

RAPPORT D'ÉTUDE  
DRS-18-177174-08150B

03/12/2018

**Revue synthétique des bonnes pratiques  
relatives à l'utilisation du cyanure pour le  
traitement de l'or dans le contexte guyanais**

**INERIS**

*maîtriser le risque |  
pour un développement durable |*



# **Revue synthétique des bonnes pratiques relatives à l'utilisation du cyanure pour le traitement de l'or dans le contexte guyanais**

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

## **Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire**

### Liste des personnes ayant participé à l'étude :

EL-BOUSTANI, Marguerita (DSC) ;

FAYET, Guillaume (DRA) ;

GOUZY Aurélien (DRS) ;

HENNEBERT, Pierre (DRC) ;

MARCON, Thomas (DRA) ;

PUCHEUX, Nicolas (DRC) ;

SALMON, Romuald (DRS).

## PRÉAMBULE

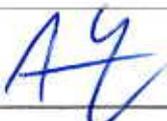
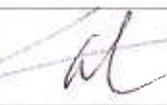
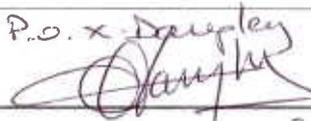
Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'Ineris, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'Ineris ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'Ineris dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'Ineris de par son décret de création, l'Ineris n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'Ineris ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'Ineris dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Coordination	Vérification			Approbation
<b>NOM</b>	Aurélien GOUZY	Christophe BOLVIN	Christian FRANCK	Benoit SCHNURIGER	Pascal BIGARRE
<b>Qualité</b>	Ingénieur à la DRS	Ingénieur à la DRA	Ingénieur à la DRS	Ingénieur à la DRC	Directeur des Risques du sol et du sous-sol (DRS)
<b>Visa</b>				 P.O. R. branches	 P.O. x Dauphine

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1. RÉSUMÉ.....</b>	<b>7</b>
<b>2. GLOSSAIRE.....</b>	<b>9</b>
<b>3. INTRODUCTION ET CONTEXTE DE L'ÉTUDE .....</b>	<b>11</b>
<b>4. GENERALITÉS .....</b>	<b>13</b>
4.1 Généralités sur le cyanure .....	13
4.2 Comportement du cyanure.....	13
4.2.1 Comportement dans l'eau.....	14
4.2.2 Comportement du cyanure en contact avec des eaux souterraines .....	15
4.2.3 Comportement dans les sols .....	15
4.2.4 Comportement dans le procédé industriel .....	16
4.3 Persistance des cyanures .....	17
4.3.1 Dégradation abiotique.....	17
4.3.1.1 Dans l'air .....	17
4.3.1.2 Dans l'eau et le sol .....	17
4.3.2 Biodégradation .....	17
4.3.2.1 Eaux de surface .....	17
4.3.2.2 Sol .....	17
4.3.2.3 Milieu anaérobie .....	17
4.4 Bio-accumulation et métabolisme .....	17
4.5 Ecotoxicité du cyanure .....	18
4.5.1 Paramètres d'écotoxicité pour les organismes aquatiques.....	18
4.5.1.1 Effets pour une exposition courte .....	18
4.5.1.2 Effets pour une exposition prolongée .....	19
4.5.1.3 Valeurs de protection .....	19
4.5.2 Paramètres d'écotoxicité pour les organismes terrestres .....	19
4.5.2.1 Effets pour une exposition courte .....	19
4.5.2.2 Effets pour une exposition prolongée .....	20
4.5.2.3 Valeurs de protection .....	20
4.6 Impacts prévisibles sur l'environnement.....	20
<b>5. TRANSPORT DU CYANURE JUSQU'AU SITE D'UTILISATION .....</b>	<b>23</b>
5.1 Transport du cyanure : accidentologie connue.....	23

5.2	Transport du cyanure : revue des bonnes pratiques .....	24
5.2.1	Transport du cyanure selon la réglementation « transport de matières dangereuses » (TMD) .....	25
5.2.1.1	Classement Transport de Marchandises Dangereuses .....	25
5.2.1.2	Transport par voie routière .....	26
5.2.1.3	Transport ferroviaire .....	26
5.2.1.4	Transport par voie maritime .....	27
5.2.1.5	Transport par voie fluviale .....	27
5.2.1.6	Transport par voie aérienne .....	27
5.2.2	Transport du cyanure selon le code international de gestion du cyanure	28
5.3	Transport du cyanure : applicabilité au contexte guyanais .....	29
<b>6.</b>	<b>STOCKAGE DU CYANURE AVANT UTILISATION .....</b>	<b>31</b>
6.1	Accidentologie connue .....	31
6.2	Revue des bonnes pratiques de stockage .....	32
6.2.1	Au niveau national .....	32
6.2.2	Au niveau international .....	34
<b>7.</b>	<b>TRAITEMENT DU MINERAI PAR CYANURATION ET TRAITEMENT DES RÉSIDUS CYANURÉS .....</b>	<b>37</b>
7.1	Cyanuration et traitement des résidus cyanurés : accidentologie connue ..	38
7.2	Revue des bonnes pratiques à privilégier dans le contexte guyanais .....	39
7.2.1	Cyanuration .....	39
7.2.2	Traitement des résidus cyanurés (decyanuration) .....	40
7.2.3	Cyanuration et Traitement des résidus cyanurés .....	40
<b>8.</b>	<b>STOCKAGE DES RÉSIDUS DÉCYANURISÉS .....</b>	<b>41</b>
8.1	Classification et évolution à long terme des déchets .....	41
8.1.1	Classification des résidus de procédés pour leur concentration résiduelle en cyanure .....	41
8.1.2	Bonnes pratiques vis-à-vis de la concentration résiduelle en cyanure des résidus de procédés .....	42
8.1.3	Classification des résidus de procédés pour leur concentration résiduelle en sulfures .....	42
8.1.4	Gestion des résidus de procédés .....	43
8.2	Généralités sur les ouvrages de stockage des déchets de l'industrie extractive .....	44
8.2.1	Les différentes configurations de retenue .....	44
8.2.2	Méthodes de construction .....	45

8.2.3 Cycle de vie des ouvrages de rétention.....	46
8.2.4 Accidentologie connue des ouvrages de rétention .....	47
8.2.5 Revue des bonnes pratiques pour les ouvrages de rétention.....	48
8.2.5.1 Sol de fondation .....	48
8.2.5.2 Matériaux constitutifs de l'ouvrage de rétention .....	48
8.2.5.3 Méthode de construction de l'ouvrage de stockage .....	49
8.2.5.4 Gestion des eaux .....	49
8.2.5.5 Gestion du matériel stocké.....	50
8.2.5.6 Crue de conception .....	50
8.2.5.7 Analyse géotechnique et surveillance de la stabilité physique .....	50
8.2.5.8 Surveillance.....	51
<b>9. CONCLUSIONS .....</b>	<b>53</b>
<b>10. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>55</b>
<b>11. LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>59</b>



## **1. RÉSUMÉ**

Dans un contexte industriel d'exploitation de l'or, la lixiviation par une solution cyanurée est adaptée aux minerais présentant de faibles teneurs en or, telles que celles rencontrées, notamment, dans les minerais guyanais.

Cette technologie a déjà été mise en œuvre de façon opérationnelle à l'échelle mondiale à de nombreuses reprises : une bibliographie détaillée et un important retour d'expériences sont ainsi disponibles.

Le présent rapport aborde les bonnes pratiques, l'accidentologie connue ainsi que les potentiels impacts sur l'environnement de l'utilisation du cyanure pour l'exploitation de l'or.

Etabli dans un délai court, sur la base d'une revue documentaire succincte ainsi que d'une mobilisation de l'expertise de l'Ineris, ce rapport ne vise pas l'exhaustivité, mais tente de mettre en lumière les points qui pourraient nécessiter de plus amples investigations.

Le document traite, successivement, et de manière synthétique :

- du cyanure et de ses propriétés intrinsèques (physico-chimie des différentes formes de cyanure mais aussi toxicologie et écotoxicologie), du comportement de cet élément dans l'environnement et des classifications réglementaires qui lui sont associées ;
- du procédé industriel d'exploitation de minerais aurifères par cyanuration, en suivant le flux du cyanure sur le site industriel (transport du cyanure jusqu'au site d'exploitation, stockage in situ, traitement du minerai par cyanuration et traitement des résidus et enfin stockage des résidus).

L'étude de l'accidentologie associée à chacune de ces grandes étapes du procédé industriel a permis d'identifier quelques bonnes pratiques qui nous sont apparues importantes à mettre en lumière.

Plus en détails, les principaux accidents identifiés sont liés aux étapes de transport du cyanure et de stockage des résidus. Néanmoins, l'absence d'occurrence d'incidents pour les opérations menées au sein du site industriel ne doit pas forcément être interprétée comme une absence d'évènements mais potentiellement comme une difficulté de remontée des informations (en particulier si aucune conséquence humaine ou environnementale n'est à déplorer à l'extérieur des limites du site).

Parmi les informations identifiées à l'occasion de cette étude, notons que :

- sous un climat pluvieux, la méthode de lixiviation en cuves associée à de l'adsorption sur charbon actif est fréquemment rencontrée ;
- une vision globale d'un site d'exploitation dans le temps et dans l'espace doit être développée pour garantir la sécurité des opérations (dans le temps de la période préalable à la mise en place des opérations industrielles à la période post-exploitation et dans l'espace à l'échelle de l'ensemble du bassin versant).

De plus, outre la gestion nécessaire de la problématique « cyanure », il a été mis en évidence d'autres points qui mériteraient des études plus poussées :

- l'impact de la qualité des infrastructures disponibles, prégnante dans le contexte guyanais, gagnerait à être estimé en termes concrets de difficulté d'approvisionnement du site en réactifs (notamment pour le procédé de décyanuration) ;
- dans l'éventualité d'une émission incontrôlée de résidus cyanurés à l'environnement, outre le devenir des différentes formes de cyanure potentiellement présentes, le devenir des autres « produits » du procédé industriel (tels que les métaux lourds) devrait également être considéré ;
- la mise en place d'une exploitation de l'or peut potentiellement initier la mise en place d'un drainage minier acide qu'il conviendrait de prendre en compte ;
- la formation du personnel pressenti pour exploiter le site doit permettre, à la fois une dissémination efficace des bonnes pratiques, mais aussi une réaction adaptée en fonctionnement du site en mode dégradé.

## **2. GLOSSAIRE**

ARIA : Analyse, Recherche et Information sur les Accidents.

BARPI : Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles.

Biodisponibilité :

La biodisponibilité d'un élément chimique correspond à son aptitude à atteindre la membrane cellulaire d'un organisme vivant. Cette notion regroupe l'ensemble des phénomènes bio-géochimiques se produisant au sein de l'organisme entre l'intégration et le métabolisme, élimination ou stockage de l'élément.

Bonnes pratiques :

Mesures techniques où organisationnelles dont l'application n'est pas imposée par la réglementation et auxquelles l'industriel peut se soumettre de façon volontaire lorsque cela est pertinent.

Code International du Cyanure :

Le Code est une initiative à adhésion volontaire pour l'industrie de l'extraction de l'or, les producteurs et les transporteurs du cyanure utilisé dans l'extraction de l'or. Il vise à compléter les réglementations existantes obligatoires pour toute société minière. La conformité aux règles, aux réglementations et aux lois des juridictions compétentes est obligatoire.

Le Code porte exclusivement sur la gestion du cyanure produit, transporté et utilisé pour la récupération de l'or, dans les résidus de la cyanuration et les solutions de lixiviation. Le Code traite de la production, du transport, du stockage et de l'utilisation du cyanure et du déclassement des unités de cyanuration. Il comprend également les obligations liées aux garanties financières, à la prévention des accidents, aux secours d'urgence, à la formation, à la communication des informations, à l'implication des parties prenantes et aux procédures de vérification de la conformité. Les producteurs et les transporteurs de cyanure sont soumis aux parties du Code qui sont identifiées dans leurs protocoles de conformité respectifs.

Drainage minier acide :

Transport à l'état dissous d'éléments traces métalliques contenus dans les stériles miniers (initialement immobiles car incorporés dans les structures cristallines) remobilisés à l'occasion de l'oxydation des sulfures également présents dans ces stériles (cette oxydation aboutie à l'acidification du milieu qui rend possible le transport des éléments traces métalliques).

Une annexe spécifique dédiée à ce phénomène est reprise en annexe 4 à ce rapport.

- MTD : Meilleurs techniques disponibles.  
Les MTD visent à prévenir ou à réduire de manière intégrée les pollutions et les consommations. Elles correspondent à :
- des procédés industriels ;
  - des techniques de traitement ;
  - des mesures organisationnelles et bonnes pratiques.
- Les MTD sont définies et partagées au niveau européen au sein de documents de références (BREF). Lorsque l'ensemble de ces conditions ne sont pas remplies, on ne parle pas de MTD mais de bonnes pratiques.
- Revanche : différence d'altitude entre le niveau de l'eau et la crête (d'un barrage, d'un ouvrage d'enclôture), représentatif de la marge de sécurité par rapport au risque de déversement.
- TMD : Transport de Matières Dangereuses.
- Lixiviation par cyanuration (ou cyanuration) :  
Procédé de traitement des minerais aurifères présentant une faible teneur. La lixiviation s'effectue à l'aide d'une solution de cyanure qui dissout l'or présent dans les minerais. Le métal est ensuite récupéré de la solution de lixiviation par adsorption sur charbons actifs ou sur résines.
- WAD : cyanures facilement dissociables (ou Weak Acid Dissociable).

### **3. INTRODUCTION ET CONTEXTE DE L'ÉTUDE**

Le Bureau du Sol et du Sous-sol (BSSS) du MTES (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire) a sollicité l'Ineris pour établir une revue synthétique des MTD (meilleures techniques disponibles) relatives à l'utilisation<sup>1</sup> du cyanure pour le traitement de l'or à l'occasion de son extraction.

Le présent document est donc constitué d'une revue documentaire succincte ainsi que d'une mobilisation de l'expertise de l'Ineris, et ce, concernant les meilleures techniques disponibles, les bonnes pratiques, l'accidentologie connue ainsi que les potentiels impacts sur l'environnement. Notons que l'objectif de ce rapport n'est pas d'être exhaustif au sujet des points d'exigence d'ordre réglementaire mais de mettre en lumière les points qui pourraient nécessiter de plus amples investigations dans le cadre de l'utilisation du cyanure pour l'exploitation de l'or.

L'ensemble des informations recueillies est interrogé en regard des caractéristiques spécifiques pouvant être rencontrées dans le contexte des mines d'or guyanaises, notamment l'existence d'un réseau de transport routier et ferroviaire limité, l'isolement des sites, le climat de type équatorial humide, et par extension les problèmes logistiques et de gestion que cela peut générer.

---

<sup>1</sup> Il est entendu ici par le terme « utilisation » l'ensemble des actions relatives au transport, au stockage, à l'emploi du cyanure, ainsi qu'au stockage des déchets issus du traitement du minerai par le cyanure.



## **4. GENERALITÉS**

Ce paragraphe a pour objet de présenter quelques généralités sur le cyanure qui permettent d'appréhender le comportement de cet élément à la fois à l'occasion du traitement du minerai par lixiviation pour la production d'or mais aussi dans l'éventualité d'une contamination de l'environnement.

La plupart des informations rapportées dans ce chapitre sont issues de NICNAS (2010) et INERIS (2011) auxquels on se rapportera pour plus de détails ; lorsque ce n'est pas le cas, les références des sources additionnelles sont indiquées.

### **4.1 GÉNÉRALITÉS SUR LE CYANURE**

Dans la majorité des cas d'exploitation d'or par lixiviation, le cyanure est acheminé sur le site d'exploitation sous forme de cyanure de sodium (NaCN) solide.

Une fois utilisé, il se retrouve essentiellement dans les résidus sous les formes chimiques suivantes (Johnson, 2015) :

- les cyanures libres (ion  $\text{CN}^-$ ) ;
- les cyanures facilement dissociables (ou WAD pour Weak Acid Dissociable). Ils comprennent les cyanures libres ainsi que des composés susceptibles de se dissocier rapidement en cyanures libres en conditions environnementales normales (par exemple les composés cyanurés de cuivre, de cadmium, de zinc). Ces cyanures sont considérés comme biodisponibles ;
- les complexes métalliques cyanurés stables. Ces complexes sont insolubles et persistants (par exemple les composés cyanurés de fer, de cobalt, d'or) ;
- des thiocyanates et des cyanates.

A titre d'exemple, notons que le cyanure de sodium porte les mentions de danger suivantes<sup>2</sup> :

- H300 + H310 + H330 - Mortel par ingestion, par contact cutané ou par inhalation ;
- H410 - Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme ;
- EUH 032 - Au contact d'un acide, dégage un gaz très toxique.

### **4.2 COMPORTEMENT DU CYANURE**

Cette introduction sur le comportement du cyanure reprend quelques éléments issus de la fiche toxicologique n°111 de l'INRS (2018) :

- les cyanures de sodium et de potassium sont des produits qui se décomposent au contact de l'eau, de l'humidité de l'air ou du dioxyde de carbone, libérant de faibles quantités de cyanure d'hydrogène<sup>3</sup> ainsi que du

---

<sup>2</sup> Règlement (CE) No 1272/2008 du Parlement Européen et du Conseil du 16 décembre 2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges, modifiant et abrogeant les directives 67/548/CEE et 1999/45/CE et modifiant le règlement (CE) no 1907/2006.

<sup>3</sup> La constante de Henry du HCN ( $1,33 \cdot 10^{-4}$  Pa.m<sup>3</sup>/mol à 25 °C) tend à indiquer la tendance de cette substance à passer dans le compartiment atmosphérique.

carbonate de calcium. En milieu acide, l'émission de cyanure d'hydrogène est plus rapide et plus importante ;

- à des températures supérieures à 50 °C, le cyanure de sodium s'hydrolyse en ammoniac et formiate de sodium ; la réaction est irréversible ; l'augmentation de la température au cours de la réaction accélère le processus et peut entraîner des effets de surpression dans des réacteurs clos. Cette réaction est plus modérée avec le cyanure de potassium ;
- le cyanure de potassium est décomposé à chaud par la potasse avec dégagement d'ammoniac et formation de formiate de potassium ;
- les cyanures sont des agents réducteurs qui peuvent réagir violemment (risque d'explosion) avec de nombreux composés : chlorates, nitrites, acide nitrique, fluor, trichlorure d'azote... ;
- si ce produit est impliqué dans un incendie, il peut libérer du cyanure d'hydrogène, du monoxyde de carbone, du dioxyde de carbone et des oxydes d'azote ;
- les cyanures de sodium et de potassium ne sont pas combustibles. Toutefois, en présence d'acides et de produits à réaction acide, d'eau ou de vapeurs d'eau ou de dioxyde de carbone, ils s'hydrolysent en libérant du cyanure d'hydrogène, gaz inflammable et très toxique. Lorsque ces produits sont impliqués dans un incendie, ils peuvent se décomposer à la chaleur, libérant du cyanure d'hydrogène et des oxydes d'azote. Les agents d'extinction préconisés sont les poudres chimiques et les mousses.

#### 4.2.1 COMPORTEMENT DANS L'EAU

Les cyanures sous forme d' $\text{HCN}^4$  et d'ion  $\text{CN}^-$  sont en équilibre en solution en fonction du pH et de la température. A des pH entre 5 et 8,5, le cyanure est à 93 % sous la forme HCN (cf. Figure 1) et donc susceptible de s'évaporer<sup>5</sup>.

---

<sup>4</sup> Le pKa de l'acide cyanhydrique est supérieur à 9 (ici cette valeur illustre le fait que HCN est considéré comme faiblement acide).

<sup>5</sup> Pour information, le cyanure dans l'atmosphère se présente essentiellement sous la forme gazeuse HCN. En dépit d'une importante solubilité du cyanure d'hydrogène, le transport de ce composé par l'eau de pluie est jugé négligeable (ATSDR, 1997).

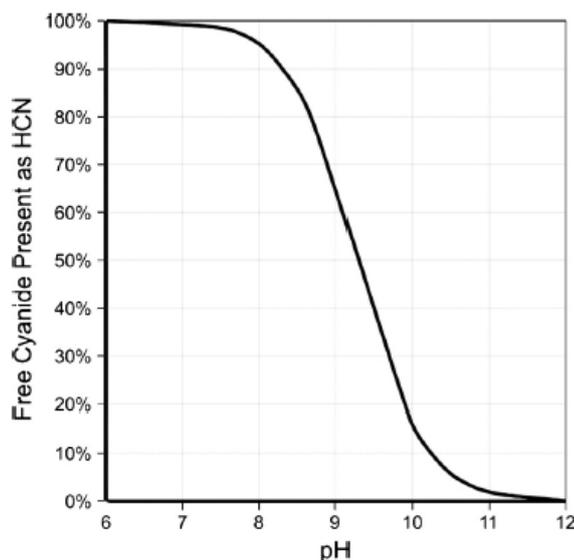


Figure 1 : Equilibre CN-/HCN en fonction du pH à 25°C  
(source Mudder et al, 2001 cité par INERIS, 2011).

Lorsque la température est plus élevée, l'équilibre est différent (NICNAS, 2010) :

- à pH 9 et à 25°C : 32 % CN- et 68 % HCN ;
- à pH 9 et à 30°C : 45 % CN- et 55 % HCN.

Ainsi, *a priori* la température élevée, dans le cas de la Guyane, réduirait la fraction de HCN qui se volatilise facilement. Néanmoins, ce phénomène pourrait être contrebalancé par l'acidité des résidus stockés dans les bassins<sup>6</sup>.

#### 4.2.2 COMPORTEMENT DU CYANURE EN CONTACT AVEC DES EAUX SOUTERRAINES

Lorsque les eaux souterraines rencontrées sont riches en métaux, les cyanures libres sont susceptibles de se complexer avec les métaux présents et de précipiter<sup>7</sup>. Un tel contexte hydrogéochimique (eaux riches en métaux) est notamment rencontré, en contexte guyanais, dans le projet Montagne d'or<sup>8</sup>, (Gutierrez, 2018)<sup>9</sup>.

#### 4.2.3 COMPORTEMENT DANS LES SOLS

Les HCN sont considérés comme très volatiles depuis les sols : cette volatilisation est ainsi le principal phénomène de diminution de cyanure à la surface du sol pour les sols de pH inférieur à 9,2.

D'autre part, les cyanures sont moyennement mobiles dans les sols. Leur mobilité est d'autant plus faible que le pH est bas et que la teneur en oxydes de fer, particules

<sup>6</sup> HCN est considéré comme très volatile depuis la surface de l'eau. Ce phénomène est d'autant plus important que le pH diminue, que la température augmente et que la concentration en cyanure est élevée (Kjeldsen, 1999 ; NICNAS, 2010 ; Ineris, 2011 ; Johnson, 2015 ; Brüger et al., 2018).

<sup>7</sup> Les ferro et ferricyanure seront a priori les complexes majoritairement formés (Johnson, 2015).

<sup>8</sup> Une description du projet « Montagne d'or » est disponible dans le rapport Montagne d'or (2018b) dédié à la présentation du projet par le maître d'ouvrage.

<sup>9</sup> Les ferro et ferricyanure seront a priori les complexes majoritairement formés (Johnson, 2015).

chargées positivement et argiles est élevée (ATSDR, 1997). La forme prédominante dans ces sols serait le ferro et le ferri-cyanure (Theis *et al*, 1994 cités par Shifrin *et al.*, 1996). Ces composés sont très stables dans les sols : ils sont retrouvés dans les sols plusieurs dizaines d'années après leur formation.

#### 4.2.4 COMPORTEMENT DANS LE PROCÉDÉ INDUSTRIEL

Le cyanure peut être émis dans l'air à toutes les étapes du process. Hors accident, les émissions les plus importantes ont lieu depuis les bassins de stockage des résidus miniers (Figure 2).

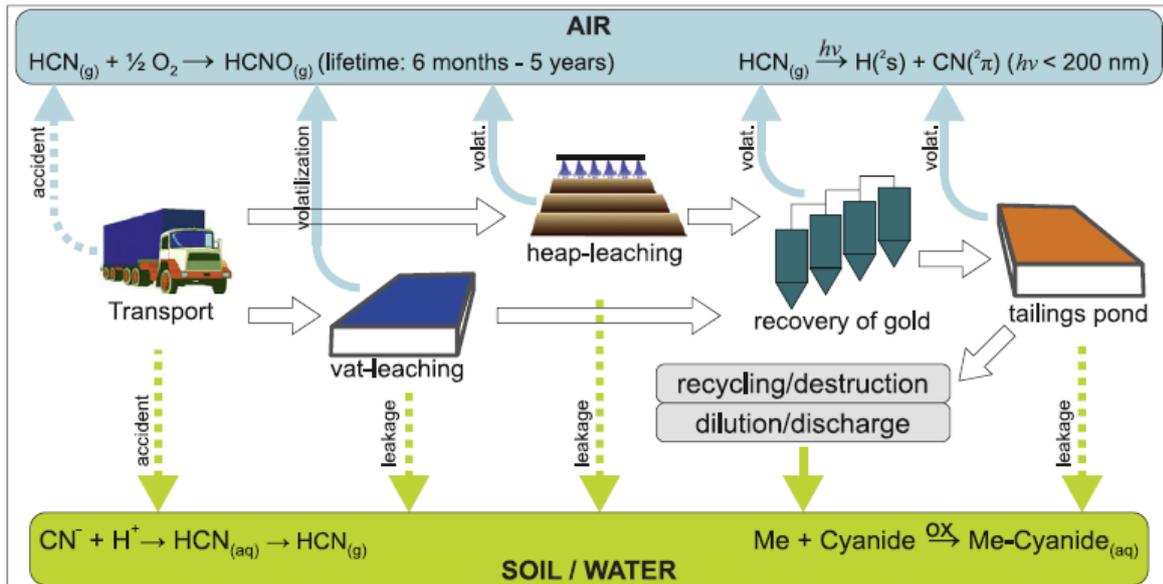


Figure 2 : Exposition des milieux naturels lors de l'utilisation de cyanure dans le contexte de l'industrie aurifère, d'après Brüger *et al.* (2018).

#### Emissions par le procédé industriel dans l'air

Il est généralement estimé que 30 à 50 % du NaCN acheminé sur un site d'extraction d'or ou d'argent sont émis dans l'air en tant que HCN volatilisé (NICNAS, 2010). Cette contribution aux émissions de HCN dans l'atmosphère représenterait 3 à 5 % par rapport aux émissions anthropiques et naturelles totales (NICNAS, 2010). Des études plus récentes basées sur des chiffres de 2013 avancent toutefois que cette contribution pourrait être revue à la hausse d'un facteur deux (Brüger *et al.*, 2018).

#### Concentration dans les bassins de stockage des résidus

Une étude sur des sites australiens montre que des concentrations de cyanure WAD de plusieurs dizaines de mg/L ont été mesurées (Johnson, 2015). De plus, la concentration de cyanures libres et de cyanures WAD décroît avec le temps dans les stockages de résidus cyanurés, la concentration des complexes métalliques cyanurés décroît également, mais plus lentement (Johnson, 2015).

## **4.3 PERSISTANCE DES CYANURES**

### **4.3.1 DÉGRADATION ABIOTIQUE**

#### 4.3.1.1 DANS L'AIR

Dans la troposphère HCN est dégradé pour former du monoxyde de carbone et de l'oxyde nitrique par l'action de radicaux oxygène et hydroxyles. La photolyse est négligeable à cette altitude. En prenant en compte l'absorption du HCN par l'océan, sa durée de vie dans l'atmosphère serait de l'ordre de cinq mois.

#### 4.3.1.2 DANS L'EAU ET LE SOL

Les composés HCN et ions CN libres sont résistants à la photolyse par la lumière naturelle. La dégradation de HCN par hydrolyse forme de l'acide formique et de l'ammonium formate au rythme de 2 à 4 % par mois, ce qui est négligeable par rapport à l'efficacité des autres voies d'élimination.

D'autre part, la photodégradation peut entraîner une rupture des liaisons métallo-cyanures et libérer ainsi des cyanures libres dans l'environnement.

### **4.3.2 BIODÉGRADATION**

Certaines bactéries peuvent dégrader ces molécules (Douglas Gould *et al.*, 2012).

#### 4.3.2.1 EAUX DE SURFACE

La biodégradation est un mécanisme important pour la transformation des cyanures dans les eaux de surface. Boening et Chew (1999) mentionnent que la concentration en cyanure doit être au maximum de 50 mg/L d'eau pour que la biodégradation soit efficace. La demi-vie des cyanures dans l'eau de rivière serait comprise entre 10 et 24 jours<sup>10</sup>. La biodégradation des cyanures convertit les ions cyanures en ions thiocyanates.

#### 4.3.2.2 SOL

Les cyanures présents à faible concentration se dégradent en nitrites et nitrates.

#### 4.3.2.3 MILIEU ANAÉROBIE

Les mécanismes de dégradation dans ces conditions sont encore peu connus.

## **4.4 BIO-ACCUMULATION ET MÉTABOLISME**

HCN ne s'accumule pas dans la chair des mammifères, des oiseaux et des organismes aquatiques. Certaines plantes sont capables de prélever HCN dans le sol pour le libérer sous forme gazeuse, ceci n'entraînant pas de bioaccumulation.

---

<sup>10</sup> Valeur probablement surestimée, les procédés de dégradation abiotiques n'ont pas été contrôlés dans cette étude de 1951.

## 4.5 ECOTOXICITÉ DU CYANURE

Le cyanure est un poison à action rapide dont la toxicité dépend de sa spéciation. Les formes les plus toxiques sont l'ion  $CN^-$ ,  $HCN$  et les composés capables de libérer facilement les ions  $CN^-$ . Il a un effet de type « tout ou rien » (Donato et al., 2007).

Les valeurs d'écotoxicité présentées dans ce document sont issues des documents de référence déjà cités (NICNAS, 2010 ; INERIS, 2011).

### 4.5.1 PARAMÈTRES D'ÉCOTOXICITÉ POUR LES ORGANISMES AQUATIQUES

#### 4.5.1.1 EFFETS POUR UNE EXPOSITION COURTE

A titre d'exemple, la distribution de la sensibilité des différentes espèces testées<sup>11</sup> à une exposition de courte durée est présentée dans la Figure 3 ci-après<sup>12</sup>.

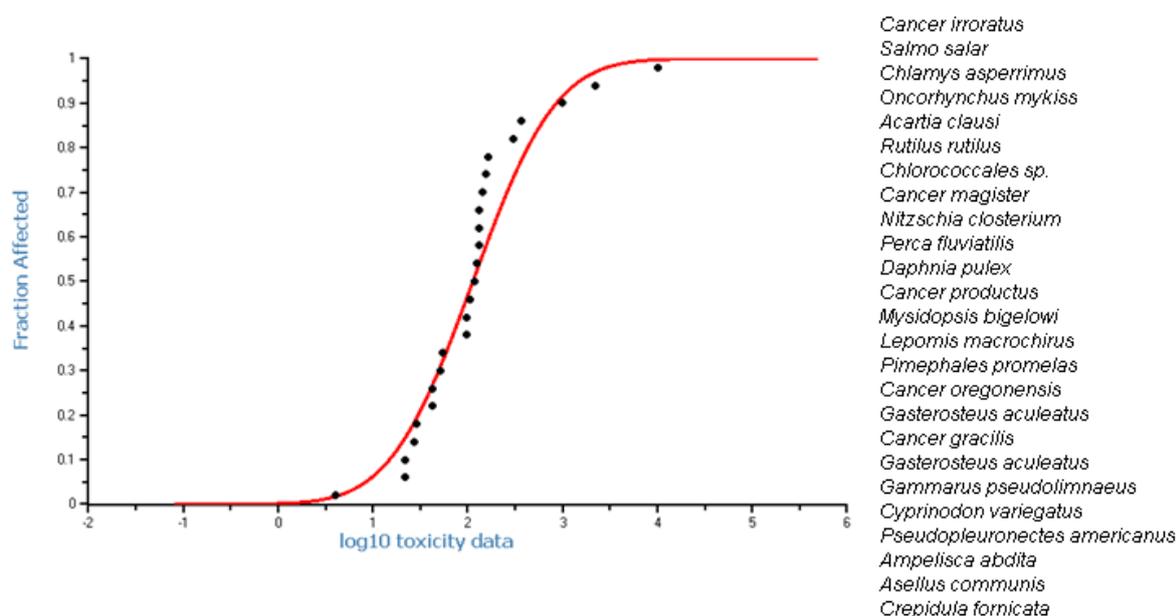


Figure 3 : Distribution de la sensibilité des espèces du point de vue des effets à court terme (en abscisse, la concentration en µg/L en transformation log, en ordonnée, la fraction d'espèces qui présenteraient 50 % d'effet sur leurs populations)<sup>13</sup>.

La variabilité interspécifique de la toxicité est remarquablement faible, probablement en raison du mécanisme d'action des cyanures : le blocage de la respiration cellulaire, à même de provoquer des effets sur toutes les espèces.

<sup>11</sup> Compris des espèces marines, donnée la plus sensible : *Cancer irroratus* (espèce marine) LC50 = 4,2 µg/L (0,6 en log).

<sup>12</sup> La sensibilité des espèces dans la liste est classée de façon décroissante. Ainsi l'espèce la plus sensible est un crustacé marin et l'organisme d'eau douce le plus sensible est la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*). L'analyse statistique des résultats d'essai démontre que la sensibilité des espèces marines et d'eau douce est comparable.

<sup>13</sup> Cyanides EQS draft dossier, document non publié.

**Dans le cas de la Guyane, bien que les espèces endémiques ne fassent pas partie des espèces testées, il n'y a pas de raison de penser qu'elles réagiraient autrement si elles étaient exposées à des concentrations identiques.**

Les concentrations les plus faibles provoquant des effets sur 50 % des organismes aquatiques d'eau douce pour une exposition aigue sont (Ineris, 2011) :

- pour les algues, 57 µg.L<sup>-1</sup>,
- pour les invertébrés, 29 µg.L<sup>-1</sup>
- pour les poissons, 41,4 µg.L<sup>-1</sup>.

#### 4.5.1.2 EFFETS POUR UNE EXPOSITION PROLONGÉE

L'ensemble des résultats de toxicité chronique répertoriés indique peu de variabilité inter-espèce. Ainsi, la NOEC<sup>14</sup> la plus faible observée (Ineris, 2011) :

- pour les algues, 12 µg.L<sup>-1</sup>,
- pour les invertébrés, 21 µg.L<sup>-1</sup>,
- pour les poissons 5,7 µg.L<sup>-1</sup>.

#### 4.5.1.3 VALEURS DE PROTECTION

Ineris (2011) propose une concentration sans effet prévisible pour les organismes aquatiques basée sur l'essai réalisé sur l'espèce d'eau douce la plus sensible (*Salvelinus fontinalis*, NOEC (144 j) = 5,7 µg/L).

**PNEC<sup>15</sup><sub>EAU DOUCE</sub>** = 0,114 µg/L (Ineris 2011)

**D'un point de vue de l'environnement aquatique, la valeur cible à ne pas dépasser en cyanure est de l'ordre de quelques dixièmes de µg par litre.**

**Une réévaluation de cette valeur est en cours dans le contexte de l'élaboration d'une NQE<sup>16</sup> par la commission européenne, mais ce document n'a pas encore été validé.**

### 4.5.2 PARAMÈTRES D'ÉCOTOXICITÉ POUR LES ORGANISMES TERRESTRES

Pour ce paragraphe, seules les valeurs les plus significatives sont rapportées.

#### 4.5.2.1 EFFETS POUR UNE EXPOSITION COURTE

Pour une exposition par inhalation :

- pour le rat, 50 % de mortalité entre 143 ppm en 60 minutes et 3 417 ppm pour une exposition de 10 secondes ;
- pour les pigeons et canaris, tous les sujets meurent s'ils sont respectivement exposés 10 et 3 minutes à 120 ppm d'HCN ;
- des singes exposés 30 minutes à 60 ppm d'HCN subissent des effets non mortels. Exposés à des concentrations de 80 ppm, ils subissent des effets incapacitants.

Pour une exposition par ingestion :

---

<sup>14</sup> Concentration sans effet observé.

<sup>15</sup> Concentration sans effet prévisible

<sup>16</sup> Norme de Qualité pour l'Environnement

- pour le rat 50 % de mortalité entre 5,1 à 5,7 mg(NaCN)/kg de poids corporel (Donato et al. 2007) ;
- pour le lapin, 50 % de mortalité entre 2,34 et 2,7 mg CN<sup>-</sup>/kg/j avec du HCn, du NaCN et du KCN ;
- pour le canard, 50 % de mortalité à 1,43 mg(CN<sup>-</sup>)/kg de poids corporel (concentration dans l'eau de boisson à 26 mg(CN<sup>-</sup>)/L) (Donato et al., 2007).

De plus des effets subléthaux sont observés sur des canards ayant ingéré une dose unique de 10mL à des concentrations allant de 10 à 80 mg(CN)/L. Des saules en solution aqueuse à 2 mg(CN)/L meurent en trois semaines. Des plantes dans du sable irrigué avec une eau à 30 mg/L meurent.

#### 4.5.2.2 EFFETS POUR UNE EXPOSITION PROLONGÉE

Pour une exposition par inhalation, aucun effet néfaste n'a été observé sur des rats et des singes exposés à 25 ppm de cyanure (50 ppm CN<sup>-</sup>) 6 heures par jour, 5 jours par semaine pendant 6 mois.

Pour une exposition par ingestion :

- des effets (perte de poids, altération fonction thyroïdienne, dégénérescence de la myéline de la moelle épinière) sont observés chez les rats exposés à 30 mg CN /kg/j pendant 11 mois ;
- des vomissements sont observés chez des porcs exposés à 0,7 mg CN /kg/j pendant 24 semaines, un changement du comportement détecté à partir de 0,4 mg/kg/j.

#### 4.5.2.3 VALEURS DE PROTECTION

**Il n'a pas été trouvé de valeur seuil de référence en France pour la protection des organismes terrestres qui concerne la consommation d'eau contaminée.** NICNAS (2010) propose une concentration sans effet prévisible de 1 mg/L dans l'eau pour la protection des mammifères et des oiseaux.

Il a été trouvé une valeur seuil dans le sol aux pays bas pour les cyanures libres de 5 mg/kg de poids sec.

## 4.6 IMPACTS PRÉVISIBLES SUR L'ENVIRONNEMENT

L'étude bibliographique réalisée ne permet pas de réaliser une évaluation des impacts sur les écosystèmes (et notamment dans le contexte guyanais). **Quelques hypothèses peuvent toutefois être formulées** sur les risques à attendre.

### Hors accident

Hors accident, le risque le plus important lié à l'utilisation du cyanure provient des bassins de stockages des résidus cyanurés. Ils contiennent un mélange de cyanures WAD (dont les cyanures libres), de complexes cyanurés stables, des cyanates et des thiocyanates. Les cyanates et thiocyanates sont délibérément formés lors du traitement des résidus pour diminuer la proportion de cyanures libres.

En conditions optimales de stockage des résidus (cf. paragraphe 8.1.2) , la toxicité de l'effluent global diminue mais reste toutefois susceptible de provoquer des effets néfastes sur l'environnement (Douglas Gould *et al.*, 2012).

Les impacts les plus importants pourraient être observés parmi les populations d'oiseaux comme le démontre le rapport du gouvernement australien (NICNAS,

2010). En effet, à des concentrations supérieures à 20 mg/L, des effets biologiques significatifs peuvent affecter les oiseaux migrateurs qui séjourneraient même brièvement autour de ces bassins. Néanmoins, d'autres facteurs peuvent nuancer cette conclusion. Ainsi il a été avancé dans NICNAS (2010) que si l'eau des bassins est très salée, les oiseaux ne s'y abreuvent pas. On peut supposer que de la même façon, si l'eau des bassins est très acide, comme cela peut être supposé au vu de la quantité d'acide sulfurique qu'ils sont susceptibles de contenir (cf. paragraphe 8), les oiseaux éviteront peut-être de s'y abreuver, mais cela reste à démontrer.

Le risque le moins préoccupant, correspond à toutes les phases où le cyanure est sous forme de NaCN solide. Sous cette forme, les écosystèmes ne sont normalement pas exposés et il n'y a donc pas d'impacts environnementaux d'importance à attendre.

#### En cas d'accident

En cas d'accident, les risques pour les écosystèmes sont très importants. Le risque minimum correspondrait à un déversement de cyanure solide de NaCN sur un sol sec. Le risque le plus élevé serait atteint si un bassin de stockage de résidus se rompait ou si une quantité importante de NaCN se déversait dans une rivière naturelle (ou était exposé à de fortes pluies).

Dans un premier temps, il est fort probable que d'importantes mortalités soient constatées sur l'ensemble des espèces à cause du seul effet du cyanure sur les organismes vivants. Néanmoins, dans une analyse plus poussée, il faudrait également considérer les potentiels effets liés à l'acidité de l'eau et à la présence des autres composés.

Dans le moyen et le long terme, bien que le HCN libéré s'évapore et se disperse relativement vite, un risque pour les écosystèmes subsiste. Les composés métalliques cyanurés, les moins toxiques et les plus stables, finissent par se dissocier sous l'action de la lumière du soleil : cette réaction libère à nouveau des cyanures libres. **L'ampleur de ce relargage dépend de paramètres spécifiques au site, le plus important étant la quantité d'ensoleillement** (Johnson, 2015).

Notons que la dissociation des composés métalliques cyanurés dans le milieu naturel peut éventuellement avoir un autre impact spécifique à la Guyane. Puisque son sol peut être riche en mercure à proximité de certains sites miniers, des complexes cyanurés de mercure peuvent être présents dans les résidus. Exposés à la lumière, le mercure sera libéré et éventuellement transformé en méthylmercure, substance très toxique et bioaccumulable.



## 5. TRANSPORT DU CYANURE JUSQU'AU SITE D'UTILISATION

### 5.1 TRANSPORT DU CYANURE : ACCIDENTOLOGIE CONNUE

Le transport de marchandises dangereuses (cyanures, mercure, explosifs, carburants) est impliqué dans 14 % des accidents en lien avec l'industrie aurifère recensés sur la période 1975-2000 par le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE, 2006).

Une recherche de l'accidentologie disponible a été réalisée au sein de la base ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents)<sup>17</sup> du BARPI (Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles). Cette base de données recense 17 accidents<sup>18</sup> mettant en œuvre du cyanure dans des transports de marchandises dangereuses par route, voies ferrées, fluviales ou maritimes (détaillés en Annexe 1). En plus de cette recherche, la base ARIA recense également un autre accident relatif à un transport par hélicoptère dont le résumé est fourni dans le Tableau 1.

*Tableau 1 : Résumé de l'accident de Port Moresby en 2000 lors d'un transport de cyanure par hélicoptère.*

N° ARIA	Date	Lieu	Résumé
17477	21/03/2000	Port Moresby (Papouasie Nouvelle-Guinée)	Un conteneur d'une tonne de produit chimique (cyanure) est tombé accidentellement d'un hélicoptère à 70 km au nord de la capitale. Selon les propriétaires du conteneur, des équipes de nettoyage ont été envoyées sur le site mais 150 kg ont déjà pu contaminer le milieu. La menace pour les populations n'étant pas à écarter, les autorités ont informé le public qu'il convenait de ne pas consommer d'eau dans la zone. Le cyanure est utilisé dans les mines d'or dans le processus d'extraction de l'or du minerai.

Sur les 18 accidents recensés (s'étalant sur la période 1983 à 2016), 10 ont eu lieu en France Métropolitaine. Les autres ont eu lieu à l'étranger (Chine (3), Royaume-Uni, Kirghizstan, Equateur, Australie, Papouasie-Nouvelle-Guinée).

Huit accidents mettent en jeu du cyanure de sodium, 3 du cyanure de potassium. Pour les autres accidents, le type de cyanure n'est pas précisé. Il s'agit de cyanure en solution dans 2 cas et en poudre dans 3 autres, la forme physique mise en cause n'étant pas mentionnée dans les autres cas.

---

<sup>17</sup> Cette base de données recense les incidents ou accidents qui ont, ou qui auraient pu porter atteinte à la santé ou la sécurité publique, l'agriculture, la nature et l'environnement. Pour l'essentiel, ces événements résultent de l'activité d'usines, ateliers, dépôts, chantiers, carrières, élevages... classés au titre de la législation relative aux Installations Classées, ainsi que du Transport de Marchandises Dangereuses. A ce jour, la base ARIA recense plus de 47 000 accidents ou incidents survenus en France ou à l'étranger ; plus de 1 700 ont été ainsi répertoriés au titre de l'année 2017. Néanmoins, cette base de données ne peut pas être considérée comme exhaustive (notamment à l'international).

<sup>18</sup> Quatre accidents parmi les 21 listés lors de la recherche dans la base ARIA se sont avérés ne pas concerner un Transport de Marchandises Dangereuses et ont donc été exclus de cette analyse (N°s 101, 27983, 39359, 42292).

L'utilisation finale du produit n'est en général pas non plus précisée, sauf pour 4 accidents : l'un concerne le traitement de surface et les 3 autres l'industrie aurifère (Barskaun (Kirghizstan), 1998 ; Port Moresby (Papouasie-Nouvelle-Guinée), 2000 ; Guayaquil (Equateur), 2000).

**Les modes de transports concernés sont principalement la route (10 accidents recensés) et le rail (6). On retrouve également un accident pour le transport par voie maritime et un accident lors d'un transport par hélicoptère.**

Des blessés ne sont mentionnés que dans peu de cas. Seuls deux accidents mentionnent des blessés mettant en cause le cyanure. Il s'agit de l'intoxication de deux gendarmes lors de l'intervention pour l'accident de Peronne (80) en 1989. Les autorités ont fait état de 2 morts et 2500 intoxiqués dans l'accident de Barskaun (Kirghizstan) en 1998.

Plus souvent, des pollutions dans les milieux sont rencontrées (7 cas sur 18) avec notamment des déversements plus ou moins importants dans des rivières pouvant engendrer des pollutions à grande échelle. Par exemple, après un déversement accidentel de cyanure dans la rivière Dan (Chine) en 2000, du fait d'un camion-citerne tombé dans la rivière, une importante pollution a été observée avec un impact de forte gravité sur la faune et la flore à une distance de 14 km. Une alerte à la consommation d'eau et de poisson avait même été émise jusqu'à une distance de 250 km. En revanche, dans 11 cas sur 18, aucune fuite ou pollution n'est observée (ou du moins mentionnée).

Les causes des accidents sont majoritairement des accidents de circulation lors du transport (déraillement de wagon, accident routier, collision entre bateaux), dans 13 cas sur les 18 recensés. On notera également deux cas de pertes de fûts/conteneurs lors du transport (Lyon, 1983, et Port Moresby, 2000). Enfin, un accident met en cause une surpression de citerne du fait de la chaleur (Morcenx, 1991).

## **5.2 TRANSPORT DU CYANURE : REVUE DES BONNES PRATIQUES**

De nombreux textes (réglementaires ou non) fournissent des indications quant aux bonnes pratiques à mettre en œuvre lors des opérations du transport du cyanure. Les paragraphes suivants proposent ainsi une approche synthétique des principales informations disponibles concernant l'approvisionnement des sites d'extraction d'or en cyanure.

De plus, compte tenu des informations à notre disposition pour la réalisation de cette étude (CNDP, 2018), **nous axons notre analyse sur le transport des sels de cyanure de potassium, de sodium et calcium à l'état solide.**

## 5.2.1 TRANSPORT DU CYANURE SELON LA RÉGLEMENTATION « TRANSPORT DE MATIÈRES DANGEREUSES » (TMD)

### 5.2.1.1 CLASSEMENT TRANSPORT DE MARCHANDISES DANGEREUSES

Les sels de cyanure solides font partie de la liste des marchandises dangereuses<sup>19</sup> respectivement sous les numéros ONU 1680, 1689 et 1575 comme indiqué par le règlement type des recommandations des Nations Unies relatives au transport des matières dangereuses<sup>20,21</sup> (cf. Tableau 2 ci-après).

Tableau 2 : Extrait du tableau des marchandises dangereuses, chapitre 3.2 du règlement type.

N° ONU	Nom et description	Classe ou division	Danger subsidiaire	Groupe d'emballage	Dispositions spéciales	Quantités limitées et quantités exceptées		Emballages et GRV		Citermes mobiles et conteneurs pour vrac	
						(7a)	(7b)	Instructions d'emballage	Dispositions spéciales	Instructions de transport	Dispositions spéciales
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7a)	(7b)	(8)	(9)	(10)	(11)
-	3.1.2	2.0	2.0	2.0.1.3	3.3	3.4	3.5	4.1.4	4.1.4	4.2.5 / 4.3.2	4.2.5
1680	CYANURE DE POTASSIUM, SOLIDE	6.1		I		0	E5	P002 IBC07	B1	T6	TP33
1689	CYANURE DE SODIUM, SOLIDE	6.1		I		0	E5	P002 IBC07	B1	T6	TP33
1575	CYANURE DE CALCIUM	6.1		I		0	E5	P002 IBC07	B1	T6	TP33

Au titre de ces recommandations, **les sels de cyanures solides font l'objet de prescriptions réglementaires en termes d'emballage et de dispositions spécifiques pour leur transport.** Ces prescriptions sont déclinées en fonction du mode de transport par l'Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (ADR), le Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses (RID), l'Accord européen relatif au transport international de marchandises dangereuses par voies de navigation intérieures (ADN), le code international du transport des marchandises dangereuses par voie maritime (IMDG) et le code de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI).

Le cyanure de potassium, le cyanure de sodium et le cyanure de calcium sont tous les trois classés sous la classe 6.1 et au sein de cette classe dans le groupe d'emballage « I ».

La classe 6.1 désigne les matières toxiques : matières qui peuvent soit causer la mort ou des troubles graves, soit être nuisibles à la santé humaine si elles sont absorbées par ingestion, par inhalation ou par voie cutanée.

Les matières toxiques sont ensuite classées dans trois groupes d'emballage en fonction du degré de risque toxique que les matières présentent pour le

<sup>19</sup> Cette liste énumère nommément les marchandises dangereuses les plus couramment transportées et qui ont une importance commerciale.

<sup>20</sup> Recommandations relatives au transport de marchandises dangereuses, règlement type, 20ème édition, ST/SG/AC.10/1/Rev.20, Vol I et II.

<sup>21</sup> A noter que les cyanures de sodium et potassium en solution portent les numéros ONU 3414 et 3413.

transport. Le groupe d'emballage I est associé aux matières et préparations présentant un risque de toxicité très grave.

De même, ils sont soumis aux mêmes régimes de quantités limitées et quantités exemptées et aux mêmes instructions d'emballages et dispositions spéciales.

Le transport est autorisé à condition de respecter l'instruction d'emballage P002 qui décrit les emballages combinés et emballages simples ainsi que les masses nettes maximales autorisées par contenants pour ces matières classées en groupe d'emballage I. A titre d'exemple, l'instruction d'emballage P002 est donnée en annexe 2.

**Ces cyanures peuvent être emballés dans des fûts, des caisses, des bidons en différentes matières** mais la masse nette maximale est limitée en fonction du type de contenant (par exemple, 120 kg pour un emballage simple dans un bidon en acier et 400 kg dans un fût en acier).

**Ces produits sont autorisés à être transportés s'ils sont emballés dans des Grands Récipients en Vrac (GRV)** selon l'instruction d'emballage. Ce type de conditionnement est soumis à la disposition spéciale d'emballage B1 qui impose aux matières du groupe d'emballage I d'être transportées dans des engins de transport fermés.

#### 5.2.1.2 TRANSPORT PAR VOIE ROUTIÈRE

Le classement et les conditions d'emballages associés aux cyanures de potassium, de sodium et de calcium sont déclinés dans l'Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (ADR)<sup>22</sup>. Ces prescriptions sont variables en fonction du type d'emballage et du parcours emprunté.

Les cyanures peuvent être transportés en citernes et en conteneurs pour vrac, à condition de respecter toutes les dispositions spéciales associées aux numéros ONU 1680 ; 1689 et 1575 décrites aux chapitres de l'ADR telles que les codes de restriction de passage en tunnels, la fabrication et l'étiquetage des colis, le chargement, le déchargement, la manutention des colis transportés et le numéro d'identification de danger 66 : matière très toxique.

#### 5.2.1.3 TRANSPORT FERROVIAIRE

De même que pour le transport par voie routière, les conditions d'emballage associées au cyanure de potassium, cyanure de sodium et cyanure de calcium sont déclinées dans le Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses (RID)<sup>23</sup>. Ce règlement donne les instructions de transport en citernes mobiles et conteneurs pour vrac ainsi que les codes-citerne pour les citernes RID, les dispositions spéciales associées à ce type de transport pour les numéros ONU 1680, 1689, 1575 auxquels le transporteur doit se conformer pour un transport ferroviaire des cyanures.

---

<sup>22</sup> Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route, ECE/TRANS/257, Vol. I et II.

<sup>23</sup> Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses (RID), Janvier 2017.

#### 5.2.1.4 TRANSPORT PAR VOIE MARITIME

Bien qu'en dehors du cadre strict de cette étude, ce paragraphe traite brièvement du transport par voie maritime. En effet, en ce qui concerne une exploitation d'or en Guyane, le transport maritime (et les contraintes spécifiques qui lui sont associées en termes d'emballage des sels de cyanure) est très probablement à l'amont des autres modes de transport terrestres.

Ainsi, la déclinaison des numéros ONU 1680, 1689 et 1575 dans le code IMDG<sup>24</sup> donne les dispositions nécessaires en termes de manutention et de stockage des unités de transport sur le transport de fret maritime. Des dispositions spéciales différentes doivent être appliquées au contexte maritime, ainsi l'instruction d'emballage P002 diffère pour le transport maritime en termes de quantité maximale de produit autorisée par emballage et la disposition spéciale PP31 impose que les emballages des produits transportés sous les numéros ONU 1680, 1689 et 1575 soient hermétiquement fermés.

#### 5.2.1.5 TRANSPORT PAR VOIE FLUVIALE

Le transport du cyanure peut aussi avoir lieu par voies fluviales selon les prescriptions de l'Accord européen relatif au transport international de marchandises dangereuses par voie de navigation intérieure (ADN)<sup>25</sup>. Cet accord donne les prescriptions d'emballage et de transport associées aux cyanures pour l'ensemble des voies navigables intérieures y compris les voies de navigation maritime frontalière et les voies de navigation intérieures reliées à la mer servant essentiellement au trafic de navires de mer et désignées comme telles. Pour chaque numéro ONU, en fonction des risques associés, cet accord donne les bonnes pratiques en termes de sécurité et de moyens de secours à mettre à disposition de l'équipage.

Ces prescriptions s'appliquent pour tous types de transports sur les eaux intérieures (y compris les transports réalisés par petites embarcations de type « pirogue »).

#### 5.2.1.6 TRANSPORT PAR VOIE AÉRIENNE

Bien qu'en dehors du cadre strict de cette étude, ce paragraphe traite brièvement du transport par voie aérienne. En effet, l'étude de l'accidentologie associée au transport de cyanure a en effet mis en évidence un accident qui atteste de la possibilité d'avoir recours à ce type de transport.

Les cyanures de potassium, sodium et calcium sont autorisés à être transportés par voie aérienne à condition de respecter les instructions d'emballage et de transport couvertes par les numéros ONU 1680, 1689 et 1575 respectivement. La quantité maximale de cyanure pouvant être transportée par voie aérienne est de 50 kg.

---

<sup>24</sup> Code maritime international des marchandises dangereuses (Code IMDG), édition de 2016 Amendement 38-16.

<sup>25</sup> Accord européen relatif au transport international de marchandises dangereuses par voie de navigation intérieure, ECE/TRANS/243, 2015.

## 5.2.2 TRANSPORT DU CYANURE SELON LE CODE INTERNATIONAL DE GESTION DU CYANURE

L'institut international de gestion du cyanure a établi le code international de gestion du cyanure<sup>26</sup> qui est une initiative sans portée réglementaire et à adhésion volontaire pour l'industrie minière d'extraction d'or et d'argent. Ce code du cyanure est à destination des producteurs et des transporteurs de cyanure utilisé dans l'industrie minière.

Ce code vise à compléter les réglementations existantes et à fournir les bonnes pratiques pour la production, le transport, le stockage et l'utilisation du cyanure ainsi que pour la mise hors service des unités de cyanuration et les obligations liées aux garanties financières, prévention des accidents, secours d'urgence et autres obligations qui incombent aux personnels intervenant dans l'industrie minière d'extraction d'or et d'argent.

Le code du cyanure repose sur différents principes et normes couvrant des pratiques que les signataires du code s'engagent à respecter pour une gestion du cyanure de manière responsable.

Le second principe du code cyanure est lié au transport du cyanure : « Protéger les communautés et l'environnement pendant le transport du cyanure »<sup>27</sup>.

De ce principe découlent deux exigences :

- « *Etablir des limites claires de responsabilité au sujet de la sécurité, de la sûreté, de la prévention des rejets, de la formation et de l'intervention d'urgence dans des accords écrits avec les producteurs, les distributeurs et les transporteurs* » ;
- « *Exiger des transporteurs de cyanure qu'ils mettent en œuvre des plans d'intervention d'urgence et les capacités appropriées, et emploient des mesures adéquates à la gestion du cyanure.* »

Afin d'évaluer et de contrôler la mise en conformité de ces principes auprès des transporteurs de cyanure et des exploitants, l'Institut international de gestion du cyanure a mis à disposition un protocole de conformité de transport du cyanure recensant les bonnes pratiques de transport depuis le point de fabrication du cyanure jusqu'à l'exploitation d'extraction de l'or. Ces dernières sont reprises ci-après :

- 1) **Sélection de l'itinéraire pour minimiser le potentiel ou l'impact éventuel de rejets ou d'accident, le choix de l'itinéraire prend en compte :**
  - **la densité de population,**
  - **la construction et l'état des infrastructure (routes, chemins de fer, port, piste d'atterrissage, aire d'atterrissage pour hélicoptère),**
  - **le tangage et l'inclinaison,**
  - **le facteur cumulatif et la proximité des masses d'eau et de brouillard.**
- 2) **Réévaluer périodiquement les itinéraires sélectionnés pour les livraisons de cyanure et obtenir un retour d'informations sur l'état des routes par les personnes chargées du transport.**

---

<sup>26</sup> <https://www.cyanidecode.org/nous-vous-inviteons-%C3%A0-d%C3%A9couvrir-liiic> (consulté en septembre 2018).

<sup>27</sup> Transport de cyanure, protocole de conformité pour le Code international de gestion du cyanure (2009).

- 3) *Employer des opérateurs formés et possédant une licence (si nécessaire) pour l'utilisation des véhicules de transport.*
- 4) *Former le personnel chargé de la manutention du cyanure et utiliser les équipements de transport pour faire son travail de manière à limiter le potentiel de rejets et d'exposition au cyanure.*
- 5) *Utiliser uniquement des équipements conçus et entretenus pour les charges à transporter.*
- 6) *Empêcher une surcharge des véhicules de transport utilisés pour la manutention du cyanure (par exemple, la surcharge d'un camion, d'un ferry, d'une barge, etc.)*
- 7) *Utiliser des plaques ou autres marquages pour identifier clairement l'expédition de cyanure conformément aux réglementations locales ou normes internationales.*
- 8) *Mettre en place un programme de sécurité pour le transport du cyanure qui inclut (si nécessaire) :*
  - a) *Des inspections des véhicules avant chaque départ ou expédition,*
  - b) *Un programme de maintenance préventive,*
  - c) *Des limites sur les horaires de travail des opérateurs et des chauffeurs,*
  - d) *Des procédures pour empêcher les charges de glisser,*
  - e) *Des procédures qui permettent de modifier ou de suspendre le transport en cas d'intempéries ou de troubles de l'ordre public,*
  - f) *Un programme de prévention de la toxicomanie,*
  - g) *Un système de conservation des dossiers indiquant que les activités mentionnées ci-dessus sont mises en place.*
- 9) *Les véhicules de transport disposent de moyens de communication avec la société de transport, l'exploitation minière, le producteur ou le distributeur de cyanure et/ou les intervenants d'urgence.*
- 10) *Les équipements de communication (GPS, téléphones portables, radios, etc.) sont testés régulièrement pour s'assurer de leur bon fonctionnement.*
- 11) *Identifier les zones de non réception des communications sur certains itinéraires, mettre en place des procédures de communication spéciales pour gérer ces zones de non réception.*
- 12) *Contrôler les stocks et/ou la chaîne de conservation pour empêcher toute perte de cyanure au cours du transport.*
- 13) *Les dossiers d'expédition indiquant la quantité de cyanure en transit et les fiches techniques sur la sécurité des substances sont disponibles pendant le transport.*
- 14) *Si la société de transport sous-traitants une partie de la manutention ou du transport du cyanure, elle s'assure que les sous-traitant appliquent les bonnes pratiques de transport imposées par la société.*

### **5.3 TRANSPORT DU CYANURE : APPLICABILITÉ AU CONTEXTE GUYANAIS**

De façon générale, les bonnes pratiques ci-dessus exposées s'appliquent au contexte guyanais mais l'accessibilité aux sites miniers par la route et les infrastructures routières sont des contraintes pour le transport et l'approvisionnement en cyanure des sites d'extraction. En plus des contraintes infrastructurelles en Guyane, il peut y avoir une contrainte humaine liée au déficit de qualification du personnel technique pour le transport du cyanure conformément aux bonnes pratiques de transport.

Pour cette étude, nous avons vérifié que la Guyane est couverte par les Accords européens ADR et ADN. Etant donné le statut politique de la Guyane : Département et Région d'Outre-Mer français (DROM), Département Français d'Amérique, Région ultrapériphérique de l'Union Européenne, nous considérons que l'ADR et l'ADN sont applicables pour les modes de transport à destination et traversant le territoire terrestre guyanais.

Notons que dans le cas où un transport maritime serait envisagé pour l'approvisionnement du cyanure, il serait pertinent de consulter le Grand Port Maritime de la Guyane pour prendre connaissance des conventions et des textes réglementations applicables aux ports d'arrivée de fret maritime en Guyane.



## **6. STOCKAGE DU CYANURE AVANT UTILISATION**

Les cyanures de sodium et de potassium se présentent sous la forme de poudre blanche hygroscopique. Sous forme solide, le cyanure de sodium est conditionné dans de gros sacs « big bags » emballés dans des caisses de protection, placées dans un endroit abrité et ventilé.

### **6.1 ACCIDENTOLOGIE CONNUE**

Une recherche de l'accidentologie disponible a été réalisée au sein de la base ARIA.

La recherche par le mot-clé « cyanure » recense 144 accidents répertoriés. Sur ces 144 accidents, seuls 29 sont pertinents vis-à-vis du stockage ou de la mise en œuvre de cyanure alcalin (de sodium ou de potassium), à l'état solide ou en solution.

Un tableau, présenté en annexe (Tableau 5) présente l'extraction de ces accidents.

Il ressort de l'analyse de ces accidents que :

- plus du tiers concernent le secteur du traitement et du revêtement de métaux avec la plupart du temps des incendies (autour ou impliquant des stockages de cyanure de sodium ou de potassium) générant des fumées toxiques ou des fuites sur des cuves générant des intoxications par inhalation pour des employés ou du personnel de secours ;
- **4 seulement concernent le secteur de l'extraction de minerais non ferreux (dont un cas en France) : ces 4 événements concernent les incidents ou bien des ruptures de digues de retenue des résidus<sup>28</sup> et non pas le stockage du cyanure avant son utilisation.**

---

<sup>28</sup> Le cas de la rupture de barrage est étudié plus en détails dans le cadre du paragraphe 8.3.

## 6.2 REVUE DES BONNES PRATIQUES DE STOCKAGE

Les recherches bibliographiques réalisées dans le cadre de cette étude indiquent<sup>29</sup> que le cyanure de sodium est majoritairement transporté et conditionné sous forme solide (briquettes).

Ces briquettes seraient stockées différemment selon les fournisseurs :

- dans des ISO conteneurs ;
- dans des cartons, placés dans des conteneurs ;
- ou dans de gros sacs « big bags » emballés dans des caisses de protection.

Ensuite, ces conditionnements sont placés dans un endroit abrité et ventilé.

Des fournisseurs proposent également des systèmes de transformation du cyanure solide en cyanure liquide, stocké dans des réservoirs.

Les documents consultés en français et majoritairement internationaux traitent des aspects sécurités à prévoir lors du stockage de cyanure.

- **Pour les stockages de solide (cyanure sous forme de briquettes) : les endroits de stockage doivent être secs (contrôle du niveau d'humidité), et correctement ventilés voire réfrigérés. Les lieux de stockage doivent être éloignés de toute matière inflammable ou produits incompatibles.**
- Pour les stockages de liquide : le stockage a lieu dans une cuve de stockage dont les niveaux sont surveillés, la cuve étant placée en rétention. Les épandages dans la rétention doivent être rapidement traités pour éviter toute émanation.

D'une façon générale, les stockages doivent être à accès limité à des personnes dûment formées.

### 6.2.1 AU NIVEAU NATIONAL

Le stockage de cyanure de sodium solide est visé par la rubrique n°4110 (Toxicité aigüe catégorie 1 pour l'une au moins des voies d'exposition, à l'exclusion de l'uranium et de ses composés).

Le tableau suivant présente les points principaux concernant les prescriptions relatives au stockage de l'arrêté de prescriptions générales<sup>30</sup> du 13 juillet 1998.

---

<sup>29</sup> Voir notamment les sites internet des fabricants de cyanure de sodium (consultés en septembre 2018) :

- Australian Gold Reagents (<https://agrcyanide.com/products/>)
- Cyanco (<https://www.cyanco.com/storage-handling/>)
- ORICA (<http://www.orica.com/Products---Services/Mining-Chemicals/Products/>)

<sup>30</sup> Arrêté relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous l'une ou plusieurs des rubriques nos 4110, 4709, 4713, 4736 ou 4737.

**Tableau 3 : Principaux points de l'arrêté de prescriptions générales du 13 juillet 1998 (avec en référence les paragraphes concernés de l'arrêté).**

Règles d'implantations générales (§ 2.1)	<i>Les substances ou préparations sont stockées par groupe en tenant compte de leur incompatibilité liée à leurs catégories de danger</i>
Règles pour le stockage des solides très toxiques (§2.1.2.1)	<p><i>L'installation est implantée à une distance d'au moins :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>10 mètres des limites de propriété pour le stockage à l'air libre ou sous auvent ;</i></li> <li>• <i>ou 5 mètres des limites de propriété pour des stockages en local fermé et ventilé selon les dispositions du point 6.2.</i></li> </ul>
Règles pour la manipulation des solides très toxiques (§2.1.2.2)	<p><i>Les solides très toxiques sont utilisés ou manipulés dans un local ou enceinte fermé et ventilé selon les dispositions du point 6.2 implanté à une distance d'au moins :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>10 mètres des limites de propriété dans le cas où la ventilation n'est pas équipée d'une installation de traitement d'air appropriée au risque ;</i></li> <li>• <i>ou 5 mètres des limites de propriété dans le cas où la ventilation est équipée d'une installation de traitement d'air appropriée au risque.</i></li> </ul>
Rétentions (§ 2.9 et 2.10)	<p><i>Le sol des aires de stockage ou de manipulation des produits dangereux pour l'homme ou susceptibles de créer une pollution de l'eau ou du sol est étanche, inerte vis-à-vis des produits, incombustible et équipé de façon à pouvoir recueillir les eaux de lavage, les eaux d'extinction et les produits répandus accidentellement ; pour cela un seuil surélevé par rapport au niveau du sol ou tout dispositif équivalent les sépare de l'extérieur ou d'autres aires ou locaux. Les produits recueillis sont de préférence récupérés et recyclés, ou en cas d'impossibilité traités conformément au point 5.7 et au titre 7. (cf. § 2.9).</i></p> <p><i>Des cuvettes de rétention sont requises pour le stockage des liquides très toxiques (cf. § 2.10).</i></p>
Aménagement et organisation des stockages (§ 2.11)	<p><i>La hauteur maximale d'un stockage de substances ou préparations sous forme solide n'excède pas 8 mètres dans un bâtiment, 4 mètres à l'air libre ou sous auvent.</i></p> <p><i>La hauteur maximale d'un stockage de substances ou préparations sous forme liquide n'excède pas 5 mètres dans un bâtiment, 4 mètres à l'air libre ou sous auvent.</i></p> <p><i>Pour assurer une bonne ventilation, un espace libre est d'au moins un mètre entre le stockage des substances ou préparations très toxiques et le plafond.</i></p>
Risques-Stockages (§ 4.10)	<p><i>Les récipients peuvent être stockés en plein air à condition que le contenu ne soit pas sensible à des températures extrêmes et aux intempéries.</i></p> <p><i>Les substances ou préparations très toxiques sont stockées, manipulées ou utilisées dans les endroits réservés et protégés contre les chocs.</i></p> <p><i>Les fûts, tonnelets ou bidons contenant des substances ou préparations très toxiques sont stockés verticalement sur des palettes. Toute disposition est prise pour éviter la chute des récipients stockés à l'horizontale.</i></p>

## 6.2.2 AU NIVEAU INTERNATIONAL

De nombreux documents internationaux ont été consultés pour identifier les bonnes pratiques de stockages.

Plusieurs méritent d'être cités, et notamment :

- Code international de gestion du cyanure (Janvier 2011) et son guide de mise en œuvre (Octobre 2009) - Institut International de Gestion du Cyanure. Ce dernier fait l'objet d'un chapitre spécifique ;
- Chemical & Allied Industries Association, Management Practice Standard series for product Stewardship: part 2.3, Guidance Document for Cyanide, September 2012.

Les documents développent les aspects suivants :

- les mesures de prévention des fuites sur les stockages liquides (rétention, etc.) ;
- les mesures de stockage en sécurité du cyanure solide (ventilation, pas de produits incompatibles, prévention des points chauds, etc.) ;
- les dispositifs de lutte contre l'incendie ;
- les dispositifs de détection de fuite ;
- les procédures à prévoir pour :
  - le déchargement et le transport sur site ;
  - les procédures d'urgence en cas d'exposition ou de déversement accidentel ;
  - etc...

➤ Code international du cyanure

Le tableau suivant présente les principales normes de pratiques associées du Code<sup>31</sup>.

---

<sup>31</sup> Cf paragraphe 5.2.2 et glossaire (paragraphe 2).

Tableau 4 : Principales normes pratiques associées au stockage par le code international du cyanure.

Principes	Normes de Pratiques	Directive
<p><b>3. MANUTENTION ET STOCKAGE</b> Protéger les employés et l'environnement pendant la manutention et le stockage du cyanure.</p>	<p>3.1 Concevoir et construire des installations de déchargement, de stockage et de mélange dans le respect des pratiques d'ingénierie saines et acceptées, des procédures de contrôle de la qualité et d'assurance de la qualité, et des mesures de prévention et de confinement des déversements.</p>	<p>Dans la mesure du possible, <b>les zones de déchargement et de stockage du cyanure liquide et solide doivent se situer loin des populations et des eaux de surface.</b></p> <p>Les mesures de protection peuvent inclure des détecteurs et des alarmes automatiques pour le gaz de cyanure d'hydrogène, des structures de confinement améliorées ou supplémentaires et des procédures d'urgence spécifiques pour l'avertissement, l'évacuation, la réaction et l'assainissement.</p> <p>Le déchargement du cyanure liquide doit s'effectuer sur une surface en béton afin d'empêcher une fuite d'entrer en contact avec l'environnement. Des systèmes et des procédures doivent être en place pour traiter de la récupération potentielle de la solution rejetée, de l'assainissement de tout sol contaminé et des problèmes possibles des camions-citernes afin de protéger l'eau de surface et l'eau souterraine. Une méthode doit être prévue pour prévenir le remplissage excessif des réservoirs de stockage de cyanure (autre que l'observation directe et la jauge manuelle), telle qu'un indicateur de niveau automatique, une alarme de haut niveau ou un système intégré de réservoir et d'arrêt de valve.</p> <p><b>Les zones de stockage du cyanure doivent être bien aérées afin d'empêcher l'accumulation de gaz de cyanure d'hydrogène.</b> Des mesures telles que le stockage sous un toit et surélevé par rapport au sol ou dans des conteneurs sûrs doivent être mises en place afin de <b>minimiser le potentiel de contact du cyanure avec l'eau.</b></p> <p><b>Le cyanure ne doit pas être stocké avec des acides, des oxydants très puissants, des explosifs, des denrées alimentaires, des aliments pour animaux, du tabac ou d'autres matières incompatibles.</b></p> <p>Les conteneurs de confinement doivent être construit dans un matériau adapté et offrir une capacité supplémentaire en cas d'événement pluvio-hydrologique.</p>
	<p>3.2 Opérer les installations de déchargement, de stockage et de mélange à l'aide d'inspections, de maintenance préventive et de plans d'urgence afin de prévenir ou de confiner les rejets et pour contrôler et répondre aux expositions des employés.</p>	<p>Les exploitations doivent élaborer et mettre en œuvre un jeu de <b>procédures écrites destinées à prévenir ou à contrôler les expositions et les rejets au cours du déchargement, du stockage et du mélange du cyanure.</b></p> <p>Les procédures de manutention du cyanure solide doivent inclure des mesures visant à garantir que les conteneurs ne sont ni fendus ni percés, et doivent donner des limites sur l'empilage de conteneurs.</p> <p>Les exploitations doivent élaborer des <b>procédures d'urgence</b> pour répondre aux rejets et à l'exposition des employés susceptibles de se produire pendant le déchargement, le mélange et le stockage de cyanure.</p>

Principes	Normes de Pratiques	Directive
		L'équipement de neutralisation et de nettoyage des déversements doit aussi être facilement disponible sur les lieux de déchargement, de stockage et de mélange. Le personnel doit y être formé.
<p><b>4. EXPLOITATIONS</b> Gérer les solutions de traitement contenant du cyanure et la production de déchets afin de protéger la santé des hommes et l'environnement.</p>	<p>4.8 Mettre en œuvre des procédures de contrôle de la qualité et d'assurance de la qualité afin de confirmer que les unités de cyanuration sont construites selon les normes et les caractéristiques acceptées en matière d'ingénierie.</p>	<p><b>Des programmes de contrôle de la qualité et d'assurance de la qualité doivent être mis en œuvre pendant la construction de nouvelles installations et la modification d'installations existantes afin de garantir l'intégrité structurelle et la capacité de confiner en toute sécurité les solides et les solutions de traitement.</b></p>
<p>8. <b>FORMATION</b> Former les employés et le personnel d'intervention d'urgence à la gestion du cyanure d'une manière sûre et respectueuse de l'environnement.</p>	<p>8.1 Former les employés à comprendre les dangers associés à l'utilisation du cyanure.</p> <p>8.2 Former le personnel approprié pour exploiter les installations selon des systèmes et procédures qui protègent la santé humaine, la communauté et l'environnement.</p>	<p><b>Tous les employés susceptibles de travailler avec du cyanure doivent être formés à ses dangers inhérents.</b></p> <p>Les fiches techniques sur la sécurité des substances ou d'autres documents d'information rédigés dans la langue des employés sont utiles à ces fins.</p> <p><b>Les éléments de formation nécessaires à chaque poste doivent être identifiés dans les documents de formation.</b></p>

## **7. TRAITEMENT DU MINERAI PAR CYANURATION ET TRAITEMENT DES RÉSIDUS CYANURÉS**

Dans le cadre de l'extraction industrielle de l'or, le cyanure est employé pour traiter chimiquement le minerai. Le principe de ce procédé consiste en une lixiviation du minerai par une solution de cyanures ayant pour objectif de dissoudre l'or qui sera par la suite récupéré par adsorption sur charbon actif.

De surcroit, les bonnes pratiques indiquent que les cyanures doivent être détruits (ou décyanuration) des résidus miniers humides avant leur stockage.

De façon schématique, l'extraction de l'or par lixiviation se réalise en cinq grandes étapes :

1. *l'extraction et le stockage du minerai ;*
2. *le broyage du minerai ;*
3. *la lixiviation du minerai (solution cyanurée) ;*
4. *la récupération de l'or sur charbon actifs puis électrolyse ;*
5. *le traitement de décyanuration des boues résiduelles.*

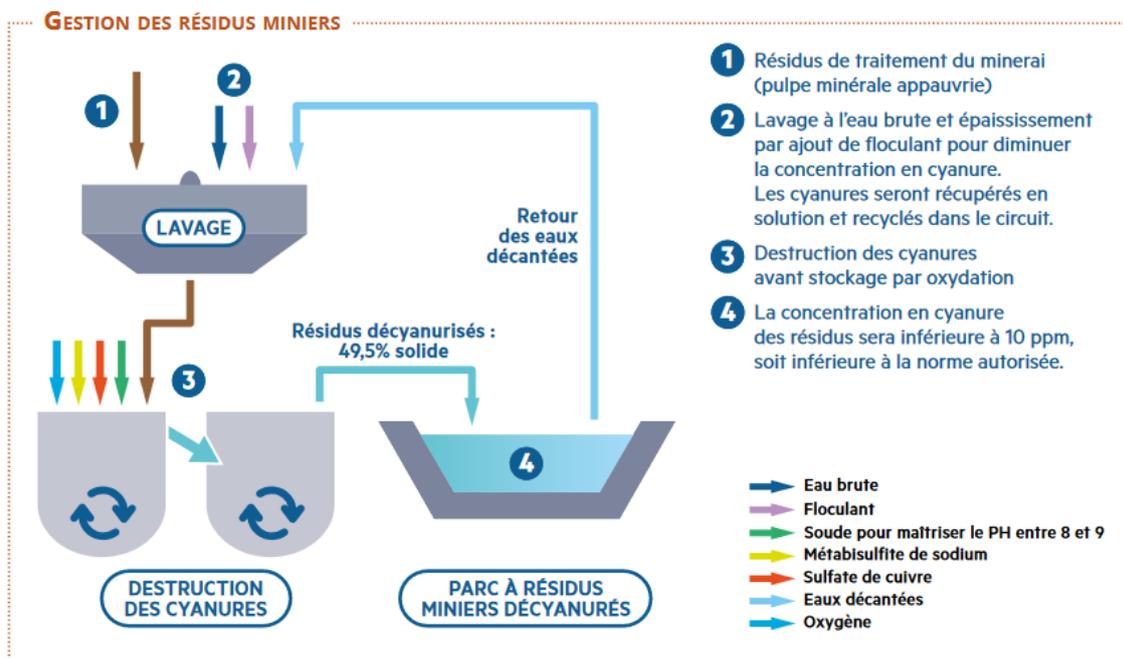
Le présent rapport concernant l'extraction d'or, ce paragraphe se concentre donc principalement sur les étapes de lixiviation/récupération de l'or et sur la décyanuration des résidus miniers.

Notons que la littérature indique deux principales techniques de lixiviation du minerai : la lixiviation en tas et la lixiviation en cuves. C'est notamment cette seconde technique qui semble privilégiée pour l'exploitation envisagée par le projet Montagne d'or (CNDP, 2018)<sup>32</sup> : « Les aspects très techniques du traitement industriel du minerai par cyanuration ont suscité moins de questions : il serait effectué en circuit fermé dans des cuves étanches avec des dispositifs de récupération en cas de fuites ».

De même, la décyanuration peut se faire par différents procédés, chimiques ou biologiques (BRGM, 2013). Pour ce même projet Montagne d'Or, le maître d'ouvrage indique vouloir avoir recours au procédé chimique par oxydation (Montagne d'or, 2018) - cf. *Figure 4* ci-après.

---

<sup>32</sup> Quant à elle, la lixiviation en tas est plus souvent pratiquée sous les climats plus secs où la gestion des eaux météoritiques ne représente pas un enjeu particulier.



Source : Compagnie minière Montagne d'Or

Figure 4 : Schéma de gestion des résidus minier établi par la compagnie minière Montagne d'or (source : Compagnie minière Montagne d'or).

## 7.1 CYANURATION ET TRAITEMENT DES RÉSIDUS CYANURÉS : ACCIDENTOLOGIE CONNUE

Lors de notre revue bibliographique nous n'avons pas identifié d'accidents associés aux phases de traitement du minerai par cyanuration et de traitement des résidus cyanurés.

Il convient toutefois de considérer que si un accident se produisait à l'intérieur des limites d'un site industriel pendant cette étape du procédé (et notamment pour la technique ayant recours à une lixiviation en cuves fermées), les éventuelles conséquences environnementales et/ou humaines pourraient être cantonnées à l'intérieur du site et donc être difficilement repérables par une analyse bibliographique rapide.

Néanmoins, bien qu'aucun accident n'ait été identifié à l'occasion du traitement du minerai par cyanuration, au vu du procédé industriel, différents scénarii de défaillances pourraient être étudiés :

- des rejets accidentels de cyanure pendant les étapes de déchargement et de mélange ou de stockage (si celui-ci est effectué de façon inappropriée) ;
- des déversements accidentels depuis les cuves, les tuyaux ou bien les réservoirs (y compris en cas de rupture d'intégrité des équipements de rétention ou bien de dépassement de leur capacité de stockage) ;
- une défaillance des systèmes de traitement des cyanures (y compris par panne, malveillance ou bien absence d'alimentation en énergie).

Les bonnes pratiques ci-après listées sont ainsi principalement axées à prévenir et/ou apporter des éléments de remédiation à ces défaillances.

## **7.2 REVUE DES BONNES PRATIQUES À PRIVILÉGIER DANS LE CONTEXTE GUYANAIS**

De nombreuses sources bibliographique ont été consultées pour identifier les bonnes pratiques à mettre en œuvre dans le cas de l'exploitation de l'or par cyanuration (Collectif, 2017 ; European Commission, 2009 ; Urien, 2017 ; BRGM, 2013, 2018, ...).

Comme tout procédé mettant en œuvre des substances problématiques pour la santé humaine et/ou pour l'environnement, il existe de nombreuses bonnes pratiques à mettre en œuvre, et la mise en place de certaines de celles-ci est très fortement dépendante de la situation locale où le procédé de cyanuration est mis en œuvre (infrastructures disponibles, conditions météorologiques rencontrées, ...). Les bonnes pratiques ci-après listées n'ont donc pas vocation à constituer une liste exhaustive mais plutôt à identifier, sous la forme d'une liste à puces, quelques bonnes pratiques, qui présentent notamment un intérêt dans le cas du contexte guyanais.

### **7.2.1 CYANURATION**

Les bonnes pratiques liées aux conditions météorologiques rencontrées sont :

- d'optimiser la prise en compte et la gestion des eaux météoritiques sur l'ensemble des ouvrages (cela implique de dimensionner les équipements en tenant compte des conditions météorologiques extrêmes pouvant être rencontrées sur le site).

L'objectif étant ici de garantir que le stockage « au sec » du cyanure soit garanti quelques soient les conditions météorologiques rencontrées ;

- de mettre en place un procédé de cyanuration en cuve à même de garantir une absence de diffusion des produits cyanurés dans l'environnement.

Les bonnes pratiques liées à l'utilisation de cyanure sont présentées ci-après :

- ajuster la cyanuration du minerai en temps réel, via la mise en place d'un système de contrôle automatique (et mettre en place un suivi des quantités de cyanure employées) ;
- lors de la cessation d'activités du site, veiller à ce qu'aucun stock de cyanure ne soit entreposé sur place ;
- prendre des dispositions pour la récupération et le retour au processus de cyanuration ou le traitement adéquat de l'eau contaminée ou des fuites de solution cyanurée ;
- construire et revêtir les réservoirs de stockage et de mélange de cyanure, ainsi que les pipelines connexes, en employant des matières compatibles avec le cyanure et un pH élevé ;
- identifier clairement les réservoirs et les pipelines comme contenant du cyanure, en indiquant le sens du débit sur les pipelines ;

Autre élément d'importance, en plus de l'or, la cyanuration peut entraîner la libération d'autres éléments (Hg, As, Sb, Fe, Zn, Cu, ...). Des mesures de prévention doivent ainsi être prises afin de gérer cette éventuelle source de contamination de l'environnement.

### **7.2.2 TRAITEMENT DES RÉSIDUS CYANURÉS (DECYANURATION)**

Une bonne pratique liée aux conditions météorologiques rencontrées est d'assurer une alimentation électrique pérenne quelques soient les conditions rencontrées (via un système de courant secouru), afin de se prémunir d'irrégularité dans le fonctionnement de la décyanuration des résidus.

Concernant l'éloignement du site d'exploitation, une bonne pratique est de se doter d'un système de gestion et d'une logistique efficace, permettant d'assurer la disponibilité sans rupture d'approvisionnement des réactifs nécessaires à la décyanuration des résidus.

Pour ce qui concerne l'utilisation même du cyanure, une bonne pratique est de surdimensionner la taille du traitement de décyanuration des résidus d'un facteur 2, afin de garantir un traitement efficace quelques soient les conditions d'exploitations rencontrées.

### **7.2.3 CYANURATION ET TRAITEMENT DES RÉSIDUS CYANURÉS**

Une bonne pratique liée aux conditions météorologiques rencontrées est de mettre en place, diffuser et tester des procédures d'urgence (par exemple via la rédaction de fiches réflexes en cas de fonctionnement en conditions dégradées).

Les bonnes pratiques liées à l'éloignement du site d'exploitation sont les suivantes :

- de mettre en place et suivre un programme d'entretien préventif des matériels tenant compte de la difficulté d'accès du site ;
- afin de limiter les risques d'incidents liés au transport de résidus cyanurés, leur traitement doit se faire à proximité du site de lixiviation.

Les bonnes pratiques liées à l'utilisation du cyanure sont :

- de tenir compte de toutes les modifications du procédé de traitement du minerai pour revoir le dimensionnement des barrières techniques mises en place sur le site (taille du traitement de décyanuration, rétentions, ...) ;
- l'adhésion au code international du cyanure et d'une manière générale, l'adhésion aux bonnes pratiques internationales sur l'utilisation de produits chimiques (y compris la communication auprès des parties prenantes des actions entreprises dans ce domaine) ;
- de mettre en place des procédures écrites standardisées pour l'ensemble des manipulations mettant en œuvre du cyanure.

## 8. STOCKAGE DES RÉSIDUS DÉCYANURISÉS

### 8.1 CLASSIFICATION ET ÉVOLUTION À LONG TERME DES DÉCHETS

La logique de la classification réglementaire des déchets ici employée est explicitée dans le « Guide d'application pour la caractérisation en dangerosité » (INERIS, 2016) : la base de cette classification repose sur la consultation du catalogue européen des déchets. Pour ce faire, nous avons considéré que les résidus issus de l'activité industrielle étaient présents sous forme de boues (nous avons ainsi écarté les classifications liées aux poussières et aux poudres).

#### 8.1.1 CLASSIFICATION DES RÉSIDUS DE PROCÉDÉS POUR LEUR CONCENTRATION RÉSIDUELLE EN CYANURE

La classification réglementaire des déchets issus du procédé de traitement du minerai aurifère vis-à-vis de son contenu en cyanure dépend directement de la concentration des résidus en cette substance. Dans le cas présent, cette classification est réglementée par les textes suivants :

- Décision 2014/955/UE de la Commission du 18 décembre 2014 modifiant la décision 2000/532/CE établissant la liste des déchets, conformément à la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil<sup>33</sup> ;
- Règlement (UE) n°1357/2014 de la Commission du 18 décembre 2014 remplaçant l'annexe III de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil relative aux déchets et abrogeant certaines directives<sup>34</sup> ;
- Règlement (UE) n°2017/997 du Conseil du 8 juin 2017 modifiant l'annexe III de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne la propriété dangereuse HP 14 « Écotoxique »<sup>35</sup>.

Selon ces réglementations, les déchets sont considérés comme toxiques pour une concentration en cyanure supérieure à 2 500 mg/kg de résidus humides.

Dans le cas du projet d'exploitation « Montagne d'or », les concentrations annoncées par l'exploitant en cyanure dans les résidus sont inférieures à 10 ppm (Urien, 2018)<sup>36</sup>. Si l'on émet l'hypothèse que ces 10 ppm correspondent à 10 mg de cyanure par kilogramme de résidus minier humides, **la réglementation indique que ces résidus ne sont pas considérés comme des déchets toxiques vis-à-vis du cyanure.**

---

<sup>33</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014D0955&qid=1537776798738&from=FR>

<sup>34</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1357&qid=1537776919953&from=FR>

<sup>35</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R0997&qid=1537777040450&from=FR>

<sup>36</sup> Ce chiffre de 10 ppm est dans la grandeur d'ordre rencontrée sur de telles exploitations : citons par exemple les résidus cyanurés d'une mine au Guyana présentant une concentration en cyanure d'environ 25 ppm (cf. § 8.2.4, page 47).

La classification par le contenu en cyanure doit néanmoins être complétée par les autres propriétés de danger que pourraient présenter ces résidus. Il convient ainsi de considérer l'émission d'acide cyanhydrique gazeux (qui correspond à la propriété « HP 12 » : présence de substance pouvant émettre un gaz toxique au contact de l'eau ou d'un acide) lors de la potentielle oxydation des sulfures de ces matériaux (cf. paragraphe ci-après).

**Ainsi, même si la concentration en cyanure ne dépasse pas les seuils admis, les résidus issus du procédé sont néanmoins considérés comme dangereux<sup>37</sup> et doivent donc se conformer aux préconisations prévues par la réglementation dans cette situation (i.e. soit traitement, soit stockage comme déchets dangereux).**

### **8.1.2 BONNES PRATIQUES VIS-À-VIS DE LA CONCENTRATION RÉSIDUELLE EN CYANURE DES RÉSIDUS DE PROCÉDÉS**

Du point de vue de l'efficacité de la réduction des teneurs en cyanures dans ces résidus, Johnson (2015) souligne l'importance de l'étape de dimensionnement des installations de stockage des résidus. En effet, **il est conseillé de les dimensionner de telle sorte que la volatilisation, l'aération et l'exposition à la lumière soient facilitées.**

### **8.1.3 CLASSIFICATION DES RÉSIDUS DE PROCÉDÉS POUR LEUR CONCENTRATION RÉSIDUELLE EN SULFURES**

Pour de nombreux projets miniers localisés en zone tropicale il est possible de rencontrer des sulfures dans les stériles de découverte et les résidus de procédés en concentrations supérieures aux capacités de neutralisation des acides de ces mêmes matériaux. Ceci implique une classification des résidus comme **déchets dangereux**, par la liste européenne des déchets (code 01 03 04\* stériles acidogènes provenant de la transformation du sulfure - \* signifie dangereux)<sup>38</sup>.

Dans le cas du projet Montagne d'or, la littérature disponible atteste de cette situation des résidus vis-à-vis de leur contenu en sulfure (Urien, 2018) : la propriété HP 15 (déchet capable de présenter une des propriétés dangereuses susmentionnées que ne présente pas directement le déchet d'origine) est ainsi probablement réalisée.

Plus en détails, l'oxydation de la pyrite  $\text{FeS}_2$  (et de la pyrrhotite  $\text{Fe}_x\text{S}_{((0-0.2)-x)}$ ) au contact de l'oxygène de l'air et de l'eau et par activité biologique produit de l'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (pH 2 à 4) qui a la propriété de dissoudre les métaux (fer, aluminium, cuivre, arsenic si présent), et peut entraîner la mise en place d'un phénomène de drainage minier acide aboutissant mobile potentiellement toxique et

---

<sup>37</sup> Classification de ces résidus comme déchet dangereux, par la liste européenne des déchets (code 01 03 04\* stériles acidogènes provenant de la transformation du sulfure - \* signifie dangereux. Cette classification correspond à une entrée dite « absolue » ne dépendant pas de la concentration en substances dangereuses, et ne nécessitant pas d'autre justification.

De plus, la propriété HP 15 (Déchet capable de présenter une des propriétés dangereuses susmentionnées que ne présente pas directement le déchet d'origine) est également suspectée pour ces résidus.

<sup>38</sup> Cette classification ne dépend pas de la concentration en substances dangereuses, et ne nécessitant pas d'autre justification.

écotoxique<sup>39</sup>. Une annexe spécifique dédiée à ce phénomène est reprise en annexe 4 à ce rapport.

Cette évolution peut se poursuivre jusqu'à épuisement des sulfures, soit potentiellement des dizaines d'années. Ce phénomène est, par exemple, très répandu dans les résidus laissés par les exploitations artisanales abandonnées de minerais sulfurés de fer, cuivre, plomb et zinc au sud du Massif Central et d'ailleurs (Saint Laurent le Minier, Saint Sébastien d'Aigrefeuille, Saint Martin de Valgalgues, ...). Sur ces sites, il résulte une contamination de tronçons de bassins versants secondaires qui, à ce jour, n'a pas été solutionnée dans son ensemble malgré divers travaux de mise en sécurité réalisés par l'ADEME (Hennebert, communication personnelle).

Une évaluation sommaire estime la quantité de sulfures excavés à 4 millions de tonnes, qui pourraient produire au contact de l'air et de l'eau jusqu'à 12 millions de tonnes d'acide sulfurique<sup>40</sup>.

**Bien que non liée au contenu en cyanure, la problématique de neutralisation des résidus miniers semble donc une problématique à part entière qui mériterait de plus amples investigations.**

De façon plus opérationnelle, il est recommandé une caractérisation fine des stériles miniers vis-à-vis de leurs teneurs en sulfure en amont du lancement des travaux afin de pouvoir évaluer leur potentiel acidogène (et par la même occasion de pouvoir proposer des mesures destinées à éviter la mise en place d'un phénomène de drainage minier acide).

#### 8.1.4 GESTION DES RÉSIDUS DE PROCÉDÉS

Dans la situation décrite ci-dessus (gestion de déchets dangereux), il convient de considérer le classement de l'installation de stockage de ces résidus en catégorie A (directive 2006/21, art 6 et annexe III).

Une première option serait de réaliser un stockage en alvéoles étanches à l'air et à l'eau (y compris météorique) après épaissement des résidus. Bien qu'une évaluation technico-économique de cette option serait à mener pour une exploitation aurifère de grande ampleur, cette technologie semble matériellement difficile à mettre en place (notamment en termes de disponibilité des matériaux).

<sup>39</sup> Notons que la norme NF EN 15875 de 2011 spécifie des méthodes permettant de caractériser le potentiel des matériaux sulfurés à former des eaux de drainage acide.

<sup>40</sup> Hypothèses et sources des informations exploitées pour l'estimation des quantités de sulfures excavées et la potentielle production d'acide sulfurique correspondant aux matériaux excavés :

Matériau	Sulfure (%)	Moyenne sulfure (%)	Volume (m3)	Taux de matériau acidogène minimum	Masse estimée roche (t)	Masse estimée sulfure (t)
	(SRK, 2015)	Calcul	(Urien, 2018)	(Urien, 2018)	Hypothèse densité 1.2 t/m <sup>3</sup>	
Upper Felsic Zone (stériles)	1.67 ; 2.39 ; 0.67 ; 1.89 ; 1.61 ; 0.52 ; 2.66	1.63	243 000 000	55%	160 380 000	2 614 194
Lower Favorable Zone (résidus de minerais)	2.45 ; 4.94 ; 0.8 ; 1.35	2.39	45 000 000	100%	54 000 000	1 287 900
Total			288 000 000		214 380 000	3 902 094
Total équivalent acide sulfurique						<b>11 935 284</b>

Pour le projet « Montagne d'or », le projet ouvert de parc à résidus correspond à une option opposée de stockage ouvert (Montagne d'or, 2018).

Selon la littérature<sup>41</sup>, une seconde option consisterait en l'ajout de matériaux alcalins en quantité supérieure à l'acidité actuelle et potentielle de ces matériaux afin de garantir leur stockage et leur végétalisation sans émissions vers les eaux de surface et les eaux souterraines.

De plus, le risque d'émission du cyanure résiduel sous forme d'acide cyanhydrique HCN volatil serait minimisé puisque le milieu ne s'acidifierait pas (l'acidité produite par l'oxydation des sulfures serait neutralisée au fur et à mesure par l'alcalinité apportée).

Au cours du temps, ce cyanure à faible concentration pourrait éventuellement être biodégradé vu les conditions favorables créées (eau, air, végétation). La propriété HP 12 pourrait donc s'atténuer voire disparaître : le matériau résiduel correspondrait alors à un déchet non dangereux au code *01 03 06 (stériles autres que ceux visés aux rubriques 01 03 04\* et 01 03 05\*)*.

Néanmoins, cette option de traitement nécessite d'avoir recours à une importante source d'alcalinité destinée à éviter les dommages environnementaux créés à moyen et long terme par ces déchets dès lors qu'ils entrent en contact avec le milieu naturel.

**Pour une exploitation en Guyane, l'enjeu de la neutralisation des résidus est d'assurer l'approvisionnement en matériaux alcalins qui ne sont que très peu disponibles sur place ou à proximité.**

## **8.2 GÉNÉRALITÉS SUR LES OUVRAGES DE STOCKAGE DES DÉCHETS DE L'INDUSTRIE EXTRACTIVE**

Sur un site d'exploitation de minerais aurifères, les résidus cyanurés sont stockés dans des sites réservoirs limités par des ouvrages de rétention en remblais, dont la stabilité et la pérennité sont cruciales pour limiter les impacts durant l'exploitation et en post-exploitation.

Les généralités reprises dans ce paragraphe sont principalement issues de Ineris (2012) qui traite des bonnes pratiques concernant les ouvrages de rétention industriels de grande hauteur en matériau meuble.

### **8.2.1 LES DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS DE RETENUE**

Trois configurations différentes de retenue sont répertoriées selon que :

- le remblai soit érigé en barrage de vallée ;
- le remblai soit érigé à flanc de coteau ;
- le remblai soit annulaire et circonscrive totalement le stockage.

---

<sup>41</sup> Doye et Duchesne, 2005 ; Hennebert, 2013 ; Paradis *et al.*, 2007 ; Polcaro *et al.*, 2000 ; Rios *et al.*, 2008 ; US EPA, 2008 ; Ziemkiewicz *et al.*, 2003 ; Zijlstra *et al.*, 2010.

De plus, le réservoir peut être multiple ou segmenté. Les différents cas sont illustrés en Figure 5 ci-après (notons que des configurations hybrides sont également observées).

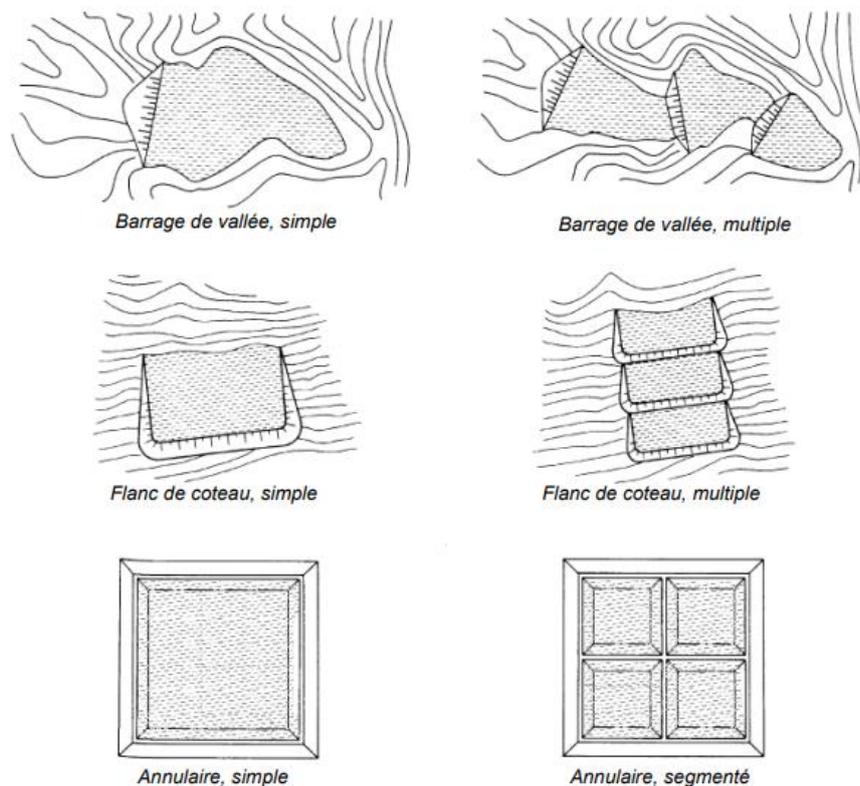


Figure 5 : Configurations de retenues, d'après Vick (1990).

### 8.2.2 MÉTHODES DE CONSTRUCTION

La construction des ouvrages de rétention est le plus souvent réalisée en plusieurs étapes puisqu'elle doit s'adapter à la production de résidus et donc à une activité industrielle qui peut s'intensifier ou au contraire décroître dans le temps.

Pour faire face à ces contraintes opérationnelles, trois méthodes de construction existent selon que :

- les élévations successives du remblai sont fondées sur les résidus ayant décanté, ce qui implique que l'axe de l'ouvrage se déplace vers l'amont lors de la construction (méthode amont) ;
- les élévations successives du remblai sont fondées uniquement sur les élévations précédentes et le sol naturel, ce qui implique que l'axe de l'ouvrage se déplace vers l'aval lors de la construction (méthode aval) ;
- les élévations successives du remblai sont fondées sur les élévations précédentes et le sol naturel à l'aval, mais s'appuient sur les résidus ayant décanté à l'amont, ce qui implique que l'axe de l'ouvrage ne se déplace pas (méthode centrale).

Ces différentes méthodes de construction sont illustrées en Figure 6 et peuvent être combinées. Dans tous les cas, la première étape consiste en la construction d'un remblai d'amorce, qui restera le remblai de pied de l'ouvrage de rétention pour la méthode amont, tandis que de nouveaux remblais de pied seront érigés à chaque élévation des méthodes aval et centrale.

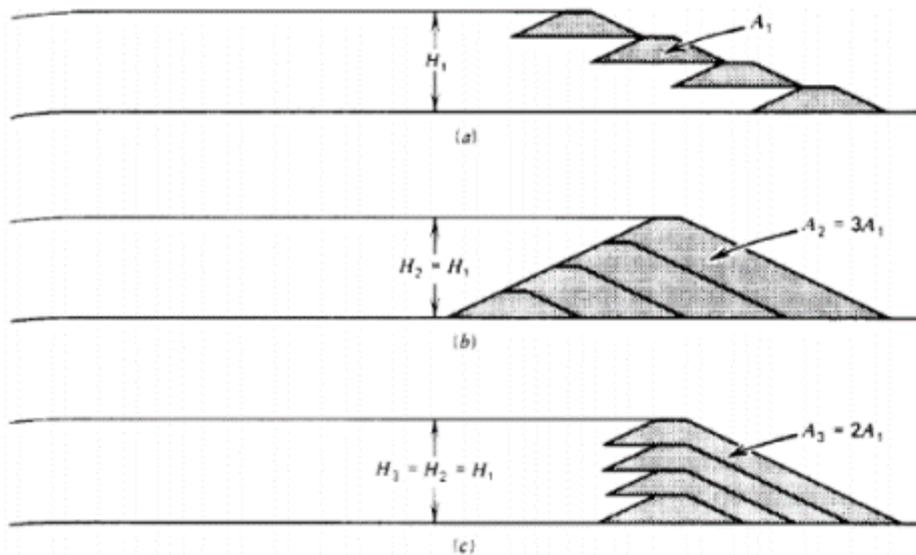


Figure 6 : Présentation des méthodes amont (a), aval (b) et centrale (c), d'après Vick (1990).

### 8.2.3 CYCLE DE VIE DES OUVRAGES DE RÉTENTION

Le cycle de vie des ouvrages de rétention industriels, tel que présenté à la Figure 7, admet une particularité du fait que la phase d'exploitation intègre des étapes de construction intermédiaires, puisque les remblais sont élevés au fur et à mesure du remplissage du réservoir par les résidus. La configuration finale de l'ouvrage peut d'ailleurs fortement différer de la configuration prévue initialement.

A l'issue de la phase d'exploitation, lorsque la rétention est pleine ou lorsque l'activité industrielle s'arrête, l'ouvrage de rétention industriel entre en phase d'abandon durant laquelle l'auscultation et le suivi continuent après mise en sécurité de l'ouvrage, notamment vis-à-vis des épisodes climatiques extrêmes.

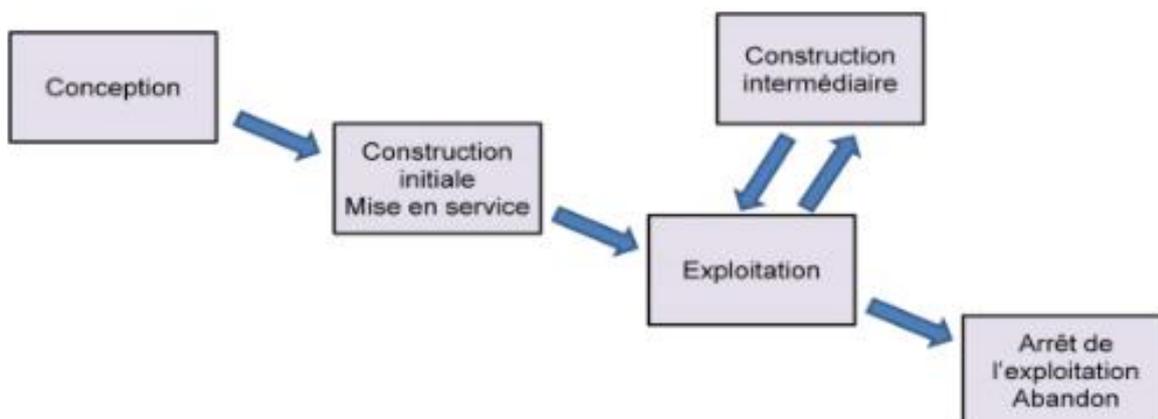


Figure 7 : Cycle de vie d'un barrage industriel.

## 8.2.4 ACCIDENTOLOGIE CONNUE DES OUVRAGES DE RÉTENTION

Comme indiqué précédemment, un accident concernant une rupture de barrage sur une exploitation d'or a été identifié lors de notre étude bibliographique (cf. Annexe 3).

Le rapport du BRGM (2013) rapporte deux autres accidents concernant des exploitations de minerais aurifères :

- *l'accident de Baia Mare (Roumanie) du 30 Janvier 2000 est dû à une rupture du barrage de résidus qui a abouti à la libération de 100 000 m<sup>3</sup> de liquide contenant entre 50 et 100 tonnes cyanure dans les rivières Sasar, Lapus, Somes, la Tisza et le Danube avant d'atteindre la mer Noire environ quatre semaines plus tard<sup>42</sup> ;*
- *au Guyana, à Omai un autre accident de ce type est survenu en août 1995 sur une mine exploitée par la société Cambior (4,2 million de m<sup>3</sup> de résidus cyanurés, à une concentration d'environ 25 ppm, se sont déversés dans la rivière Omai qui se jette dans l'Essequibo impactant près de 100 km de son cours. Il a été affirmé que jusqu'à 23 000 personnes vivant dans la région d'Essequibo ont été touchés par ce déversement par la contamination de l'eau et de la faune aquatique qui représente une ressource importante pour la population riveraine de ce cours d'eau.*

Afin de raisonner sur un plus grand nombre d'incidents, ce chapitre aborde l'accidentologie relative aux ouvrages de rétention des déchets de l'industrie extractive élargie à tous types de matériaux retenus en amont.

Un certain nombre d'analyses en retour ont été menées sur des accidents d'ouvrages de rétention de déchets de l'industrie extractive (Danciu, 2014 ; Riskope, 2017).

L'analyse accidentologique de 289 évènements, survenus entre 1915 et 2016 montre que lorsque le type de construction de l'ouvrage de rétention est renseigné, 58 % des accidents concernent des ouvrages constitués selon la méthode « amont ». 17 % des accidents concernent des ouvrages constitués selon la méthode « aval ».

Dans Danciu (2014), un certain nombre de bases de données d'accidents d'ouvrages de stockage de déchets de l'industrie extractive sont analysées afin d'identifier les différentes causes d'accident.

Les principales causes d'accidents identifiées sont les suivantes :

- débordement du barrage ;
- précipitations exceptionnelles ;
- instabilité de la pente en aval ;
- rupture de la fondation ;
- infiltration (incluant l'érosion interne) ;

---

<sup>42</sup> - Quelques 2000 kilomètres de cours d'eau, dans le bassin versant du Danube, ont été impacté par ce déversement, provoquant la mort de plusieurs tonnes de poissons et la contamination de l'eau potable de plus de 2 millions de personnes.

- dégâts liés aux structures (conduites...) ;
- tremblement de terre.

### 8.2.5 REVUE DES BONNES PRATIQUES POUR LES OUVRAGES DE RÉTENTION

L'essentiel des informations présentées dans ce paragraphe est issu de deux sources bibliographiques (Ineris, 2012 et JRC, 2018).

Les paragraphes suivants identifient les éléments qui méritent une attention particulière, notamment dans le contexte guyanais.

#### 8.2.5.1 SOL DE FONDATION

Afin d'assurer la stabilité structurelle à court terme et à long terme de la zone du site de dépôt, il convient de vérifier la compatibilité du sol de fondation avec l'ouvrage projeté. Celle-ci a pour objectifs fondamentaux de vérifier la capacité de portance du sol de fondation, au regard de la hauteur des ouvrages de rétention édifiés, d'une part, et de vérifier que les effluents du réservoir de résidus ne puissent migrer à l'extérieur de ces ouvrages d'autre part. Elle s'appuie sur une campagne d'investigation adaptée qui consiste à vérifier la continuité géologique, l'absence de discontinuités préjudiciables, les propriétés géotechniques et hydrogéologiques du sol de fondation en phase de planification et dimensionnement de l'ouvrage de dépôt ainsi qu'en phase opérationnelle.

Dans le cadre spécifique guyanais, du fait de l'éloignement des sites, ces bonnes pratiques sont souvent confrontées à des moyens d'investigation limités (sondeuses, moyens de laboratoires).

De plus, concernant l'édification d'un parc à résidus, outre les caractéristiques géomécaniques de l'ouvrage, il convient de prendre en compte le risque de présence d'objets tranchants ou poinçonnant susceptibles d'altérer la géomembrane en base de construction. **En effet, en Guyane, les sites aurifères montrent souvent des traces d'exploitations illégales qui peuvent se traduire par un remaniement plus ou moins prononcé des terrains.**

#### 8.2.5.2 MATÉRIAUX CONSTITUTIFS DE L'OUVRAGE DE RÉTENTION

Afin d'assurer la stabilité structurelle à court terme et à long terme de la zone du site de dépôt, il convient de procéder à une sélection des matériaux de construction des ouvrages de rétention :

- en phase « planning et design » : déterminer l'adéquation des matériaux pour la construction de l'ouvrage de rétention en fonction de leur caractéristiques géotechniques et environnementales ;
- en phase « opérationnelle » : vérifier les propriétés géotechniques et hydrogéologiques des matériaux de construction de l'ouvrage de rétention.

Dans le contexte guyanais, les matériaux sont souvent de faibles caractéristiques mécaniques, du fait des faciès d'altération rencontrés, liés au climat et à la présence de la forêt équatoriale (présence de sols saprolitiques ou latéritiques). La teneur en eau souvent élevée de ces matériaux constitue également un problème fréquent, empêchant un compactage optimal des ouvrages de rétention. La période d'édification est donc un facteur important en fonction de la pluviométrie locale.

**Par ailleurs, le dispositif d'étanchéité de type géomembrane, pouvant être mis en place à la base du réservoir, doit être compatible avec les propriétés chimiques des résidus stockés** (notamment en termes de contenu en cyanure et de pH de la solution).

#### 8.2.5.3 MÉTHODE DE CONSTRUCTION DE L'OUVRAGE DE STOCKAGE

Dans le cas du projet « Montagne d'Or », la méthode de construction retenue est la méthode dite « aval » (Montagne d'or, 2018b). Cette méthode a le grand avantage, par rapport à la méthode « amont » ou les digues sont construites sur des résidus, d'édifier les surélévations du barrage sur le sol de fondation et les matériaux compactés du barrage antérieur. Cela souligne l'aspect indispensable de la bonne reconnaissance de ce sol de fondation et de l'homogénéité et du bon compactage (contrôle soutenu) des barrages antérieurs. Selon cette méthode, le contrôle continu du compactage optimum est fondamental pour éviter les zones de faiblesse.

En phase planning et design, il convient de **concevoir l'élévation du barrage par étapes de telle sorte que l'axe de la crête de remblai se déplace en aval à chaque étage.**

Par ailleurs, le barrage doit être rigoureusement conçu en utilisant des principes d'ingénierie modernes pour **garantir que les remblais soient bien drainés, que les dispositifs de drainage et d'évacuation des eaux soient suffisamment dimensionnés au regard de la pluviométrie locale** (très importante en Guyane), qu'une revanche<sup>43</sup> appropriée soit garantie à tout moment, y compris une longueur de plage minimale lors des inondations extrêmes<sup>44</sup>.

**En phase opérationnelle, phase fermeture et après fermeture, il convient de procéder à la surveillance du ou des ouvrages de stockage.**

#### 8.2.5.4 GESTION DES EAUX

Concernant la gestion des eaux, les bonnes pratiques consistent :

- à réaliser un bilan hydrologique au niveau de l'ouvrage de rétention industriel prenant en compte les événements météorologiques de période de retour supérieure à la durée de vie programmée de l'ouvrage (ne pas oublier de prendre en compte les éventuels phénomènes rapides liés à des précipitations exceptionnelles) ;
- à positionner l'ouvrage de rétention le plus en amont possible dans le bassin versant (et si nécessaire utiliser des ouvrages de dérivation, construire des barrages tampons en amont pour gérer les volumes d'eau entrant dans le réservoir). Il est également préférable de ne pas implanter l'ouvrage de rétention dans la vallée d'une rivière trop importante ;
- à gérer le niveau d'eau par des ouvrages d'évacuation du surnageant ou des moyens de pompage ;
- à prévoir un exutoire d'urgence sur les ouvrages de rétention ;

---

<sup>43</sup> Cf. glossaire en tête d'ouvrage.

<sup>44</sup> Dans le contexte guyanais, le dimensionnement des ouvrages de stockage doit ainsi tenir compte de la pluviométrie locale.

- à doter le site d'un système de drainage destiné à empêcher les eaux de drainage de transiter pour l'ouvrage de rétention ;
- à éviter les phénomènes de remontée de nappe qui pourrait amener à devoir gérer un surplus d'eau sur le site en période de pluie (par exemple par la mise en place d'un pompage correctement dimensionné).

De façon générale, les bonnes pratiques consistent à prévoir une redondance des dispositions destinées à la sécurité des ouvrages de rétention.

#### 8.2.5.5 GESTION DU MATÉRIEL STOCKÉ

Afin de garantir une meilleure stabilité mécanique des résidus stockés, une étape d'épaississement des résidus avant stockage peut être proposée. Cette étape permet en outre d'améliorer l'efficacité du stockage en diminuant les volumes de stockage.

#### 8.2.5.6 CRUE DE CONCEPTION

Lors de la conception d'un ouvrage de rétention, il est nécessaire de tenir compte de la notion de crue de conception<sup>45</sup>.

Il est ainsi nécessaire de permettre aux ouvrages de retenue de supporter des événements hydrologiques extrêmes, en tenant compte des scénarios de changement climatique, en utilisant les paramètres de crue spécifiés ci-dessous :

- pour le court terme (phase de design et opérationnelle) :
  - *a minima* une inondation sur une période de retour de 200 ans en tant que crue de dimensionnement pour le dimensionnement d'un barrage à faible risque ;
  - *a minima* une inondation sur une période de retour de 500 ou 1 000 ans (en fonction du niveau de risque) en tant que crue de référence pour le dimensionnement d'un barrage à risque modéré ;
  - *a minima* la crue maximale probable en tant que crue de conception pour le dimensionnement d'un barrage à haut risque.
- pour le long terme (phase après fermeture) : la crue maximale probable pour la conception de tout barrage.

#### 8.2.5.7 ANALYSE GÉOTECHNIQUE ET SURVEILLANCE DE LA STABILITÉ PHYSIQUE

Du point de vue géotechnique, il est nécessaire de considérer tous les mécanismes pouvant affecter négativement la stabilité structurelle partielle ou totale des ouvrages de rétention selon des standards internationaux (par exemple analyse de la stabilité à court et à long terme selon l'Eurocode 7-1 (EN 1997-1: 2004 - Partie 1) ou des normes nationales équivalentes et aux dispositions des lignes directrices de la ICOLD (y compris Bulletin 139 et 148) ou équivalent national dans le cas des grands barrages.

L'analyse géotechnique doit couvrir les aspects suivants :

---

<sup>45</sup> La crue de conception est la crue de probabilité et d'intensité pertinentes adoptée pour la conception de l'ouvrage de rétention afin de garantir un niveau élevé de sécurité.

- la stabilité globale du talus de l'ouvrage de rétention, côtés aval et amont, en incluant la structure basale voire le sol de fondation ;
- la capacité portante et la stabilité de la fondation de l'ouvrage ;
- la stabilité physique et chimique des déchets d'extraction, y compris la liquéfaction statique et dynamique, conformément aux directives ICOLD ou aux directives internationales ou nationales équivalentes ;
- la stabilité contre l'érosion interne (phénomènes de renard dans le cas de matériaux de granulométrie fine) et l'érosion de surface ;
- la stabilité des systèmes d'évacuation d'eau libre, des systèmes d'évacuation de l'eau et des déversoirs d'urgence ;
- les résultats de l'analyse du bilan hydrique.

#### 8.2.5.8 SURVEILLANCE

La surveillance des bassins et barrages de rétention s'avère être nécessaire la plupart des cas, et notamment pour les ouvrages de grande élévation susceptibles de générer des impacts importants en cas de défaillance, indispensable pour vérifier :

1/ le bon fonctionnement des ouvrages de drainage, notamment en cas de forte pluviométrie ;

2/le tassement/la consolidation normale ou anormale de l'ouvrage de rétention, en phase d'élévation comme en phase de stockage.

Pour les ouvrages de grande hauteur, il convient également de vérifier que des zones d'instabilité par cisaillement n'apparaissent pas au sein du/des corps du/des ouvrages de rétention, et de vérifier également le niveau des pressions interstitielles au sein du matériau édifié. Cette surveillance doit se poursuivre au-delà de la phase d'exploitation industrielle du site.



## 9. CONCLUSIONS

La présente étude avait pour objectif de compiler et mettre en lumière certains éléments relatifs à l'exploitation de minerais aurifères par cyanuration, notamment dans le contexte guyanais. Dans ce cadre l'approche a consisté à la fois :

- à mener une approche bibliographique sur le sujet et à en synthétiser les résultats ;
- à solliciter les experts de l'Ineris des domaines concernés afin d'aboutir à une identification des principaux enjeux ;
- à consulter les informations disponibles dans les chroniques d'accidentologie afin d'en tirer des bonnes pratiques à encourager.

Les principaux enseignements de cette étude peuvent être résumés de la façon suivante :

- l'extraction de l'or par lixiviation des minerais à l'aide d'une solution cyanurée est assez bien documentée, il est donc possible de dresser un retour d'expériences de qualité permettant de mettre en évidence les principaux points sensibles à surveiller durant l'ensemble du cycle de vie de ce projet industriel ;
- de nombreuses bonnes pratiques ont déjà été édictées au niveau français ou international quant à l'usage du cyanure<sup>46</sup>. Le présent rapport s'est donc donné pour objectif de mettre en lumière les bonnes pratiques qui paraissent les plus importantes, notamment dans le contexte guyanais ;
- certaines étapes du procédé industriel concentrent un grand nombre d'accidents (notamment le transport et le stockage des résidus). Il apparaît donc que ces étapes doivent être considérées comme sensibles et qu'une attention particulière doit leur être portée (notamment en termes d'inspection à mener, de maintenance, ...) ;
- une vision globale d'un site d'exploitation dans le temps et dans l'espace doit être développée pour garantir la sécurité des opérations :
  - o dans le temps il convient de ne pas se concentrer sur la seule période d'activité industrielle, mais également de prendre en compte les conséquences sur le site des éventuelles activités préalables tout comme la surveillance post-fermeture des stockages de résidus ;
  - o dans l'espace il convient de considérer le site industriel à l'échelle de l'ensemble de son bassin versant (voire à plus grande échelle encore à travers la pluviométrie rencontrée localement).

De plus, outre la gestion nécessaire de la problématique « cyanure », l'étude a également mis en évidence d'autres aspects qui mériteraient une approche plus poussée :

- l'impact de la qualité des infrastructures disponibles dans le contexte guyanais gagnerait à être estimé en termes concrets de difficulté

---

<sup>46</sup> A l'occasion du lancement d'un projet industriel d'exploitation aurifère il conviendrait ainsi de vérifier que l'ensemble de ces bonnes pratiques soient effectives in situ et ceci à incluant les étapes de transport du cyanure (notamment par la mise en place d'un programme d'inspection adapté).

d'approvisionnement du site en réactif (notamment pour le procédé de décyanuration)<sup>47</sup> ;

- outre le devenir des différentes formes de cyanure potentiellement présentes, dans l'éventualité d'une émission incontrôlée de résidus cyanurés à l'environnement, le devenir des autres « substances » du procédé industriel (tels que les métaux lourds) devrait également être considéré ;
- la mise en place d'une exploitation de l'or en contexte guyanais peut potentiellement initier la mise en place d'un drainage minier acide potentiellement impactant qu'il conviendrait de mieux documenter ;
- la tenue dans le temps des ouvrages de rétention dans le contexte guyanais pourrait à la fois être considérée vis-à-vis des matériaux de construction disponibles mais également vis-à-vis des possibilités techniques offertes par les infrastructures locales.

---

<sup>47</sup> Dans le cas où un transport maritime serait envisagé pour l'approvisionnement du cyanure, il serait ainsi pertinent de consulter le Grand Port Maritime de la Guyane pour vérifier les dispositions applicables aux ports d'arrivée de fret maritime en Guyane.

## 10. BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR, 2011. NF EN 15875 Décembre 2011, Caractérisation des déchets - Essai statique pour la détermination du potentiel de génération d'acide et du potentiel de neutralisation des déchets sulfurés.
- BRGM, 2013. Utilisation de la cyanuration dans l'industrie aurifère en Guyane. Impacts potentiels sur l'environnement et recommandations. Rapport BRGM-RP-61968-FR, 123 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61968-FR.pdf>
- BRGM, 2018. Mines, Or et cyanure, présentation du 03/04/2018 pour le débat public Projet « Montagne d'or ». <https://montagnedor.debatpublic.fr/images/Rencontres-publiques/Atelier-fonctionnementmine-040418/Montagnedor-presentationBRGM-040418.pdf>
- Brüger A. G., Fafilek O. J., Restrepo B. et Rojas-Mendoza L., 2018. On the volatilisation and decomposition of cyanide contaminations from gold mining. *Science of The Total Environment* **627**: 1167-1173.
- CNDP, 2018. Débat public Montagne d'or en Guyane, 7 mars – 7 juillet 2018, Compte rendu établi par le Président de la commission particulière du débat public. <https://montagnedor.debatpublic.fr/>
- Collectif, 2017. Bonnes pratiques de l'activité minière. Collection « La mine en France ». Tome 12, 25 p., [http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/tome\\_12\\_tableau\\_bonnes-pratiques\\_final24032017.pdf](http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/tome_12_tableau_bonnes-pratiques_final24032017.pdf)
- Danciu P. L., 2014. Structural safety of mining tailings reflected in national and European regulations, 14<sup>th</sup> SGEM GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining.
- Donato D. B., Nichols O., Possingham H., Moore M., Ricci P. F. et Noller B. N. , 2007. A critical review of the effects of gold cyanide-bearing tailings solutions on wildlife." *Environment International* **33**(7): 974-984.
- Douglas Gould, W., M. King, B. R. Mohapatra, R. A. Cameron, A. Kapoor et D. W. Koren (2012). "A critical review on destruction of thiocyanate in mining effluents." *Minerals Engineering* **34**: 38-47.
- Doye, I. et Duchesne, J., 2005. Column Leaching Test to Evaluate the Use of Alkaline Industrial Wastes to Neutralize Acid Mine Tailings. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 131, No. 8.
- European Commission, 2009. Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities. 557 p., [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/mmr\\_adopted\\_0109.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/mmr_adopted_0109.pdf)
- Gutierrez, A. (2018). Expertise hydrogéologique des documents portés au débat public sur le Projet Montagne d'or en Guyane. Rapport final. BRGM/RC-68061-FR, 51 p., 21 ill.
- Hennebert, P., 2013. Contribution à l'évaluation de l'efficacité de la Bauxaline pour stabiliser des sols pollués et traiter des rejets miniers acides Phase 1 : synthèse bibliographique sur le traitement du drainage minier acide. Rapport d'étude Ineris-DRC-13-139579-13915A. 13/12/2013. 45 p.
- INRS, 2018. Base de données FICHES TOXICOLOGIQUES : Cyanure de sodium, Cyanure de potassium, Fiche toxicologique n°111, 10 p. [http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX\\_111](http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_111)
- Ineris, 2016. Classification réglementaire des déchets – Guide d'application pour la caractérisation en dangerosité, Rapport Ineris DRC-15-149793-06416A. <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/rapport-drc-15-149793-06416a-guidehp-vf2-1456135314.pdf>

Ineris, 2012. Programme DRA 71 – Opération A. Référentiels, normes et guides de bonnes pratiques concernant les ouvrages de rétention industriels de grande hauteur en matériau meuble », Rapport Ineris DRS-10-110463-09795C.

Ineris, 2011. Cyanures et dérivés - Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, Ineris: 72.

Institut International de Gestion du Cyanure, 2009. Sociétés d'extraction de l'or, Protocole de conformité pré-opérationnel, 27 p.,

[https://www.cyanidecode.org/sites/default/files/frenchpdf/RevisedGoldMiningProtocol\\_FR.pdf](https://www.cyanidecode.org/sites/default/files/frenchpdf/RevisedGoldMiningProtocol_FR.pdf)

Johnson, C. A. (2015). "The fate of cyanide in leach wastes at gold mines: An environmental perspective." *Applied Geochemistry* **57**: 194-205.

JRC, 2018. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Management of Waste from the Extractive Industries, JRC Science for policy report. Version "Final draft" de septembre 2018.

Kjeldsen, P. (1999). "Behaviour of Cyanides in Soil and Groundwater: A Review." *Water, Air, and Soil Pollution* **115**(1): 279-308.

Montagne d'or, 2018. Projet de mine d'or en Guyane. Présentation projetée le 4/04/2018 à Saint-Laurent-du-Maroni à l'occasion de l'atelier « le fonctionnement de la mine, les risques et leur gestion ».

Montagne d'or, 2018b. Projet de mine d'or en Guyane. Dossier du maître d'ouvrage, débat public, 122 p. <https://montagnedor.debatpublic.fr/images/Documents-Mo-montagnedor/Montagnedor-dossier-maitre-ouvrage-vweb.pdf>

Mudder, T. I., Botz, M. M. et Smith A., 2001. Chemistry and Treatment of Cyanidation Wastes, Seconde édition, MINING JOURNAL BOOKS LTD, London, 391 p. <http://dana6.free.fr/3%20060713%20English%20Compendium.pdf>

NICNAS (2010). Priority Existing Chemicals - Assessment report No31 - Sodium Cyanide, National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme. - Commonwealth of Australia: 366.

Paradis M., Duchesne J., Lamontagne A., Isabel D., 2007. Long-term neutralisation potential of red mud bauxite with brine amendment for the neutralisation of acidic mine tailings. *Applied Geochemistry* **22** (2007) 2326-2333.

PNUE, 2006. Le prix de l'or flambe : l'environnement sous pression. Bulletin d'alerte environnemental n°8, Brochure du Programme des Nations Unis pour l'Environnement.

Polcaro A., Palmas, S., Mascia, M., Renoldi, F., 2000. Co-disposal of industrial wastes to obtain an inert material for environmental reclamation. *Annali di Chimica (Rome)*, **90**(1-2), 103-111.

Rios C.A., Williams C.D., Roberts, C.L., 2008. Removal of heavy metals from acid mine drainage (AMD) using coal fly ash, natural clinker and synthetic zeolites. *J. Hazard. Mater.* **156** (1-3), 23-35.

Riskope, 2017. Hundred years of lessons learned in tailings dams failures, on line publication: <https://www.riskope.com/2017/02/22/hundred-years-lessons-learned-tailings-dams-failures/>

SRK-Consulting (2017). NI 43-101 Technical Report Bankable Feasibility Study - Montagne d'or project - French Guiana: 350.

SRK, 2015. NI 43-101 Technical Report on Updated Resource - Montagne d'Or Gold Deposit, Paul Isnard Project, Commune of Saint-Laurent-du-Maroni, NW French Guiana. P 70, <http://www.columbusgoldcorp.com/i/pdf/techrep-2015-06-03-Paul-Isnard-SRK.pdf>.

URIEN, P., 2018. Expertise Mine et Cyanure en débat public sur le Projet « Montagne d'or » en Guyane. Rapport final. BRGM/RC-67967-FR.

USE PA, 2008. EPA/600/R-08/097 June 2008 Mine Waste Technology Program Passive Treatment For Reducing Metal Loading. <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1001K7H.pdf>

Vick, S G, 1990. Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams.

Ziemkiewicz P., Skousen J., Simmons J., 2003. Long-term performance of passive acid mine drainage treatment systems. *Mine Water Environ.* 22: 118-129.

Zijlstra J.J.P., Dessl R., Peretti R., Zucca A., 2010. Treatment of Percolate from Metal Sulfide Mine Tailings with a Permeable Reactive Barrier of Transformed Red Mud. *Water Environment Research*, 82, 4, 319 – 327.



## 11. LISTE DES ANNEXES

<b>Repère</b>	<b>Désignation</b>	<b>Nombre de pages</b>
Annexe 1	Description détaillée des accidents mettant en œuvre du cyanure dans des transports de marchandises dangereuses par route, voies ferrées, fluviales ou maritimes (base de données ARIA)	9 A4
Annexe 2	Détails des instructions d'emballage des sels de cyanure solides	3 A4
Annexe 3	Synthèse des accidents impliquant des installations de cyanure alcalin, hors transport (base ARIA du BARPI)	1 A4 6 A3
Annexe 4	Éléments de rappels sur le phénomène de drainage minier acide	7 A4



## **ANNEXE 1**

**Description détaillée des accidents mettant en œuvre du cyanure dans des transports de marchandises dangereuses par route, voies ferrées, fluviales ou maritimes (base de données ARIA)**



**MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER / DIRECTION  
GÉNÉRALE DE LA PRÉVENTION DES RISQUES / SERVICE DES RISQUES  
TECHNOLOGIQUES / BARPI**

**Résultats de la recherche "2018-09-11-cyanure" sur la  
base de données ARIA - État au 11/09/2018**

La base de données ARIA, exploitée par le ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, recense essentiellement les événements accidentels qui ont, ou qui auraient pu porter atteinte à la santé ou la sécurité publique, l'agriculture, la nature et l'environnement. Pour l'essentiel, ces événements résultent de l'activité d'usines, ateliers, dépôts, chantiers, élevages,... classés au titre de la législation relative aux Installations Classées, ainsi que du transport de matières dangereuses. Le recensement et l'analyse de ces accidents et incidents, français ou étrangers sont organisés depuis 1992. Ce recensement qui dépend largement des sources d'informations publiques et privées, n'est pas exhaustif et ne constitue qu'une sélection de cas illustratifs.

Les informations (résumés d'accidents et données associées, extraits de publications) contenues dans le présent export sont la propriété du BARPI. Aucune modification ou incorporation dans d'autres supports ne peut être réalisée sans accord préalable du BARPI. Toute utilisation commerciale est interdite.

Malgré tout le soin apporté à la réalisation de nos publications, il est possible que quelques inexactitudes persistent dans les éléments présentés. Merci au lecteur de bien vouloir signaler toute anomalie éventuelle avec mention des sources d'information à l'adresse suivante : [barpi@developpement-durable.gouv.fr](mailto:barpi@developpement-durable.gouv.fr)

Liste de(s) critère(s) pour la recherche "2018-09-11-cyanure":

- Contient : cyanure
- Type d'accident : TMDROUTE , TMDRAIL , TMDFLUV , TMDMER
- Matières dangereuses relâchées : de 0 à 6
- Conséquences humaines et sociales : de 0 à 6
- Conséquences environnementales : de 0 à 6
- Conséquences économiques : de 0 à 6

#### Accident

##### Déraillement de deux wagons en gare de triage

N°47740 - 02/03/2016 - FRANCE - 64 - BAYONNE

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/47740/>

Vers 3 h, en gare de triage, 2 wagons déraillent. L'un d'eux avait transporté du cyanure de sodium. Un périmètre de sécurité est mis en place. Le trafic est interrompu sur 3 voies pendant 11 h. Aucune fuite n'est détectée.

#### Accident

##### Intoxication chimique dans un centre d'élimination de déchets dangereux

N°42292 - 15/06/2012 - FRANCE - 57 - AMNEVILLE

E38.22 - Traitement et élimination des déchets dangereux

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/42292/>



Une société de récupération de déchets livre vers 9h30 une palettes de plusieurs cartons DTQD (Déchets Dangereux en Quantité Dispersée), provenant du laboratoire d'un collègue, dans un centre d'élimination. Le fond d'un carton de la palette est mouillé et lors de sa manipulation par un agent, il s'ouvre, laissant tomber au sol des flacons en verre. Une fiole de 0,5 l de nitrobenzène et 1 fiole de 0,5 l de tétrachlorure de carbone se brisent ; l'agent est aspergé et une forte odeur d'amande se dégage. L'agent est immédiatement transporté, déshabillé et douché. Le responsable de l'exploitation arrivant sur place est pris d'un malaise. Le laboratoire d'analyse du site alerte les secours après que ses premiers examens laissent suspecter la présence de cyanure.

Les secours, intervenant avec une cellule chimique (CMIC), établissent un périmètre de sécurité de 100 m autour du lieu de l'accident, installent des rideaux d'eau et procèdent à des mesures de toxicité dans l'air. Le médecin des pompiers examine tous les employés du site et oriente 11 intoxiqués vers 2 hôpitaux proches ; 1 employé refuse son transport. Les déchets sont traités sur place.

L'inspection des installations classées, avertie par l'exploitant vers 12h30, constate plusieurs irrégularités dans le conditionnement des déchets :

- le contenu des fioles n'est pas clairement indiqué ;
- une liste des produits se trouve dans le carton mais pas sur les emballages ;
- les fioles sont conditionnées sans aucune protection et dans du carton ;
- la fiole contenant du nitrobenzène n'est pas fermée par un bouchon ;
- le bordereau de suivi de déchet porte la mention "liquide inflammable" alors que ce sont des produits toxiques ;
- la description est générique puisqu'il est seulement indiqué "produit de laboratoire".

## Accident

### Projection de cyanure de potassium sur un employé

N°39359 - 22/09/2010 - FRANCE - 31 - BRUGUIERES

H49.41 - Transports routiers de fret

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/39359/>



En rangeant une palette vide dans un centre logistique vers 11 h, un agent de manutention intérimaire reçoit des projections au visage d'un produit dont il ignore la nature. Le lendemain, faisant état de céphalées et de brûlures ressenties durant la nuit, son supérieur hiérarchique l'envoie immédiatement aux urgences. Le produit mis en cause est du cyanure de potassium. L'employé est arrêté pendant plus de 3 jours.

La palette incriminée avait servi à transporter 8 bidons de produit dont un avait été mal fermé. Celui-ci ainsi que 200 g de cyanure de potassium s'étant échappés avaient été mis en sécurité sur un bac de rétention le 22 novembre par du personnel du centre de transit portant les équipements de protection individuelle adaptés. Cependant, la palette sur laquelle se trouvaient des cristaux et qui aurait dû être sécurisée est demeurée dans la travée de distribution de l'établissement. Sa manipulation par la victime sans protection particulière a entraîné l'accident.

L'industriel procède à une sensibilisation du personnel aux procédures d'urgence. Une anomalie avait été détectée sur l'emballage défectueux lors de son transit dans un autre établissement du transporteur le 21/11. L'information avait été transmise au centre logistique avant sa réception.

## Accident

### Choc de plusieurs wagons de matières dangereuses

N°38743 - 20/07/2010 - FRANCE - 57 - WOIPPY

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/38743/>

A 10h10 au triage de Woippy, 5 wagons-citerne (3 d'acrylonitrile stabilisé, 1 de diméthylamine en solution aqueuse et 1 de cyanure de sodium en solution) se percutent dans la zone de débranchement. Après reconnaissance par les pompiers, aucune fuite n'est détectée, les mesures d'explosimétrie sont négatives. L'intervention prend fin à 11h16.

## Accident

### Pollution des eaux.

N°27983 - 11/03/2004 - FRANCE - 40 - LESGOR

C20.59 - Fabrication d'autres produits chimiques n.c.a.

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/27983/>



Des eaux de procédés chargées en cyanure de sodium provenant du bassin tampon des effluents aqueux d'une usine chimique polluent le LUZOU. Une présence anormale de cyanure (rejet de 400 g au lieu de 50 g sur une journée) est détectée au point de rejet. Les ateliers du site sont arrêtés. Après enquête au sein de l'usine, il apparaît que 30 h se sont écoulées entre l'incident à l'origine de la pollution et sa détection. La veille, un débridage hâtif d'un flexible en fin de dépotage d'un camion-citerne de cyanure de sodium fut à l'origine d'un léger écoulement sur le sol. L'opérateur l'aurait lavé puis aurait vidangé le puisard de l'aire de déchargement sans respecter les procédures en place. La vidange du

puisard a abouti dans le caniveau voisin et dans le réseau des eaux polluées. D'après l'exploitant, près de 1,5 kg de cyanure de sodium auraient été rejetés dans le milieu naturel mais sa concentration dans la rivière n'aurait pas dépassé 3 µg/l (seuil de toxicité pour les poissons : 70 µg/l). Un suivi analytique journalier des eaux rejetées est mis en place avec un réglage du débit des effluents pour diminuer les rejets. La procédure et l'aire de dépotage sont modifiées : la rétention assurée pas des boudins gonflables et mobiles permettant la vidange des eaux de pluie est supprimée et remplacée par de la maçonnerie. Une formation sur les risques associés à la manipulation du cyanure de sodium est organisée pour l'ensemble des opérateurs du site.

#### Accident

##### Pollution au cyanure.

N°21378 - 01/11/2001 - CHINE - 00 - LUONING

H49.41 - Transports routiers de fret

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/21378/>



A la suite d'un accident routier, 11 t de cyanure de sodium se déversent dans une rivière, affluent du fleuve LUOHE. Pour contenir la pollution 2 barrages sont mis en place autour de la zone contaminée s'étendant sur 4 km et 500 t de produits sont pulvérisés pour neutraliser le cyanure. Six personnes soupçonnées d'être à l'origine de cette pollution sont interpellées et une enquête est effectuée pour déterminer les causes de l'accident routier.

#### Accident

##### Déversement de cyanure.

N°19918 - 27/12/2000 - EQUATEUR - 00 - GUAYAQUIL

H49.41 - Transports routiers de fret

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/19918/>

Un camion, chargé de caisses contenant 7 t de cyanure en poudre utilisé dans la production d'or, se renverse à l'entrée d'un pont : plusieurs caisses se retrouvent renversées sur le bord de la rivière. Aussitôt, une cellule d'urgence intervient pour empêcher tout contact entre le cyanure et l'eau, ce qui aurait formé un nuage toxique. La zone où est intervenu l'accident est particulièrement peuplée. Les riverains situés dans un périmètre de 1,5 km sont priés d'évacuer les lieux mais beaucoup ignorent cette demande. Les centaines d'autres personnes évacuées sont autorisées à rentrer le soir même, une fois la mise en sécurité de la zone terminée.

#### Accident

##### Déversement accidentel de cyanure dans la rivière DAN.

N°19482 - 03/10/2000 - CHINE - 00 - NC

H49.41 - Transports routiers de fret

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/19482/>



Un camion-citerne, tombé dans la rivière, perd 5 t de solution à 30 % de cyanure. Cette fuite est à l'origine d'une importante pollution de la rivière. Des détergents sont utilisés afin de neutraliser le cyanure. La faune et la flore sont gravement touchées sur une distance de 14 km. Une alerte à la consommation d'eau est lancée sur 250 km et les poissons sont retirés de la consommation dans cette zone. Il n'y a pas d'information sur les éventuelles contaminations à des personnes.

## Accident

### Déraillement d'un traine produits chimiques.

N°16924 - 21/10/1999 - AUSTRALIE - 00 - SYDNEY

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/16924/>

Six wagons d'un train de marchandises contenant des herbicides, des engrais, du cyanure de sodium et divers produits chimiques dérailent. Par précaution, les équipes de secours établissent un périmètre de sécurité de 250 m de rayon et évacuent la population proche du site incriminé (5 maisons) pendant 2 heures. Les automobilistes sont détournés pendant la phase de nettoyage. Idem pour le trafic aérien, suspendu dans un rayon de 3,2 km et 600 m de hauteur. En cas de fuite de cyanure de sodium, l'apparition d'un nuage très toxique est redoutée. En fait, les fûts de ce produit n'ont pas fui. Plus de 40 produits chimiques étaient présents dans le train et le volume de la fuite est estimé à 40 t d'herbicides. La situation est maîtrisée en 1,5 j.

## Accident

### Collision entre un paquebot et un porte-conteneurs.

N°16246 - 23/08/1999 - ROYAUME-UNI - 00 - MARGATE

H50.20 - Transports maritimes et côtiers de fret

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/16246/>



Au large de Margate, un paquebot de 2 400 passagers entre en collision avec un cargo taiwanais chargé de 3 092 conteneurs dont 46 renferment des produits à risque (dont du cyanure). Après le choc, un incendie se déclare à bord du porte-conteneurs : 15 conteneurs sont la proie des flammes. D'autres tombent en mer. 1 Million de t d'eau est nécessaire pour circonscrire le feu. 6 bateaux-pompe arrosent le porte-conteneur pendant 6 j. Une vingtaine de personnes très légèrement blessée est soignée à bord du paquebot. Aucune pollution maritime n'est observée. Une enquête est ouverte. Les autorités décrètent une zone d'exclusion aérienne. Les autres navires sont déviés par les gardes-côtes. Les causes exactes de la collision ne sont pas connues. Une erreur de navigation de l'un ou l'autre des navires est envisagée dans cette zone à risque car très fréquentée.

## Accident

### Feu à bord d'un TMD de cyanure de potassium

N°13398 - 16/08/1998 - FRANCE - 57 - MITTELBRONN

H49.41 - Transports routiers de fret

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/13398/>

Un incendie se déclare à bord d'un camion transportant des flacons de cyanure de potassium. Une CMIC intervient.

## Accident

### Pollution par du cyanure

N°13341 - 20/05/1998 - KIRGHIZSTAN - 00 - BARSKAUN

H49.41 - Transports routiers de fret

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/13341/>



Un camion transportant près de 20 t de cyanure de sodium pulvérulent à destination d'une mine d'or tombe dans la principale rivière du pays ; 1 500 kg de cyanure sont dispersés dans l'environnement. L'évaluation des conséquences entraîne une polémique : les autorités font état de 2 morts et de 2 500 intoxiqués, mais les experts canadiens n'ont rien mis en évidence. Néanmoins la maison mère canadienne débloque volontairement 500 000 \$ pour la population affectée. Les secours évacuent 4 800 personnes de la zone de l'accident. Une commission scientifique internationale examine les conséquences de ce sinistre.

#### Accident

##### Présence d'un produit inconnu.

N°11998 - 27/11/1997 - FRANCE - 38 - VOREPPE

H49.41 - Transports routiers de fret

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/11998/>



Un produit pulvérulent blanc est répandu sur 600 m<sup>2</sup> au niveau d'une bretelle d'autoroute. Le gestionnaire de l'autoroute récupère le produit sous la surveillance d'une CMIC et de la gendarmerie. Les analyses effectuées révèlent que la substance chimique contient des traces de chlore et de cyanures.

#### Accident

##### POLLUTION DE RIVIÈRE PAR DU CYANURE

N°11171 - 17/03/1997 - CHINE - 00 - WUZHOU

H49.41 - Transports routiers de fret

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/11171/>



Un camion chargé de 200 fûts de cyanure de potassium (10 t) utilisé pour le traitement de surface tombe dans la GUIJIANG. Trois fûts, soit 700 kg de produits, ne sont pas récupérés et 19 fûts se seraient rompus. Le WEST RIVER et le PEARL RIVER sont contaminés. Les autorités alertent les populations ainsi que les autorités de Hong-Kong et de Macau. Celles-ci contrôlent l'alimentation en eau potable et bannissent l'importation d'eau et de fruits et légumes provenant de la zone affectée. Tous les produits alimentaires frais sont contrôlés.

#### Accident

##### déraillement de deux wagons de cyanure de sodium.

N°8443 - 11/04/1996 - FRANCE - 63 - GERZAT

H49.20 - Transports ferroviaires de fret

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/8443/>



A la suite de la défection d'un sabot de protection dans une gare de triage, une plate-forme déraille et percute violemment 4 wagons-citernes contenant chacun 60 t de cyanure de sodium ; 2 citernes sont endommagées avec un déchirement de la couche calorifuge mais le blindage est épargné. Aucune fuite n'est constatée. La société destinatrice du produit dépose les 2 wagons. Si une fuite de cyanure de sodium (très dangereux et toxique) avait été observée, un périmètre de sécurité de 1 km aurait été mis en place.

#### Accident

**Fuite de cyanure alcalin sur un wagon-citerne.**

**N°3323 - 29/05/1991 - FRANCE - 40 - MORCENX**

*H49.20 - Transports ferroviaires de fret*

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/3323/>

En raison d'une surpression due à la chaleur, une fuite de cyanure alcalin se produit sur un wagon-citerne en gare. La fuite est stoppée après refroidissement à l'eau. Le wagon est déplacé vers une zone isolée.

**Accident**

**Déraillement de wagons.**

**N°1930 - 10/05/1990 - FRANCE - 03 - MONTLUCON**

*H49.20 - Transports ferroviaires de fret*

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/1930/>



Déraillement de cinq wagons de marchandises. Cinq citernes de 60 m<sup>3</sup> vides, ayant contenu du cyanure de sodium sont en travers des voies. Aucune fuite n'est constatée. Des précautions de sécurité sont prises pour le relevage.

**Accident**

**Renversement d'un camion.**

**N°1608 - 25/01/1990 - FRANCE - 88 - PONT-LES-BONFAYS**

*H49.41 - Transports routiers de fret*

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/1608/>

Un camion chargé de soude, d'acides et de cyanures se renverse dans un fossé ; 20 bidons d'acide s'éventrent. Des volutes toxiques se dégagent des récipients. La circulation routière est déviée et un captage d'eau est placé sous surveillance.

**Accident**

**Renversement d'un poids lourd.**

**N°895 - 18/10/1989 - FRANCE - 80 - PERONNE**

*H49.41 - Transports routiers de fret*

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/895/>



Sur l'autoroute LILLE-PARIS, un camion dont le conducteur a le bras dans le plâtre, transportant des fûts de cyanure de potassium, se renverse. La circulation est interrompue 2h15 plus tard dans le sens concerné et 3h30 plus tard dans le sens Paris Lille. Pendant ce temps, les véhicules circulant entraînent sous leurs pneumatiques du produit échappé des fûts éventrés. Les services réquisitionnés neutralisent et récupèrent le KCN. Deux gendarmes sont intoxiqués. La circulation est rétablie 7h30 après le début de l'accident.

**Accident**

**Pollution aquatique**

**N°101 - 25/04/1988 - JAPON - 00 - SAYEMA**

*H49.41 - Transports routiers de fret*

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/101/>

---

Nombre de résultats répertoriés : 21 - 11/09/2018

---

      €

A la suite d'une erreur opératoire, une vanne laissée ouverte permet l'admission de solution de cyanure de sodium dans un stockage déjà plein au travers d'un filtre. Le stockage déborde et laisse échapper son contenu dans l'ITUMA ; 4,3 tonnes de poissons morts sont récupérés.

---

### Accident

#### Perte de fûts de cyanure de sodium.

N°15578 - 05/09/1983 - FRANCE - 69 - LYON

H49.41 - Transports routiers de fret

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/15578/>

      €

Un camion perd une cinquantaine de fûts remplis de cyanure de sodium à la sortie du tunnel de Fourvière.

---

## **ANNEXE 2**

### **Détails des instructions d'emballage des sels de cyanure solides**



P002		INSTRUCTION D'EMBALLAGE (MATIÈRES SOLIDES)			P002
Les emballages suivants sont autorisés s'il est satisfait aux dispositions générales des 4.1.1 et 4.1.3:					
Masse nette maximale (voir 4.1.3.3)					
		Groupe d'emballage I	Groupe d'emballage II	Groupe d'emballage III	
<b>Emballages combinés:</b>					
Emballages intérieurs	Emballages extérieurs				
En verre 10 kg	<b>Fûts</b>				
En plastique <sup>a</sup> 50 kg	en acier (1A1, 1A2)	400 kg	400 kg	400 kg	
En métal 50 kg	en aluminium (1B1, 1B2)	400 kg	400 kg	400 kg	
En papier <sup>a, b, c</sup> 50 kg	en autre métal (1N1, 1N2)	400 kg	400 kg	400 kg	
En carton <sup>a, b, c</sup> 50 kg	en plastique (1H1, 1H2)	400 kg	400 kg	400 kg	
	en contre-plaqué (1D)	400 kg	400 kg	400 kg	
	en carton (1G)	400 kg	400 kg	400 kg	
	<b>Caisses</b>				
	en acier (4A)	400 kg	400 kg	400 kg	
	en aluminium (4B)	400 kg	400 kg	400 kg	
	en un autre métal (4N)	400 kg	400 kg	400 kg	
	en bois naturel (4C1)	250 kg	400 kg	400 kg	
	en bois naturel, et parois étanches aux pulvérulents (4C2)	250 kg	400 kg	400 kg	
	en contre-plaqué (4D)	250 kg	400 kg	400 kg	
	en bois reconstitué (4F)	125 kg	400 kg	400 kg	
	en carton (4G)	125 kg	400 kg	400 kg	
	en plastique expansé (4H1)	60 kg	60 kg	60 kg	
	en plastique rigide (4H2)	250 kg	400 kg	400 kg	
	<b>Bidons (jerricanes)</b>				
	en acier (3A1, 3A2)	120 kg	120 kg	120 kg	
	en aluminium (3B1, 3B2)	120 kg	120 kg	120 kg	
	en plastique (3H1, 3H2)	120 kg	120 kg	120 kg	
<b>Emballages simples:</b>					
<b>Fûts</b>					
en acier (1A1 ou 1A2 <sup>d</sup> )		400 kg	400 kg	400 kg	
en aluminium (1B1 ou 1B2 <sup>d</sup> )		400 kg	400 kg	400 kg	
en un métal autre que l'acier ou l'aluminium (1N1 ou 1N2 <sup>d</sup> )		400 kg	400 kg	400 kg	
en plastique (1H1 ou 1H2 <sup>d</sup> )		400 kg	400 kg	400 kg	
en carton (1G) <sup>e</sup>		400 kg	400 kg	400 kg	
en contre-plaqué (1D) <sup>e</sup>		400 kg	400 kg	400 kg	
<b>Bidons (jerricanes)</b>					
en acier (3A1 ou 3A2 <sup>d</sup> )		120 kg	120 kg	120 kg	
en aluminium (3B1 ou 3B2 <sup>d</sup> )		120 kg	120 kg	120 kg	
en plastique (3H1 ou 3H2 <sup>d</sup> )		120 kg	120 kg	120 kg	

(suite page suivante)

<sup>a</sup> Ces emballages intérieurs doivent être étanches aux pulvérulents.

<sup>b</sup> Ces emballages intérieurs ne doivent pas être utilisés lorsque les matières transportées sont susceptibles de se liquéfier au cours du transport (voir 4.1.3.4).

<sup>c</sup> Ces emballages intérieurs ne doivent pas être utilisés pour les matières du groupe d'emballage I.

<sup>d</sup> Ces emballages ne doivent pas être utilisés pour des matières du groupe d'emballage I susceptibles de se liquéfier au cours du transport (voir 4.1.3.4).

<sup>e</sup> Ces emballages ne doivent pas être utilisés pour des matières susceptibles de se liquéfier au cours du transport (voir 4.1.3.4).

P002		INSTRUCTION D'EMBALLAGE (MATIÈRES SOLIDES) (suite)			P002
		Masse nette maximale (voir 4.1.3.3)			
		Groupe d'emballage I	Groupe d'emballage II	Groupe d'emballage III	
<b>Emballages simples (suite)</b>					
<b>Caisses</b>					
en acier (4A)*		Non autorisé	400 kg	400 kg	
en aluminium (4B)*		Non autorisé	400 kg	400 kg	
en un autre métal (4N)*		Non autorisé	400 kg	400 kg	
en bois naturel (4C1)*		Non autorisé	400 kg	400 kg	
en contre-plaqué (4D)*		Non autorisé	400 kg	400 kg	
en bois reconstitué (4F)*		Non autorisé	400 kg	400 kg	
en bois naturel aux parois étanches aux pulvérulents (4C2)*		Non autorisé	400 kg	400 kg	
en carton (4G)*		Non autorisé	400 kg	400 kg	
en plastique rigide (4H2)*		Non autorisé	400 kg	400 kg	
<b>Sacs</b>					
Sacs (5H3, 5H4, 5L3, 5M2)*		Non autorisé	50 kg	50 kg	
<b>Emballages composites:</b>					
récipient en plastique dans un fût en acier, en aluminium, en contre-plaqué, en carton ou en plastique (6HA1, 6HB1, 6HG1*, 6HD1* ou 6HH1)		400 kg	400 kg	400 kg	
récipient en plastique dans une harasse ou une caisse en acier ou en aluminium, ou dans une caisse en bois, en contre-plaqué, en carton ou en plastique rigide (6HA2, 6HB2, 6HC, 6HD2*, 6HG2* ou 6HH2)		75 kg	75 kg	75 kg	
récipient en verre dans un fût en acier, en aluminium, ou en carton: (6PA1, 6PB1, 6PD1* ou 6PG1*), ou dans une caisse en acier, en aluminium, en bois, en carton ou dans un panier en osier: (6PA2, 6PB2, 6PC, 6PG2* ou 6PD2*), ou dans un emballage en plastique rigide ou en plastique expansé: (6PH1 ou 6PH2*)		75 kg	75 kg	75 kg	
<b>Récipients à pression, s'il est satisfait aux dispositions générales du 4.1.3.6.</b>					
<b>Dispositions spéciales d'emballage:</b>					
<b>PP7</b>	Pour le No ONU 2000, le celluloïd peut aussi être transporté, sans emballage sur des palettes, enveloppé dans une housse en plastique et fixé par des moyens appropriés, tels que des bandes d'acier, en tant que chargement complet dans des engins de transport fermés. Aucune palette ne doit dépasser 1 000 kg de masse brute.				
<b>PP8</b>	Pour le No ONU 2002, les emballages doivent être construits de manière à éviter toute explosion due à une augmentation de la pression interne. Les bouteilles et les récipients à gaz ne peuvent pas être utilisés pour ces matières.				
<b>PP9</b>	Pour les Nos ONU 3175, 3243 et 3244, les emballages doivent être d'un type ayant subi une épreuve d'étanchéité au niveau d'épreuve du groupe d'emballage II. Pour le No ONU 3175, l'épreuve d'étanchéité n'est pas requise lorsque le liquide est entièrement absorbé dans un matériau solide lui-même contenu dans un sac scellé.				
<b>PP11</b>	Pour les Nos ONU 1309, groupe d'emballage III et 1362, les sacs 5H1, 5L1 et 5M1 sont autorisés s'ils sont contenus dans des sacs en plastique et palettisés sous une housse rétractable ou étirable.				
<b>PP12</b>	Pour les Nos ONU 1361, 2213 et 3077, les sacs 5H1, 5L1 et 5M1 sont autorisés s'ils sont transportés dans des engins de transport fermés.				
<b>PP13</b>	Pour les objets du No ONU 2870, seuls sont autorisés les emballages combinés satisfaisant au niveau d'épreuve du groupe d'emballage I.				

(suite page suivante)

\* Ces emballages ne doivent pas être utilisés pour des matières susceptibles de se liquéfier au cours du transport (voir 4.1.3.4).

P002	INSTRUCTION D'EMBALLAGE (MATIÈRES SOLIDES) (suite)	P002
<b>Dispositions spéciales d'emballage (suite):</b>		
<b>PP14</b>	Pour les Nos ONU 2211, 2698 et 3314, les emballages ne doivent pas nécessairement satisfaire aux épreuves d'emballage du chapitre 6.1.	
<b>PP15</b>	Pour les Nos ONU 1324 et 2623, les emballages doivent satisfaire au niveau d'épreuve du groupe d'emballage III.	
<b>PP20</b>	Pour le No ONU 2217, on peut utiliser un récipient étanche aux pulvérulents et indéchirable.	
<b>PP30</b>	Pour le No ONU 2471, les emballages intérieurs en papier ou en carton ne sont pas autorisés.	
<b>PP34</b>	Pour le No ONU 2969 (graines entières), les sacs 5HI, 5LI et 5MI sont autorisés.	
<b>PP37</b>	Pour les Nos ONU 2590 et 2212, les sacs 5MI sont autorisés. Tous les sacs de quelque type que ce soit doivent être transportés dans des engins de transport fermés ou être placés dans des suremballages rigides fermés.	
<b>PP38</b>	Pour le No ONU 1309, groupe d'emballage II, les sacs ne sont autorisés que dans des engins de transport fermés.	
<b>PP84</b>	Pour le No ONU 1057, les emballages extérieurs rigides doivent satisfaire au niveau d'épreuve du groupe d'emballage II. Ils doivent être conçus, construits et disposés de manière à prévenir tout mouvement, tout allumage accidentel des dispositifs ou tout dégagement accidentel de gaz ou liquide inflammable.	
<b>PP85</b>	Si des sacs sont utilisés comme emballages simples pour le transport des Nos ONU 1748, 2208, 2880, 3485, 3486 et 3487, ils doivent être convenablement espacés afin de permettre la dissipation de la chaleur. Pour le transport par voie maritime, les sacs ne sont pas autorisés en tant qu'emballages simples.	
<b>PP92</b>	Pour les Nos ONU 3531 et 3533, les emballages doivent être conçus et fabriqués de façon à laisser s'échapper le gaz ou la vapeur afin d'éviter une accumulation de la pression qui risquerait de provoquer la rupture des emballages en cas de perte de stabilisation.	

P003	INSTRUCTION D'EMBALLAGE	P003
Les marchandises dangereuses doivent être placées dans des emballages extérieurs appropriés. Les emballages doivent être conformes aux dispositions des 4.1.1.1, 4.1.1.2, 4.1.1.4 à 4.1.1.8 et celles du 4.1.3 et conçus de manière à satisfaire aux prescriptions du 6.1.4 relatives à la construction. On doit utiliser des emballages extérieurs fabriqués en un matériau approprié, présentant une résistance suffisante et conçus en fonction de leur contenance et de l'usage auquel ils sont destinés. Lorsque cette instruction d'emballage est appliquée au transport d'objets ou d'emballages intérieurs contenus dans des emballages combinés, l'emballage doit être conçu et fabriqué de manière à éviter toute décharge accidentelle des objets dans des conditions normales de transport.		
<b>Dispositions spéciales d'emballage:</b>		
<b>PP16</b>	Pour le No ONU 2800, les accumulateurs doivent être protégés des courts-circuits à l'intérieur de l'emballage.	
<b>PP17</b>	Pour le No ONU 2037, la masse nette des colis ne doit pas dépasser 55 kg pour les emballages en carton ou 125 kg pour les autres emballages.	
<b>PP18</b>	Pour le No ONU 1845, les emballages doivent être conçus et fabriqués pour laisser échapper le dioxyde de carbone et ainsi empêcher une augmentation de la pression qui pourrait faire craquer l'emballage.	
<b>PP19</b>	Pour les matières des Nos ONU 1327, 1364, 1365, 1856 et 3360 le transport en balles est autorisé.	
<b>PP20</b>	Les matières des Nos ONU 1363, 1386, 1408 et 2793 peuvent être transportées dans tout récipient étanche aux pulvérulents et résistant au déchirement.	
<b>PP32</b>	Les matières des Nos ONU 2857 et 3358 peuvent être transportées sans emballage, dans des harasses ou dans des suremballages appropriés.	
<b>PP90</b>	Pour le No ONU 3506, des doublures intérieures ou des sacs en matériau robuste et résistant aux fuites et aux perforations, imperméables au mercure et scellés de manière à empêcher toute fuite de la matière quelle que soit la position ou l'orientation du colis, doivent être utilisés.	
<b>PP91</b>	Pour le No ONU 1044, les grands extincteurs peuvent aussi être transportés non emballés à condition que les prescriptions du 4.1.3.8.1 a) à e) soient satisfaites, que les robinets soient protégés par l'une des méthodes indiquées au 4.1.6.1.8 a) à d) et que les autres éléments montés sur l'extincteur soient protégés de manière à éviter une activation accidentelle. Aux fins de cette disposition spéciale d'emballage, l'expression "grands extincteurs" désigne les extincteurs décrits aux alinéas c) à e) de la disposition spéciale 225 du chapitre 3.3.	



## **ANNEXE 3**

**Synthèse des accidents impliquant des installations de cyanure alcalin, hors transport (base ARIA du BARPI)**



Le tableau ci-après présente le résultat de la consultation de la base de données ARIA en résumant les informations du scénario identifié dans plusieurs colonnes et notamment :

- l'ERC ou Evénement Redouté Central qui présente la libération du potentiel de danger : un incendie, une perte de confinement toxique ;
- Les causes telles que présentées dans ARIA ;
- Les conséquences sur les personnes, l'environnement ou les structures.

pages suivantes

---

*Tableau 5* : Synthèse des accidents impliquant des installations de cyanure alcalin, hors transport (base ARIA du BARPI).



n° ARIA	Date	Lieu	Pays	Activité	Installation	ERC	Causes	Conséquences	REX
48046	16/05/2016	Gretz-Armainvilliers	France	Traitement et revêtement des métaux	Atelier (cuve de NaOH et NaCN)	Incendie à proximité de la cuve	Fuite de gaz	4 personnes légèrement intoxiquées par les fumées Aucune fuite constatée	
47210	30/09/2015	Ercuis	France	Fabrication d'articles de joaillerie et bijouterie	Local confiné sur rétention de 150 m <sup>2</sup> d'une orfèvrerie	Fuite de produit contenant du cyanure	Erreur de connexion suite à vérification de tuyaux de jonction entre pompe et cuve	5 l de produit déversé	Installation d'une vanne supplémentaire Modification du système de fixation de la tuyauterie
46803	12/08/2015	Tianjin	Chine	Entreposage et stockage	Entrepôt de stockage dont 700t de NaCN	Incendie et 2 explosions (3t de TNT et 21t de TNT)	Entrepôt situé trop des habitations (500m au lieu d'1km par la réglementation) Manque de préparation des secours (méconnaissance des produits réagissant violemment avec l'eau : NaCN-->HCN)	173 morts 720 blessés 70 disparus (principalement pompiers)  17000 logements endommagés Evaluation de dégâts : 1-1,3 M€  NaCN retrouvé à 1km du sinistre	Afin de gérer au mieux la propagation des polluants, un périmètre de confinement est établi sur 3 km autour de la zone sinistrée. Des barrages de sable et de terre sont construits afin d'encadrer une zone de 100 000 m <sup>2</sup> autour du lieu des déflagrations. L'objectif est d'éviter toute fuite liquide.
44534	25/02/2013	Hanamaki	Japon	Traitement et revêtement des métaux	Vanne d'un réservoir de solution de cyanure de sodium	fuite de 5t de solution de cyanure de sodium	Choc d'un engin de travaux	Produit absorbée par la neige sur site qui est ensuite récupérée Aucun impact sur l'environnement notamment sur la rivière voisine	
40300	17/05/2011	Morteau	France	Fabrication d'autres articles et matières plastiques	Bain de cyanure	fuite de produit	Problème sur le bain	Signes d'intoxication pour 23 personnes	
38336	28/05/2010	Friville-Escarbotin	France	Traitement et revêtement des métaux	Bâtiment (contenant cuve de 10l de cyanure de cuivre et potassium)	Incendie	Défaillance électrique	Evacuation d'une dizaine de maisons	
38243	24/05/2010	Poilly-Lez-Gien	France	Collecte de déchets dangereux	Stockage à l'air libre de déchets (dont 5 m <sup>3</sup> de produits de dégraissage, de cyanure et d'eau de process)	Incendie	NC	Relevés atmosphériques (HCN : 1,5 ppm) Eaux d'extinction pompées	
36680	07/08/2009	Nibas	France	Traitement et revêtement des métaux	Bâtiment abritant 25 kg de cyanure de potassium, 25 kg de cyanure de sodium	Incendie	NC	Aucun blessé stockages de cyanure non affectés	Stockage de cyanure dans des contenants incombustibles et en rétention, etc.

n° ARIA	Date	Lieu	Pays	Activité	Installation	ERC	Causes	Conséquences	REX
36208	23/04/2009	Salsigne	France	Extraction d'autres minerais de métaux non ferreux	Digue de retenue de 600 000t de déchets ultimes	Pollution à la suite du débordement d'un bassin de confinement de déchets d'une	Dépassement de la capacité de résistance du massif		
39282	22/08/2008	Pasadena	US	Fabrication de produits explosifs	Entrepôt	Incendie	"Les enquêteurs cherchent à savoir si le NACN présent dans le bâtiment a joué un rôle dans l'ignition"		
34794	02/07/2008	Muret	France	Récupération de déchets triés	Bâtiment d'une entreprise de valorisation de métaux précieux	Feu suivi de 2 explosions, et dispersion de 50kg de KCN en poudre dans l'atelier			Atelier cyanure bâché pour éviter débordements en cas d'orage et merlons de terre mis en place
32977	02/05/2007	Mérignac	France	Traitement et revêtement des métaux	Bâtiment	Incendie		Local abritant un stockage de cyanure de sodium est partiellement affecté Mesures de toxicités négatives	
31750	30/04/2006	Miliang	Chine	Extraction d'autres minerais de métaux non ferreux	Digue d'un bassin de stockage de stériles d'une mine d'or	Rupture de la digue	NC	Pollution sur 5 km en eaux chargées en cyanure de potassium (KCN) dans la HUASHUI Les flots provoquent un glissement de terrain qui détruit une vingtaine de maisons au pied de la digue et fait 17 disparus Les quantités de KCN déversées ne sont pas connues.	De la chaux et de la javel sont déversés pour tenter de réduire la concentration en cyanure par oxydation en cyanates
31325	09/01/2006	Kolin	République Tchèque	Fabrication de produits chimiques de base, de produits azotés et d'engrais	Station de traitement des eaux de l'usine	Débordement de la fosse de désintoxication (cyanures)	Gel d'un capteur de niveau	Pollution de l'Elbes sur plus de 85 km 10t de poissons morts	L'opérateur double le montant des jauges de signalisation, introduit des contrôles physiques de des jauges de niveau après chaque changement de quart, augmente les contrôles lors du remplissage des fosses de détoxification, vérifie l'intégrité de tous les tuyauteries hors-sol (joints) et augmente la fréquence des analyses des rejets d'eaux usées au milieu naturel. La formation des techniciens est améliorée. L'exploitant payera 80 000 euros en dédommagement.

n° ARIA	Date	Lieu	Pays	Activité	Installation	ERC	Causes	Conséquences	REX
27554	13/07/2004	Ablon	France	Traitement et revêtement des métaux	Usine de traitement de métaux	NC	NC	Pollution de la rivière	
26738	19/03/2004	NC	Roumanie	Fabrication de produits chimiques de base, de produits azotés et d'engrais	Usine	Incident	NC	10t de NaCN se déversent dans un affluent du Danube	
27983	11/03/2004	Lesgor	France	Fabrication d'autres produits chimiques	Flexible de NaCN	Fuite du flexible	Débridage hâtif d'un flexible en fin de dépotage d'un camion-citerne de NaCN	Léger écoulement sur le sol pollution de la rivière	Une formation sur les risques associés à la manipulation du cyanure de sodium est organisée pour l'ensemble des opérateurs du site.
24604	19/03/2003	Franklin	Etats-Unis	Traitement et revêtement des métaux	Bâtiment de 1200 m <sup>2</sup> (stock de cyanure de sodium)	Incendie		Une douzaine de maisons évacuées (prévention)	Importants travaux de nettoyage du sol et décontamination des eaux
24357	16/03/2003	Neuilly-sur-Marne	France	Traitement et revêtement des métaux	Rétention de cuve de stockage	Intoxication par liquide cyanuré dans rétention	NC	1 mort	Remplacement l'ensemble des installations sur des rétentions correspondant à la nature des liquides contenus
21611	30/12/2001	Valdoie	France	Traitement et revêtement des métaux	Usine (fûts de cyanure et d'acide)	Inondation de l'usine	Les causes de la rupture des bassins de rétention des débordements de la SAVOUREUSE font l'objet d'une procédure judiciaire et d'une mission d'inspection de l'Inspection Générale de l'Environnement dont le rapport est publié sur le site Internet du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.	Dérive d'objets flottants (fûts de cyanure et d'acide)	

n° ARIA	Date	Lieu	Pays	Activité	Installation	ERC	Causes	Conséquences	REX
17265	30/01/2000	Baia Mare	Roumanie	Extraction d'autres minerais de métaux non ferreux	Bassin de décantation de déchets	Brèche de 25 m de long	Des défauts de conception du barrage (proportions trop importantes de matériaux fins), de mauvaises conditions météorologiques (de fortes précipitations et la fonte des neiges ont provoqué une montée des eaux dans le bassin et un détrempeage des composants de la digue qui l'a fragilisée) et des défaillances organisationnelles (absence de mesure de transvasement des effluents) ont conduit à l'accident.	287 500 m <sup>3</sup> d'effluents contenant cyanures (400 mg / L soit 115 t au total) et métaux lourds (Cu, Zn) contaminent 14 ha de sol et polluent la SASAR Vague cyanure de 40 km de long Roumanie, Hongrie, Yougoslavie, Bulgarie et Ukraine sont impactées 1 200 t de poissons morts sont récupérées pour la seule Hongrie et des milliers de cadavres d'animaux sont retrouvés (cygnes, canards sauvages, loutres, renards...).	La mission recommande à l'exploitant d'opter pour un traitement sans cyanure, de prévoir des dispositifs de rétention de secours, de réaliser une analyse des risques et de revoir les plans d'urgence en cas de rupture. Elle invite également les états affectés à mettre en place un système de suivi continu et de détection des pollutions du DANUBE, ainsi qu'un dispositif de communication entre gouvernements et d'information rapide des populations. Une mission française est chargée d'évaluer les conséquences à long terme. Mise en place d'une station de traitement des effluents cyanurés et un bassin tampon de 250 000 m <sup>3</sup> pour recueillir le trop-plein du bassin de décantation avant neutralisation et rejet au milieu naturel.

n° ARIA	Date	Lieu	Pays	Activité	Installation	ERC	Causes	Conséquences	REX
7202	19/08/1995	Omai	Guyana	Extraction d'autres minerais de métaux non ferreux	Bassin de décantation d'effluents de traitement du minerai	Fuite sur l'enceinte du bassin	Le mode de rupture constaté est inhabituel : le barrage n'a pas cédé, mais son cœur argileux s'est totalement fissuré, laissant s'écouler toute la phase liquide et une très faible fraction solide. L'érosion le long de la buse de construction a fini par entraîner une pénétration traversante du liquide retenu qui s'est accumulé dans le remplissage rocheux, entre le cœur du barrage et les stériles argileux étanches à l'aval. En présence d'eau, le filtre en sable sur lequel reposait le cœur s'est dispersé, créant une cavité. En l'absence de support, ce dernier soumis à des efforts de tension s'est fissuré.	2,9 Mm <sup>3</sup> d'effluents comportant 25 à 30 mg/l de cyanures rejoignent la crique OMAI, 7 km en amont du confluent avec l'ESSEQUIBO utilisé par les 18 000 habitants de la ville de Bartica à l'aval pour la pêche et l'alimentation en eau. 400 poissons sont trouvés morts dans l'OMAI, mais aucun en aval du confluent. Les débits importants des cours d'eau diluent les effluents. Des teneurs en cyanure maximales de 0,15 mg/l dans l'OMAI et 0,07 mg/l dans l'ESSEQUIBO sont observées (la limite de qualité en France pour les eaux de consommation humaine est de 0,05 mg/l). La mine est fermée.	
6036	27/09/1994	Ars-sur-Moselle	France	Traitement et revêtement des métaux	Cuve de cyanure non exploitée (atelier en cessation d'activité)	Fuite de la cuve	Corrosion	Le produit se déverse dans la double enveloppe et se mélange au circuit de refroidissement. Les eaux de refroidissement cyanurées rejoignent la rivière	
4706	29/08/1993	Saint-Laurent-Du-Pont	France	Laminage à froid de feuillards	Atelier de traitement de surface (3 bacs de cyanure)	Incendie dans un atelier		3 bacs de cyanure et un bac de rinçage détruits Produits contenus par des cuvettes de rétention 15 pers en chômage technique Dégâts estimés à 10MF	
3447	06/03/1992	Corbas	France	Collecte de déchets non dangereux	14 jerricans de NaCN	Certains éventrés, laissent échapper leur contenu		Deux ouvriers, 2 pompiers et 4 militaires qui participent à leur de récupération sont intoxiqués ; souffrant de brûlures au nez et à la gorge et ils sont hospitalisés. Un périmètre de sécurité est mis en place. Les jerricans sont évacués par une société spécialisée dans le transport de produits toxiques.	
2336	17/10/1990	Saint-Laurent-Du-Pont	France	Laminage à froid de feuillards	Station de traitement des eaux de l'usine	Fuite de cyanure		Un ouvrier intoxiqué est hospitalisé	

n° ARIA	Date	Lieu	Pays	Activité	Installation	ERC	Causes	Conséquences	REX
1857	13/04/1990	Chelmsford	Royaume- Uni	Fabrication d'armes et de munitions	Cuve de 50l de KCN et autres produits chimiques	Incendie de cuve	Défaillance d'un thermostat	Un millier de personnes est évacué Le nuage qui dérive intoxique 22 riverains	
396	28/06/1998	Auburn	US	Traitement et revêtement des métaux	Bain d'une unité de traitement de surface	Dégagement de cyanure		4 employés tués 20 fortement intoxiqués 75 autres évacués	

## **ANNEXE 4**

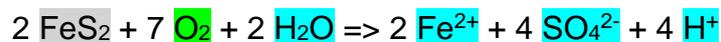
### **Éléments de rappels sur le phénomène du drainage minier acide**



### **Origines du phénomène de drainage minier acide (DMA)**

Lors d'opérations d'exploitation minière dans des encaissants et minerais riches en sulfures minéraux, les stériles comme les résidus de traitement minier, placés respectivement en verses et dans des parcs à résidus, peuvent constituer des sources importantes d'effluents à la fois acide et métallique. Le fond de fosse minière comme les galeries souterraines sont également des sources d'eaux acides qui peuvent être drainées en dehors du site et atteindre les sources ou les aquifères locaux.

Ces effluents sont générés en milieu non saturé, par la mise en contact des sulfures avec de l'air et de l'eau selon une réaction chimique plus ou moins rapide générant de l'acide sulfurique et une mise en solution de métaux lourds. La principale réaction d'oxydation de la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ), minéral sulfuré le plus répandu, à l'origine de ce phénomène dit de Drainage Minier Acide<sup>48</sup> (DMA) est :



Sont représentées en vert les espèces chimiques présentes sous forme gazeuse, en bleu les espèces en solution et en gris les espèces solides.

L'oxydation de la pyrite peut être catalysée par certaines bactéries qui se développent en tirant parti des réactions d'oxydo-réduction et deviennent alors des catalyseurs importants.

Comme l'illustre la figure ci-après reprise (synthétisant les principaux processus biologiques, géochimiques et physiques participant à la potentielle libération de métaux lourds depuis les déchets miniers), cette potentielle émission a pour origine l'oxydation des sulfures qui elle-même dépend (et peut être entretenue) par de nombreux paramètres locaux (tels que le pH, l'Eh ou bien encore l'intensité et la qualité de l'activité microbienne).

---

<sup>48</sup> Egalement appelé Drainage Acide (DA) dans certains ouvrages de référence.

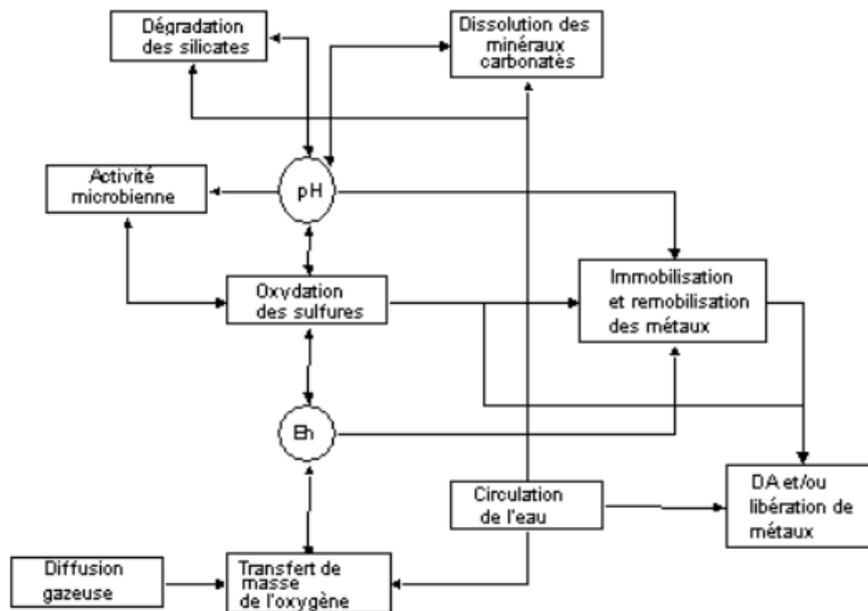


Figure 8 : Illustration schématique des principaux processus biologiques, géochimiques et physiques à la participation à la potentielle libération de métaux lourds depuis les déchets miniers (Eriksson, 2002 cité par CE, 2009).

A travers la potentielle libération des métaux lourds présents dans les résidus miniers, la survenue d'un DMA peut se traduire par un impact fort sur la faune et la flore du réseau hydrographique présent en aval des opérations du site industriel (impact notamment caractérisable en termes de toxicité et d'écotoxicité des rejets).

Ce phénomène concerne avant tout les mines à ciel ouvert qui dégagent des grandes quantités de matériaux stériles devant être entreposés en verses et pour lesquelles le minerai exploité se trouve facilement à découvert.

Le phénomène de drainage minier acide touche globalement toutes les régions du monde où l'industrie extractive est développée, y compris les régions charbonnières dans lesquelles les métaux tels que le fer sont présents dans les résidus miniers. La réaction d'oxydation des minéraux sulfurés étant auto-entretenu, elle peut s'installer sur un site et perdurer très longtemps au-delà de l'abandon du site par l'exploitant. Monna *et al.* (2011) mettent ainsi en évidence que l'actuelle pollution des rivières du parc des Cévennes a pour origine les anciennes mines de fer, de plomb et d'argent dont l'exploitation remonte à plusieurs siècles.

Les métaux et métalloïdes solubilisés dans les DMA étant pour certains toxiques, écotoxiques, non-dégradables, et bioaccumulables, l'impact environnemental des DMA constitue un enjeu majeur qui se révèle cruellement à nos sociétés au travers d'accidents catastrophiques liés à des ruptures de digues minières et de déversements massifs de déchets miniers acides et/ou métalliques ayant générés des pollutions de grandes ampleurs comme à la mine d'Aznalcóllar (Espagne), en 1998, ou encore plus récemment celui à Mariana (Brésil), fin 2015.

### **Règlementations et normes**

La directive européenne 2006/21/CE cadre la gestion des déchets de l'industrie extractive. Elle vise à prévenir ou réduire les impacts environnementaux de la gestion

des déchets miniers dans leur cycle de vie. Cette directive s'appuie sur le Bref (document de référence sur les meilleures techniques disponibles ; cf. CE, 2009 pour sa version française) relatif à la gestion des résidus miniers et des stériles dans les activités minières, rédigé à la suite des accidents majeurs cités ci-dessus.

Cette directive, qui conduit à classer les installations de gestion des déchets en deux catégories A et B selon leur nature et dangerosité, a été transposée en droit national français à travers le décret 2010-369 du 13 avril 2010 modifiant la nomenclature des installations classées et l'arrêté du 19 avril 2010 relative à la gestion des déchets des industries extractives.

Ce cadre réglementaire prévoit notamment que l'opérateur établisse et révise périodiquement un plan de gestion des déchets qu'il produit, traite et valorise ou stocke ses déchets miniers de la manière la plus sûre possible pour la santé et l'environnement.

Rappelons enfin que sont considérés comme déchets inertes les déchets présentant une teneur maximale en soufre sous forme de sulfure de 0,1 %, ou les déchets présentant une teneur maximale en soufre sous forme de sulfure de 1 % et dont le ratio de neutralisation, défini comme le rapport du potentiel de neutralisation au potentiel de génération d'acide et déterminé au moyen d'un essai statique EN 15875, est supérieur à 3.

La norme PREN 15875, qui porte sur la caractérisation des déchets, spécifie notamment des méthodes permettant de déterminer le potentiel des matériaux sulfurés à former des eaux de drainage acides. Les tests dits statiques sont utilisés pour la détermination du potentiel de génération d'acide (PGA) des rejets miniers pour la prédiction du DMA, le potentiel étant déterminé à partir du bilan entre le potentiel de génération d'acide (AP) et de neutralisation (NP) du matériau testé (Bouzahzah *et al.*, 2014)

### **Contexte Guyanais**

Le niveau de pollution d'un DMA varie en fonction de sa composition et de son pH. Ses caractéristiques sont gouvernées par de nombreux paramètres à la source tels que la géologie et la minéralogie du site minier (types et teneurs en sulfures, fracturation naturelle, la présence de roches carbonatées susceptibles de ralentir ou inhiber complètement le phénomène, etc.), le climat et la pluviométrie locales, les modalités d'exploitation, la gestion des stériles et résidus.

D'une manière générale, il est reconnu que la production de DMA est très variable d'un site minier à un autre et sa prédiction quantitative reste une équation difficile tant le phénomène repose sur des interactions physiques et géochimiques complexes. Compte tenu de l'importance de la pluviométrie dans l'origine du phénomène, le niveau de DMA peut varier aussi très significativement sur un même site en fonction de la saison.

La pollution par drainage acide minier dans le contexte d'après-mine en France métropole a fait l'objet d'un nombre limité d'études qui sont rappelées dans (Resongles, 2014).

Le contexte géologique du bouclier guyanais fait que les gisements miniers présents sont sulfurés. Les exploitations minières sont donc potentiellement sources de DMA d'autant que le climat et la pluviométrie y sont particulièrement favorables.

On peut mentionner ici l'étude menée par le BRGM relative à la caractérisation des déchets miniers en Guyane menée sur les quatre mines d'or Espérance (commune d'Apatou, compagnie minière d'Espérance), de Dieu Merci et de Yaou (commune de Saint-Elie et de Maripasoula, Société Auplata), et de Saint-Elie (commune de saint-Elie, société minière de Saint-Elie). Sur ces 4 sites exploitant l'or en gisement primaire, les résultats des campagnes d'échantillonnage et d'analyse en laboratoire du potentiel acidogène des roches exploitées dans des fosses peu profondes, contenues dans les altérites (partie altérée proche de la surface de la colonne de terrains), ont montré une quasi absence de drainage minier acide. Ce résultat s'explique évidemment par l'oxydation naturelle des sulfures dans les premiers terrains de couverture. Il serait probablement très différent si les fosses étaient ancrées dans le socle sain et non altéré situé à la base des altérites.

En revanche, l'étude hydrogéologique du BRGM (Gutierrez, 2018) du dossier présenté par la Compagnie de la Montagne d'Or dans le cadre du débat public organisé par la CNDP, souligne bien que la moitié des roches prélevées et analysées sur le site sont des sulfures et qu'une majorité des stériles (qui pourraient provenir de la mine à ciel ouvert) est potentiellement acidogène. L'étude souligne également la présence de métaux lourds dans les eaux de rejets et confirme la nécessité de traiter les eaux non conformes avant rejet.

### **Prévention et mitigation du DMA**

En premier lieu, en amont d'un projet d'exploitation minière, et lorsque que le phénomène de DMA est potentiellement attendu, il est important de bien caractériser le bruit de fond géochimique initial du site afin d'être en mesure de détecter et quantifier au plus tôt l'apparition de DMA dans l'environnement du site et valider l'efficacité des mesures de prévention ou de mitigation envisagées.

Les travaux de recherches pour le développement de techniques et méthodes de prévention des DMA et le retour d'expérience acquis sites miniers font l'objet d'un nombre croissant de publications depuis le début des années 2000. A ce jour, les auteurs soulignent toujours que les techniques les plus pertinentes pour un site doivent être déterminées au cas par cas et le plus tôt possible car la nature des résidus miniers produits est susceptible d'évoluer physico-chimiquement au fil du temps. La prise en compte préventive de cette problématique est fondamentale pour remédier aux DMA de manière efficace dans des coûts maîtrisés.

Le principe de base commun aux différentes méthodes pour prévenir les DMA repose sur la mise en œuvre de techniques qui visent à retarder ou empêcher l'oxydation des sulfures.

Les principales méthodes, soit de prévention, soit de traitement, actuellement utilisées pour limiter le phénomène d'oxydation des sulfures se répartissent en plusieurs catégories basées notamment sur : les barrières physiques, l'inhibition bactérienne, la passivation chimique et la désulfuration. La description détaillée de ces catégories et d'autres méthodes possibles (dont certaines sont encore au stade de la recherche, de la validation, ou de l'amélioration) sort de l'objectif de cette annexe, le lecteur intéressé pourra se reporter à la littérature disponible sur le sujet. On peut citer Itard *et al.* (2001), Sahoo *et al.* (2013) ou plus récemment Kefeni *et al.* (2017).

Néanmoins, comme la stratégie de prévention des DMA doit être adaptée à chaque site minier (puisque'il n'existe pas actuellement de méthode éprouvée universelle), parmi les principales méthodes de prévention, qui pourront le cas échéant être combinées, on peut mentionner :

- **Les barrières physiques** (sèches ou humides). Il s'agit ici de mettre en place une **couverture sèche** utilisant des résidus à faible teneur en sulfures, des argiles, des déchets d'oxydes, des substrats alcalins, des déchets organiques, des sols et des matériaux neutralisants pour empêcher la génération de DMA.
- **Une couverture humide** peut être utilisée comme barrière pour limiter la diffusion de l'oxygène dans les terrains. Dans des conditions normales, la solubilité de l'oxygène est faible, et le coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau est de quatre ordres de grandeur inférieur à celui de l'air. Cette propriété peut donc être exploitée pour limiter le taux d'oxydation des sulfures lorsque les déchets miniers sont recouverts d'une barrière incluant notamment une couche imperméable et une couche de matériau fin saturé.
- **Une barrière organique** vise à consommer l'oxygène arrivant sur les déchets miniers et donc à limiter fortement l'acidification. Des matières organiques telles que des déchets de bois et d'autres formes de déchets de carbone organique peuvent être appliquées pour recouvrir la surface des déchets miniers et servent de désoxygénant. Cependant, il convient de préciser que leur « durée de vie est courte », ce qui nécessite de considérer la problématique de renouvellement dans le temps de cette barrière.
- **De même, l'élimination des résidus en milieux subaquatiques** (dépôts en fond de lacs artificiels ou naturels par exemple), contribue à minimiser le contact de l'oxygène avec les matériaux réactifs disponibles dans les résidus, en particulier pour empêcher l'oxydation des sulfures. Néanmoins, avant le recours à un tel dispositif, la possibilité de la mise en place d'un système de sulfato-réduction bactérienne (susceptible de libérer localement du H<sub>2</sub>S sous forme gazeuse) doit être étudiée.
- **La désulfuration** consiste à séparer les volumes les plus riches en minéraux sulfurés du dépôt minier, laissant, sans mesure spécifique, des déchets à faible teneur en soufre qui ne généreront pas (ou très peu) d'acide et adoptant, pour l'autre part des déchets à haute teneur, des mesures de stockage plus faciles à mettre en œuvre sur des volumes réduits. L'avantage de cette approche est qu'elle est simple et économique mais elle nécessite une gestion très maîtrisée dans le temps des déchets produits. Dans le cas d'un traitement curatif (après dépôt), une caractérisation détaillée a posteriori du dépôt sera indispensable avant d'envisager cette approche.
- **Les bactéricides** peuvent supprimer l'oxydation, mais ne sont efficaces que sur les résidus frais et sur une courte durée, et ne constituent pas une solution permanente aux DMA. De plus, l'application de bactéricides peut être toxique pour les organismes aquatiques.
- **La passivation chimique**, c'est-à-dire la neutralisation du DMA à l'aide de produits alcalins tels que l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)<sub>2</sub>) ou le calcaire (CaCO<sub>3</sub>), méthode couramment utilisée pour l'élimination des métaux sous forme de précipité et de sulfate hydroxyde de métal sous forme de boues de gypse (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O). Cela suppose que de tels matériaux soient accessibles à proximité du site minier (ce qui ne semble pas être le cas dans le contexte guyanais).

### **Références bibliographiques citées dans cette annexe**

- Bouzahzah, H., Benzaazoua, M., Bussière B. et Plante B., 2014.** Revue de littérature détaillée sur les tests statiques et les essais cinétiques comme outils de prédiction du drainage minier acide Déchets sciences et techniques. N°66, mars 2014.
- Brunet, J.-F., 2000.** Drainages Miniers Acides – Contraintes et remèdes – Etat des connaissances. BRGM/RP-50504-FR, 176 p.
- CE, 2009.** Document de référence sur les meilleures techniques disponibles - Gestion des résidus et stériles des activités minières, 632 p ([https://aida.ineris.fr/sites/default/files/directive\\_ied/mmr\\_adopted\\_0109\\_VF\\_0.pdf](https://aida.ineris.fr/sites/default/files/directive_ied/mmr_adopted_0109_VF_0.pdf)). Cottard,
- Laperche, F. 2012.** Caractérisation des déchets miniers de quatre mines d'or de Guyane. Rapport final. BRGM/RP-61027-FR. 117 p.
- Erikson, N. 2002.** Acid Rock Drainage (ARD).
- Gutierrez, A., 2018.** Expertise hydrogéologique des documents portés au débat public sur le projet de la Montagne d'Or en Guyane. Rapport final. BRGM/RC-68061-FR, 51 p.
- Itard, Y., Bosc, R., 2001.** Traitements et préventions des drainages acides provenant des résidus miniers. Revue bibliographique. BRGM/RP-50829-FR, 85 p.
- Kefeni K., Kefeni, M., Makudali, T. et Bhekie, M. 2017.** Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. Journal of Cleaner Production. 151. 10.1016/j.jclepro.2017.03.082.
- Monna F., 2011.** Wild Brown Trout Affected by Historical Mining in the Cévennes National Park, France. Environ. Sci. Technol. 2011, 45, 6823–6830.
- Resongles, E., 2014.** Etude de la contamination par les métaux et métalloïdes d'origine minière sur le bassin des Gardons : approche élémentaire (As, Cd, Hg, Pb, Sb, Tl, Zn) et isotopique (Sb, Zn). Hydrologie. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc.