

Document public

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

Rapport final

BRGM/RP-68620-FR
Décembre 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

Rapport final

BRGM/RP-68620-FR

Décembre 2018

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2018

Y. Menard

Avec la collaboration de **Anne-Gwénaëlle Guezennec**

Vérificateur :

Nom : Isabelle Duhamel-Achin

Fonction : Resp. d'Unité DGR-MIN

Date : 21/12/2018

Signature :



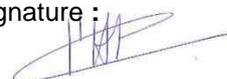
Approbateur :

Nom : Patrick D'Hugues

Fonction : Resp. d'Unité D3E-DMP

Date : 17/01/2019

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



Mots-clés : Or, Guyane, Cyanures, Cyanuration, Technologies, Traitement, Hydrométallurgie

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

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. Rapport final. BRGM/RP-68620-FR, 17 pages, 1 tableau.

Synthèse

Cette note s'inscrit dans le cadre de la convention DEB-BRGM 2018 n° 2102457320 en appui au service public. Elle fait état des différentes techniques hydrométallurgiques disponibles pour la récupération de l'or primaire dans le contexte guyanais du projet minier de Montagne d'or, détaille leurs niveaux de maturité et les contraintes associées à leur mise œuvre industrielle. Cette note offre ainsi un panorama des procédés alternatifs à la cyanuration pour l'exploitation des minerais d'or primaires, qu'il s'agisse de procédés étudiés à l'échelle laboratoires, de procédés validés à l'échelle pilote ou mis en œuvre à l'échelle industrielle.

Les conclusions de cette analyse indiquent que des alternatives à l'utilisation du cyanure pour l'exploitation des minerais d'or existent à l'échelle industrielle ou sont en phase de développement. Cependant, aucun procédé n'a atteint le niveau de maturité ni la robustesse des procédés au cyanure. L'impact potentiel sur l'environnement des réactifs utilisés dans ces procédés alternatifs est le plus souvent moindre que celui du cyanure. Pour autant, il serait nécessaire d'évaluer les différents procédés dans leur ensemble (chaînes d'approvisionnement en réactifs et en énergie, consommations énergétiques, consommations en eau et en réactifs, gestions des effluents liquides et des résidus solides, etc.) afin d'être en mesure de produire une comparaison des impacts environnementaux globaux de chaque option.

À ce jour, seul le procédé basé sur l'utilisation du thiosulfate atteint un niveau de maturité qui s'approche de la cyanuration. Cependant, sa complexité de mise en œuvre et ses coûts opératoires plus élevés que ceux de la cyanuration, en font une application de niche pour des minerais d'or réfractaires à la cyanuration notamment les minerais carbonatés.

Sommaire

1. Les types de gisements d'or guyanais	7
2. Les techniques d'exploitation	9
2.1. LES TECHNIQUES D'EXPLOITATION DES GISEMENTS SECONDAIRES (ALLUVIONNAIRE OU ÉLUVIONNAIRE)	9
2.2. LES TECHNIQUES D'EXPLOITATION DES GISEMENTS PRIMAIRES	9
2.3. CAS PARTICULIER DES MINERAIS D'OR RÉFRACTAIRES.....	10
3. Procédés alternatifs à la cyanuration pour l'exploitation des minerais d'or primaire	11
3.1. PROCÉDÉ À L'EAU RÉGALE	11
3.2. PROCÉDÉS AUX HALOGÉNURES	11
3.2.1. Iodure et bromure	11
3.2.2. Chlorure.....	11
3.3. PROCÉDÉ AU THIOCYANATE	12
3.4. PROCÉDÉ À LA THIOURÉE (OU THIOCARBAMIDE)	12
3.5. PROCÉDÉ AU THIOSULFATE.....	12
4. Synthèse des travaux de Recherche et Développement	15
5. Conclusion.....	17

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison des techniques alternatives à l'utilisation du cyanure pour le traitement des minerais d'or :.....	13
---	----

1. Les types de gisements d'or guyanais

Le territoire de la Guyane appartient à l'ensemble géologique appelé « Bouclier des Guyanes » qui s'étend du Venezuela au Brésil. Initialement, ce bouclier ne formait qu'un avec le Bouclier Ouest-Africain (de la Guinée au Ghana en passant par le Burkina Faso).

Les ressources minérales connues de la Guyane sont essentiellement constituées de minéralisations aurifères très similaires à celles du Ghana (ancienne Gold Coast) et du sud de la Côte d'Ivoire. Les géologues classent les gisements d'or guyanais en 5 types¹ :

- type placer ou alluvionnaire (type 5) : une accumulation par gravité de l'or détritique ou de minéraux lourds provenant du démantèlement des roches mères des versants. Accumulations en base des alluvions liées à la réduction de l'énergie du courant en amont de confluences ou dans un piège au fond du lit d'un cours d'eau ;
- type colluvial ou éluvionnaire (type 4) : une concentration légèrement déplacée dans le sol d'un versant suite à l'altération et à l'érosion et l'évacuation des minéraux plus légers concentrant ainsi les éléments les plus denses ;
- type résiduel (type 3) : la concentration est localisée dans la roche latéritique et les sulfures altérés et dissous à l'aplomb de la source primaire. La structure et l'orientation originelle de la roche ont disparu ;
- type oxydé (type 2) : la concentration est localisée dans une roche altérée ayant conservé sa structure originelle au-dessus du front d'oxydo-réduction ;
- type primaire (type 1) : aucun des phénomènes d'altération superficielle n'a affecté ni la concentration minérale, ni l'encaissant. La concentration peut cependant avoir subi des modifications par des altérations hydrothermales anciennes.

Historiquement, la production d'or en Guyane est essentiellement issue de l'exploitation des concentrations alluvionnaires et éluvionnaires en placers (types 4 et 5, gisements qualifiés de secondaires), celles-ci continuant à faire l'objet d'une forte activité. Les types 1 à 3 sont regroupés sous le terme de « gisements primaires ». Seul le type 1 ne fait pas l'objet d'exploitation à ce jour. Le potentiel en or primaire « type 1 » est donc quasiment intact.

Le projet minier de Montagne d'or est un gisement primaire de type amas sulfuré (type 1).

¹ Thomassin, J.-F., Urien, P., Verneyre, L., Charles, N., Galin, R., Guillon, D., Boudrie, M., Cailleau, A., Matheus, P., Ostorero, C. et Tamagno, D. (2017) - Exploration et exploitation minière en Guyane. Collection « La mine en France ». Tome 8, 141 p., 41 fig., 2 tabl., 7 ann.

2. Les techniques d'exploitation

2.1. LES TECHNIQUES D'EXPLOITATION DES GISEMENTS SECONDAIRES (ALLUVIONNAIRE OU ÉLUVIONNAIRE)

Le traitement des matériaux aurifères issus des gisements alluvionnaires repose sur des techniques dites « physiques », visant à séparer l'or des autres minéraux qu'on appelle « gangue » ou « stériles ». Ces techniques incluent :

- les sluices : plans inclinés à 10°, métalliques ou de bois recouvert d'une couche de moquette bouclée (accumulateur de particules lourdes) surmontée d'une grille en métal ;
- les tables à secousses ;
- les jigs ;
- les concentrateurs centrifuges de type Mozley ou à hauts champs gravitaires de type Falcon ou Knelson.

Ces séparateurs sont mis en œuvre en fonction de la granularité des matériaux à traiter. Aucune de ces techniques ne nécessite l'emploi de réactifs chimiques. Elles ne requièrent qu'une alimentation en eau et en électricité. Elles sont généralement simples à mettre en œuvre, peu coûteuses et très robustes. Leur champ d'utilisation est cependant limité à la récupération de l'or librement exprimé, c'est-à-dire présent sous forme de particules libérées de leur gangue siliceuse et non-associé à d'autres minéraux (sulfures par exemple).

Actuellement, les gisements d'or alluvionnaire en Guyane sont exploités bien souvent de façon rudimentaire (laveries simples et courtes) avec un taux de récupération de l'or le plus souvent inférieur à 40 %².

2.2. LES TECHNIQUES D'EXPLOITATION DES GISEMENTS PRIMAIRES

On distingue les exploitations souterraines et les exploitations de surface. Il n'existe pas d'exploitation légale souterraine en Guyane. Toutes les exploitations de minerais de type résiduel ou oxydé de Guyane sont des exploitations à ciel ouvert. La Compagnie Minière Montagne d'Or envisage d'exploiter le gisement primaire sulfuré à ciel ouvert, ce qui représenta une excavation prévue de 400 m de large, sur 120 m de profondeur et 2,5 km de long.

L'exploitation des minerais d'or primaires, à l'instar de bon nombre d'autres minerais métalliques, fait intervenir une étape de réduction granulométrique (concassage/broyage), une étape de pré-concentration physique ou physico-chimiques permettant de séparer les minéraux porteurs d'or des autres phases minérales, une étape métallurgique d'attaque des concentrés minéralurgiques et une étape de récupération de l'or.

À l'issue des étapes de broyage, le minerai est traité par voie gravimétrique (séparation des particules en fonction de leur densité, l'or ayant une densité de 19 est facilement séparable des particules d'oxydes de fer ou des sulfures dont les densités varient entre 3 et 7) ou par flottation (séparation physico-chimique permettant de produire un concentré d'or associé à des oxydes ou sulfures en fonction du contexte gîtologique). La mise en œuvre de ces techniques

² Aertgeerts, G., Nagel, J.L., Fournier, E. (2018) - L'exploitation de l'or alluvionnaire en Guyane : synthèse des techniques employées, recommandations et alternatives. Rapport final BRGM/RP-67564-FR, 71 p.

séparatives conduit à la production de concentrés minéralurgiques qui sont ensuite traités par voie hydrométallurgique afin de récupérer leur contenu en or (or lié non libre).

L'étape hydrométallurgique se décompose elle-même en trois parties principales :

- l'attaque chimique des concentrés minéralurgiques et la mise en solution de l'or sous forme d'un complexe chimique est l'étape clé de ce processus complexe. **L'utilisation du cyanure pour solubiliser l'or par complexation reste la technique la plus répandue à travers le monde pour la récupération de l'or d'un gisement primaire.** Cette technique est **extrêmement efficace** et **permet de récupérer jusqu'à 99 % de l'or** contenu dans le minerai lorsqu'elle est mise en œuvre en réacteurs sur des minerais non réfractaires au traitement direct par cyanuration ;
- la récupération du complexe chimique par adsorption sur charbon actif ou sur résine ;
- La désorption de l'or par électrolyse, puis fusion pour produire des lingots de doré (résidu de première fusion présentant encore des impuretés). Ce doré est ensuite acheminé vers une fonderie d'affinage où il est traité afin d'obtenir des lingots d'or pur à 99,999 %.

2.3. CAS PARTICULIER DES MINERAIS D'OR RÉFRACTAIRES

Un minerai d'or « réfractaire » est un minerai qui est naturellement résistant à la récupération par des processus standard de cyanuration et d'adsorption par le carbone. Ces minerais réfractaires nécessitent un prétraitement afin que la mise en solution de l'or soit efficace. Un minerai réfractaire contient généralement des minéraux sulfurés, du carbone organique, ou les deux. Ces minéraux piègent ou englobent les particules d'or, ce qui rend difficile la complexation avec l'or via la lixiviation. L'exploitation de ces minerais nécessite la mise en œuvre de techniques de prétraitement destinée à rendre accessible l'or aux réactifs de lixiviation. Parmi les techniques mises en œuvre à l'échelle industrielle, on trouve principalement la biolixiviation, le grillage, l'oxydation sous pression ou le broyage ultrafin.

L'oxydation sous pression et le grillage présente cependant des coûts d'exploitation élevés compris entre 50 et 60 \$/t pour la première, et entre 25 et 35 \$/t pour le second. Le broyage ultrafin consomme également une énergie importante (jusqu'à 150 kWh/t soit 15 à 30 \$/t) et nécessite la gestion parfois complexe des particules ultrafines à l'issue des traitements qui présentent notamment un risque accru pour les travailleurs (inhalation).

La biolixiviation est un bioprocédé dans lequel l'activité de souches bactériennes est mise à profit pour dissoudre les sulfures dans lesquels se loge l'or sous forme disséminée et le rendre ainsi accessible aux réactifs chimiques de lixiviation. Cette technique permet en outre de réaliser en milieu maîtrisé (au sein de bioréacteurs) l'oxydation des sulfures métalliques. Elle permet ainsi de prévenir la production potentielle d'exhaures minières acides si des résidus riches en sulfures viennent à être stockés à l'air libre et sans mesure de gestion particulière, à l'issue des opérations de traitement du minerai. À titre d'exemple, la société finlandaise OUTOTEC commercialise sous la marque déposée BIOX et met en œuvre un bioprocédé de ce type à l'échelle industrielle.

Des procédés alternatifs à l'utilisation du cyanure existent³. Tous n'ont pas le même niveau de maturité. Les principaux procédés sont décrits ci-après.

³ Hilson, G., and Monhemius, A.J. (2006). Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future? *Journal of Cleaner Production* 14, 1158–1167.

3. Procédés alternatifs à la cyanuration pour l'exploitation des minerais d'or primaire

3.1. PROCÉDÉ À L'EAU RÉGALE⁴

L'eau régale est un mélange d'acide nitrique (1/4) et d'acide chlorhydrique (3/4). Pris séparément, aucun de ces acides ne peut dissoudre l'or mais leur association rend possible cette mise en solution. Les taux d'extraction peuvent atteindre 100 % en quelques heures, en fonction des conditions opératoires. L'eau régale peut également dissoudre d'autres métaux nobles comme le platine, le rhodium et est ainsi utilisé pour attaquer les alliages d'or. L'eau régale est un réactif extrêmement corrosif et instable. Il n'est que peu utilisé à l'échelle industrielle et son utilisation se limite aux procédés de petites et moyennes tailles, en tant qu'électrolyte dans le raffinage de l'or par exemple, ou pour la récupération de l'or contenu dans les cartes électroniques. **La littérature ne fait aucune référence à la mise en œuvre de ce procédé à l'échelle industrielle sur des minerais d'or.**

3.2. PROCÉDÉS AUX HALOGÉNURES⁵

L'utilisation d'halogénures (chlorures, bromures, iodures) pour la lixiviation de l'or a précédé celle du cyanure. En particulier, la lixiviation de l'or en milieu chlorure était la technique classiquement employée avant l'émergence des procédés de cyanuration.

3.2.1. Iodure et bromure

L'iode et le brome sont de puissants oxydants de l'or et permettent sa mise en solution en formant des composés halogénés. Cependant, du fait des difficultés liées à l'utilisation de ces produits, à leur coût élevé et aux dangers sur la santé qu'ils présentent, **ces composés chimiques n'ont jamais été mis en œuvre à l'échelle industrielle.**

3.2.2. Chlorure

Les ions chlorures dissolvent l'or en milieu acide et oxydant par formation de complexes chlorurés. La chloration permet d'atteindre des rendements de mise en solution de l'or très élevés, proches de 100 %. À titre d'exemple, le procédé PLATSOL⁶ d'oxydation sous pression développé par SGS opère à une pression de l'ordre de 7 bars à des températures comprises entre 220 et 250 °C. En plus de l'or, il permet la récupération du platine et du palladium. 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 :**

⁴ Göknelma, M., Birich, A., Stopic, S. and Friedrich, B. (2016). A Review on Alternative Gold Recovery Re-agents to Cyanide. Journal of Materials Science and Chemical Engineering 04, 8.

⁵ Hilson, G. and Monhemius, A.J. (2006). Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future? Journal of Cleaner Production, vol. 14, pp. 1158-1167.

⁶ Ferron, C. J., Fleming, C.A., DREISINGER, D. and O'KANE, T. (2003). Chloride as an alternative to cyanide for the extraction of gold – Going full circle ? SGS Minerals services, Technical paper 2003-01.

- procédé PLATSOL, SGS, mine de NorthMet (États-Unis), métaux visés Au + Pt + Pd,
- Procédé Kell, Sedibelo Platinum Mines, mine de Sedibelo (Afrique du Sud), métaux visés Au, Pt, Pd, Rh, Ru, Ir.

Le procédé OUTOTEC (Gold chloride leaching) n'a, à notre connaissance, jamais été mis en œuvre à l'échelle industrielle.

3.3. PROCÉDÉ AU THIOCYANATE

Les ions thiocyanates SCN^- sont une alternative moins nocive que les ions cyanures CN^- . La lixiviation de l'or aux ions thiocyanates requiert l'ajout d'un oxydant comme le fer, un pH situé entre 1 et 2, et une augmentation de la température de la solution de lixiviation autour de 60 °C. Dans les conditions optimales, le taux d'extraction de l'or peut s'élever à 95 % et les cinétiques de mise en solution sont similaires à celles obtenues avec la thiourée (ou thiocarbamide). La lixiviation de l'or par les ions thiocyanates a particulièrement été investiguée par la société Newmont's Gold, à l'échelle laboratoire et pilote. **La littérature ne fait pas de référence à une mise en application industrielle.**

3.4. PROCÉDÉ À LA THIOURÉE (OU THIOCARBAMIDE)

La thiourée ($CS(NH_2)_2$) est une réelle alternative au cyanure, autant en terme de cinétique de mise en solution de l'or, de rendement d'extraction et de moindre impact environnemental et sanitaire. Le rendement d'extraction peut atteindre 99 % à des pH proches de 1-2 en présence d'oxydants (O_2 et fer). En outre, ce réactif est moins sensible que le cyanure à la présence d'autres métaux de base ou de sulfures, présents classiquement dans les minerais. Le principal inconvénient réside dans la consommation importante de réactif lié à son oxydation en solution. C'est un problème majeur du fait du coût élevé de la thiourée. **Des travaux de R&D sont actuellement en cours pour réduire ces consommations.** En particulier, des auteurs ont montré qu'il était possible de réduire cette consommation par mise en œuvre d'un mélange thiourée/thiocyanate/sulfate ferrique. **La littérature fait référence à une mise en application à l'échelle industrielle** : Mine d'or de Hillgrove, société New England Antimony Mines, New South Wales, Australie.

3.5. PROCÉDÉ AU THIOSULFATE

La principale alternative à la mise en œuvre de la cyanuration est représentée par l'emploi d'ions thiosulfates. Ces ions sont moins nocifs que les ions cyanures et permettent de dissoudre l'or efficacement en présence d'oxygène, en milieu alcalin. La mise en solution de l'or est relativement lente. Elle peut être accélérée par l'ajout de catalyseurs (cuivre, ammoniacque). Le taux d'extraction de l'or est généralement équivalent à celui obtenu à l'aide des ions cyanures. La consommation du réactif peut être importante. Les développements récents ont pour objectif de maîtriser cette consommation de façon à améliorer la rentabilité du procédé. À ce jour, il reste un **procédé de niche, coûteux** compte-tenu des fortes consommations de réactifs et n'est considéré comme une alternative au cyanure que **dans le cas de minerais particuliers** pour lesquels la cyanuration présente une efficacité moindre (minerais carbonatés, minerais riches en cuivre). **Ce procédé est mis en œuvre à l'échelle industrielle** :

- usine Mexico Le Colorado fin des années 80, lixivation en tas, Newmont ;
- début des années 90, prétraitement par oxydation sous pression, récupération sur résine (RIL), Barrick ;
- début des années 90, procédés HATS & MATS, Placer Dome ;
- début 2000, thiosulfate de calcium, récupération sur résine, Barrick ;

- le projet industriel emblématique reste celui opéré sur la mine de Goldstrike dans le Nevada, dont la reconversion d'un procédé cyanure à un procédé thiosulfate est le fruit d'un développement entre Barrick Gold et le CSIRO australien. Cette reconversion est effective et opérée depuis le dernier trimestre 2016.

Réactif	Toxicité	Avantages	Inconvénients	Mise en œuvre industrielle
Eau régale	Importante	Cinétique de mise en solution rapide	Non envisageable à grande échelle	NON
Chlorures	Moyenne	Bonne efficacité de mise en solution	Traitement en autoclave, nécessité d'employer des matériaux résistants à la corrosion par le chlore entraînant des coûts d'investissement élevés	OUI mais uniquement pour des gisements de PGM
Iodures & Bromures	Faible mais forment avec d'autres composés, des substances chimiques toxiques	Cinétique de mise en solution rapide	Coûts très élevés en réactifs Nécessité de mettre en place des systèmes de traitement coûteux pour la destruction des substances toxiques néoformées	NON
Thiocyanate	Moyenne	Recyclage possible de la solution de lixiviation	Consommation en thiocyanate supérieure à celle des cyanures	NON
Thiourée	Moyenne Raisonnablement anticipée cancérogène	Mise en œuvre industrielle Cinétique et rendement de mise en solution élevés	Oxydation rapide de la thiourée en solution entraînant des consommations élevées en réactifs, Coût élevé des réactifs Coûts élevés de traitement des effluents Solution de lixiviation non recyclable Contrôle délicat du procédé de lixiviation	OUI
Thiosulfate	faible	Réactif bon marché Possibilité de diminuer les consommations de thiosulfate par ajout de catalyseur (thallium, plomb) et par adaptation du milieu de lixiviation (Cu-NH ₃ , O ₂ , Fe) Cinétiques de dissolution équivalente à celles obtenues en milieu cyanure Significativement plus efficace pour l'extraction de l'or de minerais carbonatés	Consommation en thiosulfate supérieure à celle des cyanures Procédé plus complexe à opérer et moins robuste que le procédé au cyanure Récupération de l'or en solution au moyen de résines (adsorption sur charbon actif inopérante) ⁷ Coût élevé des résines	OUI mais pour l'heure réservé aux gisements d'or non exploitable par cyanuration (minerais carbonatés)

Tableau 1 : Comparaison des techniques alternatives à l'utilisation du cyanure pour le traitement des minerais d'or.

⁷ Grosse, A.C., Dicoski, G.W., Shaw, M.J., and Haddad, P.R. (2003). Leaching and recovery of gold using ammoniacal thiosulfate leach liquors (a review). Hydrometallurgy 69, 1–21.

4. Synthèse des travaux de Recherche et Développement

La substitution du cyanure pour la lixiviation de l'or reste encore un sujet de recherche majeur⁸. Depuis le début de l'année 2018, plus d'une cinquantaine d'articles scientifiques ont été consacrés à ce seul sujet. La majorité de ces études concerne l'amélioration des procédés existants (thiosulfate, thiourée, thiocyanate, halogénures) par l'ajout de réactifs, d'additifs ou de catalyseurs ou la combinaison de ces différents réactifs. L'objectif est d'améliorer les cinétiques et les rendements de lixiviation, de diminuer les consommations de réactifs, d'améliorer leur recyclage dans le procédé de lixiviation et de diminuer le rejet ou la formation d'espèces toxiques pendant le traitement.

Ainsi, par exemple, de nombreuses études sont consacrées à la substitution de l'ammoniaque - utilisée comme oxydant dans les procédés au thiosulfate - par d'autres réactifs. En effet, l'ammoniaque est un composé chimique extrêmement toxique pour l'homme et les espèces aquatiques. Par ailleurs, il a tendance à dégrader le thiosulfate, ce qui accroît sa consommation et affecte donc l'économie du procédé. Enfin, la présence d'ammoniaque résiduelle dans les eaux de procédés diminue l'efficacité des étapes aval de récupération de l'or, ce qui nécessite un contrôle très précis de l'ajout d'ammoniaque dans l'étape de lixiviation et la mise en place de systèmes de traitement relativement coûteux dans le circuit de recyclage de l'eau. De nombreux réactifs alternatifs ont été testés à l'échelle du laboratoire. Même si des améliorations substantielles ont pu être observées, notamment la diminution des consommations de réactifs, celles-ci s'accompagnent également d'effets secondaires non négligeables qui limitent l'efficacité du traitement⁹. Par ailleurs, l'efficacité de ces réactifs n'est avérée que sur certains types de minerais d'or bien particuliers. Enfin, l'état de l'art ne permet pas à ce jour d'évaluer l'impact environnemental de ces réactifs alternatifs ni leur influence sur l'économie du procédé au thiosulfate.

D'autres études sont consacrées à l'utilisation de solutions mixtes iode/iodure, moins coûteuses que les solutions d'iodure. Les résultats obtenus à l'échelle laboratoire semblent prometteurs en termes de cinétique et de rendement de lixiviation^{10, 11}. Cependant, aucune donnée n'a encore été publiée sur la consommation de réactifs au cours du traitement. L'effet de l'utilisation de ces solutions mixtes sur l'aval du procédé n'a pas encore été testé. Par ailleurs, la robustesse du procédé et son applicabilité à différents types de minerais d'or restent à démontrer. Aucune évaluation économique ou environnementale n'est encore disponible.

Des travaux sont actuellement en cours pour adapter le procédé GlyLeach, développé initialement pour la lixiviation des minerais de cuivre¹², aux minerais d'or. Ce procédé repose sur l'utilisation de glycine, un réactif peu coûteux, non-toxique et facilement recyclable. Son

⁸ Göknelma, M., Birich, A., Stopic, S. and Friedrich, B. (2016). A Review on Alternative Gold Recovery Re-agents to Cyanide. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering* 04, 8.

⁹ Sitando, O., Senanayake, G., Dai, X., Nikoloski, A.N. and Breuer, P. (2018). A review of factors affecting gold leaching in non-ammoniacal thiosulfate solutions including degradation and in-situ generation of thiosulfate. *Hydrometallurgy* 178, 151–175.

¹⁰ Konyratbekova, S.S., Baikonurova, A. and Akcil, A. (2015). Non-cyanide Leaching Processes in Gold Hydrometallurgy and Iodine-Iodide Applications: A Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 36, 198–212.

¹¹ Baghalha, M. (2012). The leaching kinetics of an oxide gold ore with iodide/iodine solutions. *Hydrometallurgy* 113–114, 42–50.

¹² Oraby, E.A. and Eksteen, J.J. (2014). The selective leaching of copper from a gold–copper concentrate in glycine solutions. *Hydrometallurgy* 150, 14–19.

application à la lixiviation de l'or nécessite de porter sa température à 600 °C¹³. À ce jour, cependant, l'efficacité de la glycine reste faible comparée aux autres réactifs : les cinétiques sont très lentes et la dissolution de l'or dépasse rarement 50 %. Par ailleurs, les étapes aval de récupération de l'or restent encore à développer¹⁴.

Enfin, citons le procédé d'extraction de l'or mettant en œuvre l'alpha-cyclodextrine (calixarène), proposé par la start-up américaine Cycladex, dirigée par Roger Pettman. Cette société exploite une partie des résultats des travaux de l'équipe de Sir Fraser Stoddart, prix Nobel de chimie en 2016. Dans ce procédé, la cyclodextrine est utilisée après une première étape de lixiviation aux halogénures tels que décrits au paragraphe 3.2 de la note. L'or forme alors en solution des complexes qui peuvent ensuite être isolés sélectivement à l'aide de ce composé chimique¹⁵. Dans le cas du procédé Cycladex en particulier, le minerai broyé subit une première étape de lixiviation en présence de bromure (HBr + KBr) et de peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) au cours de laquelle l'or est dissous et forme un complexe AuBr₄⁻. Après filtration de la solution, on ajoute la cyclodextrine qui réagit avec ces complexes et précipite. Les cristaux obtenus subissent alors une étape de calcination permettant de récupérer l'or. Le procédé Cycladex a été testé à l'échelle laboratoire sur une vingtaine de minerais d'or provenant de 9 pays. Cycladex annonce la mise en place d'un pilote industriel sur la mine de Comstock (Colorado) pour 2018. L'utilisation de la cyclodextrine pour la récupération de l'or pourrait ainsi faciliter l'utilisation des procédés de lixiviation aux bromures en substitution des procédés de lixiviation au cyanure, mais aucune donnée économique et environnementale n'est encore disponible à ce jour. Il faut rappeler d'une part que les bromures restent des composés extrêmement toxiques et coûteux et d'autre part qu'il existe des procédés beaucoup plus matures (charbon actif – CIL/CIP, résines – RIL/RIP) que le procédé Cycladex pour récupérer l'or après bromuration.

¹³ Eksteen, J.J. and Oraby, E.A. (2015). The leaching and adsorption of gold using low concentration amino acids and hydrogen peroxide: Effect of catalytic ions, sulphide minerals and amino acid type. *Minerals Engineering* 70, 36–42.

¹⁴ Sazini M. (2018). Comparison of cyanide and selected alternative lixiviants for the treatment of free milling gold ore. *Proceedings of ALTA conference*.

¹⁵ Liu, Z., Frascioni, M., Lei, J., Brown, Z.J., Zhu, Z., Cao, D., Iehl, J., Liu, G., Fahrenbach, A.C., Botros, Y.Y., et al. (2013). Selective isolation of gold facilitated by second-sphere coordination with α -cyclodextrin. *Nature Communications* 4, 1855

5. Conclusion

Des alternatives à l'utilisation du cyanure pour l'exploitation des minerais d'or existent à l'échelle industrielle ou sont en phase de développement. Cependant, aucun procédé n'a atteint le niveau de maturité ni la robustesse des procédés au cyanure. L'impact potentiel sur l'environnement des réactifs utilisés dans ces procédés alternatifs est le plus souvent moindre que celui du cyanure. Pour autant, il serait nécessaire d'évaluer les différents procédés dans leur ensemble (chaînes d'approvisionnement en réactifs et en énergie, consommations énergétiques, consommations en eau et en réactifs, gestions des effluents liquides et des résidus solides, *etc.*) afin d'être en mesure de produire une comparaison des impacts environnementaux globaux de chaque option. Par ailleurs, les procédés alternatifs sont souvent plus coûteux et leur applicabilité n'a pas été validée sur une large gamme de minerais d'or. En outre, pour certaines de ces solutions, les étapes d'hydrométallurgie aval qui vise à récupérer l'or après sa mise en solution, restent encore à optimiser et pour certaines à développer. À ce jour, seul le procédé basé sur l'utilisation du thiosulfate atteint un niveau de maturité qui s'approche de la cyanuration. Cependant, sa complexité de mise en œuvre et ses coûts opératoires plus élevés que ceux de la cyanuration, en font une application de niche pour des minerais d'or réfractaires à la cyanuration notamment les minerais carbonatés. Il faut également préciser que ce dernier procédé nécessite l'utilisation d'ammoniac qui reste un composé toxique pour l'homme et les espèces aquatiques et dont l'utilisation, à l'échelle industrielle, nécessite des précautions particulières.



Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement et Écotechnologies
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France - Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr