

Les aspects environnementaux

Version de janvier 2014

1	Introduction.....	1
2	Acceptabilité environnementale du matériau (présentant notamment l'application de la démarche « acceptabilité du SETRA » au matériau)	2
3	étude spécifique (niveau 3 du guide SETRA 2011)	6
3.1	Etude du comportement (altération, relargage) du matériau en situation - Norme méthodologique EN 12920+A1 (2008)	7
3.2	Essais complémentaires de caractérisation environnementale en laboratoire	8
3.3	Modélisation	10
3.4	Détermination du transfert et des impacts par les ressources en eau.....	10
3.4.1	Intérêt d'évaluer les impacts sur les ressources en eau	11
3.4.2	Diagnostic de site et caractérisation du terme-source	12
3.4.3	L'évaluation des risques pour les ressources en eau	13
3.5	Détermination de l'impact sur les écosystèmes.....	16
3.5.1	Intérêt d'évaluer les impacts sur les écosystèmes	16
3.5.2	Principes de l'évaluation des risques pour les écosystèmes.....	17
4	Auteurs et relecteurs.....	19

1 Introduction

Les activités humaines n'ont pas été suffisamment prises en compte au 20ème siècle. La conséquence en est que des problèmes environnementaux sont observés près de deux siècles après la révolution industrielle : dégradation de l'environnement, surexploitation des ressources. Toutes ces conséquences dépendent de notre façon de produire et de consommer. Le développement durable permet de répondre aux multiples défis auxquels nous devons faire face en particulier en génie civil, en intégrant, dans le processus de décision, les composantes environnementales et sociales.

Dans ce cadre, la France s'était engagée à stabiliser ses émissions de gaz à effet de serre au niveau de 1990 soit 563,9 millions de tonnes équivalent CO₂ par an (MteqCO₂) de 1990 à 2012. En parallèle, les autres problèmes environnementaux liés aux déchets, pollutions d'air, ressources non renouvelables sont de plus en plus intégrés dans les politiques environnementales en France.

De façon générale, l'impact environnemental d'un matériau intégré dans une infrastructure doit être déterminé de manière globale, et peut éventuellement faire appel à différents types d'études, pluridisciplinaires, en fonction des cibles potentielles considérées :

1. Impacts globaux tout au long du cycle de vie : recours à des approches type ACV ([fiche généralités sur l'ACV](#))
2. Impacts locaux :

- transfert vers les eaux souterraines, études du comportement à la lixiviation du matériau et modélisation hydraulique et hydrogéologique ;
- transfert vers les eaux de surface, études du comportement à la lixiviation du matériau et modélisation hydraulique ;
- impacts sur la faune et la flore (directs ou indirects), études du comportement à la lixiviation du matériau et études écotoxicologiques sur plusieurs bio-marqueurs ;

Les grands principes de ces différents types d'études sont présentés ci-après afin de donner des éléments de compréhension et de connaissances vis-à-vis des études et essais cités dans les chapitres « aspects environnementaux » et « aspects sanitaires » des rubriques « produits ».

2 Acceptabilité environnementale du matériau (présentant notamment l'application de la démarche « acceptabilité du SETRA » au matériau)

L'acceptabilité environnementale d'un matériau alternatif utilisé en technique routière se démontre via la démarche du guide méthodologique du même nom, paru en mars 2011 aux éditions SETRA.

Il concrétise ainsi près de 10 années de travaux et initiatives diverses prises par le Ministère en charge de l'Environnement ou celui en charge de l'Équipement.

La démarche d'évaluation environnementale repose sur une connaissance précise :

- du déchet à partir duquel est élaboré le matériau alternatif (étape 1) ;
- du mode d'élaboration du matériau alternatif et du matériau routier associé ainsi que de l'usage routier envisagé (étape 2) ;
- de la caractérisation environnementale des matériaux alternatif et routier (étape 3).

L'objectif global de l'étape de caractérisation environnementale est de démontrer, pour l'usage routier envisagé, que les émissions des matériaux alternatif et routier sont compatibles avec le respect des objectifs de qualité des eaux retenus dans le guide méthodologique.

Cette étape envisage trois niveaux d'investigations permettant, au final, de graduer l'effort de démonstration en fonction du risque que présentent les matériaux concernés, vis-à-vis de l'environnement :

- le niveau 1 repose sur la réalisation d'essais de lixiviation et d'analyses en contenu total ;
- le niveau 2 repose sur la réalisation d'essais de percolation ;
- le niveau 3 repose sur la production d'une étude spécifique.

La production de l'étude spécifique, associée au niveau 3 de caractérisation environnementale, est à envisager lorsque les niveaux 1 et 2 de caractérisation environnementale ne permettent pas de justifier l'acceptabilité en technique routière

d'un matériau alternatif et/ou routier, ou que les procédures ou les essais associés ne semblent pas adaptés à la nature ou au comportement de ces matériaux (cf. §3).

Des valeurs limites sont associées aux deux premiers niveaux (cf. tableaux suivants).

Ce guide permet de compléter le corpus de textes relatifs aux aspects géotechniques (normes de classification et normes produits, guide des remblais et terrassement dit « GTR », guides techniques régionaux, etc.) par des exigences environnementales.

Il a vocation à être décliné en guides d'application par grande famille de matériaux alternatifs (ceux produits à partir de déchets tels que bétons de démolition, mâchefers d'incinération, laitiers sidérurgiques, sédiments de dragage, déblais et autres terres excavées issues de sites pollués, etc.). Chacun de ces guides présentera les résultats de mise en œuvre de la méthodologie à l'échelle du gisement national, à savoir : les principales caractéristiques (composition, relargage), les conditions d'utilisation et les limites d'emploi de même que les règles de contrôle de conformité. Ce sont donc les guides d'application qui seront directement applicables et utilisables à l'échelle de chaque producteur de matériaux alternatifs.

Au printemps 2013, 2 guides d'applications sont disponibles :

- Celui relatif aux laitiers sidérurgiques,
- Celui relatif aux mâchefers d'incinération de déchets non dangereux

Un troisième relatif aux matériaux issus du recyclage des déchets du BTP est prévu au second semestre 2013.

Les tableaux de valeurs limites des niveaux 1 et 2 du guide SETRA 2011 sont reportés ci-dessous en utilisant les intitulés de colonnes définis dans ce guide :

Eléments chimiques	Valeur limite à respecter par au moins 80% des échantillons (mg/kg de matière sèche)	Valeur limite à respecter par au moins 95% des échantillons (mg/kg de matière sèche)	Valeur limite à respecter par 100% des échantillons (mg/kg de matière sèche)
As	0.5	1	1.5
Ba	20	40	60
Cd	0.04	0.08	0.12
Cr Total	0.5	1	1.5
Cu	2	4	6
Hg	0.01	0.02	0.03
Mo	0.5	1	1.5
Ni	0.4	0.8	1.2
Pb	0.5	1	1.5
Sb	0.06	0.12	0.18
Se	0.1	0.2	0.3
Zn	4	8	12
<i>Indice de phénol</i>	1	1	1
Fluorure	10	20	30
Chlorure	800	1 600	2 400
Sulfate	1 000	2 000	3 000
Fraction soluble	4 000	8 000	12 000

Tableau 1: Niveau 1 du guide SETRA 2011 - Tableau 3 de ce guide : Comportement à la lixiviation [NF EN 12457-2] sur trois échantillons du lot à caractériser: Les valeurs limites à respecter pour les quantités relarguées à un ratio liquide/solide (L/S) =10 l/kg

Paramètres	Valeur limite à respecter par au moins 80% des échantillons (mg/kg matière sèche)	Valeurs limites à respecter par 100% des échantillons (mg/kg matière sèche)
COT (carbone organique total)	30 000g	60 000g
BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylène)	6	
PCB (polychlorobiphényles 7 congénères*)	1	
Hydrocarbures (C10 à C40)	500	
HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques)	50	
Dioxines et furannes	10 ng I-TEQ** _{OMS, 2005} /kg	

*Les 7 congénères : 28, 52, 101, 118, 138, 153 et 180.

**TEQ : Toxic Equivalent Quantity

Tableau 2 : Niveau 1 du guide SETRA 2011 - Tableau 4 du guide : Teneur intrinsèque en éléments polluants sur la base d'une analyse en contenu total du lot à caractériser

Eléments chimiques	Valeur (mg/kg de matière sèche)
As	2
Ba	100
Cd	1
Cr Total	10
Cu	50
Hg	0.2
Mo	10
Ni	10
Pb	10
Sb	0.7
Se	0.5
Zn	50
<i>Indice de phénol</i>	1
Fluorure	150
Chlorure	15 000
Sulfate	20 000
Fraction soluble	60 000

Tableau 3 : Niveau 1 du guide SETRA 2011 - Tableau 5 du guide : Comportement à la lixiviation [NF EN 12457-2] sur trois échantillons du lot à caractériser: Les valeurs limites à respecter pour les quantités relarguées à un ratio liquide/solide (L/S) =10 l/kg

	Scénario « sous-couche de chaussée ou d'accotements revêtus »	Scénario « remblais technique ou accotements recouverts »
Eléments chimiques	Valeur (mg/kg de matière sèche)	Valeur (mg/kg de matière sèche)
As	0.8	0.5
Ba	56	28
Cd	0.32	0.16
Cr Total	4	2
Cu	50	50
Hg	0.08	0.04
Mo	5.6	2.8
Ni	1.6	0.8
Pb	0.8	0.5
Sb	0.4	0.2
Se	0.5	0.4
Zn	50	50
Indice de phénol	1	1
Fluorure	60	30
Chlorure	10 000	5 000
Sulfates	10 000	5 000

Tableau 4: Niveau 2 du guide SETRA 2011 - Tableau 6 du guide : Comportement à la percolation [NF CEN/TS 14405] sur trois échantillons du lot à caractériser: Les valeurs limites à respecter pour les quantités relarguées à un ratio liquide/solide (L/S) =10 l/kg

3 Etude spécifique (niveau 3 du guide SETRA 2011)

La production de l'étude spécifique, associée au niveau 3 de caractérisation environnementale, est à envisager lorsque les niveaux 1 et 2 de caractérisation environnementale ne permettent pas de justifier l'acceptabilité en technique routière d'un matériau alternatif et/ou routier, ou que les procédures ou les essais associés ne semblent pas adaptés à la nature ou au comportement de ces matériaux.

Dans les conditions fixées par le guide méthodologique, les investigations à entreprendre peuvent reposer sur :

- la réalisation de modélisations complémentaires ;
- la réalisation d'essais en laboratoire complémentaires ;
- la réalisation d'essais lysimétriques ;
- la réalisation et le suivi de plots expérimentaux (échelle 1).

Un guide a pour objet de fournir une aide à la définition puis à la conduite d'une étude spécifique lorsque les investigations associées reposent sur la réalisation d'essais en laboratoire complémentaires et/ou d'essais lysimétriques et/ou la réalisation et le suivi de plots expérimentaux. CE Guide en cours de révision par un GT animé par le CETE de Lyon regroupant outre le CETE, l'INSA de Lyon, les Mines de Douai, l'INERIS et l'ADEME. Il devrait être disponible mi 2014.

Les sections suivantes vise à apporter des recommandations et des éléments de compréhension des études pouvant être mises en œuvre pour étudier certains scénarios spécifiques tels que :

- Ceux pour lesquels les conditions d'altération du matériau diffèrent significativement de celles régnant dans les infrastructures routières (ex : immersion continue, milieu fortement réducteur),
- Ceux caractérisés par un environnement présentant une sensibilité particulière vis-à-vis des milieux aquatiques et de leurs usages (exemples : zone humide ou couverte par un arrêté de protection de biotope, périmètre de protection rapprochée d'un captage d'alimentation en eau potable, zone de baignade).

3.1 Etude du comportement (altération, relargage) du matériau en situation - Norme méthodologique EN 12920+A1 (2008)

L'objectif de cette norme européenne est de fournir une méthodologie pour la détermination du comportement à la lixiviation d'un déchet dans des conditions spécifiées, c'est-à-dire dans un scénario d'élimination ou d'utilisation sur une période de temps donnée. Cette méthodologie vise à garantir la prise en compte des propriétés spécifiques du déchet et des conditions du scénario.

La méthodologie comporte plusieurs étapes, dont certaines peuvent nécessiter la réalisation d'essais chimiques et/ou biologiques et/ou physiques et/ou de caractérisation minéralogique et/ou d'essais de lixiviation. Les essais sont choisis en fonction de l'objectif, du déchet considéré, du scénario (géométrie de l'ouvrage, conditions d'exposition, horizon de temps) et de la hiérarchisation des paramètres d'influence du scénario sur le déchet.

La méthodologie se compose des sept étapes suivantes :

1) Définition du problème et de la solution recherchée

- Que veut-on étudier et que cherche-t-on ?

2) Description du scénario

- Conditions normales et exceptionnelles d'exposition du déchet dans le scénario étudié
- Identification et hiérarchisation des facteurs d'influence prédominants (et paramètres associés)

3) Description du déchet

- Propriétés physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques

4) Détermination de l'influence de paramètres (physiques, chimiques, etc.) sur le comportement à la lixiviation (par exemple le relargage)

- Mise en œuvre d'essais permettant d'étudier l'influence des paramètres identifiés à l'étape 2 sur les caractéristiques du déchet (étape 3) et notamment son relargage
- Réalisation d'essais simulant l'exposition du déchet dans le scénario (lysimètres de petites dimensions)

5) Modélisation du comportement à la lixiviation

- Mise en équation des phénomènes influençant les propriétés du déchet dans le scénario et donc son relargage (se reporter au guide SETRA 2011)

6) Validation du modèle comportemental

- Vérifier la cohérence des résultats du modèle mathématique avec ceux issus de l'exposition du déchet dans le scénario (lysimètres ou chantiers instrumentés)

7) Conclusion

Cette norme a été largement utilisée en France (et en Europe) pour étudier le relargage de déchets utilisés comme matériaux en travaux publics au cours :

- de programmes de Recherche et Développement menés par le ministère en charge de l'Environnement et/ou les établissements publics placés sous sa tutelle et/ou les producteurs de déchets et/ou les entreprises de TP ;
- de projets réglementaires visant à élaborer des règles d'usage;
- du développement de normes et d'essais pouvant être utilisés au cours de l'étape 4 listée ci-dessus.

Des exemples de tels essais et normes sont décrits plus en détail dans la section suivante.

3.2 Essais complémentaires de caractérisation environnementale en laboratoire

Outre les essais requis par le guide SETRA de 2011, de nombreux essais de laboratoire ont été élaborés afin de déterminer les grandeurs caractéristiques du comportement des déchets (comme la vitesse d'altération, la solubilité...) et l'influence de certains paramètres (comme le pH, la température, la nature de la solution de lixiviation...) sur ces grandeurs. Les différents types d'essais existants sont précisés ci-dessous. Des compléments d'informations peuvent être trouvés dans différentes études, notamment une [étude bibliographique du BRGM](#) (Lassin *et al.*, 2002) et le guide d'usage de la méthode d'évaluation de l'écocompatibilité des scénarios de stockage et de valorisation de l'ADEME (ADEME, 2002).

Essais de caractérisation de base

- Détermination des caractéristiques intrinsèques : ce sont des essais qui fournissent des éléments qui sont indépendants du scénario, à un instant donné et dans des

conditions définies. Par exemple, la composition chimique et minéralogique, la stabilité thermodynamique du matériau, la solubilité, les coefficients de diffusion peuvent être des caractéristiques nécessaires pour la détermination du comportement à la lixiviation du matériau. La connaissance de la minéralogie est importante dans la mesure où certains constituants ou certaines associations de composés peuvent engendrer des réactions indésirables pour la pérennité de l'ouvrage (compatibilité déchet / liant ou inadéquation déchet / utilisation visée).

- Evaluation du comportement à la lixiviation : il s'agit d'évaluer le relargage et l'évolution du relargage à partir d'un matériau par contact avec un agent lixiviant. Pour ce faire, les essais suivants peuvent être réalisés :

- Comme les essais ayant pour objectif de mesurer des paramètres spécifiques, afin d'évaluer l'influence d'un paramètre sur le relargage du matériau. Par exemple, la température, le pH, le rapport L/S, le potentiel d'oxydo-réduction ou le débit d'agent lixiviant peuvent être des facteurs qui influent de manière plus ou moins importante sur le comportement à la lixiviation suivant le matériau et le scénario considérés.
- La norme NF CEN/TS 14429 décrit par exemple un essai de détermination de l'influence du pH sur la solubilisation des constituants d'un déchet. Il permet également d'évaluer la capacité de neutralisation acido-basique de ce déchet.
- A l'instar de la minéralogie, ce type d'essai, est très utile pour la détermination de l'adéquation déchet / liant dans le cas d'un traitement par exemple, en visualisant bien l'évolution du relargage potentiel dans le contexte chimique (pH) que pourra imposer le liant.
- Les essais ayant pour vocation d'évaluer la cinétique de relargage : il s'agit d'essais dans lesquels le déchet est mis en contact avec l'agent lixiviant (en général de l'eau déminéralisée) selon une configuration proche du mode de contact dans l'ouvrage.
- Ces essais étant encore réalisés au stade du laboratoire, les dispositifs expérimentaux sont de petites dimensions. Même si les conditions sont représentatives elles ne simulent pas précisément ce qui se passera dans l'ouvrage. L'important est d'avoir un certain niveau de contrôle des conditions opératoires pour comprendre les phénomènes et mécanismes de relargage, ce que ne permet pas un essai de plus grandes dimensions comme les lysimètres ou les chantiers instrumentés.
- On distingue principalement les essais suivants : l'essai de percolation à flux ascendant (NF EN 14405) et l'essai de lixivation dynamique des monolithes (NF CEN TS15864), le premier référencé dans le guide SETRA 2011 et le second dans le guide d'aide à la définition puis à la conduite d'une étude spécifique lorsque les investigations associées reposent sur la réalisation d'essais en laboratoire complémentaires et/ou d'essais lysimétriques et/ou la réalisation et le suivi de plots expérimentaux.

- Les essais statiques par contact si le déchet granulaire ou monolithique est simplement noyé dans une solution dont la nature est connue. Ici, on se place dans des conditions opératoires où le matériau réel serait totalement en contact avec de l'eau de façon prolongée (l'essai NF CEN/TS 15864 est applicable pour ces conditions).

3.3 Modélisation

La notion de « comportement » peut se définir comme la manière dont un déchet ou plus généralement une matrice réagit ou évolue sous l'influence de contraintes extérieures. La modélisation consiste à élaborer puis à appliquer un modèle de comportement, à partir d'une hiérarchie logique de l'influence des paramètres physiques, biologiques, chimiques et de mise en œuvre identifiés pour l'utilisation envisagée. Cela fournit un ensemble de relation décrivant le comportement à la lixiviation du déchet dans le scénario d'utilisation envisagé.

Cette hiérarchie logique ne doit tenir compte que des principaux paramètres d'influence et éliminer ceux dont l'effet s'avère négligeable ou secondaire (Cf. étapes 2 et 4 de la méthodologie NF EN 12920+A1).

Il faut dans un premier temps comprendre quels sont les phénomènes physico-chimiques qui entrent en jeu lors d'un contact avec un lixiviant. Cette étape permet de connaître les équilibres chimiques à prendre en compte pour chaque élément considéré dans la modélisation du relargage. Les données d'entrée sont fournies par des résultats de caractérisation chimique et minéralogique et/ou des résultats d'essais de détermination de l'influence de paramètres tels que le pH, le potentiel d'oxydo-réduction, la température, les composés organiques dissous. Généralement, afin de prendre en compte l'influence des principaux paramètres liés aux conditions d'exposition, sur le relargage des espèces solubles, une modélisation couplant la chimie du déchet/matériau et ses mécanismes d'altération et de relargage est nécessaire.

Cette modélisation chimique doit ensuite être couplée à une modélisation du relargage qui est basée sur la caractérisation des mécanismes de lixiviation d'un matériau. Les données d'entrée sont fournies par la mise en œuvre d'essais de caractérisation intrinsèque et d'essais de lixiviation dans des conditions les plus représentatives possibles des conditions d'exposition réelles (exemple : essai de percolation à flux ascendant pour les déchets formant un massif percolant).

3.4 Détermination du transfert et des impacts par les ressources en eau

Les démarches d'évaluation passant pas des étapes communes quelle que soit la cible et les milieux de transfert, afin de montrer la généricité de la méthode d'évaluation aurait pu ressortir d'avantage en structurant cette partie : 1°) Terme source ; 2°) Transfert (avec des sous- sections si transfert vers l'homme ou autres) ; 3°) Cibles (avec les sous-sections correspondant aux spécificités propres à chacune).

3.4.1 Intérêt d'évaluer les impacts sur les ressources en eau

Les matériaux alternatifs issus de déchets utilisés dans les infrastructures routières sont susceptibles de provoquer la libération de contaminants de natures diverses (sels, métaux lourds...) dans les milieux environnants (sels, métaux lourds...). Il peut s'agir des eaux superficielles, la contamination étant alors provoquée par la percolation des eaux de pluie dans les différentes couches de matériaux constitutifs de la route, qui ensuite sont évacuées par les fossés latéraux puis atteignent les cours d'eau. Les eaux souterraines peuvent également être contaminées par l'infiltration d'eaux chargées en éléments divers.

Dans ce cas, les eaux de surface et souterraines sont à la fois les vecteurs des transferts et les cibles des polluants. Il peut alors s'avérer nécessaire de caractériser les risques pour ces ressources en eau (souterraines et/ou superficielles) **dans le cas d'infrastructures placées dans un environnement présentant une sensibilité particulière vis-à-vis de la ressource en eau et de ses usages**, qu'elles soient :

- au moment des études, captées pour un usage entraînant un contact direct avec l'homme, tel que l'alimentation en eau potable (AEP), la baignade... ;
- captées pour un usage moins sensible (comme les eaux de procédés, les eaux de refroidissement...) mais susceptible d'être affecté par une modification de la qualité de la ressource en eau, nécessitant un traitement approprié pour une poursuite de l'utilisation ;
- considérées et déclarées comme une ressource future pour l'alimentation en eau potable dont il convient de préserver la qualité (en cohérence avec les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux, SAGE et Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux SDAGE) ;
- susceptibles d'être considérées comme des ressources en eau pour d'autres usages (comme l'eau industrielle, l'eau d'irrigation...).

Il n'existe pas de méthodologie définie spécifique au cas de l'évaluation des risques pour la ressource en eau dans un contexte de valorisation routière des déchets.

L'évaluation des risques pour les ressources en eau a pour objectif de quantifier le risque pour lesdites ressources, compte tenu de l'usage actuel ou reconnu de celles-ci. La complexité et la diversité des situations rencontrées nécessitent une adaptation au plus juste des moyens à consacrer à l'acquisition de données nécessaires à une évaluation des risques. La première étape consiste à effectuer un diagnostic précis du site, qui englobera la zone source, les milieux de transfert, et les cibles à prendre en considération. La seconde étape consiste à effectuer l'évaluation en elle-même, par l'utilisation de modèles de transfert simples, ou complexes, selon la situation.

3.4.2 Diagnostic de site et caractérisation du terme-source

Le diagnostic s'appuie essentiellement sur des investigations de terrain. L'échelle de la zone d'étude varie sur chaque site, en fonction de la nature des pollutions occasionnées, mais aussi des cibles identifiées.

Au stade du diagnostic d'un site, les objectifs sont multiples. Ce sont :

- L'identification et la caractérisation précise de l'ensemble des émissions en composés polluants.

Cette étape comprend la définition du terme-source (cf. norme NF EN 12920+A1 au §3.1), qui passe par des essais de caractérisation environnementale en laboratoire, décrits à la section 3.2, permettant d'évaluer la composition chimique des matériaux recyclés en infrastructures routières, et les flux de polluant susceptibles d'être libérés par ces déchets dans le milieu. Le type d'émission de la source vers les milieux est alors caractérisé.

Les caractéristiques physiques des composés libérés (viscosité, densité, solubilité, volatilité...), ainsi que biologiques (biodégradabilité...) sont également recherchées, dans la littérature ou par des essais en laboratoire. Elles permettent d'évaluer le comportement des composés dans le milieu naturel, notamment en termes de mécanismes de migration.

La mesure de l'extension de la pollution dans les milieux de transfert (eaux souterraines, eaux superficielles) est à effectuer, et ce par rapport à l'état de référence du secteur étudié.

Des piézomètres doivent être répartis sur l'ensemble du secteur, en amont et en aval de la zone-source, et réalisés en suivant les règles de l'art, selon la norme X 31-614. Le prélèvement et l'échantillonnage des eaux souterraines dans un forage doit être effectué selon la norme X 31-615. Les analyses consécutives respectent également des normes prévues pour chaque composé.

- La caractérisation des milieux de transfert.

Il s'agit de déterminer, au droit et dans le secteur des routes valorisant des déchets, les caractéristiques géologiques et pédologiques (lithologie, granulométrie, teneur en matière organique, pH et potentiel redox du sol...), hydrogéologiques (type d'aquifère, piézométrie, gradient hydraulique, usages (présence de pompages)...), hydrologiques (présence de cours d'eau, débit, fluctuations climatiques...) et climatiques (précipitations...) du site. Elles permettent la compréhension des mécanismes de transfert des polluants dans les milieux.

- La caractérisation des cibles identifiées et l'évaluation des impacts.

Cette étape passe par la recherche du nombre de captages d'alimentation en eau potable du secteur, des volumes prélevés, des cônes de rabattement associés, des périmètres de protection, de la population desservie, et des zones considérées comme des ressources futures (SAGE). La détection des substances polluantes potentiellement présentes dans les eaux des cours d'eau et des captages du secteur est ensuite effectuée au moyen d'analyses appropriées.

L'atteinte des objectifs présentés ci-dessus peut nécessiter la mise en place d'un système de surveillance de la qualité de certains milieux, notamment les eaux souterraines, sur du long terme, et ce afin de disposer de données fiables.

3.4.3 *L'évaluation des risques pour les ressources en eau*

L'évaluation des risques pour les ressources en eau, pour quantifier le risque pour lesdites ressources, est réalisée compte tenu de l'usage actuel ou reconnu de celles-ci. L'eau est le vecteur de transfert des pollutions vers l'homme via la distribution en eau potable, ou vers la chaîne alimentaire via l'irrigation ou l'abreuvement. Les résultats de l'étude pourront donc être utilisés comme données d'entrée dans une autre évaluation (évaluation des risques sanitaires par exemple) afin que soit pris en compte l'ensemble des voies d'exposition sur les cibles identifiées. Ainsi par exemple, dans le cadre d'une évaluation des risques pour la santé humaine (cf. chapitre « Aspect Sanitaire »), la contamination de l'eau consommée ou de la chaîne alimentaire peut être un élément important, voire majeur.

Lors d'une évaluation des risques sur la ressource en eau, il est généralement envisagé deux phases, correspondant à des niveaux d'investigations de plus en plus importants en vue d'acquiescer les informations nécessaires à leur mise en œuvre, à savoir :

- un premier niveau, basé sur des constatations / mesures au droit des cibles identifiées ou sur des modèles simples de transfert ne prenant en considération que des données mesurées sur le site et / ou une appréciation de certains processus tels que la dilution ;
- un second niveau intégrant certains processus complémentaires intervenant dans le comportement et le transport des polluants, à savoir les différents processus physiques, chimiques ou biologiques tels que la sorption ou la dégradation, et ceci soit au travers d'un facteur de retard, soit au travers d'équations.

En effet, les processus susceptibles d'interférer sur le transfert des composés dans les différents milieux de transferts sont nombreux et parfois complexes. Les principaux processus sont :

- la convection, liée à la vitesse de déplacement de l'eau ;
- la dispersion, liée à la tortuosité des pores et aux variations horizontales et verticales de perméabilité ;
- la dilution ;
- la diffusion, phénomène qui tend à homogénéiser les concentrations dans un fluide où existent des gradients de concentration ;
- la dégradation, qu'elle soit d'origine physique, chimique, ou biologique ;
- la précipitation ou la dissolution ;
- l'oxydation ou la réduction ;
- l'hydrolyse ;
- la complexation ;

- la sorption / désorption ;
- l'échange d'ions ;
- la photolyse ;
- la bioaccumulation ;
- la volatilisation.

Selon les cas de figure (conditions locales, types de pollution...), certains processus prévalent. Seules des mesures appropriées, en laboratoire ou in-situ, peuvent permettre d'estimer la part relative de chacun de ces phénomènes. Compte tenu de l'importance de ces réactions physico-chimiques dans le comportement des composés, une schématisation de celui-ci, sur la base des informations disponibles dans la littérature, permettra d'orienter les choix en matière de niveau d'évaluation et de modèles de transfert.

La modélisation est en effet basée sur :

- l'existence de lois physiques et chimiques décrivant les différents phénomènes ;
- la possibilité de représenter des phénomènes présentant des disparités d'échelle de temps et d'espace dans un modèle mathématique, ce qui suppose de disposer des informations de base nécessaires ;
- une nécessaire analyse de la fiabilité des outils par la mise en œuvre de tests de sensibilité en lien avec la robustesse des modèles.

Quel que soit le niveau d'investigations et d'évaluation des risques retenu, une bonne quantification, et donc une bonne prédiction des évolutions, passe par la formulation d'un schéma conceptuel adapté à la problématique (cf. « aspect sanitaire »), schéma qu'il convient de traduire en un modèle conceptuel servant de base à la définition et à la mise en œuvre d'un modèle de transfert.

L'évaluation des risques pour la ressource en eau – première approche :

Les informations de base nécessaires à la caractérisation dans les eaux souterraines et superficielles sont :

- le flux en composés entrant dans les milieux aqueux ;
- l'impact (augmentation des concentrations ?) de ceux-ci sur les eaux souterraines et superficielles réceptrices ;
- une estimation du temps de transfert dans ces milieux.

Une première appréciation de l'importance des risques encourus peut être faite soit par des mesures des concentrations dans les milieux en prenant en compte les évolutions spatiales ou temporelles, soit par de simples calculs à partir des équations de convection, diffusion, dilution, soit par une combinaison des mesures et de la modélisation simple (par des calculs de dilution ou des équations simples comme la loi de Darcy). (cf [guide SETRA 2011](#))

Ainsi, une appréciation simple, mais qui peut s'avérer suffisante dans certains cas, du temps de transfert peut être approchée par des équations mathématiques simples, du type :

Distance à la cible / Vitesse réelle du flux = Temps de transfert

L'utilisation de tels modèles simples de transfert conduit à une surestimation des concentrations en substances à l'aval des points de relargage dans le milieu naturel. Ceci constitue donc une approche conservatrice, protectrice des cibles susceptibles d'être exposées aux polluants potentiellement issus des infrastructures routières valorisant des déchets.

L'évaluation des risques pour la ressource en eau – seconde approche :

il s'agit ensuite d'intégrer les différents processus de migration des composés afin de permettre une prévision plus réaliste des concentrations aux points d'exposition. Compte tenu de leur nombre et de leur complexité, il est fait appel ici à des modèles complexes de transfert permettant d'inclure selon les cas le transfert en zone non saturée (transfert triphasique possible) et/ou les différents processus susceptibles d'entraîner une disparition ou une rétention des composés dans les milieux étudiés.

L'utilisation de modèles de transfert des composés dans les eaux superficielles et souterraines constitue une aide précieuse, dans le cadre de l'évaluation des risques, pour :

- la compréhension du fonctionnement des aquifères et des phénomènes interférant sur le transfert des polluants ;
- l'estimation du degré de contamination et de l'extension des pollutions dans les différentes formations aquifères ;
- la prédiction de la vitesse des flux de migration, et des sens d'écoulements sous diverses contraintes de prélèvements ;
- l'identification des cibles à risque.

Enfin, les résultats des évaluations réalisées pourront être intégrés :

- dans l'évaluation des risques pour la santé humaine, pour les usages tels que la baignade ou la pêche ;
- pour les écosystèmes ;
- à l'appréciation de l'acceptabilité des concentrations mesurées ou simulées dans les ressources en eau pour l'usage envisagé de celles-ci.

Le résultat de l'évaluation obtenu au moyen des mesures sur site ou des simulations par des modèles numériques de transfert est à comparer aux concentrations maximales admissibles pour l'usage actuel ou reconnu de la ressource en eau. Ainsi, si le critère d'acceptabilité porte sur une ressource en eau potable, les concentrations maximales admissibles sont définies dans l'annexe I-1 du décret 2001-1220 du 20 décembre 2001, relatif aux eaux destinées à la consommation humaine à l'exclusion des eaux minérales naturelles. Concernant des ressources à usage industriel, les concentrations maximales

admissibles seront établies par une étude spécifique tenant compte des contraintes du process industriel.

Ces valeurs déterminent l'acceptabilité des concentrations mesurées ou simulées aux points d'exposition. En cas de non-acceptabilité, des calculs itératifs sont entrepris afin de déterminer la concentration maximale relarguée par l'ouvrage qui permettra de respecter lesdits critères. Dans ce cas, les résultats obtenus peuvent servir à définir ou optimiser les programmes de surveillance des ressources en eau ou à dimensionner les ouvrages de façon à adapter le terme-source aux flux maximum admissibles

3.5 Détermination de l'impact sur les écosystèmes

3.5.1 Intérêt d'évaluer les impacts sur les écosystèmes

L'utilisation de matériaux alternatifs issus de déchets dans les infrastructures routières peut avoir pour conséquence une dispersion de composés susceptibles d'affecter les organismes biologiques de l'écosystème. Cela est particulièrement le cas pour les infrastructures recourant à ces matériaux alternatifs, placées dans un environnement présentant une sensibilité particulière vis-à-vis de milieux naturels et de leurs usages (exemples : zone humide ou couverte par un arrêté de protection de biotope). La présence de ces composés n'est cependant pas, à elle seule, suffisante pour constituer un risque significatif pour le milieu récepteur. En effet, outre les propriétés toxiques intrinsèques de ces composés, la caractérisation du risque doit également prendre en compte l'occurrence des contacts et le niveau d'exposition avec les cibles biologiques.

La conception même des infrastructures routières limite l'exposition directe des organismes du sol aux déchets intégrés à la chaussée. L'exposition des organismes biologiques, aussi bien pour le compartiment sol que pour le compartiment aquatique, doit plutôt être envisagée en fonction du transfert éventuel d'une partie des composés provenant des déchets via le vecteur eau après percolation et lessivage des ouvrages routiers.

A ce jour, il n'existe pas de méthodologie de référence permettant d'évaluer les impacts des déchets intégrés dans les infrastructures routières sur les écosystèmes. Des travaux sont néanmoins menés actuellement pour évaluer leurs propriétés de danger pour l'environnement (propriété H14, directive 91/689/CEE). La méthodologie d'évaluation proposée dans ces travaux privilégie une approche expérimentale, et est basée sur la détermination des propriétés intrinsèques des déchets dans un but de classification. De ce fait, elle ne tient pas compte de scénarios spécifiques d'exposition. Cette procédure n'apparaît donc pas comme optimale pour évaluer les impacts, sur les écosystèmes, des matériaux ou déchets intégrés dans les infrastructures routières.

Une approche de type évaluation de risques semble plus appropriée pour atteindre un tel objectif puisqu'elle intègre, dans son déroulement, la définition des scénarios d'exposition les plus pertinents.

La méthode d'évaluation de l'« Ecocompatibilité des scénarios de stockage et de valorisation des déchets » [ADEME, 2002] fournit un cadre opérationnel et des outils validés pour mener à bien ce type d'évaluation des risques.

Les principes généraux de l'évaluation des risques pour les écosystèmes sont présentés ci-dessous.

3.5.2 *Principes de l'évaluation des risques pour les écosystèmes*

L'évaluation des risques pour les écosystèmes a pour but de mettre en évidence un risque lié à des sources de pollution vis-à-vis de biocénoses (organismes biologiques) et des biotopes (milieux physiques) associés, et le cas échéant de déterminer des objectifs et une stratégie de mise en sécurité permettant d'atteindre un niveau de risque acceptable.

L'évaluation des risques pour les écosystèmes se déroule en trois phases, suivant une approche itérative qui autorise des allers-retours entre évaluation et collecte des données. Ces trois phases sont les suivantes : formulation du problème, analyses des informations (caractérisation des expositions et des effets) et caractérisation du risque.

Le risque causé par un composé vis-à-vis d'une cible biologique résulte de trois termes :

- le terme source (sols, eaux souterraines, air du sol...) et en particulier sa position, sa nature et son niveau de contamination ;
- le terme cible caractérisé par son comportement et sa sensibilité ;
- le terme transfert, correspondant au passage du terme source vers le terme cible (il est fonction de la configuration du lieu et des propriétés physico-chimiques des composés).

La conjonction entre source de contamination et cible, modulée par les processus de transfert permet de définir le risque.

Première étape : formulation du problème :

Contrairement à une évaluation classique des risques, l'étape de formulation du problème se trouve simplifiée du fait de la spécificité de l'infrastructure considérée. Celle-ci conditionne les éléments pertinents à prendre en compte aussi bien en ce qui concerne les écosystèmes que les propriétés intrinsèques (mobilité, solubilité, toxicité...) des éléments contenus dans les déchets valorisés. Compte tenu de la diversité de ces derniers, la présence effective d'effets écologiques ou écotoxiques ne peut être a priori anticipée à proximité de l'infrastructure routière.

A partir de ces éléments, le comportement de l'écosystème environnant doit être schématisé de manière générique à travers des modèles conceptuels d'exposition et de transfert permettant de cerner les scénarios les plus pertinents en fonction des propriétés des déchets envisagés.

L'évaluation de l'exposition incorpore une étape d'identification des composés présents dans les matériaux valorisés dans les infrastructures routières pour la modélisation du risque. Cependant, compte tenu de l'impossibilité pratique d'établir le risque pour la totalité des composés présents, seuls les composés susceptibles de contribuer

significativement au risque, soit par leur abondance, soit par leurs effets toxiques potentiels, sont retenus. La sélection de ces derniers, pour les besoins de l'évaluation des risques pour les écosystèmes, ne sera pas nécessairement identique à celle effectuée dans le cadre du risque sanitaire, puisque les voies de transferts et d'exposition, et la sensibilité des organismes exposés ne sont pas nécessairement identiques à ceux concernant le risque pour l'espèce humaine.

Deuxième étape : analyse des informations

L'évaluation des risques pour les écosystèmes repose, pour chaque scénario retenu, sur la caractérisation des deux composantes principales du risque, à savoir les effets et les expositions.

- Caractérisation des effets

Trois approches complémentaires sont généralement applicables pour caractériser les effets sur les organismes biologiques :

- l'approche par substances basée sur l'information bibliographique disponible ;
- l'approche par matrice nécessitant la mise en œuvre d'essais écotoxicologiques de laboratoire sur les matrices (eau et sol) considérées ;
- l'approche de type écologique qui requiert des observations et des relevés sur le terrain et permet d'obtenir une vision représentative des effets réels ou anticipés.

Chacune de ces approches présente des avantages et des inconvénients, principalement en terme d'effort, de précision et d'incertitude de résultats, mais également en terme de pouvoir prévisionnel. Les choix de telle ou telle approche repose sur la nature et la qualité de l'information disponible et sur le degré de précision et de fiabilité recherché pour la suite de l'étude. S'agissant dans le cas présent d'une démarche générique, les approches par matrices et par substances sont les plus appropriées puisqu'elles ne requièrent pas une connaissance détaillée de toutes les composantes des écosystèmes récepteurs.

D'une manière générale, le caractère écotoxique (propriété intrinsèque) d'un composé ou d'un déchet peut être estimé selon deux approches : la première basée sur la composition chimique, la seconde basée sur la détermination directe d'effets biologiques. Dans le premier cas, la composition chimique est comparée à des critères de qualité ou à des valeurs seuils ; dans le second cas, les effets toxiques pour l'environnement sont mesurés de façon directe en utilisant des outils biologiques (cf Guide SETRA 2011 et menu généralités/normes/documents de référence/normes écotoxicologiques). Ces deux approches de nature différentes sont toutefois complémentaires.

Cependant, les déchets apparaissent le plus souvent sous forme de mélanges complexes de composition inconnue. La détermination des concentrations en éléments toxiques ne permet donc pas une évaluation exhaustive de la toxicité potentielle dans de tels échantillons. Pour ces derniers, la mesure de façon directe des effets toxiques pour l'environnement, en utilisant des outils biologiques, est reconnue comme l'approche la plus pertinente. En effet, ces essais biologiques intègrent les effets potentiels de l'ensemble des composés présents, même ceux non considérés ou non détectés par l'analyse chimique, en incluant les effets synergiques, additifs ou

antagonistes. Enfin, ces essais ont pour avantage d'être sensibles à la fraction biodisponible des composés présents.

Lorsqu'une approche par substances est privilégiée, une étude bibliographique doit être menée pour chaque substance sélectionnée, afin d'évaluer d'une part ses effets toxiques potentiels, et d'autre part son devenir dans les compartiments environnementaux.

- Caractérisation des expositions

La caractérisation des expositions combine, pour chaque scénario retenu, l'interaction entre les cibles biologiques et les composés ou matrices retenus. La mise en évidence de l'occurrence de l'exposition des cibles se fait à partir de l'information disponible. Celle-ci s'appuiera sur les conclusions de la phase de détermination du transfert et des impacts par les eaux superficielles (cf. « Détermination du transfert et des impacts sur les ressources en eau »).

Troisième étape : caractérisation du risque

La caractérisation du risque dépend pour chaque couple cible-polluant, du type d'approche utilisé pour la caractérisation des effets au cours de la phase d'analyse. Dans le cas de l'approche par substances, le calcul des indices de risque (rapport PEC/PNEC) peut être un moyen. Dans le cas de l'approche par matrice, le risque est exprimé en fonction des résultats d'essais d'écotoxicité aigus et chroniques, plus ou moins complexes en fonction du cas étudié (de l'essai monospécifique au mésocosme reproduisant une partie d'un compartiment de l'écosystème). Ils sont réalisés sur des espèces représentatives des compartiments terrestre (plantes, vers de terre, microorganismes...) et aquatique (algues, micro-crustacés, rotifères...). Les protocoles expérimentaux sont élaborés de manière à simuler les conditions correspondant aux scénarios retenus.

4 Auteurs et relecteurs

Auteurs OFRIR1	Jérémy Domas (INERIS), Guillaume Gay (INERIS)
Relecture d'experts OFRIR1	
Relecture comité de pilotage	Laurent Château (ADEME), François de Larrard (LCPC), Agnès Jullien (LCPC)
Auteurs OFRIR2	Guillaume Gay (INERIS), Rabia Badreddine (INERIS), Agnès Jullien (IFSTTAR)
Relecture d'experts OFRIR2	Laurent Chateau (ADEME)
Relecture bureau	Denis François (IFSTTAR)
Date de mise en ligne, version finale	Janvier 2014