



Association SystExt

21 ter rue Voltaire  
75011 PARIS

[contact@systext.org](mailto:contact@systext.org)

[www.systext.org](http://www.systext.org)

## NOTE D'ANALYSE

# Cyanuration dans l'industrie aurifère

## Enjeux techniques et principaux risques

Synthèse des caractéristiques techniques de la cyanuration, principaux risques technologiques, techniques alternatives et points de vigilance pour le territoire guyanais.

Avril 2021

### ► L'association SystExt

SystExt pour « Systèmes extractifs et Environnements » est une association de solidarité internationale, née en 2009 au sein de la fédération Ingénieurs sans frontières (ISF) France. L'association se donne pour objectif d'obtenir la transparence et la démocratisation des enjeux associés aux filières minérales. Elle se concentre sur l'industrie minière et ses impacts humains, sanitaires, sociaux et environnementaux. La spécificité de SystExt réside dans le fait que ses membres soient des professionnels du secteur, ou confrontés à ce secteur dans l'exercice de leur métier. Ses missions s'organisent autour de quatre champs d'action : veille citoyenne, accompagnement de la société civile, sensibilisation, formation et expertise.

### ► Crédits des contenus de ce rapport (sauf si précisé)



SystExt, Avril 2021, CC BY-NC-SA 3.0 FR

*Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les  
Mêmes Conditions 3.0 France*

## SOMMAIRE

<b>1. Origine de la demande .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Minerais d'or et cyanuration.....</b>	<b>6</b>
2.1. Généralités.....	6
2.2. Formes de l'or dans le minerai .....	6
2.3. Intérêt de la cyanuration .....	7
<b>3. Lixiviation au cyanure : principe et technologies .....</b>	<b>9</b>
3.1. Principe de la cyanuration .....	9
3.2. Méthodes de lixiviation au cyanure.....	10
3.3. Récupération de l'or et obtention du produit fini.....	11
3.4. Préparation du minerai et traitements complémentaires .....	13
<b>4. Cyanures et toxicité .....</b>	<b>15</b>
4.1. Types de cyanures et toxicités associées.....	15
4.2. Analyse et diagnostic insuffisants des composés cyanurés.....	16
<b>5. Principaux risques technologiques .....</b>	<b>17</b>
5.1. Risques liés au transport.....	17
5.2. Risques liés aux installations minières .....	18
5.3. Risques liés aux effluents et déchets miniers .....	20
<b>6. Gestion des effluents et des déchets miniers .....</b>	<b>23</b>
6.1. Objectifs du traitement du cyanure .....	23
6.2. Destruction du cyanure .....	23
6.3. Recyclage du cyanure.....	26
<b>7. Techniques alternatives à la cyanuration .....</b>	<b>28</b>
7.1. Lixiviants alternatifs.....	28
7.2. Discussion sur la prédominance du cyanure .....	30
<b>8. Points de vigilance pour le territoire guyanais .....</b>	<b>32</b>



## 1. Origine de la demande

La réforme du Code minier lancée en 2019 s'est traduite par l'introduction de deux articles (20 et 21) dans le *Projet de loi n° 3875 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets* du 10 février 2021. 213 amendements ont été déposés concernant ces deux articles, parmi lesquels 3 portaient sur une **interdiction de l'utilisation des technologies à base de cyanure dans l'industrie minière**<sup>1</sup>. Bien que ces trois derniers amendements aient été rejetés par la Commission spéciale chargée d'examiner le projet de loi, ils ont permis de réintroduire dans le débat parlementaire cette question, par ailleurs régulièrement soulevée par la société civile française et européenne. Tel est le cas de l'association SystExt qui a notamment soutenu la campagne européenne *Bang Ban cyanide* en 2016-2017, appelé à un moratoire avec 30 autres associations françaises en 2018<sup>2</sup> et a été auditionnée à plusieurs reprises dans le cadre d'une proposition de loi déposée par le Sénateur Fabien Gay en mars 2019<sup>3</sup>.

Dans ce contexte, l'association WWF a sollicité SystExt afin de disposer d'une **synthèse technique sur la cyanuration dans l'industrie aurifère**. La demande porte sur un **bilan vulgarisé qui permette d'appréhender** :

- **Les caractéristiques techniques de cette méthode de traitement du minerai**<sup>4</sup> ;
- **Les principaux risques et limites technologiques associés.**

Compte tenu de la nature complexe et variée de ces sujets, il n'est pas envisageable de les décrire de façon exhaustive. Cette synthèse a, au contraire, pour but de **simplifier et de présenter en priorité les enjeux majeurs**, afin d'apporter des réponses à certaines questions : *Quel est l'intérêt de la cyanuration dans l'industrie aurifère ? Quelle importance revêt-elle pour cette filière ? Quels sont les procédés (équipements, réactifs, etc.), nécessaires ? Quelles sont les problématiques sanitaires ou environnementales majeures posées par cette technique ? Est-il possible de traiter les effluents et déchets miniers contenant des cyanures ? Existe-t-il des alternatives « viables » à la cyanuration ?*

Compte-tenu des délais courts auxquels a été assujettie la présente étude (une dizaine de jours), SystExt n'a pas réalisé de recherches bibliographiques et d'analyses approfondies. L'association s'est cependant basée sur une cinquantaine de sources documentaires, parmi lesquelles de nombreuses publications scientifiques et des rapports techniques de référence.

---

<sup>1</sup> Sont concernés les amendements : n°556 du 27/02/2021, n°3378 du 03/03/2021 et n°4425 du 03/03/2021. Ne sont pas pris en compte ici l'amendement retiré n°2017 et les amendements non soutenus n°635, n°4475, n°4434 et n°4483.

<sup>2</sup> Communiqué de presse Le cyanure tue ! Un moratoire sur l'utilisation du cyanure | SystExt, 03/09/2018 [au lien suivant](#).

<sup>3</sup> Proposition de loi n°374 visant à interdire l'utilisation de cyanure dans l'exploitation minière aurifère et argentifère présentée par M. Fabien GAY, Mmes Éliane ASSASSI, Cathy APOURCEAU-POLY, Esther BENBASSA, M. Éric BOCQUET [...] [au lien suivant](#).

<sup>4</sup> Ensemble de matériaux contenant des minéraux « utiles », en proportion suffisamment intéressante pour justifier une exploitation minière, et nécessitant une transformation (ou traitement) pour être utilisés par l'industrie.

## 2. Minerais d'or et cyanuration

### 2.1. Généralités

La cyanuration est le premier procédé de traitement du minerai employé par l'industrie aurifère et concerne **80% de la production mondiale d'or** (*L'Élémentarium, Fiche Or*). Si les mines d'or sont principalement concernées, certaines mines d'argent le sont aussi ; ainsi que d'autres mines pour lesquelles ces deux substances sont des co-produits<sup>5</sup>. Pour répondre à ce besoin, deux réactifs sont utilisés : le cyanure de sodium (NaCN) et, dans une moindre mesure, le cyanure de potassium (KCN).

Chaque année, on estime que 20% de la production de cyanure d'hydrogène sert à la fabrication de cyanure de sodium (NaCN), pour une quantité totale d'environ 500 000 tonnes de NaCN (*Australian Government, 2010, p. 47*). **80 à 90% du cyanure de sodium (NaCN) produit est utilisé pour l'industrie minière**, essentiellement pour l'extraction de l'or et l'argent<sup>6</sup> (*Australian Government, 2010 ; IHS Markit, 2020*). Si la plupart des auteurs consultés insistent sur le fait que ce secteur d'activité représente une part faible de la demande globale en cyanure d'hydrogène, il concerne cependant la quasi-totalité de la filière du cyanure de sodium.

Tenant compte de la teneur en or particulièrement faible des gisements aurifères - avec une moyenne en 2015 de 1.18 g/t pour toutes les mines d'or en exploitation et de 5.3 g/t pour les 50 premières (*Croharé, 2016*) - les quantités de minerai à traiter sont nécessairement considérables. Ainsi, **un milliard de tonnes de minerai est traité chaque année dans le monde à l'aide d'une solution cyanurée pour récupérer l'or, ce qui représente le plus grand tonnage de matières premières minérales traitées chimiquement** (*Habashi, 2016 ; in Gold Ore Processing, p. 11*).

### 2.2. Formes de l'or dans le minerai

Dans un gisement, l'or peut se présenter sous **deux formes** (selon le vocabulaire des minéralogistes) : libre ou liée<sup>7</sup>, tel que représenté de façon conceptuelle en *Figure 1, page suivante*.

L'**or libre** est un or métallique<sup>8</sup> (parfois appelé « natif »), plus ou moins en alliage avec d'autres métaux (argent, mercure, voire cuivre) et le plus souvent concentrable par gravité compte tenu de sa densité. Il se présente sous forme de pépites ou de paillettes, qui peuvent se trouver dispersées dans des amas de roches fragmentées (c'est le cas des gisements « alluvionnaires ») ou disséminées dans une roche massive. L'**or lié** est un or élémentaire<sup>9</sup>, avec deux configurations possibles : (1) associé à d'autres éléments comme le bismuth, l'antimoine, le tellure ; (2) en atome en substitution ou inséré en traces dans le réseau cristallin d'un minéral hôte, en particulier l'arsénopyrite ou la pyrite.

<sup>5</sup> Il ne s'agit alors pas de la principale substance produite mais d'une substance « secondaire » ; comme dans le cas, par exemple, d'une mine de cuivre qui produit également de l'or ou d'une mine d'or qui produit également de l'argent. La production d'or et d'argent en tant que co-produits représente une part substantielle de leur production totale. À ce titre, d'après l'Université de Berkeley, un tiers de l'or mondial consiste en un sous-produit de mines de cuivre, de plomb ou de zinc ([voir au lien suivant](#)) ; cette proportion s'élevant à 71% pour l'argent, comme sous-produit des mines de plomb-zinc, de cuivre ou d'or (*L'Élémentarium, Fiche Argent - au lien suivant*).

<sup>6</sup> Le cyanure de sodium est également utilisé dans d'autres industries minières et métallurgiques, comme agent déprimant dans la flottation des métaux de base, pour la galvanisation du cuivre et d'autres métaux sur des surfaces métalliques, pour le durcissement superficiel du fer et de l'acier, et comme agent de nettoyage des métaux (*Australian Government, 2010, p. 47*).

<sup>7</sup> Que l'or se présente sous forme libre ou lié, il est fréquent qu'il se trouve en inclusions fines dans des minéraux.

<sup>8</sup> Schématiquement, l'or se présente alors sous forme de métal pur.

<sup>9</sup> Schématiquement, l'or se présente alors sous forme d'atomes dans un minéral qui contient d'autres éléments.

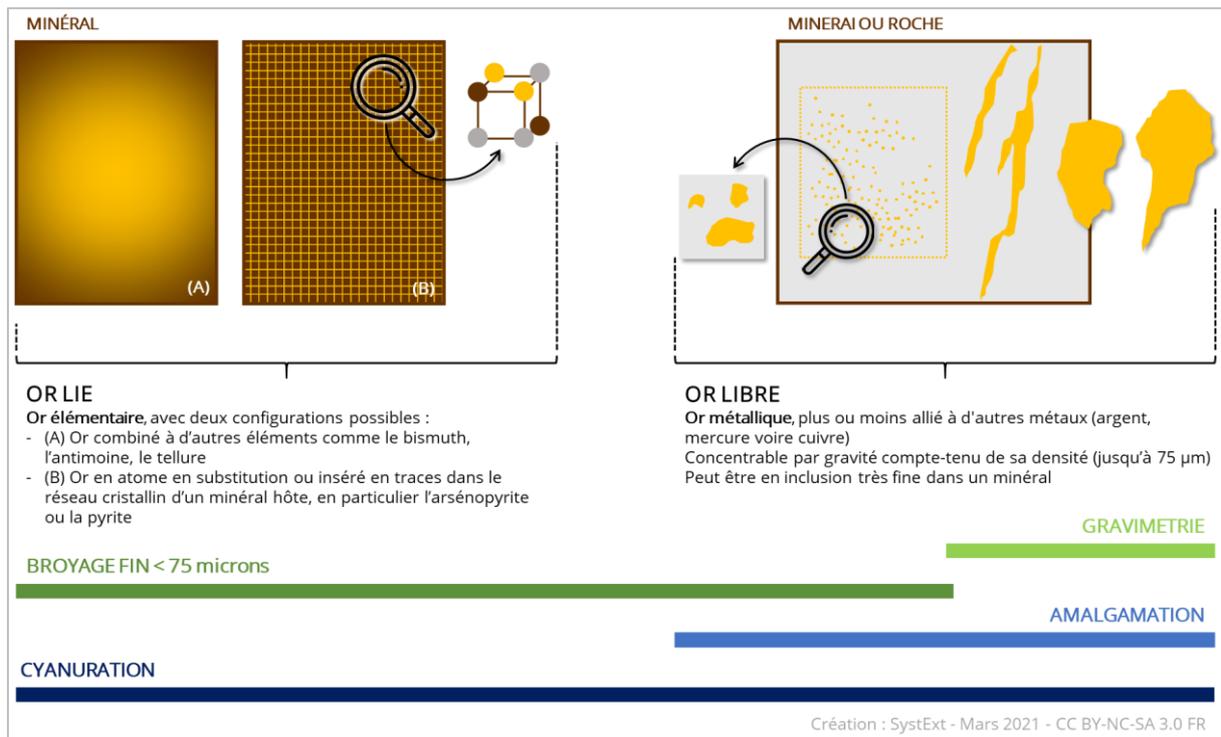


Figure 1 : Schéma conceptuel des deux formes de l'or, libre ou liée

Cette distinction est importante car elle conditionne les possibilités de traitement du minerai d'or. En fonction de la (ou les) forme(s) sous la(les)quelle(s) se présente l'or dans le gisement, des techniques différentes seront mises en œuvre, tel que détaillé dans le § 3 p. 9<sup>10</sup>.

### 2.3. Intérêt de la cyanuration

L'avènement du cyanure pour l'exploitation aurifère s'est fait dans les années 1890 lors du développement du complexe minier aurifère du Witwatersrand en Afrique du Sud. En effet, les anciennes méthodes de traitement (amalgamation<sup>11</sup> ou chloration<sup>12</sup>) ne permettaient plus de récupérer suffisamment d'or dans les nouvelles zones exploitées<sup>13</sup>, seulement 55 à 65 % (Gray & McLachlan, 1933 ; Habashi, 2016 ; in *Gold Ore Processing*, p. 11).

<sup>10</sup> Dans la suite du rapport, on utilisera le caractère « § » comme abréviation de « paragraphe ».

<sup>11</sup> L'amalgamation consiste à allier l'or (et l'argent) avec du mercure et à décomposer l'alliage (25 à 50 % d'or) par distillation du mercure, vers 400-500°C.

<sup>12</sup> La chloration consiste à dissoudre l'or par des ions chlorures en milieu acide et oxydant. Il en résulte la formation de complexes chlorurés. Cette technique permet d'atteindre des rendements de mise en solution de l'or très élevés, proches de 100 %. « *La manipulation du chlore, gaz extrêmement corrosif et toxique, n'est pas sans risques environnementaux et sanitaires. Ce procédé est mis en œuvre à l'échelle industrielle mais uniquement sur des gisements de platinoïdes dont la valeur économique justifie les investissements lourds liés à ce procédé* ». (Menard, 2018)

<sup>13</sup> Dans ces zones, l'or était soit sous forme liée dans des sulfures (la pyrite, ici) ; soit, libre, en inclusion très fines dans ces derniers.

Si l'amalgamation est désormais interdite dans de nombreux pays<sup>14</sup>, l'utilisation du mercure se poursuit sur de nombreux sites miniers artisanaux ou à petite échelle, à travers le monde. Dans ce cadre, il est régulièrement affirmé que la cyanuration a été développée afin de se substituer à l'amalgamation, compte-tenu des conséquences sanitaires et environnementales graves de ce procédé, tel que déclaré par M. François de Rugy en février 2019, alors Ministre de la transition écologique et solidaire<sup>15</sup> :

« J'entends bien ce qui est dit sur le cyanure, et je sais que certains députés ont la volonté d'interdire son usage dans l'exploitation de l'or. Mais ils ne disent rien du mercure, pourtant plus toxique. [...] **C'est d'ailleurs à cause des problèmes posés par le mercure que le cyanure lui a été substitué.** Si cela n'est pas dit, soyons clairs, c'est parce qu'aujourd'hui le mercure est utilisé à grande échelle, par plusieurs centaines d'exploitants, sous une autre forme. »

Si l'arrêt de l'utilisation du mercure ne peut être récusé, SystExt souhaite rappeler que le développement de **la cyanuration n'est pas associé à une substitution de l'amalgamation, mais à la volonté des industriels miniers de valoriser des gisements dans lesquels l'or présente des formes spécifiques.** En effet, tel que rappelé précédemment avec l'expérience sud-africaine, **l'amalgamation ne permet pas de traiter les minerais dans lesquels l'or est lié.** Cette technique n'est adaptée que pour l'or libre.

Le succès de la cyanuration est dû à sa rentabilité et aux taux de récupération assurés pour la majorité des gisements. Elle est particulièrement adaptée pour les minerais de faible teneur, jusqu'à 0.2 g/t (Moisan & Blanchard, 2013). **Elle permet dans les cas les plus favorables de récupérer jusqu'à 95 % de l'or.** Malgré l'émergence de techniques alternatives (voir chapitre 7 p. 28), le cyanure demeure donc à ce jour le produit le plus efficace et le moins coûteux pour extraire de l'or ou de l'argent.

---

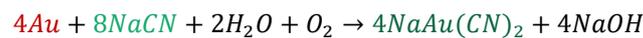
<sup>14</sup> En France, l'interdiction d'utiliser l'amalgamation date de 2006.

<sup>15</sup> Déclaration de M. François de Rugy, ministre de la transition écologique et solidaire, sur un projet d'exploitation de l'or en Guyane, à l'Assemblée nationale le 7 février 2019, [au lien suivant](#).

### 3. Lixiviation au cyanure : principe et technologies

#### 3.1. Principe de la cyanuration

La cyanuration (ou lixiviation<sup>16</sup> au cyanure) consiste à **extraire des substances solubles à l'aide d'une solution cyanurée**. Pour « isoler » l'or du reste du mélange qui contient d'autres métaux et substances, il est nécessaire de le « dissoudre ». Du point de vue chimique, les ions cyanure forment des complexes<sup>17</sup> stables avec l'or, mais aussi avec l'argent et d'autres métaux (Moisan & Blanchard, 2013) selon la réaction de dissolution suivante :



*Or + Cyanure de sodium + Eau + Oxygène → Complexe aurocyanuré<sup>18</sup> + Hydroxyde de sodium*

Plusieurs facteurs influencent l'efficacité et la durée de cette réaction, en particulier : la composition du minerai, la concentration en cyanure, la concentration en oxygène, le pH, et la taille des grains.

Concernant la taille des grains, plus celle-ci est faible, plus la réaction est rapide, tel que présenté dans le *Tableau 1*.

Taille de la particule d'or (en µm)	Temps pour dissoudre la particule (en heures)
2 000	588
150	44
74	22
45	13

Tableau 1 : Temps théorique nécessaire pour dissoudre une particule d'or ; d'après (Lucion, 2011)

Concernant le pH, la réaction est optimisée lorsque celui-ci est compris entre 10 et 11. Cela permet d'éviter la génération de cyanure d'hydrogène (HCN) gazeux qui est extrêmement toxique et peut être mortel. Ce paramètre doit être contrôlé en continu, surtout en cas de présence de sulfures qui ont tendance à abaisser le pH de la solution dans les cuves de cyanuration.

Concernant la concentration en cyanure, dans le cas de minerais d'or « exposé par broyage »<sup>19</sup>, avec peu ou pas de sulfures, une concentration de 90 à 150 mg/L NaCN est utilisée. Cette configuration est cependant optimale car, le plus souvent, les concentrations en cyanure utilisées pour dissoudre l'or sont beaucoup plus élevées. De plus, elles sont bien supérieures à celles qui sont théoriquement requises, de 1 000 à 4 000 fois (Moisan & Blanchard, 2013, p. 21) :

« Seulement 0,3 à 0,5 gramme de cyanure par tonne d'un minerai type sont en principe nécessaires pour dissoudre et extraire l'or, cependant dans la pratique, la consommation peut être comprise entre 300 grammes à plus de 2000 grammes par tonne pour atteindre une extraction efficace. »

<sup>16</sup> La lixiviation désigne la dissolution chimique de certains constituants d'un matériau par la mise en contact avec une solution (eau de pluie ou de ruissellement, par exemple).

<sup>17</sup> En chimie, un complexe est une association de plusieurs ions ou molécules.

<sup>18</sup> Le complexe auro-cyanuré a, en réalité, la formule chimique  $Au(CN)_2^-$ . Il s'agit ici d'une molécule qui associe le sodium pour que la réaction soit équilibrée, dit « dicyanoaurate de sodium ».

<sup>19</sup> Minerai qui peut être traité « simplement » selon description en § 3.4 p. 13. Il est exclusivement composé d'or sous forme « libre », selon la définition du § 2.2 p. 6.

L'excès de cyanure est notamment consommé par l'oxydation du cyanure, par la volatilisation sous forme de cyanure d'hydrogène (HCN) gazeux, ou encore par la **complexation avec d'autres métaux tels que le cuivre, le fer ou le zinc** qui sont également présents dans la solution (Moisan & Blanchard, 2013 ; Deschênes, 2016 ; in *Gold Ore Processing*, pp. 433-443).

### 3.2. Méthodes de lixiviation au cyanure

La cyanuration est restée pratiquement inchangée depuis sa découverte (Habashi, 2016 ; in *Gold Ore Processing*, p. 11). Cependant, certains développements majeurs ont été apportés : l'invention de la lixiviation en tas dans les années 1960 (voir présent paragraphe), l'introduction du charbon actif pour récupérer l'or après lixiviation (voir § 3.3 p. 11) dans les années 1980 et l'essor des techniques permettant de valoriser des minerais complexes et réfractaires (voir § 3.4 p. 13) dans les années 2000 (Angove & Acar, 2016 ; in *Gold Ore Processing*, p. 131) :

« The advent of heap leaching in the 1960s and carbon-in-pulp (CIP) in the early 1980s were probably the most important technological developments over the past 100 years. The recovery of gold from refractory ores has also steadily increased over the past 20 years [...] »

Plusieurs techniques peuvent être mises en œuvre pour réaliser une lixiviation au cyanure. A ce titre, il existe deux principes : la lixiviation statique et la lixiviation dynamique, qui se subdivisent elles-mêmes en différents types, tel que présenté dans le *Tableau 2*.

LIXIVIATION STATIQUE	
Type de lixiviation	Principe
En tas ( <i>heap leaching</i> )	Mise en tas de minerai concassé voire broyé sur une plate-forme imperméable. Irrigation du minerai avec une solution cyanurée pendant une période prolongée (semaines, mois ou années). Collecte du lixiviat (jus qui dissout l'or lorsqu'il percole depuis le sommet du tas) à la base du tas. Plus adapté à un minerai inclus dans une roche poreuse, contenant un or microscopique et à basse teneur.
En décharge ( <i>dump leaching</i> )	Même principe que précédemment, <u>mais</u> le minerai ne subit pas de concassage ou de broyage : il est mis en dépôt juste après son extraction. Type de lixiviation le plus économique possible.
En fosse ( <i>vat leaching</i> )	Installation du minerai broyé (grains de 0.1 à 2 mm) dans une « piscine » inondée par une solution cyanurée. Collecte des lixiviats en base de l'ouvrage.
LIXIVIATION DYNAMIQUE	
Type de lixiviation	Principe
En cuve (ou par agitation)	Minerai finement broyé, introduit sous forme de pulpe (consistant en un mélange d'eau et de minerai broyé) dans une série de cuves où il est mélangé avec la solution cyanurée. Agitation par voie mécanique et/ou par injection d'air.
En autoclave (ou intensive)	Même principe que précédemment, <u>mais</u> la température et la pression sont contrôlées. Lixiviation possible à haute pression. Particulièrement adapté pour les minerais complexes ou réfractaires.

Tableau 2 : Description synthétique des différents types de lixiviation

Le *Tableau 3* résume certaines caractéristiques des trois types de lixiviation les plus utilisées.

Méthode	STATIQUE		DYNAMIQUE
Type de lixiviation	En tas	En fosse	Par agitation
Teneur du minerai	Faible	Faible à moyenne	Élevée
Taille des grains	Grossier (dm-cm)	Moyen à fin (mm- $\mu$ m)	Fin (< 100 $\mu$ m)
Récupération de l'or	50 à 75 %	75 à 90 %	90 à 99 %
Durée de l'opération	Semaines	Semaines à jours	Jours à heures
Problématiques techniques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Récupération incomplète</li> <li>• Surfaces importantes</li> <li>• Nécessitant des plateformes imperméables</li> <li>• Gestion des conduites</li> <li>• Risques géotechniques pendant et après l'exploitation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Récupération incomplète</li> <li>• Coûts opératoires</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Préparation du minerai : broyage, décantation/ filtration</li> <li>• Coûts d'investissement élevés</li> <li>• Coûts opératoires élevés</li> <li>• Surveillance et contrôle continus des cuves et des conduites</li> </ul>

Tableau 3 : Comparaison des caractéristiques de trois types de lixiviation ; d'après (Lucion, 2011)

À l'échelle mondiale, la diminution des teneurs en or et la raréfaction des gisements facilement exploitables entraînent le **développement de la lixiviation en tas** (Mudder & Botz, 2004). Selon les auteurs, 15 à 30 % de la lixiviation au cyanure se ferait en tas. Une installation de lixiviation en tas peut être implantée dans un délai bien plus court que celle d'une lixiviation en cuve, pour environ un tiers du coût d'investissement. Cependant elle permet généralement de récupérer 25 % d'or en moins (Manning & Kappes, 2016 ; in *Gold Ore Processing*, p. 415).

L'emplacement idéal pour la lixiviation en tas est une zone désertique tempérée semi-aride, telle que la partie occidentale des États-Unis. Cependant, cette technique a été mise en œuvre dans des régions présentant des climats variés, y compris dans des climats tropicaux humides, où les précipitations peuvent dépasser 2.5 m par an (Manning & Kappes, 2016 ; in *Gold Ore Processing*, p. 418).

À ce jour, il n'y a **pas d'exploitation industrielle d'or par lixiviation in situ**. Cette technique, éprouvée en particulier dans l'exploitation de l'uranium et du cuivre, consiste à forer des puits de la surface vers le gisement, de soumettre ce dernier à une fracturation hydraulique et de d'y faire circuler une solution lixiviante qui est ensuite pompée vers la surface. Des études ont cependant été menées et ont donné des résultats démontrant la faisabilité de cette technique sous certaines conditions, notamment en Australie (Adams, 2016 ; in *Gold Ore Processing*, p. 988).

### 3.3. Récupération de l'or et obtention du produit fini

**Le traitement du minerai d'or ne se résume pas à la cyanuration**, c'est-à-dire à la mise en contact d'un minerai plus ou moins broyé avec une solution cyanurée. **Trois principales étapes s'avèrent nécessaires après cette phase : la récupération, l'électrolyse et le raffinage.**

### 3.3.1. Récupération

La lixiviation au cyanure permet de générer une solution chargée contenant quelques grammes d'or par m<sup>3</sup> et d'autres substances métalliques dissoutes. Afin d'extraire les substances d'intérêt de la solution, on réalise une adsorption<sup>20</sup> sur du **charbon actif ou de la résine synthétique**. À cet effet, plusieurs techniques existent, tel que présenté dans le *Tableau 4*. S'ensuivent une étape de désorption (ou « élution ») afin que l'or quitte le charbon sur lequel il est fixé, puis une étape de régénération qui consiste à « laver » le charbon actif afin qu'il puisse être de nouveau utilisé<sup>21</sup>.

Adsorption sur charbon actif	
<b>Carbon-in-pulp (CIP)</b>	Charbon introduit dans des cuves dédiées à la récupération de l'or. Lixiviation et adsorption réalisées <u>successivement</u> , dans des cuves séparées.
<b>Carbon-in-leach (CIL)</b>	Charbon introduit dans les cuves de lixiviation au cyanure. Lixiviation et adsorption réalisées <u>simultanément</u> , dans les mêmes cuves.
<b>Carbon-in-solution (CIS)</b>	Même principe que précédemment, <u>mais</u> un processus de filtration est ajouté.
Adsorption sur résines <sup>22</sup>	
<b>Resin-in-pulp (RIP)</b>	Lixiviation et adsorption réalisées <u>successivement</u> , dans des cuves séparées. Processus similaires entre l'adsorption sur résine et l'adsorption sur charbon actif, des particules de résines synthétiques remplaçant les grains de charbon.
<b>Resin-in-leach (RIL)</b>	Même principe que précédemment, <u>mais</u> lixiviation et adsorption réalisées <u>simultanément</u> , dans les mêmes cuves.

Tableau 4 : Description des différents types d'adsorption ; adapté d'après (Carton de Tournai, 2019)

**La récupération de l'or peut également être réalisée par précipitation avec du zinc**, le procédé le plus connu étant celui de « *Merrill-Crowe* ». Le principe est alors de mettre la solution chargée (issue de la lixiviation au cyanure) en contact avec du zinc métallique. L'or dissous et les autres métaux se déposent sur les particules de zinc, qui sont ensuite attaquées par de l'acide sulfurique pour libérer les métaux. Les minerais riches en argent sont de préférence traités par ce procédé.

### 3.3.2. Électrolyse

À l'issue de l'étape précédente, la solution liquide obtenue contient de l'or « dissous ». Pour le récupérer et le concentrer, on utilise la méthode de l'électrolyse, qui permet d'attirer tout l'or dissous sur une électrode pour en faire une boue métallique (SystExt, 2020).

### 3.3.3. Raffinage

Cette boue d'or est ensuite « fondue » à environ 1 500°C (Moisan & Blanchard, 2013). L'or obtenu se présente sous forme de lingots, avec une pureté de 90 à 95 %. Il est ensuite expédié vers d'autres installations de raffinage, afin de retirer les impuretés métalliques et d'obtenir un métal à 99,99%<sup>23</sup>.

<sup>20</sup> L'adsorption est un phénomène de surface par lequel des molécules se fixent sur une surface : l'adsorbant (le charbon actif ou la résine, ici).

<sup>21</sup> Ce dernier traitement est assuré par lavage à l'acide chlorhydrique ou à la soude puis par chauffage à des températures de 600 à 800°C.

<sup>22</sup> Par rapport à l'adsorption sur charbon actif, celle sur résines présente un coût d'investissement initial plus élevé mais dispose de trois avantages (Carton de Tournai, 2019) : (1) Le calibre des particules de résines synthétiques est plus régulier que les particules naturelles de charbon actif, facilitant le contrôle du processus. (2) Des meilleurs rendements sont obtenus pour les minerais réfractaires, ou ceux contenant beaucoup de composés argileux ou organiques. (3) Les résines sont plus robustes et n'ont pas besoin d'être renouvelées aussi souvent que le charbon actif, réduisant les coûts associés.

<sup>23</sup> De l'or au plus haut degré de pureté (à 99,999 %) peut être obtenu par affinage électrolytique à anode soluble (*procédé Wohlwill*).

### 3.4. Préparation du minerai et traitements complémentaires

Chaque gisement d'or dispose de caractéristiques spécifiques, qui dépendent en particulier : de la forme de l'or (libre et/ou lié), du type de minéraux qui portent l'or et qui composent le minerai, de la nature des roches encaissantes, etc. Ainsi, le plus souvent, les minerais d'or requièrent un **nombre conséquent de traitements physico-chimiques, avant même la mise en œuvre de la cyanuration**. Si chaque mine dispose de son propre schéma de procédés, des généralités peuvent être dressées sur les techniques les plus utilisées (les deux premières étant quasi-systématiquement mises en œuvre, que l'or soit libre ou soit lié) :

- Le **concassage** et le **broyage**<sup>24</sup> ;
- La **gravimétrie** consistant en un tri des particules entre elles, en valorisant la densité élevée de l'or par rapport aux autres minéraux, et permettant de séparer l'or uniquement lorsqu'il est sous forme libre ;
- La **flottation** permettant de concentrer les minéraux d'intérêt en les faisant « flotter »<sup>25</sup>, systématiquement utilisée lorsque l'or est associé à des sulfures métalliques (soit sous forme libre en inclusions fines, soit sous forme liée) ;
- Le **grillage** consistant à « brûler » le minerai, utilisé lorsque l'or est associé à des sulfures de fer, de nickel et d'antimoine, car il facilite les traitements ultérieurs en rendant le minerai poreux<sup>26</sup>.

On définit ainsi **trois catégories de minerai, selon la difficulté à en extraire l'or** et donc selon le type et le nombre d'étapes de traitement à opérer (Lunt & Weeks, 2016 ; in *Gold Ore Processing*, pp. 116-119) :

- Minerai exposé par broyage (*free-milling ore*) : L'or se présente sous forme libre. Après broyage, le minerai peut être traité par lixiviation en cuve voire par lixiviation en tas ;
- Minerai réfractaire (*refractory ore*) : L'or se présente sous forme liée. Il ne peut pas faire l'objet directement d'une cyanuration sans traitement préalable (flottation et grillage, notamment).
- Minerai complexe (*complex ore*) : Minerai intermédiaire entre les deux types précédents. Les procédés de traitement doivent être adaptés pour répondre à des enjeux tels qu'une consommation élevée en cyanure et/ou en oxygène au moment de la lixiviation.

Dans un contexte global de diminution des teneurs et de raréfaction des gisements facilement exploitables, **la récupération de l'or dans les minerais complexes et réfractaires est devenue un enjeu technologique majeur**. Les opérateurs miniers sont confrontés de façon croissante à ces deux types de minerai d'or. Parmi eux, sont particulièrement concernés les minerais (Lunt & Weeks, 2016 ; in *Gold Ore Processing*, pp. 116-119) :

- Riches en cuivre : qui sont quasi-systématiquement prétraités par flottation ou grillage ;
- Contenant de la matière organique : qui adsorbent naturellement l'or et concurrencent la récupération par le charbon actif ;

<sup>24</sup> Dans certains cas, des solutions cyanurées sont introduites dans les broyeurs, dès cette étape préliminaire.

<sup>25</sup> Les minéraux d'intérêt sont rendus hydrophobes par l'ajout de « collecteurs ». En présence de bulles d'air, les particules hydrophobes s'y fixent et remontent ainsi à la surface. Ce transport sélectif sépare donc les minéraux d'intérêt, des autres, qui restent en suspension dans la pulpe (consistant en un mélange d'eau, de réactifs et de minerai broyé). Pour stabiliser la mousse en surface, on ajoute un « moussant ». Un « déprimant » est également parfois introduit afin de rendre hydrophiles les phases minérales que l'on ne veut pas flotter.

<sup>26</sup> Le grillage est de plus en plus remplacé soit par une lixiviation en autoclave, soit par une biolixiviation (L'Élémentarium, *Fiche Or*).

- Riches en sulfures : ces derniers s'oxydant spontanément et diminuant la concentration en oxygène dans les cuves de lixiviation ;
- Associés à du mercure : qui est régulièrement présent dans les gisements d'or<sup>27</sup>.

La Figure 2 synthétise les principales étapes de traitement (décrites précédemment) qui peuvent être réalisées sur un minerai d'or.

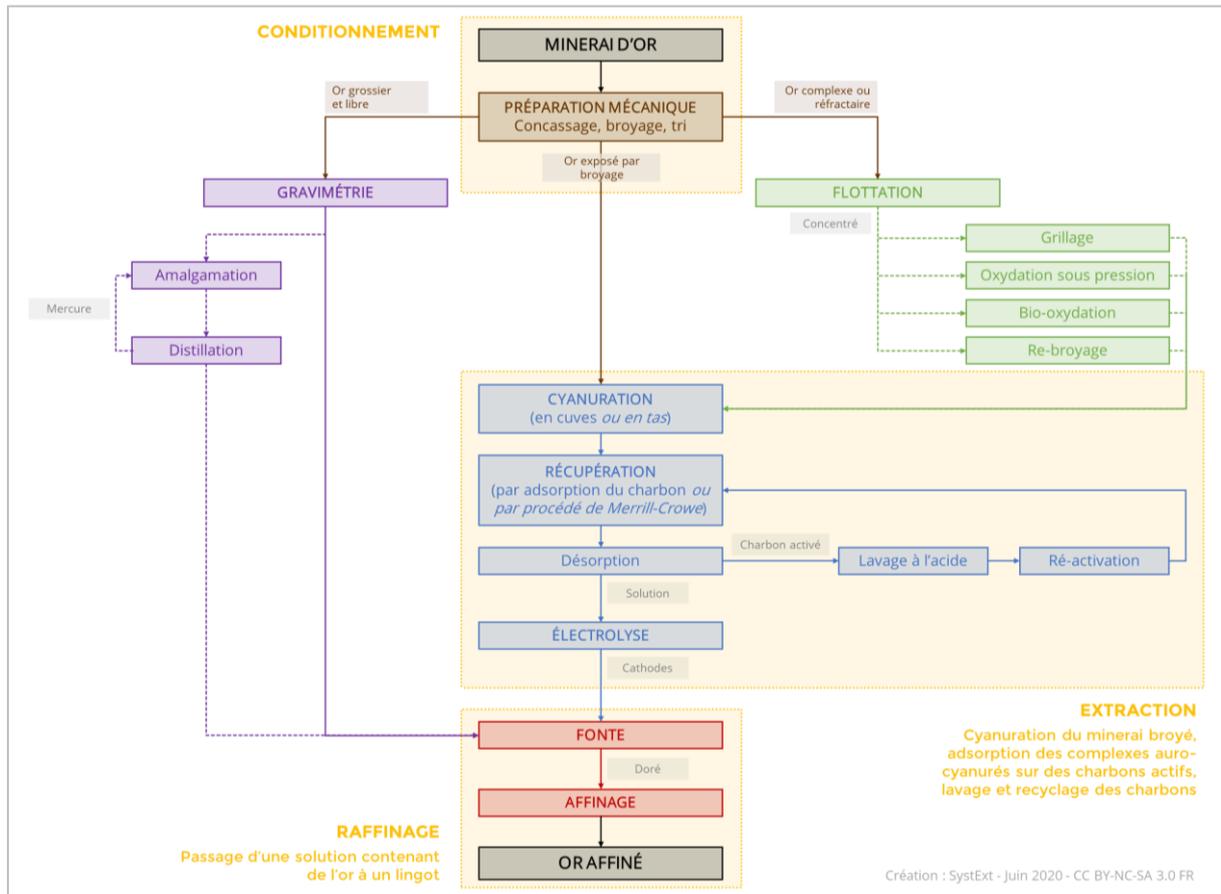


Figure 2 : Étapes de traitement qui peuvent être réalisées sur un minerai d'or ; (SystExt, 2020) modifié et traduit d'après (Norgate & Haque, 2012)

SystExt souhaite **insister sur l'importance et la pluralité des procédés mis en œuvre avant et après la cyanuration**, d'autant qu'il est attendu que les procédés de traitement se complexifient, avec l'augmentation de cas de minerais complexes et réfractaires, tel qu'expliqué précédemment. En effet, la mise en place de ces procédés requiert de nombreux réactifs chimiques et des installations de traitement de plus en plus sophistiquées, auxquelles sont nécessairement associées des quantités importantes d'effluents et de déchets miniers. **Si la lixiviation au cyanure constitue déjà un défi puisqu'il s'agit de limiter les risques associés à l'utilisation de cette substance dangereuse (tel que détaillé dans le chapitre 5 p. 17), la complexification de cette étape du traitement, des étapes qui la précèdent et de celles qui la suivent, soulèvent de nouveaux enjeux technologiques en termes de maîtrise des impacts et de limitation des risques.**

<sup>27</sup> Il est fréquent que le mercure se présente alors sous forme de cinabre, un sulfure de mercure. Pour éviter sa dissolution lors de la lixiviation au cyanure, il est nécessaire de la faire précipiter. D'autres précautions doivent être prises, car cette substance peut persister dans toutes les étapes du traitement, jusqu'à l'électrolyse ou encore jusqu'à la régénération du charbon (Lunt & Weeks, 2016 ; in *Gold Ore Processing*, p. 118).

## 4. Cyanures et toxicité

### 4.1. Types de cyanures et toxicités associées

En solution, après réaction avec le minerai, plusieurs types de cyanures se forment, que l'on peut regrouper en quatre catégories (Moisan & Blanchard, 2013 ; Moran, 1999) :

- Les **cyanures libres** : Sont concernés le cyanure libre ( $\text{CN}^-$ ) et le cyanure d'hydrogène (HCN), en phase liquide ou gazeuse. Il s'agit de la forme la plus toxique des cyanures.
- Les **cyanures simples** : Ces composés ioniques<sup>28</sup> associent l'ion cyanure et un cation (comme le sodium, le calcium, le zinc ou le cuivre). Bien qu'ils soient plus ou moins solubles, ils peuvent se dissocier dans l'eau et libérer leurs ions.
- Les **complexes cyanurés** : Ces complexes<sup>29</sup> associent l'ion cyanure et un cation métallique (zinc, cuivre, cadmium, nickel, argent, fer, etc.).
- Les **produits de dégradation** : Sont concernées les substances issues de l'oxydation du cyanure<sup>30</sup>, en particulier les cyanates ( $\text{CNO}^-$ ) et les thiocyanates ( $\text{SCN}^-$ ).

Du point de vue réglementaire, une autre classification est définie et reconnue à l'échelle internationale :

- Les cyanures libres (*free cyanide*), regroupant les cyanures libres et les cyanures simples ;
- Les cyanures facilement libérables (*weak acid dissociable - WAD*), regroupant une grande partie des complexes cyanurés ;
- Les cyanures totaux (*total cyanide*), regroupant les trois premières catégories (hors produits de dégradation).

Ces différents types de cyanures présentent des toxicités variables. On rappelle que **la toxicité d'une substance se définit comme sa capacité à provoquer des effets néfastes pour la santé humaine ou pour toute forme de vie**<sup>31</sup>. Il s'agit d'une propriété intrinsèque, c'est-à-dire qu'elle ne dépend pas de la gravité des impacts connus ou du nombre d'accidents répertoriés. Le cyanure est connu pour sa capacité à agir comme un poison violent (Moisan & Blanchard, 2013, p. 16) :

« Ses effets toxiques les plus graves se produisent à l'intérieur des organismes et sont dus à la combinaison de  $\text{CN}^-$  avec le fer de l'hémoglobine empêchant l'oxygénation du sang. »

La toxicité et l'écotoxicité des principaux types de cyanures sont très largement documentées et ne sont pas contestées (INERIS, 2011a ; Donato, et al., 2007). Bien que généralement moins toxiques que les autres types de cyanures (et moins documentés), les **produits de dégradation sont connus pour être toxiques pour les organismes aquatiques** et peuvent persister dans l'environnement pendant de longues périodes (Moran, 1999).

<sup>28</sup> Un composé ionique est un composé chimique créé par l'association d'ions.

<sup>29</sup> Un complexe est constitué d'une ou de plusieurs entités indépendantes (ions ou molécules), en interaction.

<sup>30</sup> D'autres substances, générés lors de la dégradation des cyanures entrent dans cette catégorie comme : le cyanogène (NC-CN), le chlorure de cyanogène (CICN), la chloramine ( $\text{NH}_2\text{Cl}$ ), les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) et l'ammoniaque ( $\text{NH}_3$ ).

<sup>31</sup> On parle alors « d'écotoxicité ».

**L'étude de la toxicité des cyanures se concentre souvent sur la faune aquatique**, étant donné qu'il s'agit des espèces les plus sensibles à ces substances. En effet, les poissons sont tués par des concentrations en cyanure de l'ordre du microgramme par litre, alors que les oiseaux et les mammifères sont généralement tués par des concentrations en cyanure de l'ordre du milligramme par litre, soit 1 000 fois supérieures (Moran, 1999).

Afin d'appréhender cette question, on peut se baser sur la **CL<sub>50</sub>** ou « **concentration létale à 50%** ». Cette valeur (en mg/L) désigne la concentration d'un produit chimique dans l'air ou dans l'eau qui cause la mort de 50% des animaux. Le *Tableau 5* présente la CL<sub>50</sub> de plusieurs types de cyanures pour les poissons, qui sont organisés selon les quatre catégories et les trois classes précédemment décrites. La toxicité (« Tox. ») la plus élevée y est schématisée par la couleur rouge, et la plus faible, par la couleur orange clair.

Catégorie	Classification internationale	Composés concernés	Tox.	CL <sub>50</sub> en mg/L
Cyanures libres	Cyanures libres	CN <sup>-</sup>		~ 0.1
		HCN		0.05 – 0.18
Cyanures simples	Cyanures libres	KCN(s), Ca(CN) <sub>2</sub> (s)		0.03 – 0.08
		NaCN.2H <sub>2</sub> O(s) <sup>32</sup>		0.40 – 0.70
Complexes cyanurés	Cyanures facilement libérables (WAD)	CuCN(s), Zn(CN) <sub>2</sub> (s), Ni(CN) <sub>2</sub> (s),		
		Cd(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Cu(CN) <sub>2</sub> <sup>-</sup> , Cu(CN) <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , Ag(CN) <sub>2</sub> <sup>-</sup>		
		Zn(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		0.18
		Ni(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		0.42
	Intégrés dans les cyanures totaux	Cu(CN) <sub>3</sub> <sup>2-</sup>		0.71
		Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>4-</sup>		35 (jour) 860-940 (nuit)
Produits de dégradation	Non concernés	Thiocyanates SCN <sup>-</sup>		50-200
		Cyanates CNO <sup>-</sup>		34-54

Tableau 5 : Classification et caractéristiques en termes de toxicité des différents types de cyanures rencontrés sur les sites miniers (du haut vers le bas du tableau : stabilité croissante et toxicité décroissante) ; adapté de (Moisan & Blanchard, 2013)

## 4.2. Analyse et diagnostic insuffisants des composés cyanurés

Un grand nombre des composés cyanurés du *Tableau 5 précédent* n'est pas surveillé sur les sites miniers, car **cela n'est pas demandé par les organismes de réglementation nationaux et internationaux** (Moran, 1999). En surveillance routinière, les procédures analytiques réalisées sur les échantillons d'eau (ou de sol) fournissent seulement des valeurs pour les trois classes référencées à l'international : les cyanures libres, les cyanures facilement libérables (WAD) et les cyanures totaux. De plus, **ces protocoles analytiques ne sont généralement pas adaptés à la détermination de la présence des produits de dégradation et en particulier les cyanates et les thiocyanates** (Moisan & Blanchard, 2013), qui présentent pourtant une toxicité avérée pour les organismes aquatiques.

Moran (1999) confirme ce constat et alerte sur la sous-estimation potentielle des impacts associés sur l'environnement et sur les organismes aquatiques.

<sup>32</sup> « (s) » signifie que le composé est solide.

## 5. Principaux risques technologiques

Lorsqu'il est question de risques technologiques, il est fréquent que la problématique ne soit jugée qu'à la lumière de la probabilité de survenue d'un accident. Une telle approche ne prend pas en compte la définition stricte du risque, c'est-à-dire le croisement d'une probabilité d'occurrence d'un phénomène (qu'il soit accidentel ou chronique), par la gravité de celui-ci. Ainsi, le risque est le même pour un événement peu grave qui pourrait se produire souvent, que pour un événement très grave qui a très peu de chance de se produire. **Dans le cas des risques technologiques associés au cyanure, et compte-tenu de l'extrême gravité de certains phénomènes, la diminution du risque n'est possible qu'en réduisant à son maximum (voire à zéro) leur probabilité de survenue.**

### 5.1. Risques liés au transport

Les sels de cyanure solides (tel que le cyanure de sodium, très utilisé sur les sites miniers) font partie de la liste des marchandises dangereuses de l'ONU. En application du *Règlement type des recommandations des Nations Unies relatives aux transport des matières dangereuses*, ces substances font l'objet de prescriptions réglementaires pour leur emballage et de dispositions spécifiques pour leur transport (INERIS, 2018).

En cas d'accident, l'ampleur des conséquences dépend du contexte de la zone concernée (climat, hydrographie, urbanisation, etc.), des quantités transportées, des mesures de gestion prises et du délai d'intervention (Australian Government, 2010). Il est généralement plus difficile de contenir et de traiter des rejets dus à un accident lorsque les sels cyanurés se trouvent sous forme liquide, c'est une des raisons pour laquelle la forme solide est privilégiée (Australian Government, 2010 ; Fleming, 2016 ; in *Gold Ore Processing*, p. 660). Néanmoins, en cas de déversement ou de fuite, et en contexte de pluie ou en présence d'eau à la surface du sol, la forme solide se dissout rapidement, avec pour conséquence potentielle la dispersion des composés cyanurés par ruissellement (Australian Government, 2010).

**Le transport de sels de cyanure peut s'effectuer par voie aérienne, maritime, fluviale, ou terrestre (ferroviaire ou routière).** L'accidentologie connue est majoritairement concernée par ce dernier mode de transport, représentant 10 des 18 accidents recensés entre 1983 et 2016 (6 accidents impliquant un train, 1, un hélicoptère, et 1, un bateau) (INERIS, 2018). Au regard des distances parcourues et des temps de trajet concernés, le nombre d'accidents est relativement faible (Australian Government, 2010).

Les incidents peuvent avoir lieu lors du chargement ou du déchargement des matériaux, mais aussi plus classiquement par un accident de la circulation : déraillement de train, collision entre bateaux, renversement de camion, etc. (INERIS, 2018).

#### Kirghizistan, 1998

Un accident de camion transportant du cyanure de sodium (NaCN) vers la mine d'or de Kumtor a provoqué le déversement d'environ 2 tonnes de cette substance dans la rivière *Barskaun*. Les autorités ont fait état de 2 morts et de 2 500 personnes intoxiquées. Cet événement entraîna également la mort et l'intoxication d'une grande partie de la vie aquatique des cours d'eau contaminés, ainsi que des prédateurs qui en dépendent. La zone fut évacuée environ 2 semaines après l'accident, bien après que la concentration en cyanure dans les rivières ait atteint des valeurs « sûres ». (Australian Government, 2010 ; PNUE & GRID-Europe, 2016 ; INERIS, 2018)

#### Chine, 2000

Un camion-citerne est tombé dans la rivière *Dan*, engendrant un déversement de cyanure. La faune et la flore ont été affectées gravement sur une distance d'au moins 14 km le long du cours d'eau. Une alerte à la consommation d'eau et de poisson a été émise jusqu'à une distance de 250 km. (INERIS, 2018)

## 5.2. Risques liés aux installations minières

### 5.2.1. Généralités

Les accidents liés à l'utilisation du cyanure dans l'industrie minière se produisent quelle que soit la région du monde considérée, la richesse du pays et la taille de l'entreprise (Mudder & Botz, 2004).

Aux États-Unis, en 1991, une étude réalisée par le *General Accounting Office (USGAO)* sur 119 mines de métaux précieux en activité et ayant recours au cyanure, a recensé la **survenue de 31 rejets involontaires** (Mudder & Botz, 2004).

Dans l'ouest de l'Australie, entre 1994 et 2003, 75 incidents impliquant du cyanure ont été rapportés auprès du *Department of Industry and Resources* (Australian Government, 2010). **75% sont survenus dans des usines de traitement du minerai d'or pendant le déchargement, la manutention, le mélange des réactifs, les opérations de traitement, de nettoyage et d'entretien, ou résultaient d'une défaillance des équipements (tels que des fuites au niveau des cuves ou des conduites).** Même si ces incidents impliquaient le rejet de solutions ou de vapeurs de cyanure, ils ont été rattachés uniquement à une problématique de santé et sécurité au travail (Australian Government, 2010). **25% impliquaient le rejet (avéré ou potentiel), dans l'environnement de solutions cyanurées** (Australian Government, 2010).

A ce titre, des experts contactés par SystExt en mars 2021 ont indiqué que des incidents liés à l'utilisation de cyanure survenaient effectivement dans les usines de traitement du minerai d'or. Il a été précisé qu'ils n'étaient pas nécessairement déclarés auprès des autorités compétentes, car considérés comme relevant de la santé et sécurité au travail, et donnant lieu à des actions préventives ou correctives internes à l'entreprise minière.

### 5.2.2. Risques liés aux inhalations de gaz ou de poussières

Le cyanure d'hydrogène (HCN) et les ions cyanures (CN<sup>-</sup>) ont le même mécanisme d'action sur le corps humain. En revanche, ils ne pénètrent pas dans l'organisme de la même manière (RECORD, 1995, p. 13) :

« L'acide cyanhydrique est absorbé par voie pulmonaire alors que les ions cyanure le sont par voie digestive ou cutanée. »

**Une attention toute particulière doit donc être portée au risque de dégagements gazeux de cyanure d'hydrogène, qui est aisément absorbable et extrêmement toxique.** C'est notamment pour cette raison que le pH doit être maintenu à un pH élevé (au-dessus de 10) dans les cuves de lixiviation (voir § 3.1 p. 9). À ce dernier risque, s'ajoute celui de l'inhalation de poussières toxiques dégagées par les sels de cyanure, lors du déchargement des conteneurs de transport ou de leur manutention dans l'usine de traitement, par exemple (Fleming, 2016 ; in *Gold Ore Processing*, p. 660).

Les environnements de travail doivent être aérés, le personnel doit être muni d'équipements de protection individuelle adaptés et toute manipulation doit se faire avec beaucoup de précaution.

Bien que l'exposition potentielle des travailleurs au cyanure soit relativement élevée dans l'industrie minière, il y aurait eu environ une demi-douzaine de décès accidentels dans le monde au cours du siècle dernier (Mudder & Botz, 2004).

### 5.2.3. Risques liés au stockage de produits cyanurés

**Il est également impératif que le stockage du cyanure de sodium se fasse dans un environnement sec.** En effet, le cyanure de sodium peut réagir violemment avec l'eau et générer du cyanure d'hydrogène (HCN) - qui a la particularité d'être très inflammable en plus d'être toxique - et de la soude caustique (NaOH), qui est très corrosive. Une des implications importantes concerne la gestion du risque d'incendie. Dans le cas où un feu se déclare dans un centre de stockage de sels de cyanure (comme le cyanure de sodium), il n'est pas possible d'utiliser de l'eau pour l'éteindre ou le maîtriser.

#### Chine, 2015

Sur la zone industrielle de Tianjin au nord-est du pays, un incendie s'est déclaré dans un entrepôt contenant notamment du cyanure de sodium. Deux explosions ont eu lieu, provoquant des dommages matériels graves dans un rayon de 3 km. L'intervention des pompiers a été complexifiée compte-tenu de la présence de produits cyanurés, car l'utilisation de l'eau pouvait accentuer le risque d'explosion. A cette problématique, se sont ajoutées le dégagement (non quantifié) de cyanure d'hydrogène. Le bilan officiel après 24 heures était de plus de 50 morts (dont 12 pompiers) et plus de 700 blessés (**Le Monde, 12/08/2015**)

### 5.2.4. Risques liés aux déversements de fluides cyanurés

**La plupart des rejets de cyanure proviennent de la défaillance ou de l'endommagement du matériel qui équipe les installations de traitement du minerai d'or** (**Australian Government, 2010**).

Ces phénomènes peuvent se produire au niveau des cuves de lixiviation, des unités de stockage, des conduites, etc. Ils peuvent être aggravés par des erreurs humaines ou des facteurs climatiques (notamment en cas de gel).

Les conséquences peuvent être le déversement de fluides cyanurés dans l'enceinte de l'usine voire en extérieur, dans des volumes s'étalant généralement de 100 L à 25 000 L (**Australian Government, 2010**). Cependant, dans certains cas plus rares, les volumes peuvent être de l'ordre de 200 000 L à 500 000 L (**Australian Government, 2010**).

#### Australie, 2000

Le Département des Ressources Naturelles, des Mines et de l'Énergie du Queensland a fait état d'un accident dans une usine de traitement de l'or, lié à la défaillance d'une cuve de lixiviation au cyanure de 200 m<sup>3</sup>. L'origine se trouve dans la combinaison de deux phénomènes : une corrosion ayant affaibli la base de la cuve, et de fortes pressions en jeu. Cette cuve - ainsi qu'une autre à laquelle elle était connectée, de 200 m<sup>3</sup> également - se sont alors vidées dans un espace aménagé pour retenir une fuite. Cependant, celui-ci n'avait pas été dimensionné pour contenir le rejet d'un tel volume. Un débordement d'environ 50 m<sup>3</sup> d'une solution très toxique (contant 70 µg/L de cyanures libres) s'est donc produit. (**Australian Government, 2010**)

#### Argentine, 2015-2017

En septembre 2015, dans la mine d'or et d'argent de Veladero, une conduite d'acheminement, entre l'usine principale et une aire de traitement par lixiviation, a rompu. Le volume total de solutions cyanurées déversées s'élevait à 1 million de litres. Il s'agit du plus grand accident minier de l'histoire du pays. Dans les 18 mois, deux autres incidents se sont produits, dont la défaillance d'une conduite transportant du minerai en cours de traitement. (**La Nación, 14/09/2015 ; La Nación, 29/03/2017 ; Equal Times, 07/07/2017**)

## 5.3. Risques liés aux effluents et déchets miniers

### 5.3.1. Pollution chronique des eaux de surface et des eaux souterraines

Au-delà des risques technologiques (majoritairement accidentels) présentés précédemment, il apparaît que **le principal risque associé à l'utilisation de cyanure dans l'industrie aurifère soit le risque de pollution des eaux de surface et des eaux souterraines** (Moran, 1999, p. 1) :

« While it is reasonable to be concerned about the acute poisoning of humans and other organisms from mining-related accidents, the more common environmental problems are likely to result from the chronic contamination of surface and ground waters by lower concentrations of cyanides and related breakdown compounds. »

Le traitement du minerai d'or est à l'origine de volumes considérables de déchets miniers pouvant contenir des cyanures, qui résultent :

- De la mise en dépôt de matériaux pour la lixiviation statique (en tas, en décharge ou en fosse, voir § 3.2 p. 10) ;
- Du traitement du minerai d'or sur lequel auront été réalisées des opérations de lixiviation au cyanure et/ou des prétraitements par gravimétrie, flottation, grillage (voir § 3.2 p. 10 et § 3.4 p. 13).

Ces aires de stockage de déchets miniers - respectivement appelées « bassins de lixiviation » et « parcs à résidus » - peuvent présenter des surfaces très importantes (pouvant atteindre plusieurs kilomètres carrés), et sont le plus souvent recouvertes d'une couche d'eau. Ces eaux, dites « surnageantes », contiennent des quantités plus ou moins importantes de cyanure (qui présente des formes variables, voir § 4.1 p. 15).

Ainsi, si l'on prend en compte les installations minières (usines, cuves, conduites, etc.) et ces aires de stockage, de grandes quantités d'eau contenant des composés cyanurés peuvent donc être transportées et stockées sur un site minier et peuvent donner lieu à des déversements dans l'environnement (tel que notamment présenté en § 5.2.4 p. 19).

**Des phénomènes de ruissellement, d'érosion, de fuites et d'infiltration, peuvent se produire au niveau et dans l'environnement des aires de stockage de déchets miniers.** Ces défaillances chroniques sont bien moins mises en exergue que les phénomènes de rupture dont les effets sont immédiats et probants. Par ailleurs, les conséquences des pollutions cyanurées qu'elles engendrent sont plus difficiles à analyser (Moran, 1999, p. 1) :

« Such chronic releases are much more difficult to notice and evaluate than are acute, high concentration spills that are often associated with rapid, observable deaths of aquatic organisms. Also, because mining-related waste waters are usually complex mixes of cyanides, metals, organic reagents and other anions, it is difficult to determine which chemical constituents are causing the toxicity problems. »

### 5.3.2. Ruptures des aires de stockage de déchets miniers

Les ruptures des aires de stockage de déchets miniers (bassins de lixiviation ou parcs à résidus) représentent une problématique récurrente dans l'industrie minière. **Le phénomène a pour conséquence de déverser brutalement des quantités importantes d'eaux et de boues dans l'environnement.** Les défaillances entraînant ces phénomènes peuvent être d'origines diverses : un débordement depuis le haut de l'aire de stockage, une instabilité de pente, une rupture de l'ouvrage de retenue, des instabilités internes, des précipitations exceptionnelles, des tremblements de terre, etc. (INERIS, 2018).

Cependant, nombre d'observateurs alertent sur les **erreurs humaines commises** (manque de surveillance, vétusté des installations ou encore charge en déchets miniers supérieure à la charge maximale), qui seraient dans les faits à l'origine de la majorité des ruptures (PNUE & GRID, 2017, p. 10) :

« The comprehensive 2001 ICOLD report established an urgent need for the reform of tailings storage-facility planning, management and regulation. The authors found that **all 221 failures examined were avoidable** – that the technical knowledge to build and maintain tailings storage facilities existed, but that **an inadequate commitment to safe storage combined with poor management was the cause of most failures.** »

Dans ce cadre, **les mines d'or présentent des spécificités par rapport aux autres mines métalliques** :

- **La présence de composés cyanurés** ;
- L'installation possible de deux types d'aires de stockage de déchets miniers : les bassins de lixiviation (qu'on trouve surtout dans les mines d'or et les mines de cuivre) et les parcs à résidus.

Ces deux facteurs augmentent la gravité potentielle des impacts en cas de rupture, tel que le montre le cas de la rupture de Baia Mare en 2000 (*voir l'encadré-ci-dessous*). En effet, alors que la même zone a subi, en l'espace de 2 mois, les effets de deux ruptures au niveau de parcs à résidus installés respectivement dans une mine d'or et dans une mine de plomb-zinc, c'est celle associée à la mine d'or qui a été le plus dommageable.

#### **Roumanie, 2000**

En février 2000, la digue d'un parc à résidus de la mine d'or de Baia Mare, dans le comté de Maramures, s'est rompue. La défaillance aurait été causée par la combinaison d'une mauvaise conception de l'ouvrage, des conditions d'exploitation imprévues et de fortes précipitations, qui a entraîné un débordement. Deux mois plus tard, cette rupture a été suivie d'une autre rupture de digue, sur la mine de plomb-zinc de Borsa. Ces deux accidents ont entraîné le déversement de plus de 200 000 mètres cubes d'eau contaminée et de 40 000 tonnes de résidus dans les affluents de la rivière Tisza, un affluent majeur du Danube. **Le déversement de Baia Mare a été le plus dommageable des deux incidents, libérant 50 à 100 tonnes de cyanure, ainsi que du cuivre et d'autres métaux lourds, ce qui en fait la pire catastrophe environnementale en Europe depuis Tchernobyl.** Sur une période de quatre semaines, les déversements ont traversé la Roumanie, puis la Hongrie, la Serbie et la Bulgarie, avant de se jeter dans la mer Noire. La rupture de Baia Mare a créé une vague de contaminants de 30 à 40 kilomètres de long qui a anéanti la flore et la faune de la rivière Tisza centrale. Le plancton a été tué instantanément ; les poissons ont été tués dans le panache ou sont morts peu après. Dans la partie hongroise de la rivière, l'impact a été particulièrement grave : on estime que 1 240 tonnes de poissons ont été tués. (PNUE & GRID, 2017)

#### **5.3.3. Contamination et mortalité de la faune**

Comme expliqué précédemment, les aires de stockage de déchets miniers constituent des réserves d'eau, auxquelles les animaux peuvent parfois facilement accéder. Ils peuvent même représenter des zones où s'installent de nombreuses espèces faunistiques, qui peuvent alors être contaminées (Australian Government, 2010, p. 90) :

« Although the TSFs and associated infrastructure that receive cyanide-containing waste materials from ore processing facilities (and heap leach operations) represent highly disturbed ecological areas, there is ample evidence to indicate that **these facilities have the potential to provide habitat for wildlife such as birds, mammals, reptiles, amphibians and invertebrates.** »

**C'est pourquoi des mesures doivent être mises en œuvre pour empêcher l'accès à ces aires de stockage, en particulier pour l'avifaune et les chiroptères qui sont probablement les espèces les plus affectées.**

A titre illustratif, entre 1980 et 1989, 7 000 oiseaux morts ont été retrouvés dans les bassins de lixiviation des mines d'or dans l'ouest des États-Unis (Eisler & Wiemeyer, 2004 ; Mudder & Botz, 2004).

Nombre d'auteurs alertent par ailleurs sur l'insuffisance des infrastructures de protection (Donato et al., 2007 ; Australian government, 2010).

#### États-Unis, 1983-1995

Dans le Dakota du Sud, entre 1983 et 1992, plus de 1 000 oiseaux d'une cinquantaine d'espèces différentes sont morts au niveau de la mine d'or de Black Hills. En effet, les parcs à résidus contenant des eaux cyanurées étaient insuffisamment protégés et l'avifaune s'y abreuvait. De plus, quelques années plus tard (en 1995), un bassin de lixiviation s'est effondré après de fortes pluies. Cet accident a notamment provoqué la mort de nombreux poissons. (Eisler & Wiemeyer, 2004)

Actuellement, peu de cas de mortalité étendue (concernant des centaines ou des milliers d'animaux) sont rapportés. Cependant, on estime que les sites miniers ne sont pas assez surveillés et que trop peu de données sont publiées pour connaître l'impact réel sur la biodiversité (Donato et al., 2007). Il pourrait y avoir bien plus d'animaux empoisonnés que ce qui est officiellement annoncé (Donato, et al., 2007, p. 979) :

« Some unpublished data exists at most gold mines but are usually not publicly available. Reports of wildlife deaths are often unconfirmed [...], underestimated, poorly measured [...] or exceed previous estimates [...]. »

#### 5.3.4. Cas particulier des déversements volontaires

Certains sites miniers ne déversent pas leurs résidus miniers dans des aires de stockage dédiées (comme des parcs à résidus) mais directement dans l'environnement. **Cette pratique est appelée le « déversement volontaire » et peut être effectuée en milieu fluvial, lacustre ou maritime.** Selon les auteurs, on estime qu'une vingtaine de sites miniers dans le monde y auraient recours, certains extrayant de l'or.

**Dans le cas des sites miniers aurifères ayant recours à la cyanuration pour le traitement du minerai ainsi qu'au déversement volontaire pour la gestion de leurs résidus, il est donc inévitable que des composés cyanurés soient rejetés dans les eaux de surfaces concernées.** S'agissant d'un procédé particulièrement destructeur pour la faune et la flore aquatique, l'effet dû spécifiquement à la présence de cyanure n'est cependant pas discriminé, par rapport à la présence de grandes quantités de matières solides ou à la présence de métaux et métalloïdes.

Ces dernières années, on note le développement du déversement volontaire en eaux profondes (*submarine tailings disposal*). Eddinger (2012), qui a spécifiquement étudié les impacts de cette pratique dans l'industrie aurifère, note à ce titre que les effets des composés cyanurés sur la faune et la flore des eaux profondes sont encore très peu connus.

## 6. Gestion des effluents et des déchets miniers

### 6.1. Objectifs du traitement du cyanure

Tel que rappelé dans le § 5.3.1 p. 20, de grandes quantités d'eaux et de boues contenant des composés cyanurés peuvent être transportées et stockées sur un site minier. Il s'agit :

- Des résidus miniers<sup>33</sup> provenant des opérations de cyanuration ;
- Des eaux de procédé, c'est-à-dire des solutions provenant des opérations de lixiviation statique ou dynamique<sup>34</sup> ;
- Des eaux surnageantes<sup>35</sup> des aires de stockage de déchets miniers ;
- Des eaux de ruissellement et d'infiltration collectées au niveau et dans l'environnement des aires de stockage de déchets miniers.

**Afin de limiter l'impact environnemental en cas de déversement, voire de rupture, de nombreux pays ont durci leur réglementation en ce qui concerne la concentration en cyanure des eaux et boues évacuées dans les aires de stockage. Ils ont fait de même pour les eaux rejetées dans l'environnement.**

À titre d'illustration, la réglementation française impose :

- Une valeur limite de rejet en cyanure facilement libérable (WAD) de 10 mg/kg au point de déversement des résidus miniers dans une aire de stockage ([Arrêté du 19/04/2010 ; Art. 19 et Annexe IV](#)) ;
- Une valeur limite de 0.1 mg/L en cyanure pour les rejets d'effluents liquides dans le milieu naturel ([Arrêté du 19/04/2010 ; Annexe III](#)).

Afin de diminuer les concentrations dans les effluents et les déchets miniers, les exploitants miniers réalisent donc de plus en plus fréquemment des **opérations de traitement de ces eaux et matériaux cyanurés**. Il existe deux méthodes pour ce faire : la destruction du cyanure et le recyclage du cyanure.

### 6.2. Destruction du cyanure

#### 6.2.1. Principe et principaux procédés

La destruction du cyanure ne consiste pas en une « suppression » des composés cyanurés, mais en leur **dégradation en des formes moins toxiques**, généralement en cyanate. Il existe un grand nombre de procédés de destruction du cyanure, qui dépendent notamment des caractéristiques physico-chimiques des effluents ou des déchets à traiter.

Le *Tableau 6 page suivante* présente les principaux procédés de destruction du cyanure, mis en œuvre à l'échelle industrielle.

<sup>33</sup> Rejets générés à chaque étape de traitement du minerai se présentant sous forme de boues, et dont la fraction solide est composée de grains très fins, classiquement de l'ordre de 100 µm.

<sup>34</sup> Pour rappel les différents types de lixiviation statique ou dynamique sont décrits dans le *Tableau 2 p. 10*.

<sup>35</sup> Couche d'eau recouvrant les aires de stockages de déchets miniers.

Procédé	A1 <sup>36</sup>	A2 <sup>36</sup>	Principe	Avantages	Inconvénients
<b>Atténuation naturelle</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>Réaction : ozone + cyanure = cyanate + oxygène</li> <li>Plusieurs phénomènes concomitants, le principal étant le dégagement de cyanure d'hydrogène</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilisation très simple</li> <li>Coûts d'investissement et opérationnels faibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cinétique<sup>37</sup> qui peut être lente</li> <li>Réactions qui peuvent être limitées (<i>voir § 6.2.2 ci-dessous</i>)</li> </ul>
<b>Oxydation biologique</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>Transformation par des bactéries</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coûts opérationnels relativement faibles</li> <li>Dégradation de plusieurs composés simultanément, y compris les thiocyanates</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nécessite des flux d'eaux continus et des températures supérieures à 10°C</li> <li>Remobilisation possible des métaux par adsorption sur la matière organique ou par précipitation</li> </ul>
<b>Chloration alcaline</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>Réaction en deux étapes : dichlore + cyanure = chlorure de cyanogène + chlore, puis chlorure de cyanogène + eau = cyanate + chlore.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilisation simple</li> <li>Dégradation de certains complexes cyanurés métalliques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consommation élevée en réactifs</li> <li>pH &gt; 10,5 afin d'éviter le dégagement de chlorure de cyanogène, hautement toxique</li> <li>Peut laisser du chlore résiduel en solution</li> </ul>
<b>Dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et air<sup>38</sup></b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>Réaction : dioxyde de soufre + oxygène + eau + cyanure = cyanate + sulfate</li> <li>pH compris entre 8 et 10</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dégradation de certains complexes cyanurés métalliques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilisation difficile</li> <li>Requiert du cuivre en solution comme catalyseur</li> <li>Pas de dégradation des thiocyanates</li> </ul>
<b>Peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>Réaction : peroxyde d'hydrogène + cyanure = cyanate + eau</li> <li>pH compris entre 9 et 9,5</li> <li>Adapté pour des concentrations en cyanure faibles à modérées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilisation relativement simple</li> <li>Aucune production de gaz toxiques</li> <li>Dégradation de certains complexes cyanurés métalliques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consommation élevée en réactifs</li> <li>Requiert du cuivre en solution comme catalyseur</li> <li>Pas de dégradation des thiocyanates</li> </ul>
<b>Acide de Caro (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)<sup>38</sup></b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>Réaction : acide de Caro + cyanure = cyanate + sulfate</li> <li>pH compris entre 9 et 9,5</li> <li>Adapté pour des concentrations en cyanure faibles à modérées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cinétique très rapide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acide de Caro instable qui nécessite d'être produit sur site</li> <li>À température ambiante, l'acide de Caro peut générer du trioxyde de soufre, hautement toxique et corrosif</li> </ul>

Tableau 6 : Principaux procédés de destruction du cyanure, mise en évidence de certains avantages et inconvénients ; d'après (Botz et al., 2016 ; in *Gold Ore Processing*, pp. 621-629 ; SGS France ; Lucion, 2011)

### 6.2.2. Limites de l'atténuation naturelle

L'atténuation naturelle repose principalement sur la formation spontanée de cyanure d'hydrogène gazeux, dont une partie est libérée dans l'air. Il est souvent avancé qu'au niveau des aires de stockage de déchets miniers, cette volatilisation est un facteur majeur dans la réduction de la concentration en composés cyanurés.

<sup>36</sup> A1 = Application aux effluents (Crédits icônes : Freepik - Flaticon License - www.flaticon.com) ; A2 = Application aux boues de résidus miniers (Crédits icônes : Smashicons - Flaticon License - www.flaticon.com).

<sup>37</sup> Vitesse de la réaction.

<sup>38</sup> Le procédé « Dioxyde de soufre et air » est mis en œuvre dans une trentaine de sites miniers dans le monde ; tandis que le procédé « Acide de Caro », l'est dans quelques sites seulement (Botz et al., 2016 ; in *Gold Ore Processing*, p. 624 et p. 626).

S'il est probablement vrai que des quantités importantes de cyanure d'hydrogène gazeux se volatilisent, il ne s'agirait dans certains cas que d'une perte mineure par rapport à la quantité totale de cyanure présente dans les déchets miniers (Moran, 1999 ; Donato & Overdevest, 2016 ; in *Gold Ore Processing*). En effet, plusieurs auteurs confirment que dans les aires de stockage de déchets miniers (bassin de lixiviation ou parc à résidus), la majorité de la masse des cyanures libres est convertie en d'autres formes, précipitées et adsorbées (Moran, 1999 ; Yarar, 2001).

### 6.2.3. Persistance des produits de dégradation

La destruction du cyanure a pour objectif principal de dégrader les cyanures libres. Aussi, **il est cohérent que des quantités importantes de produits de dégradation, tels que le thiocyanate, le cyanate ou l'ammoniaque, persistent dans les boues et effluents traités.** Bien que ces substances soient bien moins toxiques que les cyanures libres, elles le restent pour la faune aquatique<sup>39</sup> (voir § 4.1 p. 15). Ainsi, en fonction des réglementations en vigueur, **il est parfois également requis de procéder à des traitements complémentaires sur ces produits de dégradation** (Botz et al., 2016 ; in *Gold Ore Processing*, pp. 635-638).

### 6.2.4. Persistance de certains complexes cyanurés métalliques

Bien que la destruction du cyanure permette de dégrader certains cyanures facilement libérables (WAD), d'autres persistent dans les boues et effluents traités, tels que le ferrocyanure ou le ferricyanure. Or, si les cyanures libres ne sont pas stables (ils se dégradent rapidement dans l'environnement), il n'en est pas de même pour de nombreux autres composés cyanurés, tels que les complexes cyanurés métalliques. Dans certaines conditions, ces derniers peuvent relarguer tardivement des ions cyanure (Moran, 1999 ; Donato & Overdevest, 2016, in *Gold Ore Processing*). **Ainsi, dans les aires de stockage de déchets miniers, ce phénomène peut conduire à la libération de cyanures libres à moyen ou long-terme.**

Pour cette raison et les deux précédentes (voir § 6.2.2 et § 6.2.3 précédents), Fleming (2016) estime que **l'on ne peut pas considérer la destruction du cyanure comme une technologie « propre »** (Fleming, 2016, in *Gold Ore Processing*, p. 659) :

« While this represents a significant improvement on the historical practice of releasing cyanide directly into tailings dams and allowing air and sunlight to slowly decompose the cyanide, **cyanide detoxification cannot be considered a “clean” technology.** For example, salts such as sodium cyanate and thiocyanate accumulate in aqueous solutions (and ultimately transfer at least partially to the ground water) while heavy metals remain in the tailings. »

### 6.2.5. Risques associés au stockage d'eaux non traitées

Des experts contactés par SystExt en avril 2021 ont indiqué que, pour des raisons économiques, il est régulier que :

- Dans un premier temps, les résidus miniers (sous forme de boues), ainsi que les eaux de procédé, soient évacués sans traitement dans des aires de stockage ;
- Dans un second temps, les eaux surnageantes des aires de stockage soient traitées par atténuation naturelle (ou soient pompées pour être traitées).

Ils ont insisté sur les **risques liés au stockage - même temporaire - d'eaux ou de boues contenant des concentrations élevées en cyanure**, en particulier en cas de rupture d'aire de stockage ou en cas de difficulté à empêcher l'accès à la faune. **Ils ont donc recommandé de procéder à la destruction du cyanure préalablement à tout stockage.**

<sup>39</sup> L'ammoniaque est également extrêmement toxique pour l'homme.

## 6.3. Recyclage du cyanure

### 6.3.1. Principe et principaux procédés

Le recyclage du cyanure consiste à **récupérer le cyanure présent dans les effluents et déchets miniers puis à le réutiliser dans le traitement du minerai.**

Ces dernières années, cette méthode suscite un intérêt croissant dans l'industrie aurifère pour deux raisons (Fleming, 2016, in *Gold Ore Processing*) :

- **L'augmentation progressive des coûts associés aux procédés de destruction du cyanure**, dans un contexte de durcissement des réglementations ;
- Le développement des gisements d'or présentant des **minerais complexes et réfractaires**, pour lesquels la lixiviation est souvent très consommatrice de cyanure.

En principe, le recyclage du cyanure repose sur le fait de **favoriser le dégagement de cyanure d'hydrogène**<sup>40</sup>. Pour rappel, lors de la lixiviation, le pH est maintenu élevé (supérieur à 10) pour limiter tout risque pour les travailleurs. Ici, à l'inverse, le pH est diminué volontairement aux environs de 7 afin de relarguer le cyanure d'hydrogène présent dans les effluents et déchets miniers. Des pH encore inférieurs (jusqu'à 2) peuvent être appliqués dans le cas où le cyanure se trouve sous forme complexée avec des métaux tels que le zinc, le nickel ou le cuivre.

Le *Tableau 7 page suivante* présente les principaux procédés de recyclage du cyanure, mis en œuvre à l'échelle industrielle.

Si théoriquement ces procédés s'appliquent tant sur une boue de résidus miniers que sur un effluent, il est préférable en pratique de privilégier ce dernier. En effet, le traitement est généralement plus efficace et plus rapide, et la consommation en réactifs pour abaisser le pH est plus faible (Fleming, 2016, in *Gold Ore Processing*). Ainsi, pour obtenir un effluent à partir des boues, une séparation solide- liquide s'avère nécessaire et peut présenter un coût important.

### 6.3.2. Nécessité de développement

Bien que le recyclage du cyanure ait démontré son efficacité, seuls quelques sites miniers dans le monde emploient cette méthode (voir note de bas de page n°43 p. 27), exception faite de la récupération directe. Cette situation s'explique principalement par des motifs économiques, l'approvisionnement en cyanure « neuf » étant le plus souvent moins cher que la mise en œuvre de ces procédés (Fleming, 2016, in *Gold Ore Processing*).

Cependant, Fleming (2016) rappelle que la rentabilité économique de cette méthode augmente progressivement et **devrait être développée afin de réduire les risques** :

- **Associés aux produits de dégradation et à certains complexes cyanurés métalliques** (non résolus par la destruction du cyanure, *tel que détaillé dans les § 6.2.3 et § 6.2.4 précédents*), risques qui persistent d'ailleurs après la fermeture du site minier ;
- **Associés au transport et à la manutention du cyanure de sodium** (voir § 5.1 p. 17 et § 5.2 p. 18) ; le recyclage de cyanure diminuant la quantité de cyanure « neuf » devant être acheminée jusqu'au et sur le site minier.

<sup>40</sup> Exception faite du procédé de récupération directe, voir première ligne du *Tableau 7 page suivante*.

Procédé	Principe	Avantages	Inconvénients
<b>Récupération directe</b> <sup>41</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Récupération des eaux cyanurées dans l'usine par épaissement, ou en base du dépôt dans le cas d'une lixiviation statique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilisation très simple</li> <li>• Coûts d'investissement et opérationnels faibles</li> <li>• <b>Pas de conversion en cyanure d'hydrogène</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficile de récupérer plus de 50% des cyanures libres sans une séparation liquide-solide coûteuse</li> <li>• Requier une destruction du cyanure avant mise en décharge des résidus miniers dans les aires de stockage</li> <li>• Pas de récupération des cyanures facilement libérables</li> </ul>
<b>SART (sulfidization, acidification, recycling, and thickening)</b> <sup>42,43</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (1) Ajout d'acide sulfurique dans la solution (pH de 4-5)</li> <li>• (2) Précipitation des métaux, récupérés par épaissement et filtration</li> <li>• (3) Neutralisation de la solution filtrée par ajout de chaux ou de soude caustique (pour que la cyanure d'hydrogène reste en solution)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dans le cas des gisements riches en cuivre et en zinc, possibilité de récupérer et de vendre les précipités associés<sup>44</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficile de récupérer plus de 50% des cyanures libres sans une séparation liquide-solide coûteuse</li> <li>• Requier une destruction du cyanure avant mise en décharge des résidus miniers dans les aires de stockage</li> <li>• Pas de récupération des cyanures facilement libérables</li> </ul>
<b>AVR (acidification, volatilization, and regeneration)</b> <sup>45,43</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (1) Ajout d'acide sulfurique dans la solution (pH &lt; 7, jusqu'à 3 si nécessaire)</li> <li>• (2) Durant l'acidification, accentuation de la volatilisation du cyanure d'hydrogène (HCN) par un flux de bulles d'air [dans une tour de stripping<sup>46</sup>]</li> <li>• (3) Lavage du flux gazeux air-HCN dans une solution caustique [dans une seconde tour]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procédé éprouvé et bien connu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très difficile d'atteindre des concentrations en cyanure résiduel très faibles, peut requérir en complément une destruction du cyanure</li> </ul>

Tableau 7 : Principaux procédés de recyclage du cyanure, mise en évidence de certains avantages et inconvénients ; d'après (Fleming 2016 ; in *Gold Ore Processing*, pp. 650-654)

<sup>41</sup> Ce procédé valorise l'excès de cyanure introduit lors de la lixiviation. Pour rappel, les concentrations en cyanure utilisées pour la lixiviation sont bien supérieures à celles théoriquement requises (*voir § 3.1 p. 9*).

<sup>42</sup> En français : sulfuration (combinaison avec le soufre), acidification, recyclage et épaissement.

<sup>43</sup> Le procédé SART est mis en œuvre dans cinq sites miniers dans le monde ; tandis que le procédé AVR l'est dans trois (Fleming 2016 ; in *Gold Ore Processing*, p. 651).

<sup>44</sup> Le développement du procédé SART a eu lieu à une époque où les sociétés aurifères rencontraient des minerais de plus en plus riches en cuivre, et où la capacité à traiter économiquement le cyanure de cuivre en solution était devenue cruciale pour l'avancement de leurs projets miniers (Fleming 2016 ; in *Gold Ore Processing*, p. 651).

<sup>45</sup> En français : acidification, volatilisation et régénération.

<sup>46</sup> Le stripping correspond à l'entraînement de gaz ou produits volatils dissous dans l'eau (le cyanure d'hydrogène, ici) par l'action d'un autre gaz (l'air, ici).

## 7. Techniques alternatives à la cyanuration

### 7.1. Lixiviants alternatifs

#### 7.1.1. Généralités

L'étude des techniques alternatives à la cyanuration n'est pas issue d'une prise en compte grandissante des risques environnementaux et sanitaires associés à l'utilisation du cyanure. Elle résulte de la nécessité de traiter des minerais réfractaires, pour lesquels la cyanuration ne permet pas de récupérer l'or, et dans un contexte de prix élevé de cette substance (Aylmore, 2016, in *Gold Ore Processing*).

C'est ainsi que, par exemple, le seul site aurifère au monde mettant en œuvre une lixiviation alternative au thiosulfate à l'échelle industrielle (la mine d'or de Goldstrike, aux États-Unis) a développé ce procédé afin de valoriser un minerai doublement réfractaire : l'or est associé à des minéraux sulfurés et le minerai est riche en carbone organique<sup>47</sup>. Dans le cas de minerai riche en carbone organique, 60 à 80 % de l'or est récupéré par le recours au thiosulfate, tandis que seulement 0 à 15 % est récupéré par cyanuration (Aylmore, 2016, in *Gold Ore Processing*, p. 515).

#### 7.1.2. Principaux lixiviants alternatifs

27 lixiviants alternatifs au cyanure ont été étudiés et sont rappelés, pour mémoire, dans le *Tableau 8*. Parmi eux, 6 lixiviants (*marqués de gris*) ont fait l'objet de recherches approfondies ces dix dernières années (Aylmore, 2016, in *Gold Ore Processing*; Menard, 2018). Les procédés d'oxydation chlorés, sulfurés et ammoniacaux ont été mis en œuvre dans le cas où l'or était un co-produit (*voir note de bas de page n°5 p. 6*) de mines de métaux de base<sup>48</sup> et de mines de platinoïdes<sup>49</sup>.

Catégorie de lixiviants* ou lixiviant	Lixiviant de la catégorie (si concerné*)
Thiosulfate	
Thiourée	
Thiocyanate	
Halogénures*	Chlorures, bromures, iodures
Ammoniacque	
Nitriles	
Procédés d'oxydation chlorés*	Eau régale ; Chlorure de fer (III) ; procédé Haber-Platsol ; procédé Intec/N-Chlo ; procédé Kell
Procédés sulfurés*	Sulfure de sodium ; Polysulfures ; Bisulfite biocatalysé ; Bisulfure-dioxyde de soufre ; Procédé de pression à catalyse azotée
Bactéries et acides naturels*	Acides aminés, plantes hyper-accumulatrices
Procédés à base de cyanure*	Cyanure d'ammonium ; Cyanoforme alcalin ; Cyanamide calcique ; Cyanure de brome
Autres procédés*	Électrolyse de boue de minerai ; CSUT, DMSO et DMF ; BioD

Tableau 8 : Lixiviants alternatifs au cyanure ; adapté de (Aylmore, 2016, in *Gold Ore Processing*, p. 448).

<sup>47</sup> On parle alors de minerai de « *preg-robbing* ». Le carbone organique présent dans ces minerais adsorbe les complexes auro-cyanurés produits lors de la lixiviation (à l'image de ce qui se produit sur le charbon actif lors de l'étape de récupération), qui ne peuvent plus être récupérés lors des étapes de traitement ultérieures.

<sup>48</sup> Les métaux de base sont principalement le cuivre, le plomb et le zinc.

<sup>49</sup> Les platinoïdes consistent en un groupe de 6 métaux : platine (Pt), palladium (Pd), rhodium (Rh), ruthénium (Ru), iridium (Ir) et osmium (Os).

Le *Tableau 9* propose une comparaison des techniques alternatives les plus étudiées et envisageables à l'échelle industrielle (ce qui n'est pas le cas, par exemple, de l'eau régale). Une toxicité (« Tox. ») moyenne est schématisée par la couleur orange, une toxicité faible, par la couleur orange clair.

Alternative	Avantages	Inconvénients	Tox.	Mise en œuvre industrielle
<b>Thiosulfate</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réactif bon marché</li> <li>• Cinétique de mise en solution<sup>50</sup> efficace</li> <li>• Permet de traiter certains minerais réfractaires, qui ne peuvent être traités par cyanuration</li> <li>• Arsenic moins dissous qu'avec la cyanuration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consommation en réactifs supérieure à celle de la cyanuration<sup>51</sup></li> <li>• Technique plus complexe et moins robuste que la cyanuration</li> <li>• Requiert l'usage de résines pour la récupération de l'or après lixiviation &gt; coûts élevés, voir § 3.3.1 p. 12</li> <li>• Non utilisable sur des minerais à forte teneur en cuivre</li> </ul>		Oui Seulement pour certains minerais réfractaires
<b>Thiourée</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cinétique de mise en solution élevée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réactifs coûteux</li> <li>• Consommation en réactifs élevée<sup>52</sup></li> <li>• Technique nécessitant un contrôle important</li> <li>• Traitement des effluents coûteux</li> <li>• Solution de lixiviation non recyclable</li> <li>• Mauvaise récupération de l'argent</li> </ul>	Potentielle-ment cancérogène	Oui
<b>Thiocyanate</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solution de lixiviation recyclable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consommation en réactifs supérieure à celle de la cyanuration</li> </ul>		Non
<b>Iodures et bromures</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cinétique de mise en solution élevée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réactifs très coûteux</li> <li>• Nécessité de mettre en place des systèmes de traitement pour la destruction de composés toxiques qui se forment durant la lixiviation</li> <li>&gt; coûts d'investissement élevés</li> </ul>	Faible MAIS formation de composés toxiques	Non
<b>Chlorures<sup>53</sup></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cinétique de mise en solution efficace</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Traitement en autoclave, nécessitant des matériaux résistants à la corrosion par le chlore</li> <li>&gt; coûts d'investissement élevés</li> </ul>		Oui Seulement pour les mines de platinoïdes

Tableau 9 : Principales techniques alternatives à la cyanuration, mise en évidence de certains avantages et inconvénients ainsi que de la toxicité relative ; modifié d'après (Aylmore, 2016, in *Gold Ore Processing*; Menard, 2018)

### 7.1.3. Caractéristiques majeures des techniques alternatives

Pour évaluer la **fiabilité technique et environnementale** d'une méthode de lixiviation, il est nécessaire de prendre un compte un grand nombre de critères, parmi lesquels :

- L'efficacité de la réaction de lixiviation : cinétique rapide, taux de récupération de l'or élevé, stabilité des réactifs ;

<sup>50</sup> Ou vitesse d'extraction de l'or.

<sup>51</sup> Il existe cependant des méthodes permettant de diminuer la quantité de thiosulfate consommée durant la réaction : par ajout de catalyseur (thallium, plomb) et par adaptation du milieu de lixiviation (Menard, 2018).

<sup>52</sup> Due à l'oxydation rapide de la thiourée.

<sup>53</sup> La chloration était largement mise en œuvre à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle avant l'émergence de la cyanuration (voir note de bas de page n°11 p. 7). Cette technique a également été utilisée à de nombreuses reprises dans les années 1980 dans des usines états-uniennes pour le traitement de minerais réfractaires et carbonés (Aylmore, 2016, in *Gold Ore Processing*).

- Les équipements nécessaires : résistance à des solutions corrosives, adaptabilité aux installations existantes, complexité des procédés ;
- La gestion des effluents et des déchets miniers : recyclage des réactifs, modalités de traitement des solutions ;
- La toxicité des substances et les risques sanitaires et environnementaux potentiels.

Les techniques alternatives présentées dans le *Tableau 9 précédent* peuvent présenter ainsi des inconvénients, notamment :

- **L'instabilité de certains lixivants**, en particulier le thiosulfate ou la thiourée ;
- **La nécessité de mettre en place des équipements spécifiques**, en particulier pour les halogénures (chlorures, bromures, iodures) ;
- **Des difficultés associées au traitement et au recyclage des solutions**, en particulier pour la thiourée.

De plus, il est régulièrement mis en avant des **coûts plus élevés** dus au prix des réactifs (et/ou au fait que les techniques soient très consommatrices en réactifs), aux équipements associés, aux installations de traitement des effluents, etc. (Aylmore, 2016, in *Gold Ore Processing* ; Menard, 2018).

Cependant, des experts contactés par SystExt en avril 2021 confirment **quatre caractéristiques qui différencient ces techniques alternatives de la cyanuration** :

- **Une meilleure efficacité sur les minerais réfractaires qui ne peuvent être traités par cyanuration** ;
- **Une plus grande vitesse d'extraction de l'or** ;
- **Une toxicité très inférieure à celle du cyanure** ;
- **Un impact potentiel sur l'environnement plus faible.**

## 7.2. Discussion sur la prédominance du cyanure

Bien que plus de 1 000 publications scientifiques traitent des lixivants alternatifs au cyanure, la très grande majorité des procédés étudiés n'en sont encore qu'au stade de développement (Aylmore, 2016, in *Gold Ore Processing*, p. 447). Cette abondante bibliographie détaille les caractéristiques « théoriques » des essais réalisés en laboratoire, voire à l'échelle pilote, destinés à optimiser les réactions de lixiviation, à limiter la quantité de réactifs, à éviter la production de composés toxiques, à dimensionner les équipements les plus efficaces et les moins coûteux, etc. Mais, au regard du très faible nombre d'unités en fonctionnement, **le retour d'expérience est faible s'agissant des coûts d'investissement et opérationnels avérés, et des risques sanitaires et environnementaux probables.**

L'un des facteurs clés qui justifient la prédominance du cyanure dans l'industrie aurifère est lié à la stabilité de ce lixiviant et des complexes qu'il forme avec l'or (Aylmore, 2016, in *Gold Ore Processing*). **Un second facteur clé est probablement d'ordre économique**, tel qu'indiqué dans le *paragraphe précédent*. À ce titre, l'absence de filière industrielle mature contribue vraisemblablement à l'augmentation des coûts, les technologies alternatives requérant le développement de produits et d'équipements spécifiques.

Concernant les risques sanitaires et environnementaux associés aux technologies alternatives, si nombre d'auteurs mettent en avant les problématiques que celles-ci peuvent potentiellement présenter, elles sont **moins préoccupantes que celles associées à l'utilisation du cyanure**. Selon SystExt, une évaluation précoce de ces problématiques est essentielle mais **ne doit pas freiner le développement de ces technologies alternatives**, compte-tenu des risques très élevés associés au recours à la cyanuration (*voir chapitre 5 p. 17*).

**Un équilibre devra nécessairement être trouvé entre les impératifs économiques des exploitants miniers et la nécessité de protéger la santé humaine et l'environnement.**

## 8. Points de vigilance pour le territoire guyanais

Tous les risques technologiques et impacts environnementaux potentiels précédemment décrits sont valables pour toute exploitation industrielle d'or ayant recours à la cyanuration et qui viendrait à s'implanter sur le territoire guyanais. Cependant certains points de vigilance méritent d'être mis en évidence au regard de caractéristiques remarquables de cette région.

### 8.1.1. Vulnérabilité environnementale

Les **fortes précipitations** et la **densité du réseau hydrographique** qui caractérisent ce territoire augmentent les risques de pollution chronique des eaux de surface et des eaux souterraines, décrits dans le § 5.3.1 p. 20. Un excès d'eau parcourant les aires de stockage de déchets miniers et les installations de gestion des eaux associées (bassins, conduites, etc.) constitue une problématique particulièrement sensible (Moisan & Blanchard, 2013).

**L'accessibilité aux sites miniers et l'état des infrastructures routières constituent des contraintes pour le transport et l'approvisionnement des sites miniers en cyanure (INERIS, 2018).** De plus, la combinaison des fortes précipitations, de la densité du réseau hydrographique et du fort couvert végétal, limite considérablement les possibilités de gestion et de traitement d'un déversement de sels de cyanure en cas d'accident de transport (voir § 5.1 p. 17).

### 8.1.2. Remobilisation du mercure

La Guyane possède des teneurs naturelles en mercure dans les sols et les roches. **Les procédés de traitement de l'or facilitent la concentration du mercure dans les résidus miniers et les solutions cyanurées.** Tel que discuté dans le § 3.4 p. 13 et la note de bas de page n°27 p. 14, le mercure peut persister dans toutes les étapes du traitement, jusqu'à l'électrolyse, la régénération du charbon ou le raffinage. Il est donc susceptible d'être libéré dans l'atmosphère aux différentes étapes du procédé de traitement ; mais aussi dans l'environnement, via les aires de stockage de déchets miniers. Des mesures de prévention d'émission et de récupération spécifique sont donc nécessaires dans un tel contexte (Moisan & Blanchard, 2013).

### 8.1.3. Gestion des aires de stockages de déchets miniers

Tel que décrit dans le § 5.3.2 p. 20, le risque de rupture d'ouvrage de retenue des déchets miniers est amplifié en cas de pluviométrie importante. Le cas échéant, afin d'éviter une charge trop importante derrière l'ouvrage de retenue ou toute déstabilisation associée, **les dispositifs de drainage et d'évacuation des eaux doivent être rigoureusement dimensionnés au regard de la pluviométrie locale (INERIS, 2018).** Par ailleurs, afin de limiter le risque de débordement depuis le sommet de l'aire de stockage, il est nécessaire qu'une revanche<sup>54</sup> appropriée soit garantie à tout moment (INERIS, 2018). Enfin, une surveillance accrue est indispensable en phase opérationnelle, en phase de fermeture et après la fermeture.

---

<sup>54</sup> Différence d'altitude entre le niveau de l'eau dans l'aire de stockage et la crête de l'ouvrage de retenue, représentatif de la marge de sécurité par rapport au risque de débordement.

## BIBLIOGRAPHIE

- Adams, M. (2016). *Gold Ore Processing. Project Development and Operations*. (Vol. 15).
- After cyanide spill, can First Majestic clean up its act? (2018, Avril 21). *lapoliticaeslapolitica.com (blog)*. Consulté le Janvier 3, 2021
- Arrêté du 19/04/2010. (s.d.). *Arrêté du 19 avril 2010 relatif à la gestion des déchets des industries extractives, JORF n°0180 du 06/08/2010*.
- Australian Government. (2008). *Cyanide Management. Leading practice sustainable development program for the mining industry*.
- Australian Government. (2010). *Sodium cyanide. Priority existing chemical assessment report No 31*.
- Blazy, P., & Jdid, E.-A. (2006). Métallurgie de l'or - Procédés. *Techniques de l'Ingénieur*.
- Carton de Tournai, T. (2019). *Banro - L'or du Sud-Kivu*.
- Chine : à Tianjin, une fuite de cyanure de sodium complique la tâche des secours. (2015, Août 12). *Le Monde*.
- Cinq questions sur le cyanure et la cyanuration de l'or. (2019, Février 13). *L'Usine Nouvelle*.
- Croharé, P. (2016). *État de la production et de la demande d'or en 2016 ou vers une pénurie d'or physique et une hausse record des cours de l'or ?*
- Donato, D., Nichols, O., Possingham, H., Moore, M., Ricci, P., & Noller, B. (2007). A critical review of the effects of gold cyanide-bearing tailings solutions on wildlife. *Environment International*, 974-984.
- Earthworks. (2010). *Bellavista, Costa Rica - Glencairn's cyanide disaster*.
- Edinger, E. (2012). Gold Mining and Submarine Tailings Disposal: Review and Case Study. *Oceanography Society*, 184-199.
- Eisler, R., & Wiemeyer, S. (2004). Cyanide Hazards to Plants and Animals from Gold Mining and Related Water Issues. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 21-54.
- Explosions en Chine : le cyanure de sodium en 7 questions. (2015, Août 17). *Sciences et Avenir*.
- Fiche Or*. (s.d.). Consulté le Mars 15, 2021, sur L'Élémentarium: <https://www.lelementarium.fr/element-fiche/or/>
- Gray, L., & McLachlan, J. (1933). History of the introduction of the MacArthur-Forrest cyanide process to the Witwatersrand gold fields. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*.
- Hilson, G., & Monhemius, A. (2006). Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future? *Journal of Cleaner Production*, 1158-1167.
- INERIS. (2011). *Cyanures et dérivés - Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques. DRC-11-117259-10314A*.
- INERIS. (2011). *Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : Cyanures. DRC-11-118962-11076A*.
- INERIS. (2018). *Revue synthétique des bonnes pratiques relatives à l'utilisation du cyanure pour le traitement de l'or dans le contexte guyanais. DRS-18-177174-08150B*.
- Justice and Environment. (2011). *Banning Cyanide from Mining in the European Union - Legal Analysis*.

- Lankoande, D., & Maradan, D. (2013). *Coût de l'inaction de la gestion des produits chimiques dans le secteur minier et agricole*. Burkina Faso, Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD) - Initiative Pauvreté Environnement (IPE).
- Lucion, C. (2011). *Les procédés de traitement par cyanuration y compris les méthodes de destruction du cyanure résiduel*. Kayenn Mining Symposium.
- Menard, Y. (2018). *Technologies de substitution du cyanure pour le traitement des minerais d'or en Guyane : avantages et inconvénients sur les plans économiques et les risques environnementaux*. BRGM/RP-68620-FR.
- Mineral Policy Center. (2000). *Cyanide leach mining packet*.
- Moisan, M., & Blanchard, F. (2013). *Utilisation de la cyanuration dans l'industrie aurifère en Guyane. Impacts potentiels sur l'environnement et recommandations*. BRGM/RP-61968-FR.
- Montagne d'or : un peu plus de cyanure dans les rivières guyanaises? (2018, Juin 6). *Journal de l'environnement*.
- Moran, R. (1999). Cyanide in mining: some observations on the chemistry, toxicity and analysis of mining-related waters.
- Mudder, T., & Botz, M. (2004). Cyanide and society: a critical review. *The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection*, 62-74.
- Norgate, T., & Haque, N. (2012). Using life cycle assessment to evaluate some environmental impacts of gold production. *Journal of Cleaner Production*, 53-63.
- Otro incidente en Veladero: se rompió un caño con "material rico". (2017, Mars 29). *La Nacion*.
- Parlement européen. (2010, Mai 5). Résolution du 05/05/2010. *Résolution du Parlement européen du 5 mai 2010 sur l'interdiction générale de l'utilisation des technologies à base de cyanure dans l'industrie minière de l'Union européenne*. Bruxelles.
- PNUE, & GRID. (2017). *Mine tailings storage: Safety is no accident*.
- PNUE, & GRID-Europe. (2016). *Le Prix de l'Or Flambe, l'Environnement Sous Pression*.
- Pourquoi utilise-t-on du cyanure pour extraire l'or ? (2019, Octobre 21). *The Conversation*.
- RECORD. (1995). *Traitements d'effluents industriels contenant des traces de cyanures résiduels*.
- San Juan: detectan derrame de cianuro en una mina que explota la Barrick Gold. (2015, Septembre 14). *La Nacion*.
- Save Act Mine, & IPIS. (2017). *Etude sur l'utilisation du mercure et du cyanure dans l'exploitation artisanale de l'or au Nord et Sud-Kivu*.
- Should cyanide still be used in modern-day mining? (2016, Mars 7). *Mining Technology*.
- Sodium Cyanide. Chemical Economics Handbook*. (2020, Août). Récupéré sur IHS Markit: <https://ihsmarkit.com/products/sodium-cyanide-chemical-economics-handbook.html>
- SystExt. (2020). *Dynamine - La voracité de la mine industrielle*.
- The Regional Environmental Center. (2000). *The Cyanide Spill at Baia Mare, Romania*.
- US Department of Health and Human Services. (2006). *Toxicological profile for cyanide*.
- Veladero : une histoire sans fin. (2017, Juillet 7). *Equal Times*.
- Yarar, B. (2001). *Cyanides in the Environment and Their Long-Term Fate*.