019	0,024	0,028	0,033
9*	Molybdène	Mo		0,119	0,237	0,356	0,474	0,712	0,830	0,835
10*	Nickel	Ni		0,119	0,237	0,356	0,474	0,593	0,712	0,830
11*	Plomb	Pb		0,119	0,237	0,356	0,474	0,593	0,712	0,830
12*	Sélénium	Se		0,119	0,237	0,356	0,474	0,593	0,712	0,830
13*	Zinc	Zn		0,474	0,949	1,423	1,898	2,372	2,847	3,321
14*	Fluorure	F-		11,862	23,725	35,587	47,449	59,312	71,174	83,036
15	Chlorure	Cl-		107,710	210,675	316,962	409,488	476,392	542,821	611,148
16	Sulfate	SO4 ²⁻		118,623	237,247	355,870	474,494	593,117	855,512	1132,617

Quantités extraites cumulées en mg/m²

n°	Elément	symb		Eluat 1	Eluat 2	Eluat 3	Eluat 4	Eluat 5	Eluat 6	Eluat 7
1*	Antimoine	Sb		0,0008	0,0026	0,0034	0,0042	0,005	0,006	0,007
2*	Arsenic	As		0,0200	0,040	0,060	0,080	0,100	0,120	0,140
3	Baryum	Ba		0,080	0,280	0,408	0,687	0,887	1,047	1,154
4*	Cadmium	Cd		0,0008	0,0016	0,0024	0,0032	0,004	0,005	0,006
5*	Chrome	Cr		0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,140
6*	Chrome VI	CrVI		0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,28	0,320
7*	Cuivre	Cu		0,040	0,080	0,120	0,160	0,200	0,240	0,280
8*	Mercure	Hg		0,0008	0,0016	0,0024	0,0032	0,004	0,005	0,006
9*	Molybdène	Mo		0,020	0,040	0,060	0,080	0,120	0,140	0,141
10*	Nickel	Ni		0,020	0,040	0,060	0,080	0,100	0,120	0,140
11*	Plomb	Pb		0,0200	0,0400	0,060	0,080	0,100	0,120	0,140
12*	Sélénium	Se		0,0200	0,0400	0,060	0,080	0,100	0,120	0,140
13*	Zinc	Zn		0,080	0,160	0,240	0,320	0,400	0,480	0,560
14*	Fluorure	F-		2,00	4,00	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0
15	Chlorure	Cl-		18,2	35,5	53,4	69	80	92	103
16	Sulfate	SO4 ²⁻		20	40	60	80	100	144	191

Eprouvette d'essai N°1422 – 100% Granulats recyclés

Résultats expérimentaux - Essai TS2								
Laboratoire :	PROVADEMSE	Masse humide initie	g	121,07				
Matériau/Déchet :	1422	Taux de matière sèr	%	95,58%				
dimension (cm) :	4 x 3,82 x 3,96	Masse sèche	g	115,72				
Date :	nov. - déc.-14	Surface exposée	cm ²	244,48				
Référence de lixiviation		Eluat 1	Eluat 2	Eluat 3	Eluat 4	Eluat 5	Eluat 6	Eluat 7
Volume d'éluat	ml	5860	5860	5860	5860	5860	5860	5860
Durée de contact	jour	0,08	0,92	1,25	5,75	7	13	8
Contact cumulé	jour	0,08	1,00	2,25	8,00	15	28	36
L/S de la séquence	ml/g	47,45	47,45	47,45	47,45	47,45	47,45	47,45
L/S cumulé	ml/g	47,45	94,90	142,35	189,80	237,25	284,70	332,15
L/A de la séquence	l/m ²	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
L/A cumulé	l/m ²	8,00	16,00	24,00	32,00	40,00	48,00	48,00
pH		10,42	11,42	11,22	11,59	11,52	11,53	11,38
Conductivité	µS/cm	151,20	844,70	547,00	1207,00	1048,00	1139,40	667,60
Potentiel RedOx	mV	319,30	357,00	371,70	383,00	358,00	296,30	361,50


Concentration en mg/l

n°	Elément	symp	0,0002	Eluat 1	Eluat 2	Eluat 3	Eluat 4	Eluat 5	Eluat 6	Eluat 7
1*	Antimoine	Sb	0,0002	<0,0002	0,00021	0,00020	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
2*	Arsenic	As	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
3	Baryum	Ba	0,005	0,012	0,034	0,020	0,030	0,032	0,038	0,021
4*	Cadmium	Cd	0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
5*	Chrome	Cr	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
6*	Chrome VI	CrVI	0,010	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,011	<0,01
7*	Cuivre	Cu	0,0100	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
8*	Mercure	Hg	0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
9*	Molybdène	Mo	0,0050	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
10*	Nickel	Ni	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
11*	Plomb	Pb	0,0050	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
12*	Sélénium	Se	0,0050	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
13*	Zinc	Zn	0,020	<0,02	0,020	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
14*	Fluorure	F-	0,500	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
15	Chlorure	Cl-	1,000	3,340	2,570	2,860	2,770	2,120	1,770	1,780
16	Sulfate	SO4 ²⁻	5,000	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	5,730	6,240	6,130

Quantités extraites cumulées en mg/kg

n°	Elément	symb		Eluat 1	Eluat 2	Eluat 3	Eluat 4	Eluat 5	Eluat 6	Eluat 7
1*	Antimoine	Sb		0,005	0,01471	0,02420	0,029	0,034	0,038	0,043
2*	Arsenic	As		0,119	0,237	0,356	0,474	0,593	0,712	0,830
3	Baryum	Ba		0,569	2,183	3,132	4,541	6,059	7,862	8,849
4*	Cadmium	Cd		0,005	0,009	0,014	0,019	0,024	0,028	0,033
5*	Chrome	Cr		0,119	0,237	0,356	0,474	0,593	0,712	0,830
6*	Chrome VI	CrVI		0,237	0,474	0,712	0,949	1,186	1,708	1,945
7*	Cuivre	Cu		0,237	0,474	0,712	0,949	1,186	1,423	1,661
8*	Mercure	Hg		0,005	0,009	0,014	0,019	0,024	0,028	0,033
9*	Molybdène	Mo		0,119	0,237	0,356	0,474	0,593	0,712	0,830
10*	Nickel	Ni		0,119	0,237	0,356	0,474	0,593	0,712	0,830
11*	Plomb	Pb		0,119	0,237	0,356	0,474	0,593	0,712	0,830
12*	Sélénium	Se		0,119	0,237	0,356	0,474	0,593	0,712	0,830
13*	Zinc	Zn		0,474	1,423	1,898	2,372	2,847	3,321	3,796
14*	Fluorure	F-		11,862	23,725	35,587	47,449	59,312	71,174	83,036
15	Chlorure	Cl-		158,481	280,426	416,131	547,566	648,158	732,144	816,604
16	Sulfate	SO4 ²⁻		118,623	237,247	355,870	474,494	746,379	1042,463	1333,327

Quantités extraites cumulées en mg/m²

n°	Elément	symb		Eluat 1	Eluat 2	Eluat 3	Eluat 4	Eluat 5	Eluat 6	Eluat 7
1*	Antimoine	Sb		0,0008	0,0025	0,0041	0,0049	0,006	0,006	0,007
2*	Arsenic	As		0,0200	0,040	0,060	0,080	0,100	0,120	0,140
3	Baryum	Ba		0,096	0,368	0,528	0,766	1,022	1,326	1,492
4*	Cadmium	Cd		0,0008	0,0016	0,0024	0,0032	0,004	0,005	0,006
5*	Chrome	Cr		0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,140
6*	Chrome VI	CrVI		0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,29	0,328
7*	Cuivre	Cu		0,040	0,080	0,120	0,160	0,200	0,240	0,280
8*	Mercure	Hg		0,0008	0,0016	0,0024	0,0032	0,004	0,005	0,006
9*	Molybdène	Mo		0,020	0,040	0,060	0,080	0,100	0,120	0,140
10*	Nickel	Ni		0,020	0,040	0,060	0,080	0,100	0,120	0,140
11*	Plomb	Pb		0,0200	0,0400	0,060	0,080	0,100	0,120	0,140
12*	Sélénium	Se		0,0200	0,0400	0,060	0,080	0,100	0,120	0,140
13*	Zinc	Zn		0,080	0,240	0,320	0,400	0,480	0,560	0,640
14*	Fluorure	F-		2,00	4,00	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0
15	Chlorure	Cl-		26,7	47,3	70,2	92	109	123	138
16	Sulfate	SO4 ²⁻		20	40	60	80	126	176	225