Zeitschrift: Archives des sciences physiques et naturelles
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 21 (1939)

Artikel: Sur l'extraction de l'or par la méthode de la cyanuration
Autor: Badesco, M. Radu
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-742205

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 18.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

SUR L'EXTRACTION DE L'OR PAR LA MÉTHODE DE LA CYANURATION

PAR

M. Radu BADESCO

En Amérique du Nord, en Australie et en Afrique du Sud, plus de 25% de la production totale d'or est obtenue par le procédé de la cyanuration, qui a la tendance d'être appliqué encore sur une plus vaste échelle que jusqu'à présent. Dans ce procédé, on traite le minerai d'or avec une solution diluée de cyanure de soude ou de potasse, et ensuite on précipite l'or au moyen du zinc métallique. Comme l'or se trouve en particules de très petites dimensions et bien disséminé dans la roche qui forme le gisement, on doit très finement pulvériser le minerai, opération qui a pour but de mettre en liberté les particules d'or et de faciliter ainsi leur dissolution. Le moulage se fait en présence de l'eau avec laquelle le minerai forme une sorte de boue, qui est ensuite introduite dans de grands vases où l'on ajoute le cyanure et où a lieu la dissolution (cyanuration). Cette dissolution est accélérée par une agitation qui a lieu dans ces vases, nommés tanks de cyanuration, vases qui sont pourvus d'agitateurs mécaniques ou à air comprimé, rendant le mélange homogène: solution de cyanure + minerai.

Une installation de cyanuration, en dehors des appareils concasseurs, mouleurs, etc., est composée de plusieurs tanks de cyanuration mis en série, dans lesquels circule d'une manière continue le mélange homogène de minerai et de solution de cyanure. Ce mélange, sortant du dernier tank, passe par un filtre tournant où a lieu la séparation de la solution de cyanure aurifère du minerai devenu stérile après la dissolution de l'or.

Le nombre et la capacité des tanks sont conditionnés par le débit du minerai qu'il s'agit de traiter et le temps nécessaire à la dissolution de l'or, temps qui varie avec les caractéristiques minéralogiques du minerai, du contenu d'or et de la grandeur sous laquelle celui-ci s'y trouve. En général, le temps de cyanuration T_0 varie entre 12-24 heures, assez fréquents étant aussi les cas où la cyanuration ne dure que 3-6 heures ou bien dépasse 2-3 jours. Quant au nombre des tanks, la plupart des installations en possèdent entre trois et huit. Nous reviendrons au cours de cet article sur cette question après avoir analysé le procédé mécanique de la cyanuration et donné les formules mathématiques correspondantes.

L'un des plus importants problèmes qui se pose quand on examine ce procédé est de savoir si le minerai, circulant avec un débit constant d'un vase dans l'autre, mais dans le même sens, quitte le dernier vase sans être resté dans tous les vases au total le temps T_0 nécessaire pour obtenir le maximum d'or dissous (conformément à la courbe établie au laboratoire).

Pour traiter ce problème, nous examinerons d'abord le cas où l'on introduit avec un débit constant a dans l'unité de temps, le mélange homogène de minerai et de cyanure dans *un seul tank* V, rempli d'avance du même mélange. Tenant compte de l'intense agitation qui a lieu dans le tank, nous supposerons que le mélange de la quantité ainsi introduite avec le matériel déjà existant dans le tank *aura lieu presque instantanément*, et alors nous pourrons faire l'hypothèse que le mélange sortant du tank avec le même débit a est lui aussi homogène (les particules de mélange a introduites, ainsi que celles appartenant au tank V y entrant dans les proportions correspondantes).

Dans une Note présentée à l'Académie des Sciences de Paris [1], nous avons montré que, si la cyanuration dure pendant un temps T et si l'on examine la quantité totale aT de minerai sortant pendant ce temps du tank, on a l'équation intégrale suivante:

$$\int_0^T (T - t)\, a(t)\, dt + V\left(1 - e^{-\frac{aT}{V}}\right) = aT \qquad (1)$$

[1] Séance du 3 mai 1937. *Comptes rendus*, page 1307.

les deux premiers termes donnant respectivement les quantités totales de minerai a et V qui sortent pendant le temps T du tank. $a(t)\,dt$ est ici la quantité de mélange a restée dans V le temps t et qui sort au moment t même [1]. C'est une fonction que l'on obtient en dérivant deux fois la relation (1):

$$a(t) = \frac{a^2}{V} e^{-\frac{at}{V}} .$$

La formule (1) nous donne aussi les quantités de mélanges a et V restées dans V au plus le temps $\mathfrak{T}$ et qui sont sorties durant toute l'opération:

$$\int_0^{\mathfrak{T}} (T - t)\, a(t)\, dt \qquad \text{et} \qquad V\left(1 - e^{-\frac{a\mathfrak{T}}{V}}\right) . \tag{2}$$

Toutes ces considérations s'étendent facilement au cas de p tanks, de capacités égales V, *mis en série* (le mélange — minerai + solution de cyanure — traversant avec un débit constant a tous ces p tanks successivement). Dans une Note présentée au Congrès interbalkanique de Bucarest en 1937 [2], nous avons établi pour la quantité de minerai sortant du dernier tank la relation

$$\int_0^{T} (T - t)\, a_p(t)\, dt + \sum_{i=1}^{p} \frac{V_i}{(p - i)!} \int_0^{\frac{aT}{V_i}} e^{-s} s^{p-i}\, ds = aT \tag{3}$$

qui généralise celle que nous avons donnée dans le cas d'un seul tank. Dans cette relation, $a_p(t) \cdot dt$ est la quantité de mélange a qui est restée dans tous les tanks le temps t et qui sort du dernier pendant un intervalle élémentaire dt quelconque, et chaque terme de la somme $\sum_{i=1}^{p}$ est la quantité respective de mélange V contenu au début de l'opération par le tank correspondant V_i, qui sort après toute l'opération. Nous avons

[1] Plus exactement, c'est la quantité qui sort pendant l'intervalle dt qui suit le moment t.

[2] *Bulletin de la Société roumaine des Sciences*, t. 40 (1-2), 1938, p. 157.

numéroté les tanks de 1 à p dans le même ordre qui correspond au sens de l'écoulement du mélange, mais leurs capacités V_i dans cette formule sont égales, spécifiées par des indices seulement pour reconnaître le mélange correspondant.

Deux dérivations donnent la fonction inconnue $a_p(t)$

$$a_p(t) = \frac{a^2}{V} \frac{1}{(p-1)!} \left(\frac{at}{V}\right)^{p-1} e^{-\frac{at}{V}} . \tag{4}$$

Nous nous sommes ensuite posé le provlème suivant: les quantités de mélanges a et V qui sont restées dans les p tanks considérés *au plus* T_0 heures étant

$$\int_0^{T_0} (T - t)\, a_p(t)\, dt \qquad \text{et} \qquad \sum_{i=1}^{p} \frac{V_i}{(p-i)!} \int_0^{\frac{aT_0}{V_i}} e^{-s} s^{p-i}\, ds \tag{5}$$

dans quelles conditions et pendant combien de temps T faudra-t-il effectuer l'opération de cyanuration pour que la somme de ces deux quantités soit inférieure à $K \cdot a \cdot T$ ($K < 1$) ? En d'autres termes, nous cherchons les conditions suffisantes pour être assurés qu'un grand pourcentage de notre mélange a été complètement cyanuré, car aT est la quantité de mélange qui sort du dernier tank pendant toute l'opération.

Nous avons donc à résoudre l'inégalité que l'on obtient en additionnant les expressions (5) et écrivant que cette somme est inférieure ou égale à $K \cdot a \cdot T$. Un calcul élémentaire, que nous avons indiqué dans la Note citée, nous permet de tirer le temps T correspondant à un K donné

$$T \geqslant \frac{T_0 S_0}{K - 1 + S_0} \qquad \text{où} \qquad S_0 = e^{-\frac{aT_0}{V}} \sum_{i=0}^{p-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{aT_0}{V}\right)^i . \tag{6}$$

Le dénominateur devant être positif ($K > 1 - S_0$), on a une limitation du débit a

$$a < \theta_p \frac{V}{T_0} \tag{7}$$

θ_p étant la racine positive de l'équation transcendante en X

$$K = 1 - e^{-X} \sum_{i=0}^{p-1} \frac{X_i}{i!} . \tag{8}$$

En particulier, dans le cas d'un seul tank, on a la limitation suivante

$$a < \frac{V}{T_0} \operatorname{Log} \frac{1}{1 - K} \tag{7'}$$

et l'on voit que a tend vers zéro en même temps que K, circonstance qui se présente aussi dans le cas de p tanks. On peut ensuite observer que la racine positive θ_p croît avec p, ce qui nous permet de dire que *l'on a meilleur temps d'employer plusieurs tanks au lieu d'un seul, le débit* a *pouvant être ainsi augmenté, et, de cette manière, économiser sur les frais de l'exploitation.*

L'équation transcendante (8) peut être écrite sous la forme

$$X = K^{\frac{1}{p}} e^{\frac{X}{p}} \left[\sum_{i=0}^{\infty} \frac{X^i}{(p+i)!} \right]^{-\frac{1}{p}} \tag{9}$$

et alors le développement de la racine θ_p cherchée peut être facilement calculé au moyen de la formule de Lagrange. On obtient une série de la forme

$$\theta_p = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(Kp!)^{\frac{i}{p}}}{i!} D_i \tag{10}$$

où D_i est un déterminant d'ordre $i - 1$ qu'il est inutile de donner ici.

Théoriquement, le problème est résolu puisque cette série converge pour les petites valeurs de K. En pratique, on peut remplacer la série trouvée par d'autres séries plus faciles à manier et ainsi on peut appliquer les formules trouvées aux autres problèmes qui se posent dans l'exploitation de l'or par la méthode de la cyanuration.

Un problème des plus importants est la détermination de la quantité d'or récupérée par la cyanuration, et ce problème peut être immédiatement résolu si l'on tient compte des résultats exposés. Pour le montrer, remarquons d'abord que, par des expériences de laboratoire répétées, on peut tracer la courbe donnant l'or obtenu en cyanurant certains échantillons de minerai pendant une période de temps suffisamment grande. Cette courbe correspond, bien entendu, à des minerais bien

déterminés, prélevés d'une même partie de la mine d'or exploitée. Si l'on porte le temps en abscisse et les quantités d'or Y obtenues en ordonnée, la courbe mentionnée partira de l'origine — Y croît en même temps que t — et tendra asymptotiquement vers la droite $Y = Y_0$ qui correspond à la quantité totale d'or contenue par l'échantillon considéré [1].

Soit $Y = F(t)$ la fonction obtenue en utilisant un procédé quelconque d'interpolation pour déterminer l'équation de la courbe mentionnée plus haut. On a bien entendu $F(0) = 0$ et $F(+\infty) = Y_0$. Si nous faisons une translation des axes de manière que l'axe Ot vienne coïncider avec l'asymptote, l'origine étant sur l'axe des Y, et ensuite une symétrie par rapport à cette asymptote, nous obtenons une nouvelle courbe par rapport aux axes YOt

$$Y = Y_0 - F(t) \tag{11}$$

qui donne à chaque moment $t > 0$ la quantité d'or Y perdue si l'on arrête la cyanuration en ce moment même. Nous désignerons pour plus de simplicité par $Y(t)$ le second membre de (11).

Ceci établi, pour déterminer la quantité d'or récupérée par la cyanuration pendant tout le temps T que dure l'opération, nous calculerons d'abord la quantité d'or perdue par le fait que le mélange sortant du dernier tank contient des particules de minerai non suffisamment cyanurées, quantité que nous pourrons ensuite soustraire de la quantité totale d'or contenue par le mélange aT introduit dans le premier tank et par les mélanges V_i déjà existants dans les tanks au début de l'opération.

Prenons le cas d'un seul tank V et supposons que le mélange qu'il contient y a été versé depuis un certain temps T_1. En répétant le raisonnement qui nous a conduit à l'équation intégrale (1) et tenant compte de la courbe (11), la quantité d'or perdue pendant toute l'opération sera donnée par l'expression

$$\int_0^T (T - t)\, Y(t)\, a(t)\, dt + a \int_0^T Y[T_1 + t]\, e^{-\frac{at}{V}}\, dt \ .$$

[1] Plus précisément, Y_0 est la quantité d'or contenue dans l'unité de volume.

La première intégrale est relative au mélange a et la seconde, au mélange V.

Une fois cette expression calculée, en la soustrayant de la quantité totale d'or

$$(aT + V) \cdot Y_0$$

on obtient la quantité d'or récupérée par la méthode de cyanuration pendant tout le temps T (la durée totale de l'opération).

Dans le cas général de p tanks mis en série, nous désignerons par T_1, T_2, ..., T_p, les temps correspondants aux mélanges $V_i (i = 1, 2, ..., p)$ contenus par ces tanks; ces mélanges y ont été versés depuis les temps respectifs T_i mentionnés.

Ceci précisé, la quantité d'or perdue pendant toute l'opération pourra être calculée comme dans le cas d'un seul tank et sera donnée par l'expression

$$\int_0^T (T - t)\, Y(t)\, a_p(t)\, dt + a \sum_{i=1}^{p} \frac{1}{(p-i)\,!} \int_0^T Y(T_i + t)\, e^{-\frac{at}{V_i}} \left(\frac{at}{V_i}\right)^{p-i} dt \tag{13}$$

qui généralise l'expression (12). On retrouve le premier membre de la relation (3) si l'on fait $Y(t) \equiv 1$. Dans ce cas, la quantité totale d'or contenue par le mélange avec lequel on opère est

$$(aT + pV) \cdot Y_0 \tag{14}$$

et la quantité d'or récupérée s'obtient en soustrayant les relations (13) et (14).

En pratique, il est impossible d'obtenir tout l'or contenu par le minerai même si l'on dépasse un certain temps T_0 quand on est sûr d'avoir récupéré entre 85 et 95% de la quantité totale d'or. La méthode de la cyanuration ne donne plus qu'au laboratoire les 15 à 5% d'or que le mélange entraîne avec lui pendant l'exploitation. Nous pourrons alors remplacer Y_0 par $F(T_0)$ dans la relation (11) et poser

$$Y(t) \equiv 0 \qquad \text{pour} \quad t > T_0 ,$$

ce qui apporte une certaine simplification dans l'expression (13).

La vérification expérimentale des formules établies présente de grandes difficultés car il faut dresser des Tables dont la construction, avec les erreurs correspondantes, demande un

temps beaucoup trop long. Ce qui nous a d'ailleurs arrêté un certain temps, a été l'absence d'une installation de cyanuration possédant un assez grand nombre de tanks comme celle que nous avons préconisée dans une Note présentée au Congrès des Ingénieurs roumains qui a eu lieu à Bucarest en 1937.

Dans cet ordre d'idées nous avons vu plus haut qu'il était nécessaire de prendre p assez grand pour que le débit a en soit augmenté, ceci ayant pour effet de diminuer le nombre K correspondant au mélange non suffisamment cyanuré. Or, les installations qui existaient jusqu'à présent n'utilisaient qu'un petit nombre de tanks — trois à six — de même que les installations américaines modernes qui n'avaient qu'au plus dix tanks d'une plus petite capacité. Tout ceci n'était pas propice pour soutenir la construction d'une installation correspondant à nos vues car, même les spécialistes consultés ne voyaient pas l'intérêt et surtout le rendement d'une telle installation, ainsi que sa possibilité de fonctionnement. On s'est toujours borné à un petit nombre de tanks de grandes capacités.

L'année dernière, sur l'invitation de l'administrateur-délégué Georges Martin de la Société Aurum de Baïa Mare (Roumanie), nous avons visité l'installation de cyanuration de cette Société à capital suisse et roumain (dont le président est M. A. Boissonnas de Genève). Cette installation, construite sur des données empiriques, se composait, à notre surprise, d'une centaine de cellules (tanks de petite capacité), mises en série, et fonctionnait admirablement depuis six mois. C'est, nous croyons, l'unique installation de ce genre. Nous espérons très prochainement confronter les formules établies par nous et les résultats pratiques obtenus par l'installation de Baïa Mare pour pouvoir nous rendre compte quel est le meilleur procédé de cyanuration: un petit nombre de tanks de grande capacité ou un grand nombre de petite capacité.

Le problème qui nous a conduit à la formule (5) nous a été signalé par l'ingénieur Gh. Vanci de la Société Petroshani (Roumanie), qui a apporté un précieux concours dans l'interprétation pratique de nos résultats. Nous lui adressons ici nos plus vifs remercîements.