



# Pollution des sols en contexte minier : démarche et choix des techniques d'évaluation du risque Rapport final

**BRGM/RP-54713-FR**  
Juin 2006

Étude réalisée dans le cadre du projet  
de Recherche du BRGM APMR01

**B. Coste, Y. Itard**

<b>Vérificateur :</b>
Nom : Greffié C.
Date :
Signature :

<b>Approbateur :</b>
Nom : Labbé J.F.
Date :
Signature :

**Mots clés** : Évaluation des risques, gestion des terrains en fonction des risques, sols, pollution, diagnostic, normes

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

© BRGM, 2006, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

L'objet de cette synthèse bibliographique, menée dans le cadre du projet de recherche intitulé « formations superficielles et risques environnementaux » (SUR), est de balayer l'inventaire des techniques de diagnostic et d'analyses employées pour mener à bien l'évaluation du risque lié à la pollution des sols. Ce projet étant inscrit dans la thématique « Conséquences territoriales de la cessation des Activités Minières », les recherches bibliographiques ont été plus particulièrement orientées vers des sources prenant plus spécifiquement en compte l'évaluation du risque et le diagnostic de pollution des sols par les métaux dans le secteur minier.

Après un rappel des définitions nécessaires sur le risque et des principes et démarches d'une évaluation de risque lié à une pollution des sols, cette étude bibliographique aborde les différentes étapes nécessaires à l'acquisition des données utiles à cette évaluation, à savoir :

- l'approche **évaluation du risque** s'impose aujourd'hui comme outil d'aide à la décision pour la gestion des sites pollués. Cette approche prenant en compte les spécificités de chacun des sites étudiés tend à remplacer une approche « normative » même dans les pays ou états qui s'étaient tout d'abord orientés vers la définition d'un référentiel universel.
- Pour mener à bien une évaluation de risque lié à la pollution des sols, le **diagnostic** doit être réalisé selon une **stratégie d'échantillonnage et d'analyses** basée sur des **méthodes normalisées**. Les différentes méthodes employées ont pour but la caractérisation des différentes sources de pollution et de leurs impacts sur les sols en termes de pollution. Avec comme objectif le recueil des données nécessaires à une évaluation des risques, l'analyse chimique du contenu total en un élément toxique d'un sol ou d'un déchet doit être complétée par des tests physico-chimiques plus complets.
- Les **sources de références** récentes sont diverses et variées tant au niveau national qu'international. D'une manière générale, pour la prise en compte des spécificités du secteur minier, qu'il s'agisse de la plupart des mines métalliques ou du charbon, c'est auprès de sites internet d'organismes nord-américains que l'on trouve le plus de documents sur cette thématique : guides méthodologiques et études de cas prenant en considération à la fois les aspects sanitaires et environnementaux.

Cette **synthèse bibliographique** est le point de départ, dans le cadre du projet SUR, de recherches plus approfondies notamment dans le domaine de la normalisation. Les principaux axes de ces recherches plus approfondies, sont d'une part l'**inventaire des normes**, d'autre part les thèses de [Blanchard](#) (2000) et [Lespagnol](#) (2003) sur la normalisation des **tests de lixiviation** dans le domaine des sols pollués.

L'adaptation de l'étude de risque à l'échelle d'un **bassin minier** peut-être facilement réalisée en s'inspirant des études spécifiques à ce secteur développées dans le cadre des programmes des principaux organismes nord-américains tels que l'EPA, l'USGS ou les ministères canadiens.



# Sommaire

<b>1. Introduction.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Généralités .....</b>	<b>9</b>
<b>3. Analyse du risque.....</b>	<b>11</b>
3.1. NOTION DE RISQUE : DEFINITIONS .....	11
3.1.1. Risque.....	12
3.1.2. Gestion et évaluation du risque .....	12
3.2. STRATEGIE .....	13
3.3. PRINCIPES DIRECTEURS.....	13
3.3.1. Approche intégrée .....	14
3.3.2. Démarche scientifique .....	14
3.4. LES ETAPES DE L'EVALUATION DU RISQUE TOXICOLOGIQUE.....	15
3.4.1. L'identification du danger.....	15
3.4.2. La caractérisation toxicologique .....	15
3.4.3. L'estimation de l'exposition.....	16
3.4.4. L'estimation du risque.....	16
3.5. RISQUE POUR LES ECOSYSTEMES .....	17
3.6. CONCLUSION .....	18
<b>4. Diagnostic de pollution des sols.....</b>	<b>19</b>
4.1. RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS.....	19
4.1.1. Sols.....	19

4.1.2. Sols pollués .....	20
4.1.3. Conclusion .....	20
4.2. STRATEGIES D'INVESTIGATION .....	21
4.3. EXAMEN DES SPECIFICITES DU SITE .....	21
4.4. MESURES SUR SITE .....	22
4.4.1. Géophysique.....	22
4.4.2. Gaz .....	22
4.4.3. Métaux dans les sols .....	22
4.5. ECHANTILLONNAGE .....	23
4.6. ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES.....	24
4.6.1. Chimie.....	24
4.6.2. Minéralogie .....	25
4.7. CARTOGRAPHIE.....	25
<b>5. Evaluation et Contrôle qualité .....</b>	<b>27</b>
<b>6. Sources d'information .....</b>	<b>29</b>
6.1. NORMES QUALITE DES SOLS .....	29
6.2. REVUES SCIENTIFIQUES .....	31
6.3. AUTRES SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES (SITES WEB).....	32
6.3.1. Généralités sur les sites et sols pollués.....	32
6.3.2. Evaluation du risque .....	34
6.3.3. Diagnostic de pollution des sols .....	37
<b>7. Conclusion.....</b>	<b>39</b>

# 1. Introduction

Le contexte général de cette recherche bibliographique est le projet cadre intitulé « Conséquences territoriales de la cessation des Activités Minières ». Le but de ce projet est de fédérer l'ensemble des projets de recherche actuellement en cours ou à venir ayant trait aux impacts résiduels liés aux anciens travaux miniers, à l'échelle d'un bassin minier.

Ce projet cadre s'appuie sur le projet cible AREDIE, initié en 2005, auquel il est ajouté un second projet cible intitulé « formations superficielles et risques environnementaux » (SUR). Ces deux projets sont homogènes au niveau de l'approche régionale des problèmes de l'après mine mais abordent la problématique sous deux angles complémentaires :

- AREDIE se veut l'intégration en un lieu donné (actuellement le bassin aurifère de St Yrieix La Perche) des outils des différentes disciplines permettant de comprendre le fonctionnement global d'un bassin versant ; les travaux sur ce bassin versant ont démarré en 2005 et se poursuivront en 2006, tout en recherchant une ouverture sur d'autres types de bassins miniers pour les années à venir.
- SUR vise à approfondir nos connaissances sur le compartiment superficiel (tranche 0 – 20 m), à la fois support ou source de pollution et milieu d'exposition pour l'homme et les écosystèmes.

Plus précisément, l'objectif majeur du projet SUR est d'appréhender comment mieux prendre en compte le risque lié à la pollution des sols à l'échelle d'un bassin minier. L'analyse (ou évaluation) utile aux décideurs en charge de la gestion du risque nécessite une approche méthodologique basée sur la caractérisation de la pollution selon des méthodes normalisées. La première étape de l'étude consiste en une recherche bibliographique :

- d'une part des différentes approches d'analyse du risque lié aux métaux présents dans les sols,
- et d'autre part des techniques de caractérisation de la pollution des sols, étape nécessaire à l'évaluation du risque.

**De cette recherche bibliographique est issue cette présente synthèse** en six parties :

- Un rappel de quelques généralités sur la notion de pollution des sols (chapitre 2) ;
- Une présentation des concepts et méthodes d'analyse de risques utiles à la problématique propre au projet (chapitre 3) ;
- Un inventaire des stratégies et outils de diagnostic adaptés à l'échelle d'un bassin minier (chapitre 4) ;
- Un rappel des notions de contrôle qualité et d'évaluation des performances d'une analyse de risques (chapitre 5) ;
- Enfin les principales sources de références bibliographiques (chapitre 6).

Certains axes présentés dans cette synthèse bibliographique très générale, seront approfondis dans le cadre d'une thèse qui devrait constituer l'étape suivante du programme de recherche SUR.



## 2. Généralités

Bien que "**le sol**" fasse, à plusieurs titres, l'objet d'une réglementation en tant que bien et propriété foncière, la législation européenne n'a pas encore donné de cadre spécifique à la protection des sols. Ainsi, pour définir le cadre législatif de la protection des sols, il convient de se référer aux différents textes organisant la protection de l'environnement et ce par de multiples approches.

La problématique "**pollution des sols**" apparaît dans des textes relatifs à l'eau, comme ceux concernant l'utilisation des boues d'épuration en agriculture (Directive [86/278/CEE](#) du Conseil du 12 juin 1986), la qualité requise des eaux superficielles destinées à la production d'eau alimentaire (Directive [75/440/CEE](#) du Conseil, du 16 juin 1975) ou la protection des eaux souterraines contre la pollution causée par certaines substances dangereuses (Directive [80/68/CEE](#) du Conseil, du 17 décembre 1979).

La protection des sols est également abordée dans des textes législatifs relatifs à la gestion des déchets comme par exemple ceux concernant l'élimination des huiles usagées (Directive [75/439/CEE](#) du Conseil, du 16 juin 1975), la mise en décharge des déchets (Directive [1999/31/CE](#) du Conseil du 26 avril 1999), ou à la pollution atmosphérique par la législation relative à la réduction des composés organiques volatils (Directive [1999/13/CE](#) du Conseil du 11 mars 1999), relative à la limitation des émissions de certains polluants dans l'atmosphère en provenance des grandes installations de combustion (Directive [2001/80/CE](#) du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2001) ou encore à la législation relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution (Directive [96/61/CE](#) du Conseil du 24 septembre 1996 relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution).

En **droit français**, la protection des sols ne profite pas non plus d'un cadre juridique spécifique. En conséquence, la thématique sol n'existant pas, en tant que telle, il faut également se référer à **diverses réglementations**, notamment la réglementation relative aux installations classées pour la protection de l'environnement et les réglementations spécifiques aux thèmes de l'eau, de l'air, des déchets, des matières fertilisantes et des produits phytosanitaires. Dans le cadre de la législation installations classées, une politique s'est développée en France depuis plus de dix ans sur cette problématique. Ses principes et sa mise en œuvre sont très proches de ce que pratiquent les autres pays européens. Cette politique est centrée sur deux concepts principaux :

- l'**analyse** et la **gestion du risque** plus que l'attachement au niveau de pollution intrinsèque,
- la gestion **en fonction de l'usage** des sites.

Les **actions de protection et de gestion des sols** passent dans un premier temps par la connaissance approfondie des méthodes d'échantillonnage et de caractérisation des sols (paramètres physico-chimiques et biologiques) ainsi que par la définition d'une terminologie adaptée et harmonisée. Ces informations sont essentielles à tous ceux qui sont amenés à évaluer la qualité des sols et à les gérer. Dès lors, normaliser le vocabulaire et les méthodes permet à toutes les parties prenantes de se comprendre, d'accepter et d'interpréter sur une même base les résultats issus des mesures. Dans le domaine de la qualité des sols, plus de 150 normes sont disponibles (cf Annexe 1).

Dans le domaine de la protection de l'environnement en général, et des sols en particulier, le **secteur minier** présente de nombreuses spécificités. Dans ce secteur non directement concerné par les réglementations régissant les Installations classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE : [loi de 1976](#)), la prise en compte de la pollution des sols est un phénomène très récent : la pollution des sols n'est mentionnée qu'à partir de 2000 dans le Décret de mise en application des PPRM (Plan de Prévention des Risques Miniers). A noter que même la notion de déchets miniers est récente et que la réglementation les concernant n'est pas encore définitivement arrêtée : la Directive européenne sur la gestion des [déchets de l'industrie extractive](#) est en préparation et par conséquent non encore transcrite au niveau national.

Les spécificités du secteur minier se retrouvent tant dans le domaine de l'évaluation du risque que dans celui de la caractérisation des pollutions. L'analyse bibliographique des différentes méthodes disponibles permet d'identifier celles qui paraissent le mieux adaptées à ces spécificités.

## 3. Analyse du risque

La "gestion des terrains et des territoires en fonction des risques" (RBLM: Risk Based Land Management) est un concept qui s'impose de plus en plus dans les politiques de gestion des terrains pollués adoptées par les différents États européens, ainsi que dans le cadre de la préparation de Directives européennes. Il est intéressant de noter que cette approche s'impose aussi aujourd'hui à des pays d'Europe comme les Pays-Bas, mais aussi à des provinces du Canada comme le Québec, autrefois pionniers en terme d'approche normative dans le domaine de la gestion des sols pollués (Valeurs seuils A, B, C, etc.).

Ce concept constitue un levier pour le développement de solutions durables, en assurant les principes suivants : (1) la réduction des risques pour la santé humaine et les écosystèmes afin de permettre un (ré)emploi des terrains en toute sécurité ("fitness for use") ; (2) la prévention de tout risque de dispersion des polluants ("protection of environment") ; (3) la protection à long terme tout en minimisant les charges de surveillance ("long-term care"). La "maîtrise des risques" impose néanmoins que des outils méthodologiques reconnus comme fiables et performants soient disponibles pour en faire l'évaluation.

L'analyse des nombreux documents disponibles sur le sujet est synthétisée, ci-après, dans une perspective de situer, à l'échelle d'anciens sites miniers, la place de l'évaluation des risques liés aux sols pollués. Cette synthèse aborde les grandes lignes directrices de la thématique en terme : d'approche stratégique, de principes directeurs et de mise en œuvre. Il apparaît cependant nécessaire d'apporter préalablement quelques notions et définitions du risque.

### 3.1. NOTION DE RISQUE : DEFINITIONS

Depuis une vingtaine d'années, le terme risque constitue l'un des objets majeurs de la toxicologie et vise à préciser les **effets potentiels sur la santé** à la suite d'une **exposition à un agent toxique**. Il en est de même plus récemment en termes d'écotoxicologie.

**D'un point de vue social, le risque a une résonance d'acceptabilité.** Tel risque est-il ou non acceptable ? En d'autres termes, il s'agit de déterminer un niveau sécuritaire ; une situation est jugée sécuritaire lorsque le risque qui lui est associé est jugé acceptable.

Enfin, depuis le début des années 1990, l'intérêt pour le risque est devenu une préoccupation sociale majeure, où sa fragmentation et sa compartimentation disciplinaire cèdent leur place à un langage interdisciplinaire qui favorise la communication et les échanges avec un public de plus en plus intéressé à prendre une part active aux problèmes et aux débats touchant la santé publique et l'environnement.

### 3.1.1. Risque

La notion de risque peut être définie de multiples façons :

1. Traditionnellement, le risque était défini comme « la probabilité qu'une situation potentiellement dangereuse se réalise, causant alors un préjudice ».
2. Le risque peut être aussi défini comme étant un «concept utilisé pour donner une signification à une chose, force ou circonstance qui représente un danger pour les gens ou à ce qu'ils considèrent important ; la représentation d'un risque se fait en termes de probabilité ».
3. le risque est « la probabilité qu'une conséquence donnée, généralement néfaste à la santé, se produise dans des conditions particulières. Le risque résulte de la combinaison de deux facteurs : la probabilité d'occurrence d'un événement néfaste et ses conséquences ». Cette dernière définition rejoint sensiblement celle pour qui le risque toxicologique est « la mesure de la gravité résultant de l'exposition à une substance ainsi que la probabilité qu'une telle exposition survienne.

Ces définitions du risque paraissent toutes valables en mettant plus ou moins l'accent soit sur la probabilité d'occurrence soit sur l'exposition.

Dans le contexte des sols pollués à l'échelle des sites miniers, nous retiendrons la définition suivante, qui fait la part égale aux deux concepts de probabilité et d'exposition :

Le **risque** toxicologique (ou écotoxicologique) est la **probabilité** que des **effets néfastes** sur la santé humaine (ou l'environnement) se produisent à la suite d'une **exposition** à des agresseurs environnementaux d'origine chimique, physique ou biologique.

### 3.1.2. Gestion et évaluation du risque

En plus de la définition de la notion de risque, telle qu'elle est aujourd'hui communément admise et employée dans le contexte des sols pollués, deux autres notions méritent d'être précisées : il s'agit des termes de gestion et d'évaluation :

- **La gestion du risque** est un processus d'identification, de sélection, de mise en œuvre et d'évaluation des actions de réduction du risque ; le but est d'intégrer de manière scientifiquement valable et économiquement acceptable les actions de réduction ou de prévention du risque toxicologique en considérant les aspects sociaux, culturels, éthiques, politiques et légaux.
- **L'évaluation du risque** est un processus qualitatif et quantitatif qui vise à déterminer la probabilité qu'une exposition à un ou plusieurs agresseurs environnementaux, produise des effets néfastes sur la santé humaine (ou l'environnement).

Dans ces deux définitions on note que, si les deux processus sont étroitement liés, les domaines d'intervention des responsables sont très clairement séparés entre l'évaluateur et les décideurs.

### 3.2. STRATEGIE

Compte-tenu des enjeux, il n'est pas étonnant de constater l'intérêt porté à la problématique des terrains pollués, dont certains, en plus de représenter un risque pour la santé des populations et pour l'environnement, peuvent avoir des répercussions notables sur l'économie notamment en termes de programme d'aménagement actuels et futurs. D'une manière générale, en présence d'une pollution des sols, le propriétaire du terrain avait théoriquement le choix entre quatre mesures de gestion du risque :

- dépollution des sols jusqu'au respect de critères génériques,
- dépollution des sols jusqu'au respect de critères spécifiques déterminés à partir d'une évaluation de risque,
- mise en place de mesures de confinement, de contrôle et de suivi (réseau de surveillance),
- mise en place de mesures restrictives (restriction d'usage et/ou accès).

En termes de dépollution ou de mise en place de mesures de confinement ou de restriction d'usage, la référence à des critères génériques universels est largement abandonnée au profit d'une approche prenant en compte la spécificité des terrains concernés. La tendance aujourd'hui est de considérer qu'une approche fixant des **normes et des standards** prédéfinis, visant à promouvoir une multifonctionnalité finale des sols n'est pas réaliste car elle conduirait à des activités de **dépollution systématique** avec des coûts très élevés. Par ailleurs une telle approche ne tient pas compte de la diversité des sols. Par rapport à ce constat, depuis la fin des années 1980, l'intérêt pour le risque associé à la pollution environnementale a été grandissant. Aujourd'hui la place de l'analyse des risques dans la gestion des terrains contaminés est reconnue de façon manifeste.

La notion de diversité des sols apparaît de façon évidente au regard de la diversité des sites miniers lorsqu'il s'agit d'aborder le problème de la pollution des sols dans ce contexte (fonds géochimiques, anomalies, minéralisation, mode d'exploitation...). Dans le cadre d'une stratégie de gestion du risque sur **le long terme** et de **projets d'aménagement ou de reconversion**, les méthodes d'évaluation ne doivent pas se limiter à la prise en compte de l'impact actuellement mesuré, mais doivent aussi intégrer la notion de risques potentiels par l'archivage des différentes sources de danger et la modélisation des modes de dispersion des polluants.

### 3.3. PRINCIPES DIRECTEURS

Le processus d'évaluation et de gestion du risque toxicologique (et écotoxicologique) constitue une **démarche intégrée**, tant au plan scientifique qu'au plan de l'association des acteurs. D'un point de vue scientifique, l'évaluation du risque toxicologique doit reposer sur de solides fondements scientifiques et sur les meilleures connaissances disponibles notamment celles spécifiques du site minier considéré.

### 3.3.1. Approche intégrée

**L'acceptabilité d'un risque n'est pas un concept scientifique mais un concept social.** Il n'appartient pas aux évaluateurs scientifiques du risque de se prononcer sur l'acceptabilité sociale d'un risque. Pour ce faire :

- **L'ampleur de l'évaluation du risque doit être adaptée** aux besoins et aux objectifs poursuivis par la gestion du risque. Elle varie selon le contexte, la nature, l'importance du problème, des impacts et des enjeux socio-économiques, et selon la disponibilité des données scientifiques.
- **À toutes les étapes de l'évaluation et de la gestion du risque, une attention particulière doit être consacrée à la communication sur le risque.** Les facteurs déterminants de la perception du risque doivent être pris en considération dans l'évaluation du risque toxicologique et toute évaluation et gestion du risque doit prévoir un processus de participation active du public clarifiant les rôles de chacun des acteurs et assurant la transparence de la procédure. Le processus d'évaluation et de gestion du risque doit être équitable en assurant à chacun des chances égales de faire valoir son point de vue.
- Enfin le processus et les procédures d'évaluation du risque doivent être **harmonisés** afin de favoriser un maximum de **cohérence** et d'**équité**, d'améliorer la **validité** des évaluations du risque, de diminuer le nombre de sources d'incertitude et de favoriser une prise de décision éclairée, tout en conservant suffisamment de souplesse pour qu'ils puissent être adaptés aux nouvelles données scientifiques ou à certaines situations concrètes.

### 3.3.2. Démarche scientifique

L'évaluation du risque est une démarche scientifique qui fournit, aux décideurs et aux groupes concernés, l'information scientifique nécessaire à la prise de décision concernant le risque.

**L'évaluation du risque doit être basée sur de l'information scientifique valide, rigoureuse, transparente, disponible et mise à jour.** La qualité du caractère scientifique de l'évaluation du risque est assurée notamment par la compétence des analystes et par l'encadrement de la démarche. L'évaluation du risque retire des avantages en matière de crédibilité lorsqu'elle est transparente quant aux données et valeurs utilisées, quant aux choix faits durant la démarche d'évaluation et quant aux **sources d'incertitude**.

1. **l'évaluation du risque n'est pas une fin en soi**, mais s'intègre dans un cadre plus vaste de gestion, nécessitant l'harmonisation d'une approche méthodologique avec de grandes lignes directrices générales et une certaine souplesse d'adaptation aux spécificités du contexte local.

2. **L'évaluation du risque toxicologique doit reposer sur de solides fondements scientifiques** et sur les meilleures connaissances disponibles.

### 3.4. LES ETAPES DE L'ÉVALUATION DU RISQUE TOXICOLOGIQUE

En complément aux principes rappelés précédemment, il faut préciser à ce stade que le besoin **d'harmonisation ne signifie en aucun cas uniformisation** : l'évaluation du risque doit d'une part laisser une place à l'expertise (= expérience de l'évaluateur) et d'autre part s'adapter aux spécificités du cas traité.

De façon générale, l'évaluation du risque toxicologique (pour la santé humaine) comprend les quatre étapes suivantes : identification du danger, caractérisation toxicologique, estimation de l'exposition, estimation du risque.

#### 3.4.1. L'identification du danger

L'identification du danger consiste à identifier et présenter une situation ou un agresseur environnemental pouvant comporter un risque pour la santé publique. Elle permet la documentation des principales voies d'exposition, des principaux effets qui y sont associés et la détermination des populations à risque. Elle prend en considération la perception du risque et les connaissances de la population et des groupes concernés par le projet ou le problème lorsqu'il est prouvé que ces renseignements influent ou peuvent influencer le niveau de risque. En effet, la prise en compte des connaissances locales est extrêmement utile pour détailler par exemple les voies d'exposition de la population aux sources éventuelles de risque, ou pour anticiper les problèmes potentiels liés à des risques.

#### 3.4.2. La caractérisation toxicologique

La caractérisation toxicologique sert principalement à déterminer les doses de contaminants pour lesquelles des effets néfastes sur la santé humaine sont susceptibles de survenir. Elle vise à établir la relation dose-réponse, c'est-à-dire la relation entre la dose absorbée ou biologiquement effective d'un contaminant et la réponse toxique chez l'être humain, en termes de gravité et d'incidence. Elle permettra d'identifier les effets toxiques possibles associés aux contaminants en cause.

Les **valeurs de référence** les plus couramment utilisées sont les doses de référence, les concentrations de référence et les doses journalières admissibles. Ces valeurs correspondent aux doses de contaminants auxquelles un individu peut être exposé sans risque de subir des effets toxiques non cancérogènes. Pour les effets cancérogènes, les coefficients de cancérogénicité sont des indicateurs du niveau de sécurité virtuelle appliqués à un contaminant. Les valeurs de référence et les estimateurs de risque cancérogène peuvent être basés sur des études toxicologiques animales ou des études épidémiologiques faites chez l'humain.

La définition de ces valeurs de référence et de ces estimateurs de risque cancérogène est exigeante et nécessite un énorme travail d'évaluation de la documentation scientifique, de prises de décision quant aux méthodes de calcul et d'extrapolation à utiliser et de validation par des pairs. C'est pourquoi, selon les objectifs poursuivis par l'évaluation du risque, cette étape peut faire appel à des valeurs de référence et à des estimateurs de risque cancérogène établis par des organismes internationaux reconnus.

Le choix des valeurs de référence et des estimateurs de risque cancérigène doit alors tenir compte de plusieurs paramètres tels que :

- la qualité scientifique de l'étude ou des études qui ont servi de base à l'élaboration de la valeur de référence et de l'estimateur de risque cancérigène ;
- la rigueur scientifique utilisée lors des diverses étapes de calcul, d'extrapolation ou de modélisation pour l'évaluation du risque;
- la transparence du processus ;
- l'évaluation par les pairs et les groupes concernés ;
- le niveau de consensus autour de la valeur de référence et de l'estimateur de risque cancérigène;
- la disponibilité de l'information pour les spécialistes, les groupes et les individus intéressés;
- l'actualité et la mise à jour des données.

### **3.4.3. L'estimation de l'exposition**

L'estimation de l'exposition permet de calculer les doses auxquelles les personnes sont exposées en raison de la contamination dans les divers médias et en tenant compte des différentes voies d'entrée dans l'organisme. Elle utilise les données provenant de la caractérisation des concentrations des contaminants dans les milieux biologiques humains (indicateurs biologiques), de mesures dans l'environnement ou de modèles mathématiques. Elle comprend une caractérisation de l'exposition (détermination des conditions dans lesquelles il y a contact entre un contaminant et un individu ou une population) et une modélisation ou estimation de l'exposition (estimation de la durée, de la fréquence et de la gravité du contact en considérant les voies respiratoire, orale et cutanée).

Notons que trois types de dose peuvent être utilisés pour l'estimation de l'exposition :

1) la dose d'exposition potentielle, définie comme étant la dose totale entrant en contact avec la personne exposée et susceptible d'être absorbée; 2) la dose absorbée, qui constitue la fraction d'un contaminant qui traverse l'épithélium (cette fraction peut varier en fonction du média, du contaminant et de la concentration); 3) la dose biologiquement effective, qui est la quantité d'un contaminant (ou du métabolite) qui interagit avec les macromolécules et qui résulte en une altération des fonctions physiologiques.

### **3.4.4. L'estimation du risque**

L'estimation du risque permet d'estimer le niveau de risque et son incertitude en mettant en relation les informations sur les caractéristiques toxicologiques des contaminants avec les doses d'exposition. Elle est généralement représentée par la possibilité ou la probabilité qu'un agent toxique affecte une population donnée. Elle permet généralement de faire une estimation numérique ponctuelle ou d'obtenir un intervalle de valeurs.

L'estimation prend en compte l'ensemble des incertitudes qui lui sont associées. Elle doit à cet égard intégrer des informations qualitatives concernant notamment la méthodologie et les interprétations ainsi qu'une discussion des limites, des incertitudes et des présomptions.

Les lignes directrices nécessaires au bon déroulement d'une analyse de risques doivent :

- constituer des repères et un outil pour les analystes ;
- favoriser la présentation transparente de toute l'information critique et de toutes les explications pertinentes ;
- faciliter l'adaptation à de nouvelles données scientifiques, à diverses situations concrètes, aux caractéristiques et à la perception de la population.
- laisser une place importante au jugement professionnel des analystes (avis d'expert).

### 3.5. RISQUE POUR LES ECOSYSTEMES

En termes d'écotoxicologie les grandes étapes sont assez semblables. Sans développer le contenu de la démarche, il faut retenir que selon les contextes et les substances présentes on distingue deux grands types d'écosystèmes qui correspondent au **milieu aquatique** d'une part et d'autre part au **milieu terrestre**. Dans les deux cas on dispose de nombreuses références bibliographiques sur :

- le comportement des principaux représentants de la **faune et de la flore** tant aquatique que terrestre ;
- les effets de telle ou telle substance, notamment les métaux.

Comme il a été précisé précédemment, les données écotoxicologiques issues des références bibliographiques doivent être ici aussi validées ; la principale difficulté d'une évaluation des risques pour les écosystèmes réside dans **l'extrême diversité du monde animal et végétal**.

A noter que le risque pollution pour les écosystèmes aquatiques est naturellement pris en compte sur de nombreux anciens sites miniers français, pour définir les objectifs d'une station de traitement des eaux par exemple. Cette prise en compte est faite de manière empirique souvent sous la pression des associations de pêcheurs ou pisciculteurs, alors que la méthodologie du MEDD, élaborée dans le cadre de sa politique de gestion des sols pollués, préconise de ne prendre en compte que le risque sanitaire. Aussi les recherches bibliographiques sur les approches méthodologiques prenant en compte le risque pour les écosystèmes ont été les plus fructueuses à partir des sources nord-américaines, et plus particulièrement canadiennes quand il s'agit du secteur minier (voir chapitre 6).

### **3.6. CONCLUSION**

La synthèse bibliographique montre qu'aujourd'hui l'analyse des risques liés à la pollution des sols a conquis sa place dans de nombreux domaines et dans de nombreux pays.

Dans le domaine de la gestion des sites et sols pollués, y compris en contexte minier, l'évaluation des risques constitue un outil judicieux d'aide à la décision par l'établissement de critères environnementaux sécuritaires et argumentés. Pour ce faire elle doit s'appuyer sur une démarche scientifique rigoureuse à toutes les étapes de son déroulement.

## 4. Diagnostic de pollution des sols

Parmi les outils fiables et performants nécessaires à une évaluation du risque, réalisée dans un objectif d'aide à la décision, ceux utilisés dans la phase initiale que constitue le diagnostic de pollution des sols occupent une place primordiale. Il est en effet difficile de se soustraire à cette étape car les données nécessaires à la caractérisation des **sources de pollution** et de leurs **impacts** sont soit insuffisantes, soit inadaptées à une problématique d'évaluation de risques.

L'analyse des documents disponibles sur les différentes méthodes et outils de diagnostic est synthétisée ici afin de retenir les mesures sur site, les méthodes d'échantillonnages et d'analyse de laboratoire adaptées à une stratégie de diagnostic de pollution des sols réalisé dans la perspective d'une évaluation de risques à l'échelle d'un site ou d'un bassin minier. Dans le cadre de cette synthèse bibliographique, il est apparu intéressant de rappeler quelques définitions concernant les sols pollués avant de présenter les stratégies d'investigation et les outils disponibles pour leur caractérisation.

### 4.1. RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS

Dans l'optique de la gestion des anciens sites miniers avec une approche évaluation du risque, la caractérisation de la pollution des sols demande de rappeler le rôle des sols dans l'environnement pour ensuite s'intéresser plus particulièrement à leur pollution, notamment par les métaux.

#### 4.1.1. Sols

L'importance de la protection des sols correspond à ce qu'ils constituent une importante ressource :

- **ressource économique** pour la **production alimentaire** en étant à la base de 90% de l'alimentation humaine et animale et comme **support de toute activité humaine** ;
- **ressource environnementale** comme support des **écosystèmes terrestres** et comme interface entre la croûte terrestre et les milieux aquatiques et atmosphériques.

Cette ressource, complexe et très diversifiée, est constamment menacée par des phénomènes naturels diversement amplifiés par des activités humaines comme par exemple dans le domaine de l'érosion. Parmi les phénomènes d'origine anthropique la **pollution des sols et des eaux** est un de ceux de plus en plus pris en considération dans la gestion de cette ressource. Selon la nature de la pollution, sa source est à rechercher auprès des différents grands domaines d'activités humaines, qu'ils soient agricoles, urbains (transport, déchets...) ou industriels (chimie, pétrochimie, mines, métallurgie, agroalimentaire...).

**L'étude des sols est impossible à dissocier de celle des eaux** du fait :

- du lien entre production des sols et ressources en eau en agriculture,
- de l'interaction entre fonctionnement des sols et circulation des eaux continentales,
- des interactions écologiques entre milieux terrestres et aquatiques,
- enfin de l'interdépendance entre la qualité des sols et celle des eaux.

#### 4.1.2. Sols pollués

Un sol est considéré pollué lorsque la dégradation de sa « qualité » par l'**apport anthropique d'éléments toxiques** peut porter atteinte à la santé humaine ou/et à l'environnement. Cette transformation le dénature en transformant le sol considéré comme « ressource » par rapport à différents usages en un « **déchet** » devant être traité par le **responsable de la pollution**.

Dans le contexte du projet « caractérisation des horizons superficiels à l'échelle d'un bassin minier », la pollution des sols concerne essentiellement la présence anormale en « éléments traces » plus ou moins toxiques.

Les **éléments traces** (ou éléments en traces) sont les 80 éléments chimiques dont la concentration, dans la croûte terrestre, est pour chacun d'entre eux inférieure à 0,1 %. Ils ne représentent à eux tous que 0,6 % du total, alors que les 12 éléments majeurs interviennent pour 99,4 %. Les éléments majeurs sont (par ordre d'abondance décroissante) : O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti, H, P et Mn. Certains éléments en traces sont indispensables au déroulement des processus biologiques : ils sont alors nommés "oligo-éléments". Mais la plupart des oligo-éléments peuvent s'avérer toxiques pour diverses formes de vie, à des teneurs très fortes (et en fonction des espèces chimiques présentes) : c'est le cas de **Cu, Zn, Cr**. Il en va de même pour d'autres éléments traces dont le caractère indispensable n'est pas démontré comme **Cd, Hg, Pb, Sn, As, Se ou B**.

Les **éléments traces sont naturellement présents** dans un horizon de sol, résultant uniquement de l'évolution géologique et pédologique, à l'exclusion de tout apport d'origine anthropique. D'un point à un autre d'un territoire, ce **Fond Pédogéochimique Naturel** (FPGN) peut varier très largement (Leduc *et al.* 1996, [Darmendrail et al. 2000](#), Barbier *et al.* 1978), en fonction de la nature du matériau parental (héritage) et du type de sol qui s'est développé (types de processus pédogénétiques et durée d'action de ces processus).

La notion de FPGN doit être comprise au sens de fond pédogéochimique local (correspondant à une "série de sols") et par opposition aux **contaminations anthropiques**.

#### 4.1.3. Conclusion

- le sol doit être considéré, au même titre que l'eau, comme une **importante ressource économique et environnementale** ; cette ressource est fragile, notamment pour les aspects pollution ;
- Sols et eau étant inséparables, les disciplines des géosciences concernées dans le domaine des sites pollués sont la **pédologie et l'hydrologie** avec leurs différentes facettes : chimie, physique, biologie, aspects socio-économiques ;
- La dégradation de la qualité d'un sol par une pollution le dénature en transformant une « ressource » en un « déchet » pouvant porter atteinte à la santé humaine ou/et à l'environnement.

C'est dans ce contexte de protection des sols « ressources » et de gestion des sols « déchets » (= sources secondaires de pollution) que doit se définir la stratégie d'investigation des sols dans le cadre d'un diagnostic de pollution prenant en compte les interactions sols et eau.

## 4.2. STRATEGIES D'INVESTIGATION

L'objectif d'un diagnostic de pollution des sols est de les caractériser au mieux afin d'être, dans le cadre d'une évaluation des risques, le support d'une aide à la décision spécifique à chaque site. Il s'agit :

- De déterminer **quantitativement** et **qualitativement** les polluants présents,
- De les **localiser** sur le site,
- D'en évaluer la **mobilité** et la **toxicité**.

De la qualité des résultats dépendra la pertinence des décisions prises par les organismes responsables concernés. Les diagnostics débutent toujours par une **étude documentaire** sur l'historique du site, une étude de vulnérabilité de l'environnement (étude du sol, des nappes, des usages de tel ou tel milieu, des cibles potentielles...). Ensuite la phase d'investigation sur le terrain consiste à sonder le sol et échantillonner dans les différentes zones à risque identifiées. Les échantillons sont ensuite envoyés dans les laboratoires.

Afin de prendre au mieux en compte les spécificités du site, une stratégie d'investigation doit être élaborée lors d'une **visite du terrain** afin de définir le **volume des travaux d'investigation** ainsi que les **moyens** nécessaires pour leur réalisation.

Les moyens doivent être eux aussi adaptés aux **spécificités du site** en se répartissant de manière optimale entre :

- Mesures sur site,
- Echantillonnage,
- Analyses de laboratoire,
- Cartographie.

## 4.3. EXAMEN DES SPECIFICITES DU SITE

La prise en compte de l'ensemble des spécificités de chaque site étudié nécessite un examen préalable du **contexte naturel** et de **l'historique des activités**.

Le déroulement de cet examen se décompose en deux phases : étude documentaire et visite de terrain :

- L'objectif de **l'étude documentaire** est d'élaborer un modèle spécifique prenant en compte les sources potentielles de pollution et la vulnérabilité du milieu naturel,

- Les observations effectuées lors de la **visite de terrain** viennent compléter l'étude bibliographique pour mieux appréhender les problèmes en termes de **répartition spatiale**. Cette approche naturaliste permet de définir les zones homogènes d'un point de vue géologie, pédologie, morphologie, hydrologie-hydrogéologie, et occupation des sols.

Cet examen, aboutissant à un zonage spatial, préalable au diagnostic proprement dit, permet d'optimiser les différents moyens qui seront mis en œuvre lors des investigations pour la caractérisation des pollutions en se focalisant sur les zones à risque identifiées.

#### 4.4. MESURES SUR SITE

Parmi les différentes méthodes de mesures sur site il faut distinguer les méthodes dont l'objectif est de mesurer directement la présence d'un polluant dans les sols ou leurs émanations, de celles indirectes comme la plupart des méthodes géophysiques classiques.

##### 4.4.1. Géophysique

Les méthodes classiques de géophysiques sont utilisées dans les diagnostics. L'objectif n'est pas de mesurer directement une pollution mais de mettre en évidence des discontinuités ou hétérogénéités du sous-sol comme par exemple :

- **Radars** pour mise en évidence de cavités,
- **Profils électriques** afin de localiser un substratum ;

Dans ces méthodes, une place à part doit être faite à la **Scintillométrie-Spectrométrie** qui permet une cartographie rapide de zones radioactives naturelles ou d'origine anthropique.

##### 4.4.2. Gaz

Dans le domaine spécifique de la mesure des gaz, deux méthodes de terrain sont particulièrement utilisées pour détecter des pollutions sur d'anciens sites miniers :

- **Radon** : mesures de radon pour les mines d'uranium mais aussi utilisées, comme pour le méthane, à l'aplomb d'anciens travaux souterrains de différente nature (fer, charbon, sel...)
- **Mercure** : le mercure peut être, en environnement comme en prospection, mesuré directement sur site.

##### 4.4.3. Métaux dans les sols

La mesure sur site des métaux dans les sols tend à se développer pour réduire en amont le nombre des mesures en laboratoire ou pour pouvoir prendre des mesures d'urgence si nécessaire. L'analyseur à fluorescence X est actuellement le seul équipement disponible et l'information fournie est au mieux semi-quantitative pour des mesures faites sur des sols homogénéisés. Ce type d'appareillage est peu utilisé en diagnostique et un peu plus fréquemment en phase de dépollution.

La **méthode EPA 6200** décrit les procédures d'utilisation in-situ des appareils portables de fluorescence X pour la détermination de la concentration des éléments dans les sols et les sédiments.

Dans le domaine du diagnostic de pollution des sols :

- les mesures des **métaux** directement sur site restent très qualitatives et chères,
- les mesures sur-site s'imposent par contre dans le domaine des minerais **radioactifs**.

#### 4.5. ECHANTILLONNAGE

Dans un diagnostic de pollution des sols, l'échantillonnage doit intégrer une approche fonctionnelle et spatiale.

Les **stratégies d'échantillonnages**, méthodes de prélèvement et de préparation des échantillons sont parfaitement connues et normalisées (cf annexe 1). Leur mise en œuvre est simplement une adaptation de moyens aux objectifs du diagnostic réalisé dans le cadre d'une étude de risque. Dans le cadre d'une étude de risque de pollution des sols la phase d'échantillonnage a pour objectif de caractériser à la fois les différentes sources de pollution et leurs impacts afin de pouvoir évaluer le risque d'exposition sanitaire et environnemental. Ceci constitue les principales lignes directrices d'une stratégie d'échantillonnage sachant que :

- le **plan d'échantillonnage** doit rendre compte de la distribution spatiale des éléments en 3D en prenant en considération l'hétérogénéité du milieu à caractériser par une densité d'échantillonnage adaptée (Salvador-Blanes 2002, Salpéteur *et al.* 2000).

- Le **mode de prélèvement** doit être adapté au milieu échantillonné mais aussi aux objectifs de l'étude et à la nature des polluants :

- prélèvements de type agronomiques avec composite de sols superficiels ou des premiers horizons pédologiques (0 à 1 m),
- rainurages de tranchée par passes métrique ou selon les différents horizons (quelques mètres),
- prélèvements à la tarière ou carottage (X mètres).

- Le **choix du mode de conditionnement** et de **préparation des échantillons prélevés** ont pour but d'assurer la conservation de l'échantillon et une bonne représentativité de l'échantillonnage. Les méthodes de préparation ne présentent pas de difficulté particulière lorsqu'on s'intéresse aux métaux. Elles consistent essentiellement à homogénéiser les prélèvements par l'enchaînement de techniques de **séchage, tamisage, broyage et quartage**.

## 4.6. ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

Les résultats d'analyses les plus couramment présentés dans les études correspondent à des « **teneurs totales en éléments traces** ». Ces résultats sont obtenus par la dissolution de toutes les formes de l'élément y compris celles intégrées dans les réseaux cristallins des minéraux (argiles, silicates, carbonates, oxydes, etc.).

Elles permettent d'évaluer le stock d'un élément à un moment donné, mais elles ne permettent pas de distinguer les formes chimiques présentes, elles ne fournissent donc aucun renseignement sur la mobilité de l'élément dans le sol ni sur sa disponibilité ou sa toxicité vis-à-vis des organismes vivants. Dans une approche de type normative, les résultats sont exprimés sous cette forme.

De nombreuses techniques sont disponibles pour **mieux caractériser** les différentes sources de pollutions telles que minerais et résidus divers, les sols et sédiments. Ces techniques sont du domaine de la **caractérisation minéralogique**, des **spéciations chimiques**, des **tests de disponibilité** chimique, ou des **tests toxicologiques et écotoxicologiques**.

### 4.6.1. Chimie

Au niveau de la chimie l'important est de caractériser d'une part le **contenu total** en un élément et d'autre part la **fraction soluble** d'un échantillon. Les **tests de lixiviations** renseignent sur les possibilités de transfert des différentes sources de pollutions vers le milieu aquatique et biologique. La difficulté réside dans le choix de la méthode en l'absence de procédure spécifique pour les sols : lixiviation in-situ ou sol excavé ? La méthode la plus couramment employée en France parmi les trois principaux tests de lixiviation normalisés pour les déchets est la **norme NF EN 12457-2 « Lixiviation, essai de conformité des déchets fragmentés et des boues »** (Norme préconisée par l'administration pour l'admission des déchets en décharge, remplace la XP 31- 210).

A noter que les **attaques ménagées**, couramment utilisées par l'INRA pour les sols agricoles afin d'apprécier la part d'un élément assimilable par les plantes, correspondent à quelque chose d'intermédiaire entre attaque totale et test de lixiviation (Lespagnol 2003, Blanchard 2000).

Les **spéciations** sont à envisager au cas par cas. Il s'agit de méthodes d'analyse permettant de remplacer la mesure de la concentration totale d'un élément dans un échantillon par la séparation, l'identification et le dosage individuel de toutes les "formes" de cet élément dans cet échantillon, comme par exemple : **Mesures isotopiques, Composés organométalliques** de Pb, Hg, As ou Sn...

Pour la partie chimie nous renvoyons aux nombreuses publications citées en bibliographie et aux catalogues des laboratoires. On note dans les catalogues de différents laboratoires, BRGM et INRA par exemple, que :

- le **laboratoire INRA** d'Arras est nettement orienté vers l'épandage des boues de stations d'épuration (STEP) en séparant dans son catalogue les boues et les sols,

- le **laboratoire BRGM** d'Orléans regroupe les sols avec les déchets sous la rubrique analyse des « sols pollués et déchets industriels », les autres rubriques étant toujours dans le domaine de la chimie « roches, matériaux et minerais » ou « boues et sédiments ».

Cet exemple parmi d'autres est intéressant car il illustre parfaitement la diversité de la notion de sol : « ressource à protéger » qui va recevoir un « déchet » pour l'INRA, « sol pollué » donc déchet pour le BRGM. En pratique, ce genre d'orientation est à prendre en considération dans le choix d'un laboratoire et lorsqu'on compare des résultats issus de laboratoires différents.

#### 4.6.2. Minéralogie

Les déterminations minéralogiques (macroscopiques, microscopiques, RX) permettent après séparation ou non des différentes phases, de caractériser les différents minéraux ou matériaux supports de la pollution. A noter que ces déterminations sont très utiles pour distinguer les apports anthropiques dans un contexte de fonds géochimiques élevés.

- l'analyse chimique du contenu total en un élément trace est fréquemment utilisée dans une approche normative,
- elle doit être complétée dans tous les cas dans le cadre d'une approche « risque » par une caractérisation plus fine des échantillons avec d'autres méthodes (lixiviation, spéciation, granulométrie, minéralogie, tests toxicologiques et écotoxicologiques...)

#### 4.7. CARTOGRAPHIE

La distribution spatiale de la pollution est mise en évidence par une représentation cartographique définissant des **zones** et **horizons** de sols plus ou moins pollués. Cette **cartographie 3D** étant réalisée à partir de résultats d'analyses ponctuels nécessite une **interpolation** : empirique ou à partir d'outils de modélisation. La représentativité de la cartographie des éléments analysés dépend bien évidemment de la « grille » initialement choisie dans la stratégie d'échantillonnage.

Il se pose à ce stade, où l'on passe des analyses chimiques à la cartographie des teneurs en polluants, la question de l'apport de la **géostatistique**. En bibliographie, de nombreuses études font intervenir **la géostatistique dans le domaine des sites et sols pollués**, de la définition d'une stratégie d'échantillonnage à la représentation des résultats.

Les stratégies d'échantillonnage sont, comme vu précédemment, issues le plus souvent d'une réflexion des praticiens dont les critères de choix peuvent être considérés empiriques. Etant donné que l'échantillonnage vise à réduire les incertitudes spatiales, la géostatistique :

- Fournit les outils et les résultats nécessaires à une rationalisation rigoureuse et systématique d'un programme d'échantillonnage,
- Permet une analyse cohérente des données, des incertitudes et des erreurs qui les entachent.



## 5. Evaluation et Contrôle qualité

Comme indiqué aux chapitres précédents, les étapes d'une analyse du risque lié à la pollution d'un site par des métaux sont nombreuses. A toutes ces étapes sont liées des **incertitudes** plus ou moins grandes selon le volume et la qualité des **données disponibles**. Au-delà du **contrôle qualité** de la bonne application de méthodes normalisées à chacune des étapes du diagnostic, se pose la question de l'évaluation des performances de l'étude de risque dans son ensemble. Les recherches bibliographiques ont permis de trouver de nombreux articles scientifiques récents traitant de l'influence d'informations incomplètes (ou non-disponibles), sur la qualité des résultats d'une étude d'impact environnementale.

Les articles récents, en particulier de la revue « **Environmental Impact Assessment Review** »<sup>1</sup> (EIAR), montrent que, au-delà d'un simple contrôle qualité, l'analyse des points forts et des points faibles d'une étude est de plus en plus souvent réalisée, et ce dans le monde entier des USA à l'Inde ou la Turquie, en passant par l'Europe. A titre d'exemple, dans le seul numéro 26 de cette revue, on trouve les articles suivants :

**USA** : "[The influence of incomplete or unavailable information on environmental impact assessment in the USA](#)", pages 448–467.

**Finlande** : "[Quality control and the substantive influence of environmental impact assessment in Finland](#)", pages 481-491

**Inde** : "[EIA practice in India and its evaluation using SWOT analysis](#) (Strength, Weakness, Opportunity and Threat)", pages 492-510.

**Italie** : "Some common **shortcomings** in the treatment of impacts of linear infrastructures on natural habitat", pages 257-267..

**Grèce** : "[Evaluation of the EIA system performance in Greece, using quality indicators](#)", pages 242-256.

**Turquie** : "Strategic environmental assessment and national development plans in Turkey: Towards legal framework and operational procedure", pages 301-316.

Ces articles récents traitant de **sujets à la charnière de l'analyse et de la gestion du risque** constituent un bon point de départ pour des recherches plus approfondies. Ils sont construits sur la mise en évidence des points forts et des faiblesses des études (notion de « maillon faible »). Certains auteurs insistent sur les aspects **responsabilité**, en se référant à des décisions de justice prenant en considération les lacunes au niveau des données. A noter que si toutes les analyses de risque comportent des lacunes en termes d'informations, ces lacunes sont plus ou moins préjudiciables selon leur nature et leur ampleur.

---

<sup>1</sup> <http://www.sciencedirect.com/science/journal/01959255>

Au niveau européen, d'autres articles traitent des **aspects réglementaires** avec notamment les relations entre différentes directives se rapportant à l'environnement, l'eau ou les déchets, comme par exemple, toujours dans le n°26 de la revue EIAR : "[The Water Framework Directive and the Strategic Environmental Assessment Directive: Exploring the linkages](#)".

- toute analyse de risque comporte des lacunes qui doivent être évaluées en termes d'influence sur la qualité des résultats,
- cette évaluation des performances de l'étude met souvent en évidence des lacunes, notamment au niveau des données prises en compte. Ces lacunes ou certains raccourcis tendant à bruler des étapes peuvent mettre en péril les résultats de l'ensemble de l'analyse.

:

## 6. Sources d'information

Les sources d'information dont est tirée la synthèse très générale sur les pratiques actuelles d'analyse de risque appliqué aux sites pollués, sont à ranger dans les trois catégories suivantes :

- normes sur la qualité des sols,
- articles récents des nombreuses revues scientifiques internationales,
- sites WEB des organismes nationaux ou internationaux.

Parmi ces différentes sources de données, les références retenues sont celles traitant plus particulièrement de l'analyse de risque et du diagnostic de pollution par les métaux qui peuvent être utilisées dans le secteur minier.

L'ensemble de ces articles scientifiques, thèses, rapports et guides méthodologiques, **sont rassemblés sur un CD, en annexe 2 de ce rapport.**

### 6.1. NORMES QUALITE DES SOLS

Un inventaire des normes sur la **qualité des sols** est présenté en annexe 1. Il montre que ces normes couvrent tous les thèmes se rapportant à la pollution des sols :

- Vocabulaire et description,
- Echantillonnage et préparation des échantillons,
- Méthodes d'analyses chimiques et de caractérisation des pollutions,
- Méthodes d'analyse physique,
- Méthodes d'analyse biologique.

Ces normes ne concernent pas uniquement les métaux, mais cet inventaire illustre que dans le cas d'un diagnostic de pollution d'un site, il est toujours possible de se référer, dans un but de traçabilité et harmonisation, à des procédures normalisées, et ce à toutes les étapes. Un exemple intéressant, pour illustrer le volet « Méthodes d'analyse chimiques de caractérisation des pollutions », est d'évoquer ici le cas des normes pour l'évaluation des risques de transfert des polluants présents dans les sols.

- **Quelles normes pour évaluer les risques de transfert des polluants ?**

Comme évoqué précédemment, la mesure de la quantité totale d'éléments en traces dans les sols ne suffit pas pour évaluer réellement les risques de transfert vers les horizons profonds, les nappes d'eau et les organismes biologiques. La partie mobilisable est appréciée actuellement par l'utilisation, faute de tests spécifiques pour les sols, des tests de lixiviation utilisés habituellement pour les déchets (mâchefer, cendres volantes, Réfiom, ...). Cet usage peut être justifié par le fait

qu'un sol pollué peut-être assimilé à un déchet mais du fait de la nature physico-chimique particulière d'un sol, les résultats ne sont pas jugés toujours très satisfaisants.

Aussi, la volonté est désormais affichée de **développer des normes spécifiques** permettant d'accéder à la fraction mobile et donc potentiellement disponible pour les êtres vivants. Ainsi, plusieurs normes sont en discussion au comité international (**ISO TC 190**) traitant de la qualité du sol.

Une première série de normes (**ISO21268-1, -2 et -3**) est en cours de finalisation et devrait être publiée très prochainement :

- Ces normes de lixiviation séquentielle, inspirées de celle des déchets, concernent **l'extraction à l'eau** d'échantillons de sol avec des rapports massiques liquide/solide respectivement de 2 et 10 (étapes 1 et 2) et par percolation ascendante en colonne (étape 3). Ces essais permettent d'évaluer la quantité d'un élément ou d'une molécule potentiellement mobilisable à l'eau ainsi que l'écotoxicité des éluats ainsi obtenus.
- Cette lixiviation à l'eau n'étant pas suffisante lorsque les transferts vers les êtres vivants doivent être étudiés, deux autres méthodes sont en cours d'élaboration. Il s'agit, d'une part, d'une extraction à l'aide de nitrate d'ammonium pour évaluer la quantité d'éléments en traces échangeables et, d'autre part, d'une procédure utilisant **plusieurs lixiviations en parallèle avec de l'eau ajustée à différents pH** afin d'apprécier l'effet de ce paramètre sur la mobilité des contaminants. Enfin, un document guide portant sur la sélection de méthodes d'évaluation de la biodisponibilité des contaminants dans les sols est au stade du démarrage. Ce document couvre tous les aspects de la biodisponibilité : vis-à-vis des écosystèmes (ex : végétaux, animaux), de l'homme (ex : disponibilité intestinale) et des bactéries (ex : application à la biodégradation).

Parmi le grand nombre de normes concernant les sols, nous avons extrait de l'inventaire disponible sur le site AFNOR celles illustrant bien la diversité de la problématique se rattachant aux sols pollués. Dans ces fiches, AFNOR indique les grandes lignes de la Norme et précise son domaine d'application.

Nous avons retenu, par exemple, des normes traitant :

- **de la santé et de la sécurité**
  - NF ISO 15800 (X 31-604)- « Caractérisation des sols relative à l'exposition des personnes » (2004),
  - NF ISO 10381-3 (X 31-008-) « Echantillonnage – Lignes directrices relatives à la sécurité » (2002)
- des **méthodes in-situ** de détection et de caractérisation des pollutions (norme FD X 31-611)
  - Partie 1 : « Guide général pour les analyses des gaz des sols in situ employées en criblage de terrain » (1997)
  - Partie 2 : « Guide général pour l'utilisation de méthodes géophysiques en criblage de terrain » (1999)
- de l'**échantillonnage** (NF ISO 10381)
  - Partie 1 : « Lignes directrices pour l'établissement des programmes d'échantillonnage »,
  - Partie 2 : « Lignes directrices pour les techniques d'échantillonnage » (2003)

- de méthodes spécifiques de **dosage** :
  - NF ISO 11262 (X 31-407) « Dosage des cyanures » (2004)
  - NF ISO 16772 (X 31-432) « Dosage du mercure » (2004)
- De **caractérisations spécifiques** :
  - NF ISO 15176 (X 31-602) « Caractérisation de la terre excavée et d'autres matériaux du sol destinés à la réutilisation » (2003),
  - NF ISO 15799 (X 31-603) « Lignes directrices relatives à la caractérisation, écotoxicologique des sols et des matériaux du sol » (2004).

Les normes concernant la qualité des sols :

- traitent de toutes les phases du diagnostic, depuis l'utilisation des **méthodes in-situ** et la stratégie d'échantillonnage jusqu'à l'analyse,
- correspondent très souvent, en dehors du cas des **méthodes de dosage**, à des **lignes directrices** ou des **guides** de caractérisation ou de stratégie d'investigation.

## 6.2. REVUES SCIENTIFIQUES

Un grand nombre de revues scientifiques traite des différentes thématiques recoupées par la problématique de l'évaluation des risques liés à la pollution des sites par des métaux. Elles sont très souvent disponibles en ligne. Parmi les revues directement accessibles au BRGM avec des articles téléchargeables dans leur intégralité, nous avons rapidement examiné le contenu des publications essentiellement pour l'année 2006 pour 20 revues publiées chez 3 éditeurs : Elsevier, Springer et S.S.S.A (Soil Science Society of America).

Les thématiques couvertes sont celles explicitées dans le titre des journaux spécialisés suivants<sup>2</sup> :

**Elsevier** : Environmental pollution (33 articles), Applied geochemistry (27 articles), Geochemical Exploration (22 articles), Ecotoxicology and Environmental Safety (16 articles), EIA\_Review (14 articles), Environment International (12 articles), Environmental Radioactivity (6 articles), Environmental Modelling (5 articles).

**Springer** : Environmental Monitoring and Assessment (11 articles), Water, Air & Soil Pollution (5 articles), Environmental Geology (2 articles), Environmental Geochemistry and Health (2 articles), Ecotoxicology (3 articles), Aquatic Ecology (1 article), Journal of Analytical Chemistry (1 article).

**SSSA** : Journal of Environ Quality (35 articles), Heavy Metals in the Environment (13 articles), Soil Chemistry (4 articles), Soil mineralogy (2 articles), Ecological Risk Assessment (1 articles).

---

<sup>2</sup> Le nombre d'articles entre parenthèses correspond aux articles dont le texte est intégralement disponible sur le CD

Ces articles scientifiques récents constituent la base de recherches bibliographiques plus poussées dans le cadre de la thèse réalisée dans le cadre du projet SUR qui vise à approfondir nos connaissances sur le compartiment superficiel (tranche 0 – 20 m), à la fois support ou source de pollution et milieu d'exposition pour l'homme et les écosystèmes

### 6.3. AUTRES SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES (SITES WEB)

Les autres sources bibliographiques disponibles sur le WEB sont nombreuses. Elles sont cités ici en les regroupant selon que les références traitent plus particulièrement soit de la pollution des sols en général, de l'évaluation du risque ou du diagnostic.

#### 6.3.1. Généralités sur les sites et sols pollués

Parmi la très grande richesse et diversité de références sur les sites et sols pollués deux sources, l'une référence européenne et l'autre nationale, méritent d'être retenues pour une recherche plus approfondie sur le sujet :

❖ **Consoil 2005** (Europe)

[http://www.kvvm.hu/szakmai/karmentes/egyeb/consoil\\_2005/consoil\\_2005.htm](http://www.kvvm.hu/szakmai/karmentes/egyeb/consoil_2005/consoil_2005.htm)

La Conférence Internationale **CONSOIL 2005 - référence européenne en matière de gestion et de réhabilitation des sols pollués** - s'est tenue en novembre 2005 à Bordeaux. Le CD des présentations de ce dernier congrès rassemble de nombreux articles, d'origines très diverses, liés à la pollution des sites et à l'évaluation des risques. Les communications sont regroupées sous différents thèmes et sessions spéciales :

- Thème A : les aspects réglementaires (cadre européen) ;
- Thème B : les différents milieux (sols, eaux, sédiments) ;
- Thème C : la caractérisation des sites et l'évaluation du risque ;
- Thème D : Les concepts et méthodes de réhabilitation ;
- Thème E : La prise de décision et gestion des terrains en fonction du risque ;
- Thème F : Des exemples de cas ;
- Thème G : Les polluants.

Parmi tous ces thèmes, on retiendra plus particulièrement comme **point de départ pour des recherches plus approfondies** :

- les **11 sessions du thème C** qui abordent tous les outils et méthodes de caractérisation d'un site, de l'échantillonnage à la modélisation sous tous ses aspects (transferts, exposition) en passant par les tests de lixiviations et la géochimie isotopique ;
- Les **cas concrets du thème F** avec les exemples du secteur minier de la **session F1** et des **méga sites et friches** de la **session F3**.

❖ R.E.C.O.R.D (France)

R.E.CO.R.D. est un réseau coopératif de recherche qui fait appel aux différentes spécialités de la recherche en environnement. Il travaille essentiellement sur le problème du traitement des déchets ainsi que sur celui des sols pollués. Cette structure en réseau, unique en France dans sa conception, permet la réalisation des recherches dans un cadre de coopération tripartite : **industriels, organismes publics et chercheurs**. Cette coopération est effective à tous les stades de la recherche : définition des thèmes, conduite de l'étude, validation et valorisation des résultats.

Les programmes de recherche du réseau sont en 2006 regroupés en quatre axes principaux :

- AXE 1 : Connaissance et caractérisation des déchets et des pollutions ;
- AXE 2 : Traitement et valorisation des déchets et des sols ;
- AXE 3 : Evaluation des impacts sanitaires et environnementaux ;
- AXE 4 : Approche sociale de la gestion des déchets et des sols .

Des **synthèses des publications et rapports** de l'association R.E.C.O.R.D sont disponibles sur leur site internet (<http://www.record-net.org>). Parmi les synthèses des rapports les plus récents, sur les thématiques sols pollués et déchets, on peut citer par exemple :

- Stratégie et technique d'échantillonnage des sols pour l'évaluation des pollutions- synthèse de mai 2006 de l'Etude N°04-0510/1A –CNRSSP.
- Détermination du caractère radioactif d'un déchet : Etat des réglementations et pratiques dans différents états membres de la communauté Européenne – synthèse de décembre 2005 de l'étude N°05-0127/1A – Adit - Subatech
- Méthodes d'évaluation des risques environnementaux et risque acceptable : état des lieux & étude comparative – synthèse de novembre 2005 de l'étude N°04-0811/1A – Université de Lille.
- Typologie des enjeux environnementaux et usage des différentes méthodes d'évaluation environnementales – synthèse de juin 2005 du rapport final de l'étude N°03-1011/1A – RDC-Environnement
- Meilleures pratiques d'analyse des polluants cibles dans des matrices solides complexes (déchets, sols et matériaux pollués) – synthèse de décembre 2004 de l'étude N°03-0130/1A –Polden Insavalor
- Développement d'un outil de gestion intégrant les risques économiques pour la réhabilitation des sites contaminés – synthèse de mai 2004 de l'étude N°02/0507/1A – Ecole polytechnique de Montréal
- Projet ASPYREN : évaluation du comportement environnemental des déchets ou des sols contenant de l'arsenic, application à des cendres de pyrite – Synthèse de février 2004 des études N°01-0121 et 01-0122/1A – BRGM-Polden Insavalor-Laepsi.

En dehors de ces dernières publications, on trouve, en remontant plus avant dans les archives, des études par exemple sur les tests de lixiviations et les transferts de polluants dans les sols, la

déontologie de la métrologie de l'environnement ou l'évaluation de la dangerosité des déchets industriels.

❖ **Autres sources :**

A ce stade, sans entrer dans la multitude des références propres aux différents organismes français travaillant sur la thématique tels que par exemple BRGM, INERIS, ADEME ou INRA, il faut signaler les colloques ou journées organisées sur une substance ou thématique particulière :

- **Journées arsenic, plomb ou mercure** ; les synthèses de ces rencontres facilitent les recherches bibliographiques en constituant un état de la situation sur le sujet à un moment donné ; <http://www.sitespollues.ecologie.gouv.fr/ActesConferences.html>
- **Colloques du type GISOS** sur l'après-mine, (voir CD actes du colloque de 2005).

### 6.3.2. Evaluation du risque

En termes **d'évaluation du risque** les références françaises ou européennes citées ci-dessus peuvent être complétées par des références plus spécifiques issues de la culture Nord-Américaine et notamment de **pays miniers** comme le Canada (sources fédérales et provinciales) qui intègrent dans l'évaluation du risque les aspects **sanitaires** et **environnementaux**.

#### **USA**

Dans le cas des sites et sols pollués, la structure fédérale est articulée autour de l'initiative Superfund (loi CERCLA : Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act) qui vise à résorber les sites réputés les plus dangereux, recensés sur une liste de priorité nationale (NPL). L'objet "Superfund" crée un espace concret pour la mise en œuvre d'actions de recherche et développement intégrées. Il constitue une porte d'entrée pour opérer un état des lieux des recherches et des acteurs scientifiques impliqués dans les thématiques "sites et sols pollués".

Aux Etats-Unis, le système de R&D sur les sites pollués est foisonnant et peu lisible. Les recherches portant sur les sites pollués, de la caractérisation à la correction des effets environnementaux et sanitaires, n'échappent pas aux règles générales propres à la science et à la technologie prévalant dans ce pays :

- l'ensemble des thématiques sont couvertes, à un excellent niveau et avec de nombreux moyens ;
- approche "bottom-up", peu de stratégies de R&D sont définies, hormis dans le cadre de "visions" ou d'initiatives ;
- dispersion des acteurs.

Aux USA, les programmes de recherche et développement à l'échelle fédérale dans le domaine des sols pollués, des risques sanitaires associés et des méthodes de dépollution des sites sont regroupées en deux principales structures:

- Le **Superfund Basic Research Program** qui est piloté par les National Institutes of Health (NIH/NIEHS), *Site Web* : <http://www-apps.niehs.nih.gov/sbrp/> , *Budget 2005* : 80 millions US \$.

- les **Hazardous Substance Research Centers** de l'Environmental Protection Agency (EPA), <http://www.hsrb.org/>. Le HSRC est une organisation nationale qui poursuit des études dans la gestion des sols pollués. Il est financé par l'agence de protection de l'environnement (EPA), le département de l'énergie (DOE), et le département de la défense (DOD). Des fonds supplémentaires peuvent provenir du milieu universitaire, de l'industrie, et des agences gouvernementales.

Pour des recherches bibliographiques plus avancées sur ce qui se fait dans le domaine aux USA nous renvoyons :

- au **rapport de l'Ambassade de France** à Washington, du 28 septembre 2005, intitulé « Recherche et développement sur les sols pollués aux Etats-Unis, analyse de deux programmes structurants » qui présente les grandes caractéristiques des programmes évoqués ci-dessus : budget, thèmes d'intervention, ainsi que les principaux renseignements sur les équipes scientifiques impliquées.

Ce rapport contient de **nombreux liens interactifs** vers les différentes équipes et centres de recherches dont ceux des **HSRC régionaux comme celui des « Rocky Mountain »**, <http://www.engr.colostate.edu/hsrb/>, spécialisé sur le thème « Amélioration de la connaissance des aspects géochimiques, biologiques, et hydrogéologiques des problèmes environnementaux associés avec l'exploitation des mines ».

- Autres sites et publications de l'EPA, <http://nlquery.epa.gov/epasearch/epasearch>.
- Aux Sites internet de l'USGS :

- Rubrique « **Contamination and pollution** » (= Introduction of harmful substances into the environment by human action or natural processes) <http://www.usgs.gov/science/science.php?term=769&order=alpha>

Page Web très générale sur la pollution avec toutes les thématiques : substances, toxicité et écotoxicité, différents milieux ... Un lien de cette page, [Abandoned Mine Lands \(AML\)](#), ouvre en particulier sur le programme de réhabilitation des sites miniers.

- Rubrique "**Mining hazards**" (= Dangerous conditions which result from the extraction of naturally occurring mineral deposits. Includes tunnel collapses, fires, and explosions) <http://www.usgs.gov/science/science.php?term=750>,

Cette page, plus spécialisée, constitue une bonne entrée vers une dizaine de thématiques telles que par exemple : le drainage minier en général ou dans le cas des mines de charbon, le comportement de substances comme Pb ou Hg, les transferts de pollution... Cette page d'entrée est parfaitement complémentaire du site HSRC « Rocky Mountain » car la plupart de ses terrains de jeu sont constitués par des gisements de la partie orientale des USA comme par exemple les **mines de charbon de Pennsylvanie**.

## **CANADA**

Dans la synthèse, nous nous sommes beaucoup inspiré des sources canadiennes fédérales et provinciales, des différents ministères et organismes en charge de l'environnement ou de la gestion des ressources naturelles.

Comme aux USA, les moyens mis en œuvre sont très importants avec comme objectif, au-delà de la simple hiérarchisation des problèmes, d'aller jusqu'à la réhabilitation. On retrouve plus ou moins la même chose que sur les sites des USA avec en plus :

- Une forte interconnexion, au niveau fédéral et provincial, entre ressources naturelles, environnement et protection du milieu aquatique,
- Un important développement récent de l'approche risque prenant en compte les écosystèmes (notamment aquatiques)

**Ministère de l'environnement**, <http://www.ec.gc.ca/>

Ce ministère a comme mandats de :

- Conserver et améliorer la qualité de l'environnement naturel, notamment celle de l'eau, de l'air et du sol;
- Préserver les ressources renouvelables du Canada, notamment les oiseaux migrateurs, la flore et la faune sauvages en général, à conserver et à protéger les ressources en eau du Canada;
- Coordonner les plans et les programmes fédéraux relatifs à l'environnement.

## **Ministère des Ressources naturelles**

Avec notamment Le **Groupe de l'environnement** des Laboratoires des mines et des sciences minérales de **CANMET**, des études sont réalisées dans le domaine des technologies de **traitement des résidus miniers solides et liquides** et des effluents des usines de concentration, du déclassement des mines et de la restauration de leur site. Ses principaux programmes sont les suivants :

- [Gestion des résidus et stériles miniers](#)
- [Technologies des effluents miniers](#)
- [Les métaux et l'environnement](#)

Les initiatives spéciales comprennent :

- [NEDEM \(Programme de neutralisation des eaux de drainage dans l'environnement minier\)](#)
- [SMART \(Technologies de restauration et de gestion durables des résidus miniers\)](#)
- [ÉTIMA \(Programme d'évaluation des techniques de mesure d'impacts en milieu aquatique\)](#)
- [ETEM \(Examens toxicologiques des effluents miniers\)](#)

## **Associations professionnelles**

- [L'Association minière du Canada](#)
- [Enviromine](#)

- International Council on Mining and Metals ICMM - <http://www.icmm.com>

On trouve sur ces différents sites institutionnels ou professionnels de nombreux guides de bonnes pratiques, directives, lignes directrices sur toutes les phases de l'exploitation minière et sur tous les aspects environnementaux.

Il faut citer comme publications récentes, pour les thématiques risque et métaux, le guide du projet **MERAG** (Metal Risk Assessment Guidance document) : "**Good practice in metals risk assessments**".

De nombreux documents sont orientés sur les effluents et leur impact sur le milieu aquatique, comme par exemple le rapport **AQUAMIN** « Évaluation des effets de l'exploitation minière sur le milieu aquatique au Canada » et ses développements plus récents.

Il ressort de l'examen de l'ensemble des documents de sources nord-américaines que l'objectif principal des études est ici la protection du milieu en traitant les principales sources de pollutions en amont.

### 6.3.3. Diagnostic de pollution des sols

- En terme de **diagnostic de pollution** des sols nous avons vu que tout ce qui concerne la méthodologie est du domaine :
  - de l'application à bon escient des **normes existantes sur la qualité des sols**,
  - ou à défaut, de l'adaptation de **méthodes normalisées dans le domaine des déchets** comme par exemple dans le domaine des tests de lixiviation (voir les thèses de Blanchard (2000) et Lespagnol (2003), disponibles sur le CD).
- En ce qui concerne les **sols et leurs propriétés** les références doivent être recherchées au niveau national auprès des sources 1) de type **INRA** dans le domaine des sols agricoles (= sol ressource à protéger), 2) de type **BRGM** notamment en ce qui concerne les publications sur les fonds géochimiques et **BRGM, INERIS** ou **ADEME** en ce qui concerne les sols pollués et les déchets.
- La aussi dans le domaine du secteur minier la méthodologie est nord-américaine ; les états miniers nord-américain ayant développé des guides spécifique à cette thématique. (voir biblio).



## 7. Conclusion

En conclusion à cette étude bibliographique, il ressort que **l'évaluation des risques** est aujourd'hui une approche communément admise pour évaluer le niveau de pollution. Le **diagnostic de pollution** doit, dans l'optique de cette approche, ne pas se limiter à l'analyse du contenu total en un élément métallique, comme c'était le cas dans le cadre d'une approche normative. Il doit intégrer des méthodes physico-chimiques de caractérisation des sols plus complexes : séparations de phase, déterminations minéralogiques et spéciations chimiques.

- **Evaluation du risque** : les références montrent dans leur diversité que la **méthodologie** est aujourd'hui suffisamment développée, dans le domaine de la pollution des sols par les métaux, pour mener à bien les études scientifiques nécessaires aux décideurs en charge de la gestion et de l'aménagement des sites.
- **Diagnostic de pollution** : les **normes qualité des sols** fournissent toutes les lignes directrices et méthodes de mesure pour mener à bien un diagnostic de pollution dans un souci de traçabilité et reproductibilité mais aussi sécurité. Le choix et l'enchaînement des méthodes doit être définie dans une stratégie d'échantillonnage qui prend en compte les spécificités du site et les objectifs de l'étude.
- **Sources de références** : Les normes de qualité des sols sont internationales (ISO pour la plupart et déclinées en AFNOR ou normes européennes) ; En revanche, l'origine diverse des sources de référence consultées traduit la diversité culturelle liée à l'origine de ces sources : **françaises, européennes et nord-américaines**. Les différentes références montrent que l'application au secteur minier ne pose pas de problème méthodologique particulier à condition de s'inspirer des lignes directrices, guides méthodologiques et autres références prenant en compte les spécificités de ce secteur. C'est dans les pays miniers d'Amérique du Nord, USA et Canada, que ces spécificités ont été le mieux pris en compte en particulier dans le cadre d'ambitieux programmes scientifiques.
- **Approfondissement des recherches**. Les recherches bibliographiques peuvent être approfondies dans différentes directions notamment dans :
  - le **domaine de la normalisation** pour 1) le **choix des normes pertinentes** du domaine qualité des sols (ou adaptation à partir d'autres domaines du type déchets ou matériaux), 2) le **choix des tests de lixiviation**, cet axe est dans le prolongement du précédent mais il mérite d'être développé en particulier, car très spécifique de la problématique environnement minier. Les points de départ, pour ces recherches plus approfondies, sont d'une part l'inventaire des normes, d'autre part les thèses de Blanchard (2000) et Lespagnol (2003).
  - L'adaptation de l'étude de risque à l'échelle d'un **bassin minier** à partir des études spécifiques à ce secteur développées dans le cadre des vastes programmes des principaux organismes nord-américains tels que l'EPA, l'USGS ou les ministères canadiens.



## **Annexe 1**

### **Inventaire des normes sur la qualité des sols**



## **Normes ISO Qualité des sols**

### **Généralités**

ISO 11074:2005 : Qualité du sol – Vocabulaire - ISO 11074-1:1996 - Qualité du sol - Vocabulaire - Partie 1: Termes et définitions relatifs à la protection et à la pollution du sol

ISO 11074-2:1998 - Qualité du sol – Vocabulaire - Partie 2: Termes et définitions relatifs à l'échantillonnage

ISO 11074-4:1999 - Qualité du sol - Vocabulaire - Partie 4: Termes et définitions relatifs à la réhabilitation des sols et sites

ISO 11259:1998 - Qualité du sol - Description simplifiée du sol

ISO 14507:2003 - Qualité du sol - Prétraitement des échantillons pour la détermination des contaminants organiques

ISO 15903:2002 - Qualité du sol - Format d'enregistrement des données relatives aux sols et aux sites

ISO 16133:2004 - Qualité du sol - Lignes directrices pour l'établissement et l'entretien de programmes de surveillance

ISO 18589-1:2005 - Mesurage de la radioactivité dans l'environnement - Sol - Partie 1: Lignes directrices générales et définitions

### **Qualité du sol - Echantillonnage**

ISO 10381-1:2002 - Qualité du sol – Échantillonnage - Partie 1: Lignes directrices pour l'établissement des programmes d'échantillonnage

ISO 10381-2:2002 - Qualité du sol – Échantillonnage - Partie 2: Lignes directrices pour les techniques d'échantillonnage

ISO 10381-3:2001 - Qualité du sol - Échantillonnage -Partie 3: Lignes directrices relatives à la sécurité

ISO 10381-4:2003 - Qualité du sol – Échantillonnage - Partie 4: Lignes directrices pour les procédures d'investigation des sites naturels

ISO 10381-5:2005 - Qualité du sol - Échantillonnage - Partie 5: Lignes directrices pour la procédure d'investigation des sols pollués en sites urbains et industriels

ISO 10381-6:1993 - Qualité du sol – Échantillonnage - Partie 6: Lignes directrices pour la collecte, la manipulation et la conservation de sols destinés à une étude en laboratoire des processus microbiens aérobies

ISO 10381-7:2005 - Qualité du sol - Échantillonnage - Partie 7: Lignes directrices pour l'échantillonnage des gaz du sol

ISO 10381-8:2006 - Qualité du sol – Échantillonnage - Partie 8: Lignes directrices pour l'échantillonnage des stocks de réserve

ISO 11464:1994 - Qualité du sol - Prétraitement des échantillons pour analyses physico-chimiques

ISO 22892:2006 - Qualité du sol - Lignes directrices pour l'identification de composés cibles par chromatographie en phase gazeuse et spectrométrie de masse

ISO 23611-1:2006 - Qualité du sol - Prélèvement des invertébrés du sol - Partie 1: Tri manuel et extraction au formol des vers de terre

ISO 23611-2:2006 - Qualité du sol - Prélèvement des invertébrés du sol - Partie 2: Prélèvement et extraction des micro-arthropodes (Collembola et Acarina)

### **Propriétés chimiques des sols**

ISO 10382:2002 - Qualité du sol - Dosage des pesticides organochlorés et des biphényles polychlorés - Méthode par chromatographie en phase gazeuse avec détection par capture d'électrons

ISO 10390:2005 - Qualité du sol - Détermination du pH

ISO 10693:1995 - Qualité du sol - Détermination de la teneur en carbonate - Méthode volumétrique

ISO 10694:1995 - Qualité du sol - Dosage du carbone organique et du carbone total après combustion sèche (analyse élémentaire)

ISO 11047:1998 - Qualité du sol - Dosage du cadmium, du chrome, du cobalt, du cuivre, du plomb, du manganèse, du nickel et du zinc - Méthodes par spectrométrie d'absorption atomique dans la flamme et électrothermique

ISO 11048:1995 - Qualité du sol - Dosage du sulfate soluble dans l'eau et dans l'acide

ISO 11260:1994 - Qualité du sol - Détermination de la capacité d'échange cationique effective et du taux de saturation en bases échangeables à l'aide d'une solution de chlorure de baryum

ISO 11261:1995 - Qualité du sol - Dosage de l'azote total - Méthode de Kjeldahl modifiée

ISO 11262:2003 - Qualité du sol - Dosage des cyanures

ISO 11263:1994 - Qualité du sol - Dosage du phosphore - Dosage spectrométrique du phosphore soluble dans une solution d'hydrogénocarbonate de sodium

ISO 11264:2005 - Qualité du sol - Dosage des herbicides - Méthode par CLHP avec détection par UV

ISO 11466:1995 - Qualité du sol - Extraction des éléments en traces solubles dans l'eau régale

ISO 13536:1995 - Qualité du sol - Détermination de la capacité d'échange cationique potentielle et des teneurs en cations échangeables en utilisant une solution tampon de chlorure de baryum à pH = 8,1

ISO 13877:1998 - Qualité du sol - Dosage des hydrocarbures aromatiques polycycliques Méthode par chromatographie en phase liquide à haute performance

ISO 13878:1998 - Qualité du sol - Détermination de la teneur totale en azote par combustion sèche ("analyse élémentaire")

ISO 14154:2005 - Qualité du sol - Dosage de certains chlorophénols - Méthode de chromatographie en phase gazeuse avec détection par capture d'électrons

ISO 14235:1998 - Qualité du sol - Dosage du carbone organique par oxydation sulfochromique

ISO 14254:2001 - Qualité du sol - Détermination de l'acidité échangeable dans un extrait au chlorure de baryum

ISO 14255:1998 - Qualité du sol - Détermination de l'azote nitrique, de l'azote ammoniacal et de l'azote soluble total dans les sols séchés à l'air en utilisant le chlorure de calcium comme solution d'extraction

ISO/TS 14256-1:2003 - Qualité du sol - Dosage des nitrates, des nitrites et de l'ammonium dans les sols bruts par extraction au moyen d'une solution de chlorure de potassium - Partie 1: Méthode manuelle

ISO 14256-2:2005 - Qualité du sol - Dosage des nitrates, des nitrites et de l'ammonium dans des sols bruts par extraction avec une solution de chlorure de potassium - Partie 2: Méthode automatisée avec analyse en flux segmenté

ISO 14869-1:2001 - Qualité du sol - Mise en solution pour la détermination des teneurs élémentaires totales - Partie 1: Mise en solution par l'acide fluorhydrique et l'acide perchlorique

ISO 14869-2:2002 - Qualité du sol - Mise en solution pour la détermination des teneurs élémentaires totales - Partie 2: Mise en solution par fusion alcaline

ISO 14870:2001 - Qualité du sol - Extraction des éléments en traces par une solution tamponnée de DTPA

ISO 15009:2002 - Qualité du sol - Détermination par chromatographie en phase gazeuse des teneurs en hydrocarbures aromatiques volatils, en naphthalène et en hydrocarbures halogénés volatils - Méthode par purge et piégeage avec désorption thermique

ISO 15178:2000 - Qualité du sol - Dosage du soufre total par combustion sèche

ISO 16703:2004 - Qualité du sol - Dosage des hydrocarbures de C10 à C40 par chromatographie en phase gazeuse

ISO 16772:2004 - Qualité du sol - Dosage du mercure dans les extraits de sol à l'eau régale par spectrométrie d'absorption atomique de vapeur froide ou par spectrométrie de fluorescence atomique de vapeur froide

ISO 17380:2004 - Qualité du sol – Détermination des cyanures totaux et des cyanures aisément libérables - Méthode d'analyse en flux continu

ISO 18287:2006 - Qualité du sol - Dosage des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) - Méthode par chromatographie en phase gazeuse avec détection par spectrométrie de masse (CG-SM)

ISO 20279:2005 - Qualité du sol - Extraction du thallium et dosage par spectrométrie d'absorption atomique électrothermale

ISO 22155:2005 - Qualité du sol - Dosage des hydrocarbures aromatiques et halogénés volatils et de certains éthers par chromatographie en phase gazeuse - Méthode par espace de tête statique

### **Propriétés physiques des sols**

ISO 11265:1994 (ISO 11265:1994/Cor 1:1996) - Qualité du sol – Détermination de la conductivité électrique spécifique

ISO 11271:2002 - Qualité du sol – Détermination du potentiel d'oxydoréduction - Méthode de terrain

ISO 11272:1998 - Qualité du sol - Détermination de la masse volumique apparente sèche

ISO 11277:1998 - Qualité du sol - Détermination de la répartition granulométrique de la matière minérale des sols - Méthode par tamisage et sédimentation

ISO 11465:1993 - Qualité du sol – Détermination de la teneur pondérale en matière sèche et en eau - Méthode gravimétrique

ISO 11508:1998 - Qualité du sol – Détermination de la masse volumique des particules

ISO 16720:2005 - Qualité du sol - Prétraitement des échantillons par lyophilisation pour analyse subséquente

ISO/TS 17892-1:2004 (ISO/TS17892-1:2004/Cor1:2006)- Reconnaissance et essais géotechniques – Essais de laboratoire sur les sols - Partie 1: Détermination de la teneur en eau

ISO/TS 17892-2:2004 (ISO/TS 17892-2:2004/Cor1:2006)-Reconnaissance et essais géotechniques – Essais de laboratoire sur les sols - Partie 2: Détermination de la masse volumique d'un sol fin

ISO/TS 17892-3:2004 (ISO/TS 17892-3:2004/Cor 1:2006) - Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 3: Détermination de la masse volumique des grains - Méthode du pycnomètre

ISO/TS 17892-4:2004 - Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 4: Détermination de la granulométrie

ISO/TS 17892-5:2004 (ISO/TS 17892-5:2004/Cor 1:2006) - Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 5: Essai à l'oedomètre sur sol saturé

ISO/TS 17892-6:2004 (ISO/TS 17892-6:2004/Cor 1:2006) - Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 6: Essai au cône

ISO/TS 17892-7:2004 (ISO/TS 17892-7:2004/Cor 1:2006) - Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 7: Essai de compression simple sur sol cohérent

ISO/TS 17892-8:2004 (ISO/TS 17892-8:2004/Cor 1:2006) - Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 8: Essai triaxial non consolidé non drainé

ISO/TS 17892-9:2004 (ISO/TS 17892-9:2004/Cor 1:2006) - Reconnaissance et essais géotechniques – Essais de laboratoire sur les sols - Partie 9: Essai triaxial consolidé sur sol saturé

ISO/TS 17892-10:2004 (ISO/TS 17892-10:2004/Cor 1:2006) - Reconnaissance et essais géotechniques – Essais de laboratoire des sols - Partie 10: Essai de cisaillement direct

ISO/TS 17892-11:2004 (ISO/TS 17892-11:2004/Cor 1:2006) - Reconnaissance et essais géotechniques – Essais de laboratoire sur les sols - Partie 11: Détermination de la perméabilité au perméamètre à charge constante ou variable

ISO/TS 17892-12:2004 (ISO/TS 17892-12:2004/Cor 1:2006) - Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12: Détermination des limites d'Atterberg

### **Propriétés biologiques des sols**

ISO 11266:1994 - Qualité du sol – Lignes directrices relatives aux essais en laboratoire pour la biodégradation de produits chimiques organiques dans le sol sous conditions aérobies

ISO 11267:1999 - Qualité du sol - Inhibition de la reproduction de *Collembola* (*Folsomia candida*) par des polluants du sol

ISO 11268-1:1993 - Qualité du sol - Effets des polluants vis-à-vis des vers de terre (*Eisenia fetida*) - Partie 1: Détermination de la toxicité aiguë en utilisant des substrats de sol artificiel

ISO 11268-2:1998 - Qualité du sol - Effets des polluants vis-à-vis des vers de terre (*Eisenia fetida*)- Partie 2: Détermination des effets sur la reproduction

ISO 11268-3:1999 - Qualité du sol - Effets des polluants vis-à-vis des vers de terre - Partie 3: Lignes directrices relatives à la détermination des effets sur site

ISO 11269-1:1993 - Qualité du sol - Détermination des effets des polluants sur la flore du sol  
Partie 1: Méthode de mesurage de l'inhibition de la croissance des racines

ISO 11269-2:2005 - Qualité du sol - Détermination des effets des polluants sur la flore du sol  
Partie 2: Effets des substances chimiques sur l'émergence et la croissance des végétaux supérieurs

ISO 14238:1997 - Qualité du sol - Méthodes biologiques - Détermination de la minéralisation de l'azote et de la nitrification dans les sols, et de l'influence des produits chimiques sur ces processus

ISO 14239:1997 - Qualité du sol - Méthodes de mesure de la minéralisation de produits chimiques organiques dans le sol sous conditions aérobies, au moyen de systèmes d'incubation de laboratoire

ISO 14240-1:1997 - Qualité du sol - Détermination de la biomasse microbienne du sol - Partie 1: Méthode par respiration induite par le substrat

ISO 14240-2:1997 - Qualité du sol - Détermination de la biomasse microbienne du sol - Partie 2: Méthode par fumigation-extraction

ISO 15473:2002 - Qualité du sol - Lignes directrices relatives aux essais en laboratoire pour la biodégradation de produits chimiques organiques dans le sol sous conditions anaérobies

ISO 15685:2004 - Qualité du sol – Détermination de la nitrification potentielle et inhibition de la nitrification -- Essai rapide par oxydation de l'ammonium

ISO 15952:2006 - Qualité du sol – Effets des polluants vis-à-vis des escargots juvéniles (*Helicidae*) - Détermination des effets sur la croissance par contamination du sol

ISO 16072:2002 - Qualité du sol – Méthodes de laboratoire pour la détermination de la respiration microbienne du sol

ISO 16387:2004 - Qualité du sol – Effets des polluants sur les *Enchytraeidae* (*Enchytraeus* sp.) - Détermination des effets sur la reproduction et la survie

ISO 16712:2005 - Qualité de l'eau – Détermination de la toxicité aiguë des sédiments marins et estuariens vis-à-vis des amphipodes

ISO 17126:2005 - Qualité du sol – Détermination des effets des polluants sur la flore du sol – Essai de détection de l'émergence des plantules de laitue (*Lactuca sativa* .)

ISO 17155:2002 - Qualité du sol - Détermination de l'abondance et de l'activité de la microflore du sol à l'aide de courbes de respiration

ISO 20963:2005 - Qualité du sol - Effets des polluants vis-à-vis des larves d'insectes (*Oxythyrea funesta*) - Détermination de la toxicité aiguë

ISO 22030:2005 - Qualité du sol - Méthodes biologiques – Toxicité chronique sur les plantes supérieures

ISO 23611-1:2006 - Qualité du sol - Prélèvement des invertébrés du sol - -Partie 1: Tri manuel et extraction au formol des vers de terre

ISO 23611-2:2006 - Qualité du sol - Prélèvement des invertébrés du sol - Partie 2: Prélèvement et extraction des micro-arthropodes (*Collembola* et *Acarina*)

ISO 23753-1:2005 - Qualité du sol - Détermination de l'activité des déshydrogénases dans les sols - Partie 1: Méthode au chlorure de triphényltétrazolium (CTT)

ISO 23753-2:2005 - Qualité du sol - Détermination de l'activité des déshydrogénases dans les sols - Partie 2: Méthode au chlorure de iodotétrazolium (CIT)

### **Propriétés hydrologiques des sols**

ISO 10573:1995 - Qualité du sol - Détermination de la teneur en eau de la zone non saturée - Méthode à la sonde à neutrons de profondeur

ISO 11274:1998 - Qualité du sol - Détermination de la caractéristique de la rétention en eau - Méthodes de laboratoire

ISO 11275:2004 - Qualité du sol - Détermination de la conductivité hydraulique en milieu non saturé et de la caractéristique de rétention en eau - Méthode par évaporation de Wind

ISO 11276:1995 - Qualité du sol - Détermination de la pression d'eau dans les pores - Méthode du tensiomètre

ISO 11461:2001 - Qualité du sol - Détermination de la teneur en eau du sol en fraction volumique, à l'aide de carottiers - Méthode gravimétrique

ISO 15175:2004 - Qualité du sol - Caractérisation des sols en relation avec la nappe phréatique

ISO 15709:2002 - Qualité du sol - Eau du sol et zone non saturée - Définitions, symboles et théorie

ISO 16586:2003 - Qualité du sol - Détermination de la teneur en eau volumique du sol à partir de la masse volumique apparente sèche connue - Méthode gravimétrique

ISO 17312:2005 - Qualité du sol - Détermination de la conductivité hydraulique de matériaux poreux saturés à l'aide d'un perméamètre à paroi rigide

ISO 17313:2004 - Qualité du sol - Détermination de la conductivité hydraulique de matériaux poreux saturés à l'aide d'un perméamètre à paroi flexible

**Autres normes relatives à la qualité du sol (Y compris les aspects liés à l'agriculture)**

ISO 15176:2002 - Qualité du sol - Caractérisation de la terre excavée et d'autres matériaux du sol destinés à la réutilisation

ISO 15799:2003 - Qualité du sol - Lignes directrices relatives à la caractérisation écotoxicologique des sols et des matériaux du sol

ISO 15800:2003 - Qualité du sol - Caractérisation des sols relative à l'exposition des personnes

ISO 19258:2005 - Qualité du sol - Guide pour la détermination des valeurs de bruit de fond

# **Exemples Extraits de l'Inventaire des normes sur la QUALITE DES SOLS**

## **Description et domaines d'application**

**AFNOR**

11, avenue Francis de Pressensé  
93571 Saint-Denis la Plaine Cedex  
Date de mise à jour : 07/02/2005

**NF ISO 15800 (X 31-604) « Qualité du sol – Caractérisation des sols relative à l'exposition des personnes » (2004)**

Des caractérisations de sols et de sites relatives à l'exposition des personnes sont effectuées dans le monde entier. En général, elles sont planifiées et conduites par des bureaux d'études ou des groupes d'experts. Les données issues de ces caractérisations sont utilisées pour l'évaluation de l'exposition des personnes. En outre, ces caractérisations interviennent non seulement dans les processus de prises de décisions au niveau des entreprises, des individus et des instances locales et nationales mais aussi dans les recommandations et réglementations édictées par des instances nationales et internationales.

Les évaluations relatives aux effets potentiels sur la santé des personnes, dus à l'exposition, peuvent être utilisées dans les cadres suivants :

- classification des sites contaminés ;
- recommandations relatives à la réhabilitation des sites, des sols et des matériaux du sol, par exemple fixation de priorités pour la dépollution ;
- décisions quant à l'usage future/planifié des sites contaminés ;
- décisions à propos de l'élimination/du traitement/de la réutilisation des sols/matériaux du sol pollués ou dépollués.

Les données nécessaires à l'évaluation de l'exposition des personnes dépendent, dans une certaine mesure, de la façon dont l'exposition est évaluée. Ainsi, les calculs peuvent reposer sur des scénarios nécessitant chacun des données différentes.

L'étendue des investigations nécessaires à cette évaluation peut varier en fonction du niveau de contamination et de l'usage du site en question. Dans certains cas, l'évaluation de l'exposition potentielle sur la santé des personnes ne peut s'appuyer que sur des informations concernant les substances présentes dans le sol, leurs niveaux de concentration et les paramètres pertinents du sol. Dans d'autres cas, des informations plus détaillées sur la disponibilité de la substance se révèlent nécessaires. Ces informations dépendront de la nature et de la concentration de la substance, des paramètres pertinents du sol et du type d'exposition concernant l'usage du site en question. En outre, la méthode et les stratégies d'échantillonnage peuvent découler de l'usage du site et des voies d'exposition possibles.

En raison des dépenses élevées qui tendent à s'imposer à la fois pour les propriétaires fonciers privés et les fonds publics destinés aux mesures correctives concernant les terres contaminées, aux mouvements généraux de capitaux et aux entreprises industrielles/commerciales, la demande en matière de normes internationales concernant la caractérisation des sols contaminés est très forte, notamment au regard de la santé des personnes. Les normes internationales associées à ce domaine complexe viendront à l'appui de la création d'une base scientifique commune pour l'échange d'informations, le développement des connaissances et d'une solide évaluation commerciale.

***Domaine d'application :***

La présente norme internationale spécifie les lignes directrices concernant la nature et l'étendue de la caractérisation des sols nécessaire à l'évaluation de l'exposition des personnes aux substances pouvant être à l'origine d'effets néfastes. La présente norme internationale ne prend pas en compte les possibilités de normalisation des calculs qui sont utilisés pour l'évaluation de l'exposition des personnes.

En outre, la présente norme internationale ne tient pas compte des informations nécessaires à l'évaluation de l'exposition des personnes relative à des produits contaminants lixiviés depuis le sol vers les eaux de surface et/ou souterraines ou transférés par écoulement. De la même manière, elle ne prend pas en compte les aspects liés à la radioactivité et aux bactéries pathogènes présentes dans le sol et à l'exposition potentielle des personnes qui en découle.

**NF ISO 10381-3 (X 31-008-) « Qualité du sol – Echantillonnage – Partie 3 : Lignes directrices relatives à la sécurité » (2002)**

**Introduction :**

La présente partie de l'ISO 10381 fait partie d'une série de normes internationales destinées à être utilisées ensemble si nécessaire. **L'ISO 10381-3 traite de la sécurité rapportée aux différentes études de sols.**

**Domaine d'application :**

La présente partie de l'ISO 10381 décrit les dangers pouvant se présenter au cours d'une investigation de site et lors du prélèvement d'échantillons de sols et d'autres matériaux terrestres, y compris les dangers inhérents aux opérations d'échantillonnage, les dangers pouvant provenir de la contamination et les autres dangers physiques. Sont indiquées les précautions à prendre pour que les risques liés à tout échantillonnage ou investigation sur site puissent être contrôlés et minimisés.

La présente partie de l'ISO 10381 donne des lignes directrices relatives aux dangers et aux risques qui peuvent être rencontrés lors d'une investigation de site.

- en général,
- sur les zones agricoles,
- sur des zones contaminées,
- au cours d'études géologiques, ainsi qu'une indication des activités qui peuvent engendrer des risques.

Elle décrit ensuite les modes opératoires qui peuvent être appliqués pour contrôler les risques.

La présente partie de l'ISO 10381 est conçue spécifiquement pour traiter des problèmes de sécurité durant l'échantillonnage et l'investigation sur site, et n'est pas destinée à fournir des lignes directrices pour d'autres situations telles que la construction.

NOTE Les anciens sites de production de munitions et autres matériels militaires posent des problèmes particuliers aux investigateurs et autres personnes impliquées dans la manipulation des échantillons prélevés dans de tels endroits. Les lignes directrices données dans la présente partie de l'ISO 10381 seront utiles dans de telles situations, mais il convient que des lignes directrices supplémentaires sur les mesures de précautions à prendre soient obtenues des spécialistes responsables de l'exploitation antérieure de ces sites.

**FD X 31-611-1 (X 31-611-1) « Qualité du sol – Méthodes de détection et de caractérisation des pollutions – Partie 1 : Guide général pour les analyses des gaz des sols in situ employées en criblage de terrain » (1997)**

**Introduction :**

Le présent document a été réalisé à partir des connaissances et de l'expérience des professionnels au moment de son édition. Il est dans sa nature d'évoluer avec les connaissances des techniques.

Les techniques de criblage de terrain par analyse des gaz du sol sont des techniques d'investigations sommaires permettant de recueillir des informations de précision limitée, dans un délai court et à un coût modéré sur les produits volatils présents dans le sol ou le cas échéant sur les produits pouvant dégager ces composés volatils (tels que produits organiques pouvant générer du méthane par fermentation).

**Domaine d'application :**

Le présent document s'applique aux analyses des gaz du sol réalisées in situ, avec du matériel portable.

Le but de l'opération est de disposer d'une analyse de la phase gazeuse interstitielle de la zone non saturée du sol (zone vadose) soit parce que cette information est utile par elle-même, soit parce qu'elle est indicative des produits présents dans le sol.

Les techniques de criblage de terrain par analyse des gaz du sol peuvent être utilisées pour une étude de sol soit à l'étape de l'étude simplifiée des risques, soit à celle de l'étude détaillée des risques à des fins de dégrossissage. Dans les deux cas, on fait appel à cette technique après exploitation des informations disponibles sur la nature et l'état du sol. Elle permet de détecter et de délimiter sommairement une zone polluée et doit être complétée le cas échéant par une détermination quantitative selon la précision requise. Les produits recherchés sont volatils en tant que tels ou sont des substances volatiles issues de la dégradation des composés organiques lourds dans les conditions spécifiques de l'ensemble étudié (sol + produits). Pour une même concentration, certains COV seront détectés ou pas en fonction de leur tension de vapeur et de la température extérieure. Selon la technique utilisée, des composés volatils autres que les COV peuvent aussi être détectés (comme, par exemple, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S,...).

**FD X 31-611-2 « Qualité du sol – Méthodes de détection et de caractérisation des pollutions – Partie 2 : Guide général pour l'utilisation de méthodes géophysiques en criblage de terrain » (1999)**

**Domaine d'application :**

Le présent document a été réalisé à partir des connaissances et des expériences des professionnels au moment de son édition. Il est dans sa nature d'évoluer avec les connaissances et les techniques.

La première partie est consacrée aux généralités et aux critères nécessaires à la réussite d'une campagne géophysique.

La seconde décrit les principales méthodes retenues, leur domaine d'application, leur principe et leurs limites d'utilisation.

La troisième partie tente, après avoir envisagé les principaux problèmes à traiter, de proposer la ou les meilleures méthodes géophysiques pour les résoudre si elles existent.

L'application des méthodes géophysiques nécessite de bien définir le problème à étudier (établir un cahier des charges), comprenant l'exigence imposée au géophysicien soumissionnaire de montrer que la technique proposée est adaptée au problème posé par le donneur d'ordre et prévoir, chaque fois que possible, la possibilité de valider la méthode dans des situations comparables (test sur des exemples connus).

Cette démarche sera facilitée et ses chances de succès grandement améliorées par la réalisation préalable de recherches historiques et documentaires.

Quelle que soit la méthode utilisée, un référentiel topographique (de préférence coordonnées Lambert) doit être établi et conservé tout au long des études puis du suivi du site.

Les méthodes géophysiques sont des méthodes déductives (indirectes) qui permettent de mesurer une caractéristique physique du sous-sol et tentent d'interpréter leur variations dans l'espace : résistivité (ou conductivité), densité, susceptibilité magnétique, etc. Pour pouvoir les utiliser avec succès, il est indispensable qu'il existe, pour le paramètre mesuré, un contraste suffisant entre la cible et l'encaissant ou entre les différentes couches à identifier. Ceci ne suffit pas toujours, notamment dans le cas de sites industriels pour lesquels certaines infrastructures (constructions métalliques, ligne HT, etc.) peuvent induire des « bruits » dont l'intensité est supérieure à celle engendrée par les cibles recherchées. Une attention particulière doit donc être portée à « l'environnement » dans lequel une prospection est envisagée.

Le présent document se limite aux principales méthodes géophysiques de surface éventuellement applicables aux sites et sols pollués. Les diagraphies en sont exclues, de même que les méthodes de mesure de radioactivité. Par ailleurs, certaines de ces méthodes peuvent également être utilisées en milieu aquatique mais cet aspect ne fait pas l'objet du présent document.

**Domaine d'application :**

Les méthodes géophysiques permettent de détecter des discontinuités physiques. Le présent document décrit les mesures géophysiques de surface permettant de fournir des informations sur la structure, le type et l'état du sous-sol sous forme de grandeurs de mesures définies physiquement, sans qu'il y ait intervention

dans le sol. Seules les pollutions chimiques impliquant une discontinuité d'ordre physique pourront être mises en évidence. Dans tous les cas les résultats devront ensuite être confirmés par les investigations complémentaires (en général, forages de calage et analyses de sol).

Ces techniques trouvent tout particulièrement leur place dans la phase de diagnostic initial sur un site potentiellement pollué, après la recherche historique, pour :

- a) détecter des anomalies physiques (hétérogénéités naturelles ou artificielles résultant ou non de pollutions) permettant de localiser certaines sources potentielles (par exemple des fûts enterrés, etc.) ou de délimiter l'extension de certaines zones (par exemple, une ancienne décharge) ;
- b) mettre en évidence des anomalies chimiques comme une zone saline puis éventuellement suivre son évolution. A ce sujet, il convient de noter qu'une pollution chimique ne peut être détectée que si elle conduit à une discontinuité physique suffisante, supérieure aux variations naturelles ou artificielles d'origines différentes ;
- c) donner des indications ou confirmer le contexte géologique et hydrogéologique. Cette application n'est pas développée dans ce document.

**NOTE** Les méthodes géophysiques trouvent leur place au début des investigations de terrain pour rechercher les objets enterrés ainsi que pour préciser le contexte géologique et pour délimiter le contour d'une zone (zone polluée, terre remaniée, décharge recouverte, objets enfouis ou envasés, etc.).

Ces investigations préliminaires peuvent aussi être utilisées en phase de diagnostic approfondi et éventuellement pour suivre l'évolution d'une pollution saline.

Les méthodes géophysiques permettent une investigation détaillée du territoire, les résultats obtenus sont alors utiles pour interpôler les résultats d'autres investigations ponctuelles (forage par exemple). Cependant, de nombreuses contraintes restreignent les possibilités d'emploi qui sont explicitées dans chaque cas.

<b>NF ISO 10381-1 (X 31-008-1) « Qualité du sol – Echantillonnage – Partie 1 : Lignes directrices pour l'établissement des programmes d'échantillonnage » (2003)</b>
--

**Introduction :**

La présente norme internationale fait partie d'une série de norme internationale destinées à être utilisées conjointement en fonction des besoins. L'ISO 10381 (toutes les parties) traite des modes opératoires d'échantillonnage correspondant aux divers objectifs de l'étude du sol.

**Domaine d'application :**

La présente partie de l'ISO 10381 définit les principes généraux à appliquer à la conception des programmes d'échantillonnage qui visent à caractériser et contrôler la qualité du sol et à identifier les sources et les effets de la contamination du sol et du matériau associé, en mettant l'accent sur :

- les modes opératoires nécessaires à déterminer l'emplacement des points où des échantillons peuvent être prélevés en vue d'un examen ou sur lesquels des instruments peuvent être installés pour le mesurage in situ, y compris du point de vue statistique,
- les modes opératoires de détermination des quantités d'échantillons à prélever et des éventuelles combinaisons de ces derniers,
- les méthodes de collecte des échantillons,
- les méthodes de conservation, de stockage et de transport des échantillons afin d'éviter toute détérioration ou contamination.

<b>NF ISO 10381-2 (X 31-008-2) « Qualité du sol – Echantillonnage – Partie 2 : Lignes directrices pour les techniques d'échantillonnage » (2003)</b>
--

**Introduction :**

La présente partie de l'ISO 10381 fait partie d'une série de normes destinées à être utilisées conjointement en fonction des besoins. Elle traite des divers aspects de l'échantillonnage pour les besoins de l'étude du

sol, y compris les études agricoles et de contamination, mais ne couvre pas les études à des fins géotechniques.

Les principes généraux à appliquer à la conception des programmes d'échantillonnage pour les besoins de la caractérisation du sol et l'identification des causes et des effets de la pollution du sol et du matériau associé sont donnés dans l'ISO 10381-1. Il convient de consulter l'ISO 10381-1, l'ISO 10381-4 et l'ISO 10381-5 pour que ce qui concerne l'équipement adapté, les informations sur les emplacements d'échantillonnage, les essais à réaliser, le type d'échantillon, la profondeur d'échantillonnage, le type de sol et la représentativité requise du système d'échantillonnage.

**Domaine d'application :**

La présente partie de l'ISO 10381 donne des lignes directrices relatives aux techniques de prélèvement et de stockage des échantillons de sol en vue d'examiner ceux-ci ultérieurement pour obtenir des informations sur la qualité du sol.

La présente partie de l'ISO 10381 fournit des informations sur les équipements types qui peuvent être utilisés dans des situations d'échantillonnage particulières pour mettre en œuvre des modes opératoires d'échantillonnage corrects et recueillir des échantillons représentatifs. Des lignes directrices sont fournies concernant la sélection des équipements et des techniques à utiliser pour prélever correctement des échantillons remaniés et non remaniés à différentes profondeurs.

Les lignes directrices fournies visent à faciliter le prélèvement d'échantillons pour déterminer la qualité du sol à des fins agricoles et donnent également des indications pour le prélèvement d'échantillons pour des études de contamination qui nécessiteront des techniques et des compétences distinctes. La présente partie de l'ISO 10381 fait référence à certains aspects de la collecte d'échantillons d'eau souterraine et de gaz présents dans le sol dans le cadre d'un programme d'échantillonnage des sols.

Les présentes lignes directrices ne couvrent pas spécifiquement les études à des fins géotechniques, même si les études de qualité du sol et les études géotechniques peuvent être avantageusement associées lorsque l'on envisage le redéveloppement d'un site.

La présente partie de l'ISO 10381 n'est pas applicable à l'échantillonnage des strates dures, telles que les socles rocheux.

Les techniques de collecte d'information sur la qualité du sol sans prélèvement d'échantillons, telles que les méthodes géophysiques, ne sont pas couvertes par la présente partie de l'ISO 10381.

**NF EN ISO 10381-4-1 (X 43-008-4) « Qualité du sol –Echantillonnage – Partie 4 : Lignes directrices pour les procédure d'investigation des sites naturels, quasi naturels et cultivés » (2003)**

**Introduction :**

La présente partie de l'ISO 10381 fait partie d'une série de norme internationale destinées à être utilisées conjointement en fonction des besoins. L'ISO 10381 traite des modes opératoires d'échantillonnage correspondant aux divers objectifs de l'étude du sol.

La terminologie générale utilisée est conforme à celle établie par l'ISO/TC 190 et, plus précisément, à la terminologie de l'échantillonnage présentée dans l'ISO 11074-2.

**Domaine d'application :**

La présente partie de l'ISO 10381 décrit l'échantillonnage des sols provenant de

- sites naturels et quasi naturels,
- zones utilisées pour l'agriculture (terre arables et pâturage),
- zones utilisées pour l'horticulture (y compris les jardins privés et les lotissements),
- zones utilisées pour les cultures particulières, l'arboriculture, les vignobles, etc.,

**X 31-115 (X 31-115) « Qualité des sols – Prélèvement et conservation des échantillons de sol en vue de la détermination de l'azote minéral sur sol frais » (2001)**

**Domaine d'application :**

Le présent document décrit une méthode de prélèvement, de conditionnement et de conservation d'échantillons de sols en vue de la détermination des teneurs en azote minéral du sol frais. Cette méthode s'applique aux sols cultivés, notamment en vue du suivi expérimental de la dynamique de l'azote, du calcul de la fertilisation azotée ou de l'évaluation des risques de lessivage de l'azote nitrique.

Le terme "azote minéral" comprend l'azote dissous dans la solution du sol ou fixé sur le complexe argilo-humique et qui existe sous la forme d'ion nitrate ( $\text{NO}_3^-$ , azote nitreux) et ammonium ( $\text{NO}_4^+$ , azote nitreux) et ammonium ( $\text{NO}_4^+$ , azote ammoniacal).

NOTE Dans certains sols caillouteux, l'utilisation de la sonde et de la tarière peut être problématique voire impossible.

**NF X 31-100 « Qualité des sols – Echantillonnage – Méthode de prélèvement d'échantillons de sol » (1992)**

**Domaine d'application :**

La présente norme a pour objet de définir une méthode générale d'échantillonnage des sols en vue d'analyses destinées à une interprétation agronomique afin d'évaluer certains paramètres de la fertilité. Cette méthode s'applique également en vue de l'analyse des sols sur lesquels peut être appliqué tout substrat susceptible d'augmenter la teneur en éléments tels que des boues des ouvrages de traitement des eaux usées urbaines. Ces analyses peuvent comprendre par exemple des déterminations de granulométrie, humidité, capacité d'échange, pH, carbonates, carbone organique, azote total, phosphore, cations échangeables, oligo-éléments et traces d'éléments polluants (voir articles 12).

Elle ne s'applique pas aux prélèvements pour études pédologiques, étude de drainage, détermination de l'azote minéral du sol frais, etc... pour lesquels des méthodes appropriées sont utilisées, ni aux prélèvements de sol pour diagnostic ou expertise de sites pollués ou susceptibles de l'être.

**NF ISO 11275 (X 31-558) «Qualité du sol – Détermination de la conductivité hydraulique en milieu non saturé et de la caractéristique de rétention en eau » (2004)**

**Introduction :** La teneur en eau du sol et la pression matricielle sont liées. Elles représentent les caractéristiques de la rétention en eau d'un sol. L'eau du sol, qui est en équilibre avec l'eau saturante, est à pression (ou succion) matricielle nulle et soit le sol est saturé, soit la phase gazeuse n'est plus constituée que de petites bulles. Au fur et à mesure qu'un sol saturé s'assèche, la pression matricielle diminue (c'est-à-dire devient plus négative) et les pores les plus grands se vident de leur eau. La diminution de la pression matricielle entraîne les pores plus petits à se vider à leur tour, jusqu'à ce que seuls les plus étroits contiennent encore de l'eau. Non seulement l'eau disparaît de la porosité du sol, mais l'épaisseur des films d'eau autour des particules du sol diminue. Ainsi, la baisse de la pression matricielle est liée à la diminution de la teneur en eau du sol [8],[9]. Des mesurages en laboratoire ou sur le terrain de ces deux paramètres peuvent être réalisés, et la relation, qui peut être représentée sous forme de graphique, de tableau ou éventuellement de formule, s'appelle la courbe caractéristique de rétention en eau du sol. Cette relation est valable du sol saturé au sol séché en étuve (pression matricielle d'environ à environ).

La courbe caractéristique de rétention en eau du sol diffère selon le type de sol. La forme et la position de la courbe par rapport aux axes dépendent des propriétés du sol, telles que la texture, la densité et l'hystérésis associées à l'historique de saturation et de séchage. Des points individuels de la courbe caractéristique de

rétenion en eau peuvent être définis à des fins spécifiques. La conductivité hydraulique est une mesure de la vitesse d'écoulement de l'eau liquide dans un sol sous l'influence des variations de pression matricielle d'un point à un autre du sol. La conductivité hydraulique d'un sol non saturé dépend des mêmes facteurs que la courbe caractéristique de rétenion en eau, qui présente également une hystérésis. Lorsqu'un sol saturé s'assèche, la conductivité hydraulique diminue, et il est pratique d'exprimer la conductivité hydraulique correspondant à la caractéristique de rétenion en eau de ce sol en fonction de la diminution de sa pression matricielle.

Les résultats obtenus à l'aide de ces méthodes peuvent être utilisés, par exemple, dans les cas suivants:

- pour fournir une évaluation de la distribution de la dimension de pores équivalents (par exemple l'identification de macropores et de micropores);
- pour déterminer les points caractéristiques de l'eau disponible pour les plantes dans le sol et répertorier les sols en conséquence (par exemple à des fins d'irrigation);
- pour déterminer l'espace poral efficace (par exemple pour la conception du drainage, l'évaluation des risques de pollution);
- pour contrôler les changements de structure d'un sol (dus, par exemple, au labour, au compactage ou à l'adjonction de matière organique ou de conditionneurs synthétiques de sol);
  - pour confirmer la relation entre la pression matricielle négative et d'autres propriétés physiques du sol (par exemple la conductivité hydraulique, la conductivité thermique);
  - pour déterminer la teneur en eau à des pressions matricielles négatives spécifiques (par exemple pour des études de dégradation microbiologique);
  - pour estimer d'autres propriétés physiques du sol considéré.

**NF ISO 15799 (X 31-603) « Qualité du sol – Lignes directrices relatives à la caractérisation écotoxicologique des sols et des matériaux du sol » (2004)**

**Introduction :**

La plupart des méthodes d'essai écotoxicologique existantes (essais biologiques) en cours d'harmonisation au plan international ont été mises au point pour décrire le potentiel écotoxique d'une substance lorsqu'on l'ajoute à un sol/matériau du sol. Ces méthodes peuvent être utilisées sous réserve de quelques modifications pour la caractérisation écotoxicologique sols/matériaux du sol pour ce qui concerne leur fonction, suivant l'utilisation prévue. Néanmoins, dans ce contexte, il convient que les utilisateurs de présentes méthodes gardent à l'esprit que la validation de celles-ci n'est pas terminée.

Les essais biologiques complètent les analyses chimiques classiques pour les substances ayant des propriétés toxiques. Les résultats obtenus par une analyse chimique peuvent être utilisés pour effectuer des évaluations écotoxicologiques à partir de données relatives aux substances identifiées, y compris les produits chimiques telles que leur potentiel de bioaccumulation. Ces données sont souvent rares (pour autant qu'elles existent) et en comprennent pas les éventuelles interactions (synergie/antagonisme) entre les produits chimiques et la matrice complexe du sol. En outre, une identification et une quantification exhaustives des substances sont irréalisables. Par conséquent, pour étudier l'éventuelle toxicité de mélanges chimiques complexes dans les sols, il est possible d'utiliser les essais écotoxicologiques des sols. L'extrapolation des essais de laboratoire aux conditions de terrain nécessite une prise en compte adéquate des facteurs environnementaux essentiels dans les conditions d'essai ainsi que le choix de critères d'effet écotoxicologiques appropriés. La présente norme internationale fait partie d'une série de normes qui

donnent des recommandations relatives aux sols et aux matériaux du sol eu égard à certaines fonctions et utilisations, y compris la préservation des organismes vivants. Il convient de la lire conjointement avec ces autres normes.

**Domaine d'application :**

La présente norme internationale fournit les lignes directrices relatives à la sélection des méthodes expérimentales permettant l'évaluation du potentiel écotoxique des sols et des matériaux du sol (par exemple terre excavées ayant fait l'objet d'une remédiation, remblais, talus) par rapport à leur utilisation prévue et aux effets éventuellement défavorables pour les organismes vivant dans l'eau et le sol, et le maintien des fonctions d'habitat et de rétention du sol.

La présente norme internationale ne traite pas des essais relatifs à la bioaccumulation. Les essais de génotoxicité utilisant des organismes eucaryotes du sol ne sont pas encore disponibles. La présente norme internationale ne s'applique pas à l'évaluation écologique des sols non contaminés en vue d'une utilisation naturelle, agricole ou horticole, de tels sols pouvant être intéressants s'ils peuvent servir de référence pour l'évaluation de sols provenant de sites contaminés. De même, elle ne concerne pas l'interprétation des résultats obtenus d'après les méthodes proposées dans son domaine d'application.

**NF ISO 15176 (X 31-602) « Qualité du sol –Caractérisation de la terre excavée et d'autres matériaux du sol destinés à la réutilisation » (2003)**

**Introduction :**

La présente norme internationale fait partie d'une série de lignes directrices relatives à l'évaluation des sols et des matériaux du sol en vue de certaines fonctions et utilisations. Il convient de la lire conjointement avec les autres normes internationales, dont certaines donnent des lignes directrices plus spécifiques en fonction de certaines utilisations énoncées dans le domaine d'application ou des aspects d'évaluation particuliers. Par exemple, l'ISO 15800 donne des lignes directrices concernant les études relatives à l'exposition des personnes à des substances potentiellement dangereuses et l'ISO 15175 donne des lignes directrices sur la caractérisation du sol en relation avec les nappes phréatiques.

Les sols sont le résultat dynamique de processus chimiques, physiques et biologique, ils résultent des interactions entre la nature inhérente des matériaux « parents », des conditions environnementales prédominantes et des humaines. Ils constituent une ressource naturelle qu'il convient de conserver dans la mesure du possible. Si des activités de construction, d'exploitation minière ou autres requièrent une excavation des sols et leur déplacement par rapport à leur situation naturelle, il convient, dans la mesure du possible, de les réutiliser de façon cohérente en fonction de leurs propriétés naturelles et de l'utilisation prévue dans le nouvel endroit d'implantation. Les sols prévus pour une réutilisation doivent généralement présenter un comportement à la lixiviation et des propriétés chimiques, géotechniques, physiques, biologiques et radiochimiques cohérentes avec cette utilisation ultérieure. Il convient de faire particulièrement attention dans les cas où il est impossible que le sol soit contaminé.

Il convient que les sols devant être excavés soient étudiés pour déterminer de quelle manière il est possible de les réutiliser de façon à réduire au minimum les quantités devant être éliminées sous forme de déchets et pour déterminer les impacts sur l'environnement susceptibles de résulter de la réutilisation. Le traitement des sols et des matériaux du sol visant à supprimer ou à détruire les contaminants ou à réduire leur présence dans l'environnement peut altérer les propriétés du sol. Il convient par conséquent de déterminer ces propriétés avant la réutilisation. Pour les sols artificiels, il est possible qu'il soit nécessaire de déterminer à la fois les caractéristiques des composants et celles du produit fabriqués.

L'objectif de la caractérisation du sol (ou de toute autre substance) tel que suggéré dans la présente norme internationale est généralement de permettre des jugements relatifs à son aptitude à une utilisation définie (par exemple l'exploitation des terres arables, les jardins de particuliers). Ces jugements peuvent être effectués par référence aux lignes directrices internationales ou nationales définissant des critères physiques, chimiques ou génériques qu'il est nécessaire de remplir ou par rapport à des critères établis sur

une base spécifique au site. Lorsque des substances susceptibles de nuire à la santé humaine ou à l'environnement sont présentes, il est également possible que le jugement soit basé sur une évaluation du risque qualitative, semi-quantitative ou complètement quantitative spécifique au site. Des lignes directrices formelles relatives à ces évaluations ont également été publiées par de nombreuses instances. Dans certains cas, ces lignes directrices s'inscrivent dans un cadre législatif. Des organisations professionnelles et certains organismes de normalisation ont également produit des lignes directrices.

Lors de la décision de réutiliser ou non les matériaux du sol, il est possible que d'autres objectifs complémentaires ou concurrents comme la protection du sol, de la mesure de l'eau et de l'air, les exigences de planification physique et les exigences législatives nationales soient à respecter.

L'évaluation du matériau du sol destiné à être réutilisé peut nécessiter le mesurage des caractéristiques chimiques, physiques, biologiques, géotechniques et radiochimiques du matériau du sol et du site d'origine aussi bien que du site d'accueil. Il convient d'identifier les paramètres qui sont en adéquation avec la tâche entreprise.

La présente norme internationale identifie les fonctions et les propriétés des matériaux du sol à l'endroit initial (site source) ainsi que les propriétés du nouveau site (site d'accueil) qui peuvent être applicables aux utilisations potentielles énoncées dans le domaine d'application et indique les normes internationales disponibles pour tel paramètres ou mode opératoire. Les aspects radiochimiques et géotechniques ne sont pas traités. Concernant des lignes directrices relatives aux aspects géotechniques de l'utilisation des matériaux du sol comme matériaux de construction, il convient de se référer aux autres normes internationales applicables (par exemple celles qui ont été produites par l'ISO/TC 182, Géotechnique, ou aux nationales en vigueur.

Le mode de traitement du sol après excavation peut affecter les propriétés du sol. Certaines suggestions concernant une méthode correcte de manipulation du sol et des pratiques et surveillance relatives après placement sont fournies à l'annexe B.

***Domaine d'application :***

La présente norme internationale fournit les lignes directrices concernant les essais pouvant être nécessaires pour caractériser les matériaux du sol destinés à être excavés et réutilisés, avec ou sans traitement préliminaire. Les matériaux du sol incluent la terre excavée, les matériaux de dragage, les matériaux de remblayage, les sols artificiels et les sols initialement pollués mais ayant été traités dans le but de supprimer ou de détruire les contaminants.

Elle prend en compte les différentes exigences du sol superficiel, du sous-sol et d'autres matériaux du sol comme les sédiments ou les sols traités. Des méthodes normalisées ISO sont listées, lorsqu'elles sont disponibles.

Les méthodes d'essai sont destinées à couvrir une grande variété d'utilisations finales possibles comme :

- les zones de jeu pour les enfants en bas âge, y compris les écoles maternelles, les jardins d'enfants, etc. ;
- les écoles ;
- les jardins et autres zones résidentielles ;
- les lotissements ;
- l'horticulture ;
- l'agriculture ;
- les travaux forestiers ;
- les zones de loisirs, par exemple les parcs, les terrains de sport ;
- la restauration d'écosystèmes endommagés ;
- les chantiers.

Elle est prévue pour être utilisée dans le cadre de la détermination de l'aptitude des matériaux du sol une réutilisation et l'évaluation des impacts sur l'environnement pouvant résulter de la réutilisation.

La présente norme internationale n'est pas applicable au dépôt des matériaux du sol dans l'eau ou la restauration du sous-sol. Elle ne traite pas des exigences géotechniques lorsque les matériaux du sol doivent être utilisés comme matériau de construction.

**NF ISO 11074-4 (X 31-002-4) « Qualité du sol – Vocabulaire – Partie 4 : Termes et définitions relatifs à la réhabilitation des sols et sites » (2000)**

**Introduction :**

Les sols et sites dégradés ou contaminés sont en principe soumis à une réhabilitation si l'estimation du risque encouru et du dommage subi le justifient. La gamme des techniques employées est large et comporte, à titre d'exemple : le traitement des sols sur sites et hors sites, l'excavation totale ou partielle du sol et sa mise en décharge en tant que déchets, ou le confinement du sol contaminé.

Une réhabilitation peut également être nécessaire pour les sols ayant subi par exemple une érosion, un compactage ou une induration ou pour les sols exposés à nouveau après avoir été couverts suite à la construction de routes, bâtiments, etc. pendant un certain temps.

Les objectifs principaux visés par la réhabilitation des sols et des sites sont multiples :

- protéger la santé humaine et l'environnement contre l'effet de la contamination de sols et de sites en réduisant les contaminations jusqu'à un niveau tolérable ;
- assurer la sécurité du site en attendant la mise au point de moyens de restauration adaptés ;
- permettre l'utilisation des sites à des fins définies ;
- restaurer la multifonctionnalité des sols et des sites.

**Domaine d'application :**

La présente partie de l'ISO 11074 définit une liste de termes fréquemment employés dans le domaine de la réhabilitation des sols et des sites.

**NF X 31-003 « Qualité des sols – Description du sol » (1998)**

**Introduction :**

Traditionnellement, la description des sols et de leur environnement se faisait à partir de levés de terrains et d'inventaires dont l'objet était de définir le contexte pédogénétique et d'évaluer les aspects appliqués, notamment le potentiel agronomique de ces sols. Aujourd'hui, de nombreuses observations se font dans le cadre beaucoup plus large d'études environnementales et englobent dans leurs objectifs les aspects suivants :

- l'identification de l'influence de l'homme sur les sols, et plus particulièrement les effets négatifs de cette influence (par exemple la pollution et la détérioration des propriétés physiques) ;
- la protection de terres dans le contexte d'une agriculture « durable » ;
- la prévision du sort réservé aux polluants introduits dans le sol ;
- la mise au point de bases de données spatiales (utilisées dans le cadre de SIG) visant à faciliter leur représentation géographique, ainsi que pour de nombreux autres usages.

Le présent document repose donc sur des aspects de l'approche traditionnelle de la description des sols (par exemple les « Directives pour la description des profils de sols » de la FAO 1990). La seule description des sols et des sites ne suffit toutefois pas. Il est nécessaire de procéder également à des mesures physiques, chimiques ou biologiques, en laboratoires. Une attention particulière doit être portée à la description précise des sites, au choix des méthodes d'échantillonnage et au nombre d'échantillons. Il faut donc impérativement placer le présent document dans le contexte des autres normes élaborées dans le domaine de la qualité des sols soit dans le cadre international de l'ISO/TC190 « Qualité des sols », soit dans le cadre de la normalisation française.

**Domaine d'application :**

Le présent document doit être utilisé comme un guide pour la description du sol et de son contexte environnemental sur un site donné. Il est important de noter que plusieurs échantillons peuvent être prélevés sur un même site. Les informations fournies par cette description permettront, lors de la présentation des résultats, de situer le contexte dans lequel ont été réalisés les prélèvements des échantillons analysés. Il est possible de ne pas enregistrer les données sous toutes les têtes de chapitres de la présente description.

**NF ISO 11262 (X 31-407) « Qualité du sol – Dosage des cyanures » (2004)**

Les cyanures peuvent être présents dans le sol sous forme d'ions cyanure et de complexes cyanurés. Ils peuvent être dosés comme aisément libérables, comme complexes cyanurés ou comme cyanures totaux. La présente norme internationale spécifie le dosage des cyanures aisément libérables, des complexes cyanurés et des cyanures totaux.

La présente norme internationale traite, en particulier, des deux sujets suivants :

- a) Libération et absorption d'acide cyanhydrique.
- b) Dosage des cyanures, respectivement des ions cyanure :
  - 1) méthode colorimétrique ;
  - 2) méthode titrimétrique avec indicateur.

**Domaine d'application :**

La présente norme internationale est applicable aux échantillons à l'état brut et spécifie deux méthodes de quantification permettant de doser les cyanures aisément libérables et les complexes cyanurés. Il n'est pas toujours nécessaire de doser les cyanures aisément libérables avant le dosage des complexes cyanurés. Dans ce cas, il est possible d'omettre la première partie du processus de distillation, afin de ne doser que les cyanures totaux.

Les méthodes sont applicables aux sols contenant entre 0,5 mg/kg et 10 000 mg/kg de cyanures totaux. Les méthodes utilisées, avec les plages correspondantes de concentration en cyanures contenus dans la portion aliquote prélevée dans la solution correspondante, sont les suivantes :

- a) Méthode colorimétrique - Cette méthode s'applique à des concentrations cyanures comprises entre 0,5 mg/kg et 50 mg/kg de l'échantillon d'origine.
- b) Méthode titrimétrique avec indicateur - Cette méthode s'applique à des concentrations en cyanures supérieures à 50 mg/kg dans l'échantillon d'origine (exempt de cailloux).

**NF ISO 16772 (X 31-432) « Qualité du sol – Dosage du mercure dans les extraits de sol à l'eau régale par spectrométrie d'absorption atomique de vapeur froide ou par spectrométrie de fluorescence atomique de vapeur froide » (2004)**

**Domaine d'application :**

La présente norme internationale spécifie une méthode de dosage du mercure dans un extrait de sol à l'eau régale, obtenu conformément à l'ISO 11464 et à l'ISO 11466, par spectrométrie d'absorption atomique ou spectrométrie de fluorescence atomique de vapeur froide. La limite de dosage est au moins de 0,1 mg/kg.

**NF X 31-120 « Qualité du sol – Détermination du cuivre, du fer, du manganèse et du zinc – Extraction par l'acétate d'ammonium en présence d'EDTA » (2003)**

**Domaine d'application :**

Le présent document a pour but de décrire une méthode de mise en solution du cuivre, du fer, du manganèse et du zinc contenus dans un échantillon de sol préparé pour essai, ainsi que le dosage spectrométrique de ces éléments.

Cette méthode permet d'estimer la quantité des oligo-éléments précités d'un sol susceptible d'être prélevés par les végétaux qui y sont implantés. Elle s'applique principalement aux sols agricoles.

L'interprétation des résultats à laquelle conduit cette méthode est du ressort de l'agronomie.

**NF ISO 11271 (X 31-557) « Qualité du sol – Détermination du potentiel d'oxydoréduction – Méthode de terrain » (2003)**

**Introduction :**

Le potentiel d'oxydoréduction du sol est un paramètre physico-chimique important, utilisé pour caractériser globalement le degré d'aération d'un sol. Sur site, il fournit des informations sur l'état d'oxydation ou de réduction des composants qui, selon les cas, jouent un rôle important dans la nutrition des végétaux, peuvent provoquer des phénomènes de toxicité ou intervenir dans les transferts gazeux vers l'atmosphère (effet de serre). Il peut également être utilisé, dans une certaine mesure, pour suivre les performances du sol lors de l'épandage ou du **compostage des boues et** adapter les applications en conséquence. En laboratoire, il peut être utilisé pour étudier les phénomènes de diffusion de l'oxygène des agrégats.

**Domaine d'application :**

La présente norme internationale spécifie une méthode de terrain pour la détermination du potentiel d'oxydoréduction, ou potentiel redox, d'un sol (Eh).

NOTE Le mesurage électrochimique du potentiel redox décrit n'est possible que pour un horizon de sol dont le degré d'humidité est défini comme frais ou plus humide, selon la classification présentée à l'annexe D.

**NF ISO 11048 (X 31-402) « Qualité du sol – Dosage du sulfate soluble dans l'eau et dans l'acide » (1995)**

**Domaine d'application :**

La présente norme internationale prescrit les modes opératoires de préparation des extraits aqueux et acides des sols séchés à l'air et de matériaux semblables au sol. La teneur en sulfate de ces extraits est déterminée par une méthode gravimétrique selon laquelle on ajoute du chlorure de baryum à l'eau ou à l'extrait acide, puis on assèche et pèse le précipité de sulfate de baryum. On calcule alors la teneur en sulfate à partir de la masse du matériau utilisé dans l'analyse et la masse de sulfate de baryum précipité.

La présente norme internationale s'applique à tous les types de sols séchés à l'air, par exemple préalablement traités conformément à l'ISO 11464.

La présente norme internationale s'applique à tous les types de sols séchés à l'air, par exemple préalablement traités conformément à l'ISO 11464.

La présente norme internationale se compose de sept sections :

Section 1 – Généralités

Section 2 – Prétraitement des échantillons et détermination de la teneur en matière sèche

Section 3 – Extraction du sol avec de l'eau dans une proportion sol/eau de 1 :5 masse/volume

Section 4 – Extraction du sol avec de l'eau dans une proportion sol/eau de 1 :2 masse/volume

Section 5 – Extraction du sol au moyen d'acide chlorhydrique dilué

Section 6 – Dosage du sulfate en solution par méthode gravimétrique utilisant du chlorure de baryum

Section 7 – Fidélité des méthodes et rapport d'essai.

**NF ISO 15175 « Qualité du sol – Caractérisation des sols en relation avec la nappe phréatique » (2004)**

**Domaine d'application :**

La présente norme internationale fournit des lignes directrices sur les principes régissant l'évaluation des sites, des sols et des matériaux provenant du sol, et sur les principales méthodes correspondantes, en relation avec leur rôle comme source de pollution des eaux souterraines et avec leur fonction de transfert, de dégradation et de transformation des contaminants.

Elle identifie et énumère des stratégies de surveillance, des méthodes d'échantillonnage, des méthodes de traitement des sols et des méthodes analytiques applicables.

Elle est applicable à l'évaluation de l'impact des contaminants sur les eaux souterraines, en relation avec :

- la qualité de l'eau potable,
- la qualité de l'eau de l'irrigation,
- l'usage industriel, et
- le débit de base naturel d'alimentation des cours d'eau.

**FD X 31-614 (X 31-614) « Qualité du sol – Méthodes de détection et de caractérisation des pollutions – Réalisation d'un forage de contrôle de la qualité de l'eau souterraine au droit d'un site potentiellement pollué » (1999)**

**Domaine d'application :**

Ce document s'applique à la conception et à la réalisation des forages de contrôle de la qualité de l'eau souterraine.

Il ne concerne par les réflexions préalables à mener avant leur mise en place, ni celles relatives aux modalités d'échantillonnage des terrains traversés ou de l'eau souterraine.

Compte tenu de la diversité des contextes géologiques et hydrologiques susceptibles d'être rencontrés, et de la multitude des produits et substances susceptibles d'être présents ou recherchés dans les formations traversées et l'eau souterraine, il apparaît impossible d'imposer une technique ou un matériau particulier pour la réalisation de ce type de forage.

**FD X 31-615 (X 31-613) « Qualité du sol – Méthodes de détection et de caractérisation des pollutions – Prélèvements et échantillonnage des eaux souterraines dans un forage » (2000)**

**Domaine d'application :**

Ce document s'applique au prélèvement et à l'échantillonnage dans un forage de contrôle de la qualité de l'eau souterraine potentiellement polluée en vue de :

- la détection, l'identification et l'évaluation de pollutions, résultant d'une activité anthropique quelle qu'elle soit ;
- la surveillance et l'analyse du déplacement d'un panache de pollution.

Un puits (fermier, agricole, ...) peut aussi constituer un ouvrage de contrôle de la qualité souterraine, dès lors qu'il répondra aux exigences techniques de ce type d'ouvrage (voir le document – FD X 31-614, de 1999) ; il faut donc s'en assurer avant de les utiliser dans le cadre d'une campagne de prélèvement d'eau souterraine. L'attention est attirée sur le fait que les piézomètres, dont la seule mission est comme leur nom l'indique, de permettre la mesure de la pression hydrostatique de la nappe en un lieu, tout comme de nombreux puits, ne recoupent que la partie supérieure de la nappe.

Ce document ne concerne pas :

- la mise en place, ni la réalisation des forages (voir FD X 31-614, de 1999).
- l'élaboration d'une stratégie d'échantillonnage, laquelle découle des résultats de l'enquête historique et de l'étude hydrogéologique documentaire (voir étape A du diagnostic initial) à réaliser en préalable sur le site à étudier.
- l'utilisation d'autres techniques de prélèvement d'eau dans des forages autres que ceux définis dans le document FD X 31-614 telles que par exemple les sondes à pointes filtrantes ;
- les échantillonnages destinés aux contrôles des captages d'eaux utilisés pour l'alimentation en eau potable (AEP).

**NF X 31-504 (X 31-504) « Qualité des sols – Méthode de mesure de la conductivité hydraulique horizontale équivalente et de la porosité de drainage in situ  
Méthode de Guyon » (1995)**

**Domaine d'application :**

La présente norme décrit la méthode et les techniques de mesurages des paramètres hydrodynamiques utilisés dans le cadre du drainage agricole. Cette méthode est appelée méthode de GUYON ou encore « méthode du puits et des piézomètres » ou « pompage d'essai ».

Les deux paramètres hydrodynamiques, conductivité hydraulique horizontale saturée et porosité de drainage, sont mesurés sur le terrain en présence d'une nappe à faible profondeur.

L'intérêt de cette méthode vient de la participation d'un grand volume de sol à l'écoulement, ce qui intègre les hétérogénéités locales et permet d'estimer une conductivité hydraulique horizontale équivalente qui tient compte de l'hétérogénéité verticale de la conductivité des différents horizons du sol où évolue la nappe.

**NF X 31-107 (X 31-107) « Qualité des sols – Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol – Méthode à la pipette » (2003)**

**Domaine d'application :**

Le présent document a pour objet de déterminer l'importance pondérale relative de différentes classes de particules, identifiées par leur taille, constitutives de squelette minéral des sols.

Il décrit la détermination de cinq classes granulométriques :

- Les argiles (0 à 2  $\mu\text{m}$ )
- Les limons fins (2 à 20  $\mu\text{m}$ )
- Les limons grossiers (20 à 50  $\mu\text{m}$ )
- Les sables fins (50 à 200  $\mu\text{m}$ )
- Les sables grossiers (200 à 2 000  $\mu\text{m}$ )

Il s'adapte au cas où les distinctions entre limons fins et grossiers d'autre part ne sont pas nécessaires.

Il ne prend pas compte les échantillons pour lesquels la composition granulométrique peut évoluer au cours du séchage à l'air lors de la préparation selon la norme NF ISO 14464. C'est par exemple le cas des sols volcaniques de type andosols pour lesquels le séchage induit une agrégation irréversible.

Pour effectuer l'analyse granulométrique de ces sols, il convient donc de les conserver à l'état humide.

Les quantités de gypse éliminées en cours de traitement sont limitées (voir paragraphe 8.2.4).

Il s'adapte au cas où la coupure entre limons grossiers et sables fins s'effectue à 63  $\mu\text{m}$  au lieu de 50  $\mu\text{m}$ .

- Le premier prélèvement à la pipette s'effectue à un temps et une profondeur calculés pour prélever des particules comprises entre 0  $\mu\text{m}$  et 60  $\mu\text{m}$ .
- Le tamis d'ouverture de mailles de 50  $\mu\text{m}$  est remplacé par un tamis d'ouverture de mailles de 60  $\mu\text{m}$ .



## Annexe 2

### CD de documents

#### 1. Rapports

- a. Guides méthodologiques
- b. Impacts sanitaires
- c. Rapports BRGM

#### 2. Réglementation

- a. Code minier
- b. Directive cadre eau
- c. Directive déchets industrie extractive
- d. Loi ICPE 1976

#### 3. Revue scientifique

- a. Elsevier
  - i. Applied geochemistry
  - ii. Ecotoxicology and environmental Safety
  - iii. EIA Review
  - iv. Environment International

- v. [Environmental modelling](#)
  - vi. [Environmental pollution](#)
  - vii. [Environmental radioactivity](#)
  - viii. [Geochemical exploration](#)
  - ix. [Ore geology](#)
- b. [Springer](#)
- i. [Aquatic Ecology](#)
  - ii. [Ecotoxicology](#)
  - iii. [Environmental geochemistry and health](#)
  - iv. [Environmental geology](#)
  - v. [Environmental Monitoring and Assessment](#)
  - vi. [Journal of analytical Chemistry](#)
  - vii. [Water, Air and Soil pollution](#)
- c. [SSSA](#)
- i. [Ecological Risk Assessment](#)
  - ii. [Heavy Metals in the Environment](#)
  - iii. [Journal of Environ Quality](#)
  - iv. [Soil Chemistry](#)
  - v. [Soil mineralogy](#)

#### 4. Symposium

a. Consoil

b. Gisos

#### 5. Normalisation

#### 6. Thèses

a. Blanchard

b. Lespagnol

#### 7. Divers



**Centre scientifique et technique  
Service REM**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34