

DOCUMENT PUBLIC

*Caractéristiques physico-chimiques
des opérations de lixiviation
en tas de minerai d'or
Etude bibliographique*

M.L. Noyer

janvier 1997
R 39140



Mots clés : Lixiviation en tas, minerais d'or, caractéristiques, étude bibliographique

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

NOYER M.-L. (1997) - Caractéristiques physico-chimiques des opérations de lixiviation en tas de minerais d'or. Etude bibliographique. Rapp. BRGM R39140, 67 p., 15 fig., 3 tabl.

© BRGM, 1997, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce travail a été effectué dans le cadre du projet de recherche M31 qui comprenait un thème intitulé " Lixiviation statique : modélisation et amélioration du procédé ". Il a été réalisé sur crédits de la Direction de la Recherche (programme 1996).

L'objectif de ce thème était, dans le but de parvenir à une amélioration des procédés de lixiviation statique, la mise au point de modèles d'écoulement et de transport couplés avec la chimie afin de prédire l'évolution de la lixiviation dans les tas en fonction des différents paramètres physiques pris en compte.

Dans cette optique, l'étude bibliographique présentée ici permet de recenser, dans la littérature existante :

- les données relatives à des sites réels de lixiviation en tas de minerai d'or avec un éclairage particulier sur les sites BRGM,
- les méthodes ayant servi au dimensionnement des tas, au calcul des débits d'arrosage et à l'estimation de l'évaporation,
- les expériences d'écoulement en colonnes et les types de modèles éventuellement utilisés,
- les modèles réduits de tas,
- les méthodes d'optimisation mises en oeuvre sur les sites réels.

Cependant, malgré l'abondance des documents disponibles, plusieurs raisons limitent la portée de cette étude :

- les descriptions d'opérations sont souvent de caractère **qualitatif** et rendent compte d'une démarche **empirique**, propre à chaque opération et non généralisable ;
- les paramètres d'écoulement dans les tas (perméabilité, porosité...), et a fortiori leurs hétérogénéités spatiales, ne font pratiquement jamais l'objet de mesures ; dans le meilleur des cas, on a des estimations de la perméabilité (avec une méthode non précisée) ; seuls les débits d'arrosage sont parfois un peu mieux définis ;
- les informations sont **parcellaires** et varient selon les opérations (sur tel site, on va tout apprendre de la méthode de construction des tas mais on ne saura rien sur les rythmes ou débits d'arrosage ou sur la durée de lixiviation...).

Ce rapport contient donc un assemblage d'informations qui nous ont semblé intéressantes. Nous en avons fait une sorte de manuel d'initiation à la lixiviation en tas des minerais d'or, à l'usage des non-spécialistes ; il n'apprendra probablement rien aux praticiens de la technique mais il pourra, en tout cas nous l'espérons, aider les spécialistes d'autres disciplines appelés à intervenir sur le projet (tels que hydrogéologues, géochimistes ou autres).

Sommaire

Introduction	9
1. Généralités sur la lixiviation en tas.....	13
1.1. Historique du procédé	13
1.2. Réactions chimiques en jeu et caractéristiques requises pour le minerai.....	14
1.3. Considérations géographiques et climatiques	14
1.4. Eléments d'une installation de lixiviation en tas	16
1.4.1. Sources de minerai	16
1.4.2. Pré-traitement du minerai.....	17
1.4.3. Tas et aire de lixiviation.....	18
1.4.4. Système d'arrosage par la solution et de récupération des jus.....	19
1.4.5. Bassins des jus riches et stériles.....	20
1.4.6. Circuit de récupération du métal	20
2. Pré-traitement du minerai par concassage et agglomération.....	21
2.1. Examen des cas où le pré-traitement est nécessaire	21
2.2. Principes de l'agglomération	22
2.3. Teneur en eau optimale pour l'agglomération	24
2.4. Agglomération de minerais concassés et de résidus.....	24
2.5. Agglomération de rejets traités finement broyés.....	24

3. Construction et dimensionnement des tas	25
3.1. Choix du site.....	25
3.2. L'aire de lixiviation et la membrane (liner)	25
3.3. Le système de récupération des jus	25
3.4. Type de tas.....	27
3.4.1. Méthode de l'aire réutilisable (reusable pad).....	29
3.4.2. Méthode de l'aire en expansion (expanding pad)	29
3.4.3. Méthode "valley leach"	32
3.5. Construction des tas	32
3.5.1. Déversement en tas et égalisation de tout-venant (run of mine dumping and dozing).....	35
3.5.2. Déversement en piles (plug dumping).....	35
3.5.3. Entassement au convoyeur (conveyor stacking)	38
3.6. Exemple de construction et dimensionnement des tas	38
3.6.1. Alligator Ridge, Nevada (Amselco Natural Resources).....	38
3.6.2. Picacho Peak, Arizona, (Chemgold inc.).....	42
3.6.3. Borealis Mine, Nevada (Echo Bay Mines).....	43
3.6.4. Winnemucca, Nevada, (Pinson Mining Compagny).....	44
3.6.5. Buckorn, Nevada, (Cominco American)	44
3.6.6. Round Moutain, Nevada, (Round Mountain Gold Corporation)	45
3.6.7. Chimney Creek, Nevada.....	45
3.6.8. Zortman-Landusky, Montana, (Zortman-Landusky Mining Company)	45
3.6.9. Camperdown Mine, Sherugwe, Zimbabwe, (Mopane Mines pvt ltd).....	45
3.6.10. Royal Family Mine, Filabusi, Zimbabwe, (Cluff Minerais Exploration ltd).....	45

4. Application et contrôle chimique de la solution	47
4.1. Techniques d'arrosage du tas	47
4.2. Contrôle chimique de la solution	50
4.2.1. Le cyanure	51
4.2.2. L'oxygène dissous	52
4.2.3. L'alcalinité	52
4.2.4. Les métaux dissous	52
4.3. autres contrôles	53
4.3.1. Les solides dissous	53
4.3.2. L'entartrage	53
5. Caractéristiques des opérations de lixiviation en tas du BRGM	55
5.1. Hassaï	55
5.1.1. Les essais de traitement	56
5.1.2. L'exploitation pilote	57
5.2. Ity	58
5.2.1. Le développement du procédé	59
5.2.2. L'exploitation industrielle	61
Conclusion	63
Bibliographie	65

Liste des figures

Fig. 1 : Types de minerai d'or (d'après La Brooy <i>et al.</i> , 1994).....	9
Fig. 2 : Options de traitement des minerais de type "free milling" et semi-réfractaires (d'après La Brooy <i>et al.</i> , 1994).....	10
Fig. 3 : Schéma d'une opération de lixiviation en tas (d'après Dorey, van Zyl, Kiel, 1988).....	17
Fig. 4 : Effets de l'agglomération (d'après McClelland et van Zyl, 1988).....	23
Fig. 5 : Choix du site de lixiviation en tas (d'après Strachan et Dorey, 1988)	26
Fig. 6 : Evaluation du système collecteur (d'après Strachan et Dorey, 1988)	28
Fig. 7 : Méthode de l'aire réutilisable (d'après Dorey, van Zyl, Kiel, 1988)	30
Fig. 8 : Méthode de l'aire en expansion (d'après Dorey, van Zyl, Kiel, 1988)	31
Fig. 9 : Méthode "valley leach" (d'après Dorey, van Zyl, Kiel, 1988)	33
Fig 10 : Construction du tas par déversement de tout-venant (d'après Muhtadi, 1988)	36
Fig. 11 : Construction du tas par déversement en piles (d'après Muhtadi, 1988).....	37
Fig. 12 : Construction du tas par entassement au convoyeur (d'après Muhtadi, 1988)..	39
Fig. 13 : Lixiviation en tas à Picacho Peak, Arizona (d'après Randol Int. Ltd, 1987) ...	42
Fig. 14 : Utilisation des arroseurs (d'après Muhtadi, 1988).....	48
Fig. 15 : Utilisation des "pressure emitters" (d'après Muhtadi, 1988).....	49

Introduction

D'après La Brooy *et al.* (1994), les minerais d'or peuvent être classés en 3 catégories soit libérés (free milling), complexes ou réfractaires comme indiqué sur la figure 1, extraite de leur publication.

Les minerais de type "libéré" (ayant généralement une granulométrie inférieure à 75 microns à 80 %) peuvent donner lieu à des taux de récupération d'or supérieurs à 90 % en 20 à 30 heures, avec un procédé conventionnel de lixiviation au cyanure par agitation, CIP (carbon in pulp) ou CIL (carbon in leach). En fin de lixiviation, la concentration restante en cyanure est de l'ordre de 100 à 250 ppm avec un pH autour de 10.

Les minerais qui ne peuvent donner lieu à une production d'or à un taux économiquement acceptable qu'au prix de quantités beaucoup plus importantes de cyanure ou d'oxygène sont dénommés " complexes ".

Les minerais qui ne peuvent en aucun cas conduire à une production d'or économiquement rentable avec les procédés courants de lixiviation par cyanuration sont dénommés "réfractaires".

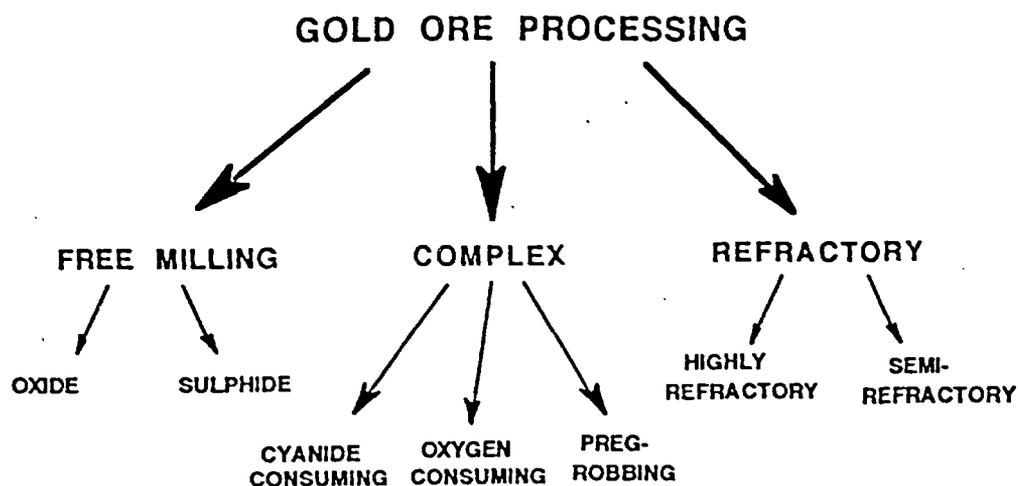


Fig. 1 - Types de minerai d'or (d'après La Brooy *et al.*, 1994).

Les raisons qui peuvent rendre les procédés classiques de cyanuration inopérants ou non rentables sont de 3 types :

- dans les minerais fortement réfractaires, l'or peut être piégé dans la matrice minérale de telle façon que le produit lixiviant ne peut l'atteindre ;
- dans les minerais complexes, le produit de lixiviation est consommé au cours de réactions parasites qui se produisent entre les minéraux, et par conséquent, le cyanure et/ou l'oxygène peuvent se retrouver en quantité insuffisante pour assurer la lixiviation (cf fig.1 : cyanide/oxygen consuming) ;
- des composants du minerai peuvent adsorber ou précipiter une partie du complexe formé par l'or dissous dans le cyanure de sorte qu'il n'est pas récupéré dans le jus lixivié (cf fig. 1 : preg-robbing).

Les minerais complexes ou réfractaires requièrent en général des pré-traitements plus ou moins compliqués avant la lixiviation proprement dite (par cyanuration ou autrement). En ce qui concerne les minerais où l'or est libre, (de type libéré), le pré-traitement est généralement limité au concassage et au broyage pour rendre l'or accessible au cyanure, et seuls ces minerais sont susceptibles d'être traités par lixiviation en tas.

La figure 2, extraite de la même publication, présente l'ensemble des possibilités de traitement pour les minerais du premier type (libéré).

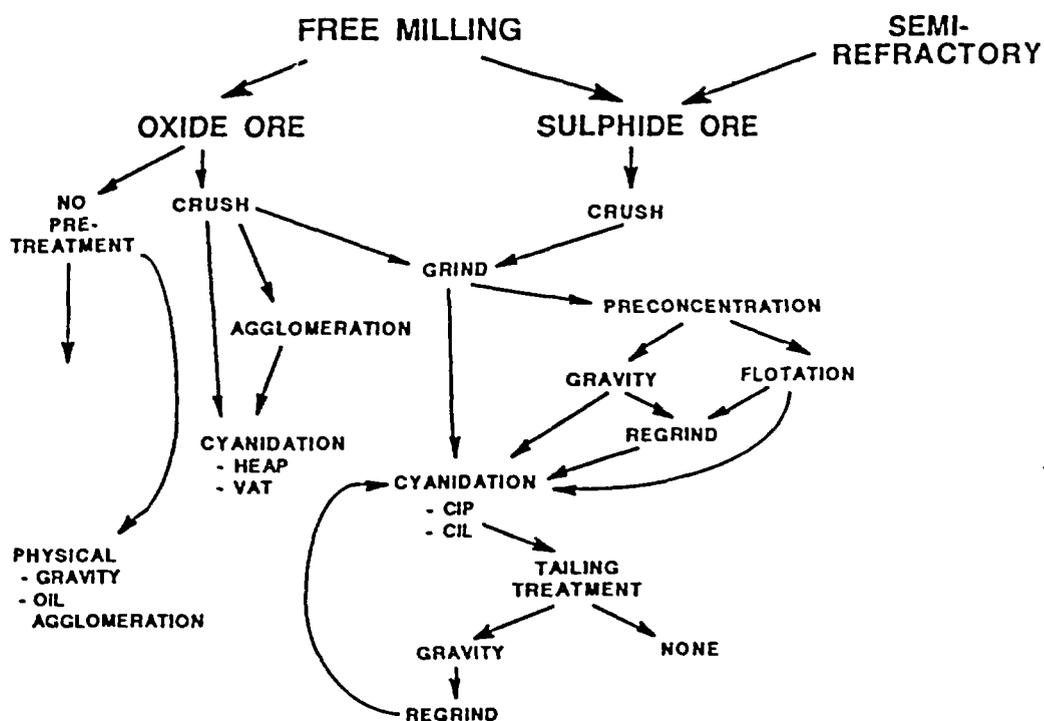


Fig. 2 - Options de traitement des minerais de types libéré et semi-réfractaire (d'après La Brooy et al., 1994).

Il existe plusieurs variantes de la lixiviation en tas (heap leaching) :

- **wap leaching** ou lixiviation en tas sur aire abandonnée ; ce procédé consiste à arroser du minerai après l'avoir préparé mécaniquement en renforçant et en homogénéisant la taille des grains ; c'est le procédé utilisé actuellement à Léro ;

- **dump leaching** ou lixiviation sur aire naturelle ; ce procédé consiste à entasser le minerai en remblai et à l'arroser ;

- **vat leaching** ou lixiviation sur aire récupérable ; ce procédé consiste à noyer le minerai dans une cuve par la solution d'attaque ; le minerai est enlevé en fin d'opération.

Le traitement par lixiviation en tas (heap) est particulièrement adapté aux minerais à faible teneur (jusqu'à 0.2 g/tonne). Le coût de traitement minimum est obtenu pour la lixiviation de tas de tout-venant (run of mine dump). Le minerai moins perméable nécessite un concassage avec, éventuellement, agglomération des particules fines par un liant tel qu'un ciment (cf § 2) pour améliorer la percolation. La solution chargée (pregnant) récupérée en bas du tas est généralement traitée par adsorption sur colonnes de charbon actif (CIC) qui permet habituellement de récupérer l'or de façon efficace.

La figure 2 montre que ce sont les minerais oxydés qui peuvent être traités par " heap " ou " vat " mais que les minerais sulfurés nécessitent des modes de cyanurations par agitation (CIP ou CIL) car le contrôle du pH est impossible en tas.

1. Généralités sur la lixiviation en tas

Ce chapitre s'inspire essentiellement d'un article de Dorey *et al.*, (1988) qui passe en revue les facteurs importants à considérer en vue d'une utilisation de la technologie de la lixiviation en tas pour l'extraction de l'or.

1.1 HISTORIQUE DU PROCÉDÉ

La technologie d'extraction des métaux précieux (or et argent) par lixiviation en tas a pris son essor durant la décade 1975-1985, bien que les principes en aient été connus bien plus tôt (invention du procédé général de traitement des minerais par cyanuration dès 1887, première utilisation commerciale de la lixiviation en tas à la fin des années 60 par la Carlin Gold Mining Company au Nevada).

Au milieu des années 70, la technologie de la lixiviation en tas a été améliorée grâce aux méthodes d'agglomération de façon à pouvoir traiter les gisements argileux à faible teneur (c'était l'époque où le prix de l'or augmentait constamment). En effet, beaucoup de gisements découverts ne pouvaient être traités par la lixiviation en tas simple parce que les argiles ainsi que les poudres générées par le concassage empêchaient une percolation uniforme de la solution à travers les tas de minerai ; la technologie de lixiviation en tas avec agglomération permet par contre de traiter la plupart des minerais, rejets stériles (waste) et rejets traités (milled tailing).

Le résultat des améliorations qui ont été apportées au procédé durant les années 70 et 80 a été un accroissement remarquable de la production : en 1986, la production d'or par lixiviation en tas avait crû jusqu'à 30 % de la production totale des Etats-Unis (au lieu de 6 % estimés en 79).

Comme on l'a déjà signalé, de grands gisements à faible teneur (0,02 oz/ton soit 0,65 g/tonne) peuvent désormais être traités en utilisant les technologies courantes de la lixiviation en tas.

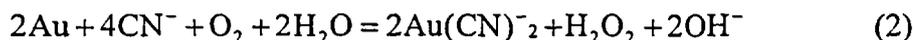
La lixiviation en tas présente, par rapport à la lixiviation par agitation, plusieurs avantages qui sont la simplicité du procédé, ses coûts d'investissement et de production plus faibles, des durées plus courtes de démarrage, et des régulations moins contraignantes concernant l'impact sur l'environnement (au moins aux Etats-Unis...).

1.2. RÉACTIONS CHIMIQUES EN JEU ET CARACTÉRISTIQUES REQUISES POUR LE MINÉRAI

Le principe de base du processus de cyanuration repose sur le constat que les ions cyanure forment des complexes très stables avec l'or, l'argent et quelques autres métaux. Les solutions de cyanure faiblement alcalines dissolvent préférentiellement l'or et l'argent contenus dans le minerai. La réaction chimique, appelée équation d'Elsener qui, traditionnellement, était considérée comme rendant compte de la dissolution de l'or par le cyanure est la suivante :



Des recherches récentes sur le mécanisme de dissolution indiquent que la réaction procéderait en 2 étapes ; la plus grande partie de l'or se dissoudrait selon la réaction :



et une faible (mais significative) partie de l'or se dissoudrait selon la réaction (1).

Le taux de dissolution de l'or dépend de la concentration en cyanure de sodium (NaCN) et de l'alcalinité de la solution, le pH optimum étant 10,3.

Pour que les réactions ci-dessus se produisent rapidement et efficacement, l'or doit se présenter sous forme de "petites particules libres et propres" (free, fine-size, clean particles) dans un minerai qui ne contient pas d'agent consommateur de cyanure ou d'impuretés capables d'inhiber les réactions chimiques en question. Un apport adéquat d'oxygène dissous à la solution cyanurée est nécessaire pendant toute la durée de réaction. Seuls certains types de minerais présentent les caractéristiques requises pour la cyanuration par lixiviation en tas ; il s'agit essentiellement :

- des minerais oxydés "disséminés",
- des minerais sulfurés où les métaux précieux ne sont pas intimement associés avec les sulfures (pas les minerais réfractaires tels que définis en introduction),
- certains filons (Iode) ou "placer" qui contiennent de fines particules d'or avec une grande surface de contact relativement à leur poids (particules "aplaties").

1.3. CONSIDÉRATIONS GÉOGRAPHIQUES ET CLIMATIQUES

Les opérations de lixiviation en tas ont été d'abord localisées dans l'ouest des USA principalement au Nevada, pour toute une série de raisons : présence de gîtes de grande taille mais à faible teneur et donc, peu susceptibles d'être traités par les procédés classiques (CIP/CIL), topographie et conditions climatiques adéquates, grands espaces disponibles et contraintes juridiques réduites. Ces opérations se sont ensuite répandues sur le territoire américain mais en restant longtemps dans des zones à climat tempéré, des températures trop basses limitant les possibilités à cause de la formation de glace.

L'hydrologie du site influence de façon nette la faisabilité d'une opération ; en effet, pour produire efficacement et économiquement les métaux précieux par lixiviation en tas, il faut maintenir la concentration de la solution dans une fourchette relativement étroite, et ceci dépend du régime des précipitations sur le site. En climat aride, où l'évaporation est importante, de grandes quantités d'eau doivent être fournies en appoint régulier pour maintenir la concentration souhaitable dans le circuit de lixiviation. Au contraire, en zone de forte précipitation, c'est la trop grande dilution de la solution qu'il faut surveiller. Cela peut amener à neutraliser et décharger la solution active en cours d'opération. De tels facteurs climatiques doivent évidemment être pris en compte au cours de l'étude de faisabilité du projet.

De nos jours, cependant, les opérations de lixiviation en tas se répandent un peu partout.

- En climat chaud et sec voire aride : des opérations fonctionnent avec succès dans le désert Mojave en Californie, dans l'ouest de l'Australie. On peut citer l'exemple de Picacho Peak (cf § 3.6.2) où on s'attendait à avoir un problème d'approvisionnement en eau ; ce ne fut pas le cas car l'exploitant obtint le droit de prélever de l'eau dans la rivière Colorado ; dans d'autres cas, comme Amboy dans le désert Mojave, exploité par American Mining Ventures, la lixiviation fut réalisée avec de l'eau saturée en CaCl_2 . Le BRGM a sa propre expérience d'une opération de lixiviation en tas en climat aride avec le pilote de Hassaï au Soudan (cf § 5.1).

- En climat froid : l'opération Zortman and Landusky de Pegasus Gold est située à une altitude relativement élevée dans la partie nord des USA où l'hiver est très froid (Montana) ; dans ce cas, la lixiviation est interrompue durant les mois les plus froids. Par contre, au Nevada, il existe des opérations de lixiviation en tas qui sont poursuivies pendant l'hiver, même pendant de longues périodes à températures négatives. Des opérations ont été testées avec succès dans des régions aussi nordiques que le Yukon ou Terre-Neuve pendant de longues périodes de temps très froid (autour de -20°C avec des vents de 100 à 125 mph). Ceci a été rendu possible grâce à des innovations qui sont brièvement décrites ici (pour plus de détails, cf Randol Int. Ltd, 1987, p. 2804) :

- le chauffage de la solution stérile avant son retour sur les tas par échange de chaleur avec une solution d'eau et de soude ; par exemple à Round Mountain, Nevada, (cf § 3.6.6), le chauffage direct de la solution stérile avait été essayé mais arrêté pour cause d'entartrage ; à Borealis Mine, Nevada, (cf § 3.6.3), la lixiviation a pu se poursuivre par des températures de -22°C en chauffant la solution arrivant sur les tas ;

- des abris et des protections contre le vent, par exemple pour les colonnes de charbon actif à Round Mountain et à Borealis ; ou en lixiviant sous abri dans des cuves (vats) comme à Creeple Creek, Colorado ;

- l'utilisation de la glace comme couche de protection sur les bassins ;

- la lixiviation à travers des couches de glace sur le tas ; par exemple à Winnemucca, Nevada, (cf § 3.6.4), la solution est vaporisée sur les tas en grosses gouttes, la glace est poreuse et la solution pénètre à travers les craquelures jusqu'au tas en-dessous ; même si une partie de la solution gèle sur les tas, le cyanure passe ; en Février 1985, 1400 onces d'or ont été récupérées en lixiviant à travers une couche de

glace de 7 pieds ; considérant que la production totale d'or était en moyenne de 1200 onces d'or par mois, ce résultat est remarquable !

- des capuchons pour protéger les têtes d'arrosage ce qui peut être suffisant pour empêcher la formation de glace sur le tas (à Borealis) ;
- enterrement des lignes d'arrosage, par exemple à Zortman & Landusky, Montana (cf § 3.6.8) ;

- En climat humide : la lixiviation en tas a été menée avec succès dans des zones de Californie à fortes précipitations, également aux Philippines, au Costa Rica et au Honduras ; finalement, il est plus difficile d'opérer en climat frais et humide qu'en climat tropical ; la côte Nord-Ouest de l'Amérique du Nord présente quelques uns des climats où il est le plus difficile d'opérer. Un climat trop humide peut aussi mettre en danger la stabilité des tas.

1.4. ÉLÉMENTS D'UNE INSTALLATION DE LIXIVIATION EN TAS

Indépendamment des spécificités de chaque opération, une installation de lixiviation en tas se compose des éléments suivants (cf fig. 3) :

- source de minerai
- système de pré-traitement du minerai (ore preparation)
- tas et aire de lixiviation (heap and pad)
- système d'arrosage par la solution et de récupération des jus
- circuit de récupération du métal
- bassins pour la solution chargée et la solution stérile (pregnant and barren ponds).

Ces éléments sont brièvement passés en revue ci-après.

Le succès d'une opération de lixiviation en tas va dépendre des choix faits sur chacun de ces composants parmi lesquels les plus critiques sont :

- les méthodes employées pour le pré-traitement
- les techniques de construction de l'aire de lixiviation et du tas
- les techniques d'arrosage du tas avec la solution cyanurée.

Ces 3 points sont donc repris plus en détails aux § 2, 3 et 4

1.4.1. Sources de minerai

Elles peuvent être diverses pour un même site : minerai fraîchement extrait de la mine, minerai à faible teneur précédemment mis de côté, rejets traités ou stériles (milled waste/tailings).

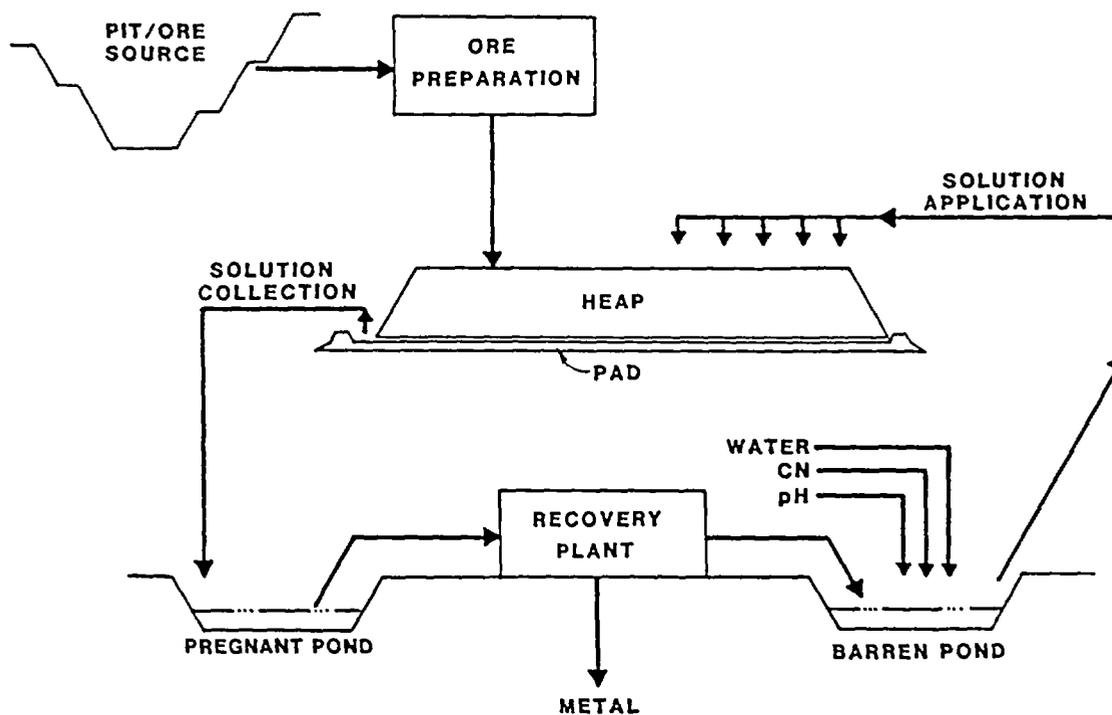


Fig. 3 - Schéma d'une opération de lixiviation en tas (d'après Dorey, van Zyl, Kiel, 1988).

1.4.2. Pré-traitement du minerai

Le choix de la méthode de pré-traitement avant lixiviation est déterminé par les tests métallurgiques sur le minerai ; en corollaire, le type de pré-traitement peut aussi dicter la configuration de l'installation de lixiviation en tas ainsi que la façon de la construire. En général, comme on l'a vu plus haut, les minerais susceptibles d'être lixiviés de cette façon sont des minerais oxydés pour lesquels le pré-traitement peut varier entre : rien, concassage seul, concassage et agglomération ou agglomération seule ; en plus de ces traitements relativement classiques, des méthodes de pré-traitement chimique se sont avérées technologiquement faisables pour les minerais sulfureux, mais non rentables du point de vue économique.

Les objectifs principaux du pré-traitement pour la lixiviation en tas sont l'obtention d'une poudre suffisamment fine pour que la solution entre bien en contact avec le métal et suffisamment perméable et stable pour que le taux de lixiviation soit adéquat à travers tout le tas ; ces deux objectifs peuvent se révéler contradictoires dans certains cas où la finesse du matériau s'accompagne d'une faible perméabilité. En effet, durant la construction du tas, il se produit une ségrégation entre les particules de granulométries très différentes qui aboutit à des cheminements préférentiels pour la solution, ce qui a finalement pour effet de rendre imperméable des portions entières du tas; l'agglomération des "fines" est destinée à minimiser ces inconvénients.

Les tests métallurgiques, qui doivent être menés pour vérifier la faisabilité d'une opération de lixiviation en tas, permettent en général de vérifier si l'agglomération est nécessaire (tests en bouteille, tests en petites colonnes) : en règle générale, un minerai qu'il faut concasser jusqu'à 3/4 de pouce (19 mm) ou plus fin va nécessiter une étape d'agglomération même s'il ne contient pas d'argile. Des tests doivent alors être menés pour déterminer la quantité optimale de liant à ajouter. On revient plus en détail sur le pré-traitement du minerai au § 2.

1.4.3. Tas et aire de lixiviation

Chaque installation de lixiviation en tas est unique et la construction du tas et de l'aire (pad) requiert la prise en compte de plusieurs facteurs qui sont : le type et l'origine du minerai, le type de métallurgie, la topographie du site, les caractéristiques géotechniques, hydrologiques et climatiques du site. L'aire est la structure qui contient le tas et doit prévenir les infiltrations de solution cyanurée dans le sol.

Les trois méthodes de construction et d'utilisation du tas et de l'aire couramment utilisées sont :

- l'aire réutilisable (reusable pad)
- le tas en expansion permanente (permanent expanding heap)
- la lixiviation en vallée (valley leach).

Ces méthodes sont décrites en détail au § 3.4.

Le tas et l'aire doivent être des structures stables qui vont contenir le solide et le lixiviat ; chacune des trois méthodes listées ci-dessus requiert la prise en compte de critères différents.

Le placement du minerai sur le tas peut aussi être effectué de différentes manières, en fonction prioritairement de la nature du minerai. Cela va du déversement en tas (end dumping) au dépôt à la chargeuse (front-end loaders) ou à l'entassement par un convoyeur (conveyor stacking), les critères principaux de choix étant de limiter au mieux le tassement, la formation de couches différenciées et la ségrégation des particules et de prévenir tout dommage à la membrane d'étanchéité (liner) durant la construction du tas.

Les fondations du tas doivent être capables de supporter les contraintes exercées par le tas, non seulement en terme de stabilité d'ensemble mais aussi en terme de différences de tassement d'un endroit du tas à l'autre ; en effet, ces différences de tassement peuvent affecter défavorablement le drainage dans le tas et occasionner des dommages à la membrane (liner) et à l'aire de lixiviation. En cas de "valley heap" ou de sites pentus, il faut évaluer la capacité des matériaux de fondation et de l'interface entre les fondations et la membrane à résister au glissement. On revient plus en détail sur ces points au § 3.

1.4.4. Système d'arrosage par la solution et de récupération des jus

La solution de lixiviation est pompée dans le bassin des jus stériles (barren pond) jusqu'à la surface du tas où différents systèmes d'arrosages peuvent être utilisés ; la contrainte à respecter est une distribution uniforme de la solution ; les taux d'arrosage classiques varient entre 7 et 10 l/h/m². L'arrosage résulte normalement en un écoulement non saturé de solution à travers le tas. Les réactions chimiques de dissolution du métal par le cyanure réclament un apport d'oxygène, qui peut venir naturellement de la zone non saturée de l'écoulement ; de plus, l'arrosage accentue l'effet d'entraînement de l'oxygène dans la solution lixiviante. L'écoulement de la solution dans le tas est essentiellement vertical depuis la surface jusqu'en bas du tas. Certaines méthodes permettent de stocker la solution dans le tas lui-même, dans ce cas, la solution s'écoule verticalement de la surface du tas jusqu'à la surface libre de la solution stockée.

Une couche de matériau perméable est habituellement placée directement sur la membrane avant la construction du tas, dans le but de faciliter le drainage et aussi de protéger la membrane durant la construction.

La solution chargée venant du tas est recueillie à l'aide d'un système de tuyauteries et/ou de tranchées ; des drains sont souvent installés dans la couche perméable située au sommet de l'aire pour optimiser le recueil de la solution. Ces drains tendent à prévenir la formation d'une surface libre au-dessus de l'aire lorsqu'on utilise des méthodes de drainage gravitaire et ont donc pour effet de réduire les pertes par suintement. Les solutions chargées contiennent souvent des sédiments et donc un filtrage doit être envisagé avant d'envoyer la solution chargée dans le bassin des jus riches (pregnant pond).

On revient plus en détail sur les systèmes et débits d'arrosage au § 4.

1.4.5. Bassins des jus riches et stériles

La solution chargée contenant l'or, il est impératif, d'un point de vue économique, qu'aucune fuite ne puisse se produire depuis le bassin ; on installe donc une membrane imperméable afin de contenir la solution non seulement pour éviter les fuites de métal précieux mais aussi pour protéger l'environnement contre une éventuelle pollution au cyanure. Le bassin de solution chargée est directement connecté au tas, aussi recueille-t-il, en plus du jus riche, l'eau de ruissellement sur le tas. La conception du bassin de jus riche doit donc tenir compte de l'éventualité d'orages.

La solution stérile contient le jus après que le métal en ait été retiré, c'est à dire les résidus chimiques utilisés lors de la récupération du métal (cf § 1.4.6.). De plus le pH est fixé à une valeur proche de 10 et du cyanure est présent, en général pas en quantité suffisante pour assurer la lixiviation, on en rajoute donc dans le bassin des jus stériles avant de renvoyer la solution sur le tas.

1.4.6. Circuit de récupération du métal

Il consiste en un système permettant de récupérer le métal précieux contenu dans la solution et une installation pour le fondre. La récupération se fait soit par précipitation sur zinc selon le procédé de Merrill-Crowe ou par adsorption sur charbon actif.

2. Pré-traitement du minerai par concassage et agglomération

Pour la rédaction de ce chapitre, on s'est référé à McClelland et van Zyl, (1988).

2.1. EXAMEN DES CAS OU LE PRÉ-TRAITEMENT EST NÉCESSAIRE

La cyanuration par lixiviation en tas est particulièrement adaptée aux minerais à faible teneur, aux petits gisements, et aux rejets traités ou stériles pour lesquels un broyage très fin n'est pas indispensable pour une bonne extraction. Comme on l'a déjà signalé, les conditions nécessaires sont une bonne perméabilité du tas et une répartition uniforme de la solution de lixiviation.

Les minerais d'or et d'argent contenant des quantités importantes d'argile ou de "fines" générées par le concassage sont parmi les plus difficiles à traiter par lixiviation en tas. La présence de quantités excessive de limons (slimes) de granulométrie inférieure à 50 microns dans le tas a pour effet de ralentir la percolation de la solution, créer des cheminements préférentiels voire des zones non lixiviées dans le tas. Ceci a pour conséquence des durées de lixiviation excessives (économiquement parlant) et des taux de récupération trop faibles. Dans les cas extrêmes, les argiles ou les limons peuvent complètement colmater le tas, ce qui provoque le ruissellement de la solution sur les faces du tas au lieu de sa pénétration à l'intérieur.

Les inconvénients provoqués par la présence de "fines" sont particulièrement néfastes au moment de la construction du tas (cf § 3) parce qu'un tri s'opère alors naturellement entre les matériaux grossiers et fins, ce qui a pour effet de concentrer les fins au centre des piles individuelles du tas et les grossiers à la base des piles. Quand les piles individuelles sont nivelées avant installation du système d'arrosage, une ségrégation supplémentaire se produit qui résulte en des zones de perméabilités nettement différentes. La solution suit alors les chemins de moindre résistance, percolant à travers les zones de matériau grossier et court-circuitant (ou humectant à peine) les zones de matériau fin.

Comme on l'a signalé plus haut, le pré-traitement par agglomération est efficace pour améliorer les conditions de percolation dans les minerais à faible teneur ; cependant les systèmes permettant de réaliser l'agglomération nécessitent des investissements importants et ne devraient donc pas être installés à moins d'absolue nécessité. Il est donc indispensable, au moment des tests de faisabilité d'une opération commerciale, de déterminer précisément le besoin en agglomération pour un type de minerai donné.

2.2. PRINCIPES DE L'AGGLOMÉRATION

L'objectif de l'agglomération des minerais de métaux précieux avant lixiviation en tas est donc la production d'un matériau uniformément poreux mais qui restera mécaniquement stable quand il sera manipulé, mis en tas puis percolé par le liquide lixiviant. Une autre application courante des principes de l'agglomération est la stabilisation des sols en vue de la construction de routes : dans ce cas les quantités d'agent stabilisant utilisées sont habituellement dans la fourchette de 5 à 10 % du poids ; il est clair que de tels pourcentages sont économiquement prohibitifs pour les opérations commerciales de lixiviation en tas ; il est donc primordial d'optimiser ces quantités.

Les différents liants utilisables peuvent varier en efficacité en fonction du type de minerai. Suivant la composition granulométrique du minerai, on peut identifier deux mécanismes d'agglomération (cf figure 4) :

- agglomération des particules fines sur le matériau grossier contenu dans le minerai concassé (cf fig. 4 a),
- agglomération des particules fines en boulettes stables (cf fig. 4 b).

Dans le cas de l'agglomération de minerais ou résidus concassés, contenant un fort pourcentage de "fines", les fines vont se lier aux morceaux plus gros ; dans ce cas, le ciment Portland peut être utilisé seul comme liant et de faibles quantités sont suffisantes. Quand des matériaux fins tels que des rejets traités avec pas ou peu d'argile sont agglomérés, on peut utiliser aussi le ciment "Portland" seul.

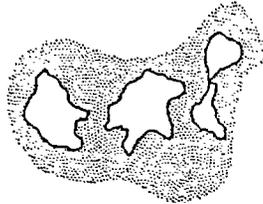
Les minerais argileux sont plus délicats à traiter du fait de la très faible perméabilité de l'argile ; on peut parfois stabiliser l'argile en ajoutant de la chaux ; un échange de cations se produit et l'argile riche en sodium se change en argile riche en calcium, ce qui augmente la perméabilité de l'argile. Il est donc conseillé d'agglomérer les minerais argileux à l'aide d'un mélange de ciment Portland et de chaux.

Les facteurs importants de l'agglomération sont :

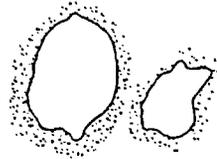
- les caractéristiques du minerai (granulométrie et présence de fractures dans les particules) : le temps de lixiviation nécessaire varie comme le carré du diamètre des particules ; pour une récupération rapide du métal, le diamètre doit être aussi faible que possible mais l'option d'un broyage fin entre en conflit avec la nécessité d'une perméabilité uniformément élevée ; l'agglomération doit permettre de réconcilier ces deux contraintes contradictoires ;
- contrôle du processus : contrôle du taux d'alimentation en minerai, du taux de liant, de la teneur en eau ;
- type d'appareil agglomérateur sur lequel on n'insistera pas ici (voir McClelland et van Zyl, 1988, pour plus de détails).

BEFORE AGGLOMERATION

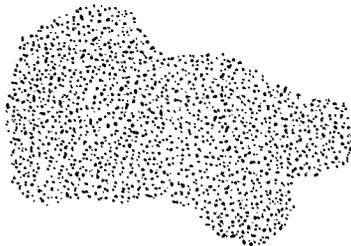
AFTER AGGLOMERATION



a) COARSE MATERIAL WITH LARGE PERCENTAGE FINES.



a) FINES ARE AGGLOMERATED ONTO COARSE PARTICLES, BINDER SUCH AS PORTLAND CEMENT IS USED.



b) FINE MATERIAL, e.g. TAILINGS WITH NO OR LITTLE CLAY



b) AGGLOMERATES ARE FORMED BY BINDING FINES TOGETHER WITH BINDER SUCH AS PORTLAND CEMENT.



c) CLAY MATERIAL WITH METAL "LOCKED" IN LOW PERMEABILITY MEDIUM.



c) AGGLOMERATES ARE FORMED BY BINDING FINES TOGETHER AFTER MODIFYING CLAY PROPERTIES, LIME AND PORTLAND CEMENT CAN BE USED.

Fig. 4 - Effets de l'agglomération (d'après McClelland et van Zyl, 1988).

Les recherches récentes s'orientent vers l'utilisation de polymères pour remplacer partiellement ou totalement le ciment comme liant (cf Randol Int. Ltd, 1992a, p 5775, Randol Int. Ltd, 1992b, p 223 et p 247).

2.3. TENEUR EN EAU OPTIMALE POUR L'AGGLOMÉRATION

La teneur en eau optimale est déterminée par la taille des particules, la teneur en argile, les caractéristiques de mouillabilité, et le degré de compacité requis durant l'agglomération. La masse ne doit pas être saturée car cela détruirait la "green strength" (terme qui désigne la force des agglomérés pour résister aux manipulations et au traitement, cette force est apportée principalement par la tension de l'eau et améliorée par le liant). Des tests préliminaires doivent permettre d'estimer la teneur en eau convenable dans chaque cas.

2.4. AGGLOMÉRATION DE MINÉRAIS CONCASSÉS ET DE RÉSIDUS

La plupart des minerais de métaux précieux et des résidus (wastes) nécessitent d'être concassés à une taille inférieure à un pouce (25 mm) avant agglomération ; le concassage à ces tailles libère le métal précieux. Pour réaliser un concassage à 3/4 de pouce (19 mm), il faut en général procéder en 2 étapes et pour 3/8 de pouce, en 3 étapes successives (chiffres donnés à titre indicatif).

Les minerais concassés peuvent en général être agglomérés correctement avec des quantités de ciment allant en général de 2,5 à 5 kg par tonne de matériau sec (parfois jusqu'à 20 kg/tonne) et en mouillant avec 8 à 16 % d'eau ou de solution fortement cyanurée, ensuite il faut brasser mécaniquement le mélange aggloméré et le laisser arriver à maturation pendant la construction du tas ; la quantité de ciment ajoutée durant l'étape d'agglomération procure en général le taux d'alcalinité requis pour la lixiviation. Après agglomération et construction du tas, la lixiviation est réalisée de la même manière que pour une lixiviation en tas classique (sans agglomération). Durant l'agglomération, l'argile et les particules fines adhèrent aux particules plus grossières en les enveloppant d'une couche comme indiqué sur la figure 4 en a).

2.5. AGGLOMÉRATION DE REJETS TRAITÉS FINEMENT BROYÉS

Les rejets traités (tailings) d'opérations précédentes ont en général une teneur en métal précieux trop faible pour qu'une opération de cyanuration classique par agitation soit économiquement rentable. Dans la plupart de ces cas, la seule technique envisageable est la lixiviation en tas. Le liant à utiliser est dans ces cas un mélange de chaux et de ciment, habituellement 10 à 15 lb/ton (5 à 7,5 kg/t) de matériau sec. Il faut ajouter davantage d'eau que dans les cas évoqués au § précédent, pour arriver à 16 %, voire à 22 %. Des temps de maturation de l'ordre de 72 heures ou plus sont requis.

Deux paramètres mécaniques sont importants pour l'agglomération des rejets :

- l'eau doit être ajoutée en gouttelettes parce que la goutte d'eau rencontrant le matériau sec forme immédiatement une petite boule qui sert de noyau pour la croissance des agglomérés ; si l'eau est envoyée sous forme de vapeur, le noyau ne se forme pas ;
- il ne faut pas brasser le matériau mais plutôt le rouler.

3. Construction et dimensionnement des tas

Pour la rédaction de ce chapitre, on s'est référé à Muhtadi, (1988), Randol International Ltd, (1987), Randol International Ltd, (1992a) et van Zyl, (1987).

3.1. CHOIX DU SITE

Les aspects à prendre en compte lors de l'évaluation des potentialités d'un site sont divers ; il faut en particulier tenir compte de contraintes propres au site qui sont la topographie, le climat, les conditions de fondations, la géologie et l'hydrologie.

En ce qui concerne la topographie, par exemple, la figure 5 montre que, pour ce cas, seule une partie du site peut être retenue pour installer l'aire de lixiviation car la pente doit exister pour permettre l'écoulement des jus mais rester modérée ; en fait la pente idéale de l'aire est celle qui minimise les travaux de terrassement tout en permettant l'écoulement et en assurant la stabilité mécanique du futur tas, laquelle est contrôlée par la partie aval de l'aire.

3.2. L'AIRE DE LIXIVIATION ET LA MEMBRANE (LINER)

L'aire elle-même doit :

- constituer un soubassement solide, stable et incompressible durant la construction du tas d'abord puis pour sa durée de vie,
- constituer une couche très peu perméable sous le tas afin d'intercepter les jus s'écoulant du tas.

La prise en compte de la première condition entraîne les contraintes sur la pente comme évoqué au § précédent ; dans certains cas, l'aire peut avoir une pente variable telle que la partie aval soit plus plate que la partie amont, en vue de renforcer la stabilité du tas.

La réalisation de la deuxième mission de l'aire est liée au choix des matériaux constituant la membrane d'étanchéité (cf Strachan et van Zyl, 1988), qui est destinée à contenir les jus chargés et peut comporter une ou plusieurs feuilles de matériaux divers (argile compactée, géomembrane, etc...).

3.3. LE SYSTEME DE RECUPERATION DES JUS

Ce système est chargé de collecter les jus traversant le tas et de les rassembler par drainage gravitaire jusqu'au réservoir de solution chargée.

Il est conçu pour s'adapter au débit des jus de lixiviation et aussi au ruissellement et suintement en cas d'orages. Ce système a aussi pour rôle de réduire la hauteur d'eau saturée dans le tas.

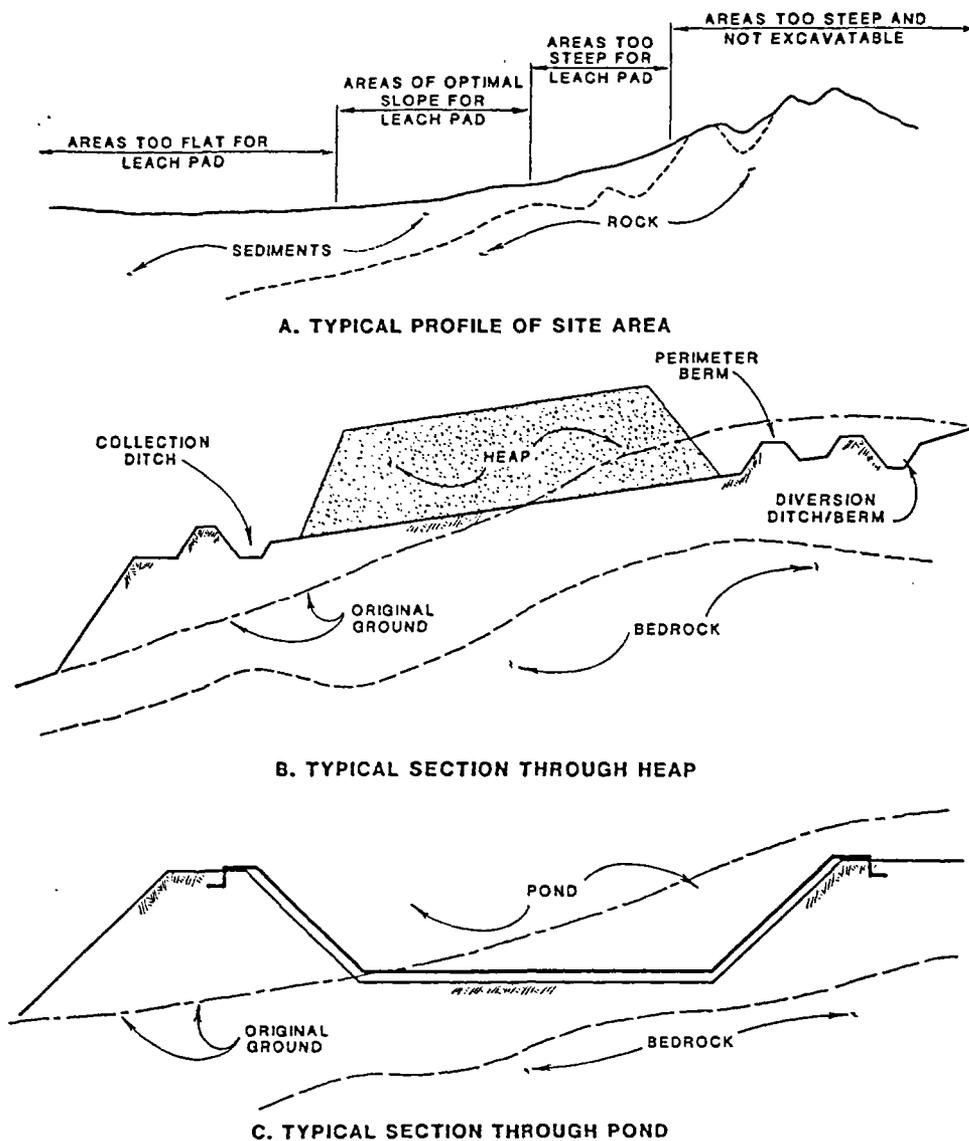


Fig. 5 - Choix du site de lixiviation en tas (d'après Strachan et Dorey, 1988).

Ce système constitue donc une zone de drainage au-dessus de la membrane, constituée de minerai s'il est suffisamment perméable, ou d'un matériau plus filtrant tel que du gravier, ou de drains, ou d'une combinaison de ces éléments.

Le choix du système dépend de la pente de l'aire, de la perméabilité du minerai et du débit d'arrosage par la solution. Si le minerai est très perméable par rapport au débit d'arrosage, le minerai seul peut suffire à assurer le drainage ; si le minerai est peu perméable, considérant le débit choisi, et si la zone saturée au-dessus de la membrane doit être réduite, un système plus complexe doit être installé. Ces remarques sont illustrées par la figure 6 où les limites de la zone saturée sont schématisées par l'équation dite "du drain", considérée comme suffisamment précise pour évaluer l'espacement requis entre les drains dans le tas. Le système collecteur est conçu pour minimiser l'extension de la zone saturée au-dessus de la membrane, minimiser les suintements et cependant, assurer une stabilité mécanique correcte. Il doit aussi jouer un rôle de filtre pour empêcher les particules fines de minerai d'arriver dans le réservoir de solution chargée.

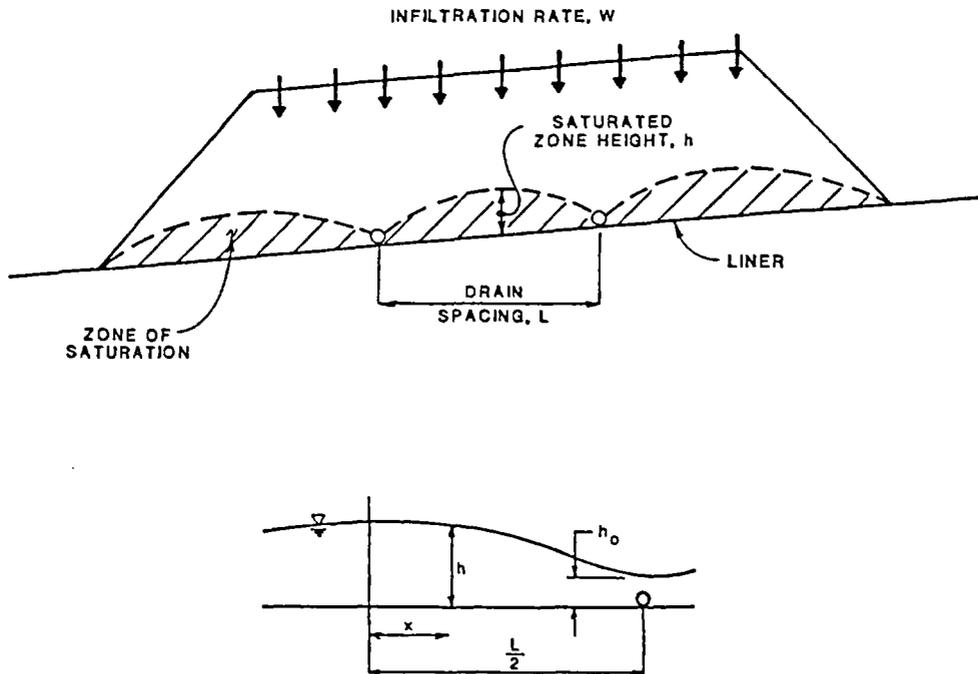
3.4. TYPE DE TAS

Le choix de la configuration du tas influence le fonctionnement du système collecteur et donc le taux de récupération du métal et il devrait être fait en liaison avec la conception de l'aire de lixiviation.

La hauteur totale des tas dépend de la résistance des fondations, de l'aire et de la membrane, de la topographie, des caractéristiques physiques du minerai et chimiques de la solution.

La stabilité doit être particulièrement bien évaluée dans les cas où on peut craindre un affaissement ou un glissement du tas, c'est à dire quand les fondations sont faibles, quand la pente est un peu forte, quand le tas doit atteindre une grande hauteur, ou quand l'apparition dans le tas d'une zone saturée importante est prévisible.

Le facteur le plus important à prendre en compte pour choisir la configuration du tas est l'aptitude à la lixiviation du minerai (leachability). Les tests en colonne ne peuvent pas donner une idée exacte de ce qui se passe dans un tas réel, c'est pourquoi les taux de récupération en colonne représentent une limite supérieure non atteinte sur un tas. Avec quelques années de recul, les opérateurs commencent cependant à avoir une meilleure approche de ce qui peut tourner mal sur le site alors même que les tests en colonne concluaient à une bonne aptitude à la lixiviation du minerai.



FROM SOLUTION TO ONE-DIMENSIONAL UNCONFINED
FLOW BETWEEN PARALLEL DRAINS WITH VERTICAL
INFILTRATION (McWHORTER AND SUNADA, 1977):

$$h^2 = h_o^2 - \frac{WL^2}{4K} - \frac{Wx^2}{K}$$

FOR $h_o = 0$ and $x = 0$:

$$h^2 = \frac{WL^2}{4K} \text{ i.e., } \frac{L}{2} \sqrt{\frac{W}{K}} = h$$

Fig. 6 - Evaluation du système collecteur (d'après Strachan et Dorey, 1988).

Comme indiqué au § 1.4.3, il existe 3 méthodes principales de construction et d'utilisation de l'aire et du tas :

3.4.1. Méthode de l'aire réutilisable (reusable pad)

On construit une série d'aires permanentes sur lesquelles le minerai éventuellement pré-traité est chargé, lixivié, lavé, neutralisé si nécessaire, puis déchargé pour stockage dans une pile de minerai usagé (cf figure 7). La mise au point d'un tel système nécessite une évaluation précise du temps de lixiviation ; en effet, la taille des aires et le nombre de segments d'aire sont dictés par la durée des cycles de lixiviation, optimisée par rapport au taux de récupération du métal ; le minerai doit se lixivier au cours de cycles de durée relativement constante ; les aires sont conçues pour des temps de lixiviation d'environ 60 jours ; si le temps de lixiviation augmente, la production diminue.

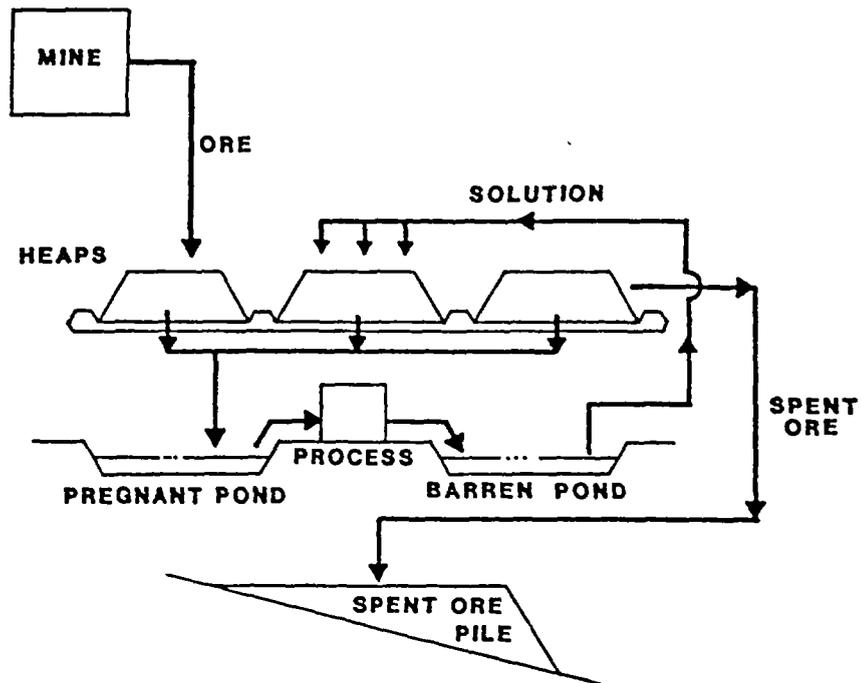
Un inconvénient de cette méthode est son manque de flexibilité : une fois que le minerai est retiré de l'aire, les quantités de métal restantes sont définitivement perdues. Par contre, la construction de l'aire ne nécessite pas une très grande surface par rapport à la méthode du tas en expansion. Une topographie plate est préférable ; néanmoins, comme la surface nécessaire est limitée, la construction de l'aire par excavation et remblai est envisageable ; de plus, il faut absolument disposer d'un emplacement adéquat pour le tas de minerai déjà traité. Les chargements et déchargements de minerai sur l'aire impliquent un système de membrane résistante, capable de tolérer les contraintes qui résultent de ces manipulations ; on peut utiliser pour la membrane des matériaux tels que l'asphalte ou le béton.

L'avantage principal de cette méthode est la faible surface de lixiviation ; le coût (par tonne de minerai) de la construction de l'aire décroît en fonction du nombre de fois que les aires sont réutilisées ; la taille des bassins ne dépend que de la surface de l'aire et est donc limitée aussi ; on peut donc plus facilement contrôler la solution cyanurée (cf § 4.2).

3.4.2. Méthode de l'aire en expansion (expanding pad)

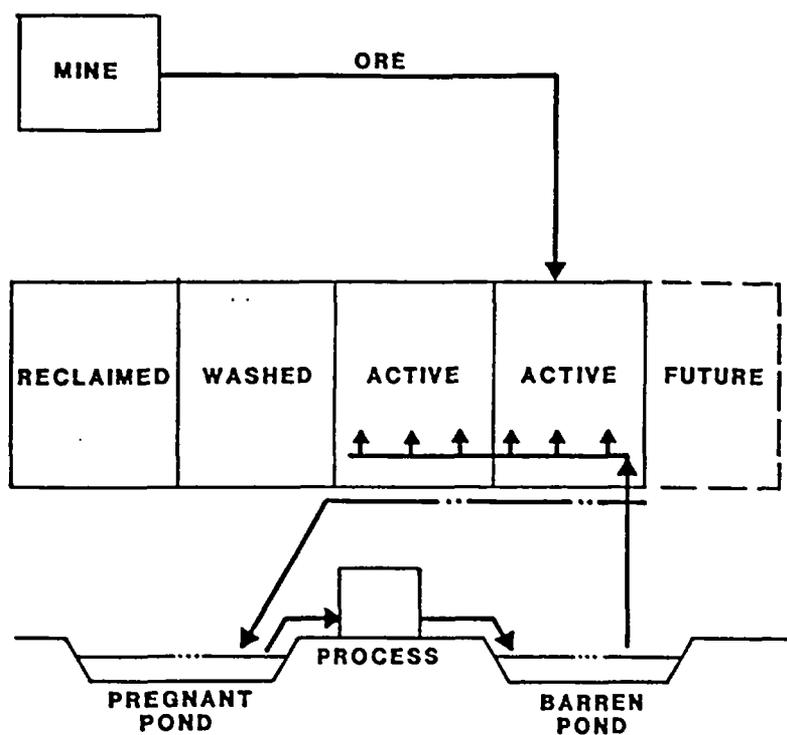
Le minerai est placé sur l'aire ; après lixiviation, le minerai reste en place (figure 8) ; un nouveau cycle de lixiviation peut alors être effectué ou bien on lave ou on neutralise le minerai si nécessaire. On peut alors rajouter des couches (lift) sur le tas ou bien le réformer.

Pour appliquer cette méthode, il est nécessaire de disposer d'une grande surface suffisamment plate sur laquelle l'aire (et le tas) vont se développer par étapes ; en général, la pente du sol devrait être inférieure à 10% et si possible à 5%. Pour limiter les pertes d'eau, les conditions climatiques devraient permettre un bilan nul entre évaporation et précipitation. La taille des surfaces en jeu accroissent l'impact du cycle hydrologique. Par contre, il n'y a pas de limitation de principe à la durée de lixiviation.



- MINE
- TREAT & PLACE ON PAD
- LEACH
- WASH/NEUTRALIZE REMOVE
- DISPOSE IN SEPERATE WASTE PILE

Fig. 7 - Méthode de l'aire réutilisable (d'après Dorey, van Zyl, Kiel, 1988).



- MINE
- TREAT & PLACE ON PAD
- LEACH
- NEUTRALIZE (IF NECESSARY)
- LEAVE IN PLACE/RECLAIM
- OR
- RELEACH
- PLACE ADDITIONAL LIFT OF ORE

Fig. 8 - Méthode de l'aire en expansion (d'après Dorey, van Zyl, Kiel, 1988).

Les minerais à cycle variable ou long peuvent être traités sans impact négatif sur la production d'or ; si cela s'avère rentable, on peut lixivier le minerai en plusieurs cycles avant de l'abandonner. La membrane ne subit pas de contraintes particulières une fois que le minerai est installé, elle n'a pas besoin d'être aussi résistante que dans le cas de la première méthode. Le coût initial est relativement bas du fait de la construction par étapes ; par contre, le coût par tonne de la construction de l'aire est fixe.

3.4.3. Méthode "valley leach"

Le minerai est placé derrière une structure destinée à le retenir (cf figure 9). La lixiviation est réalisée sur des couches (lifts) successives qui progressent vers l'amont de la pente. La majeure partie du minerai demeure en contact avec la solution lixiviante durant l'opération ; une fois la lixiviation achevée, le minerai est laissé en place et réformé sous la forme d'un tas de déchets (waste rock dump).

La méthode est applicable à condition que le minerai ait la capacité de rester perméable malgré les contraintes exercées par les couches successives. Elle présente l'avantage de pouvoir être utilisée sur un terrain pentu. La capacité de stockage des pores du minerai est souvent utilisée pour contenir la solution chargée, ce qui supprime la nécessité d'un bassin pour cette solution dans des cas où la place disponible est souvent réduite à cause de la pente ; le fait de contenir la solution chargée dans le tas lui-même implique la mise en place d'un système de membrane très fiable, par exemple, une combinaison de synthétique et de sol à faible perméabilité.

Le stockage de la solution derrière la structure destinée à le retenir implique que celle-ci fonctionne comme un barrage. La conception et la réalisation du "valley heap" nécessite des travaux d'ingénierie relativement importants pour évaluer les effets sur la stabilité de l'ouvrage de la topographie et de la hauteur finale prévue pour le tas. Des "valley leaches" en opération atteignent des hauteurs dépassant 200 pieds (61 m) de la base au sommet. Du fait de la rétention des solutions dans le tas lui-même dont la capacité de stockage est relativement grande, une opération de ce type peut tolérer de grandes fluctuations saisonnières dans les conditions climatiques et s'adapter à pratiquement tout type de climat.

3.5. CONSTRUCTION DES TAS

Plus de la moitié des opérations de lixiviation en tas montées avant 1980 ont été des échecs, la plupart du temps parce que la construction du tas avait été incorrectement effectuée.

La question de la construction du tas tourne autour du problème de la séparation naturelle entre les matériaux de granulométries différentes quand ils sont entassés. La ségrégation par granulométrie se produit de toute façon mais on peut la contrôler quelque peu en choisissant correctement la méthode. Plus le tas est haut, plus la ségrégation va être marquée, on peut donc la réduire en réduisant la hauteur ou en empilant des couches fines successives (lifts).

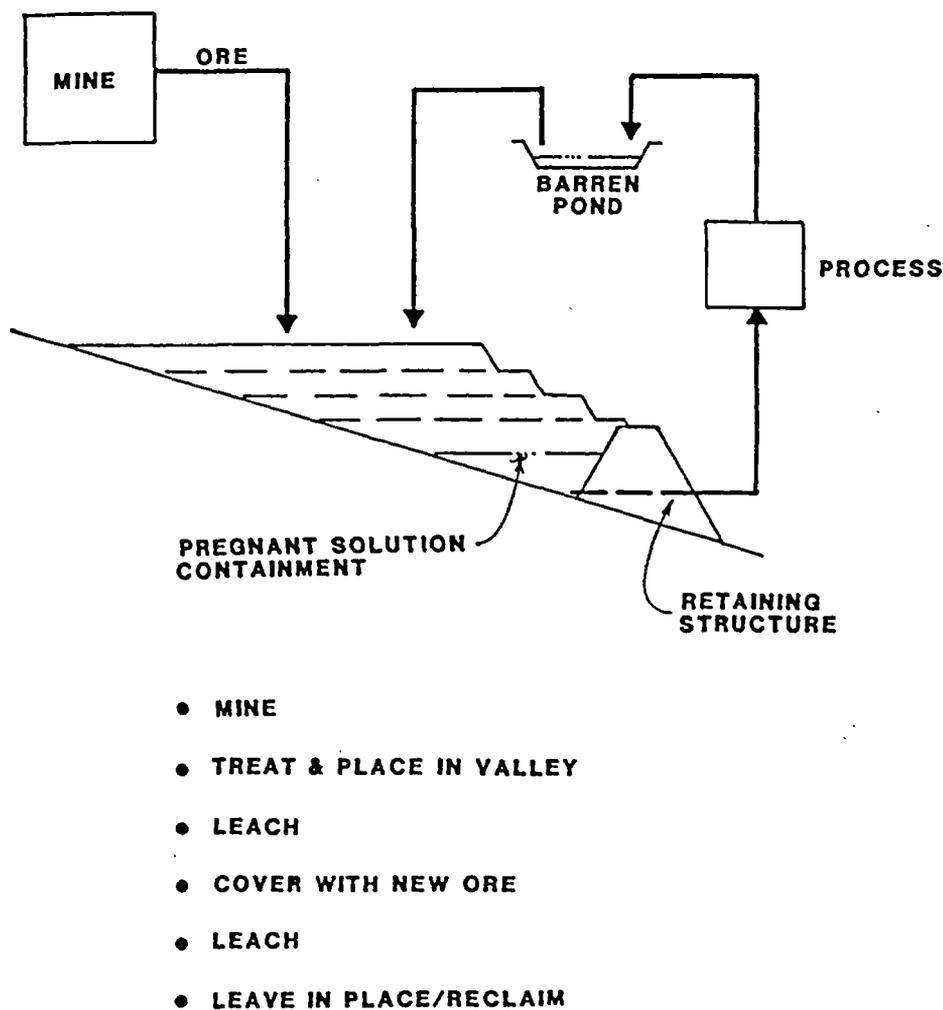


Fig. 9 - Méthode "valley leach" (d'après Dorey, van Zyl, Kiel, 1988).

Un autre problème courant est celui des changements dans les caractéristiques du minerai au cours de l'exploitation, c'est-à-dire de la teneur en argile, la teneur en eau, etc..., modifications qui peuvent amener à changer la façon de manipuler le minerai et de le mettre en tas.

Les minerais naturellement perméables et libres de "fines" sont relativement insensibles à la méthode de construction du tas qui peut alors atteindre de grandes hauteurs (200 pieds) ; les durées de lixiviation sont alors assez courtes.

Les minerais argileux, agglomérés avec du ciment, de la chaux ou de l'eau sont très mous et susceptibles de tassement quand mis en tas ; les minerais traités au ciment ou à la chaux se stabilisent après un laps de temps, de sorte qu'une autre couche de minerai peut être ajoutée au-dessus sans affecter la perméabilité de la première couche ; aussi, la lixiviation de la couche supérieure avec écoulement à travers la première est réalisable et fait bénéficier la couche inférieure d'une extraction secondaire. D'un autre côté, les tas de minerais à forte teneur en argile doivent être limités en hauteur et exposés à une circulation minimale en surface pour éviter le risque de tassement, soit de la section inférieure de la pile à cause de son propre poids, soit de la surface à cause du trafic.

La hauteur d'un lift sur un tas permanent est en général limitée par le désir de démarrer rapidement la lixiviation du minerai fraîchement amassé ; d'autre part, les tas de grande hauteur contiennent plus d'or par unité de surface du tas et donc, la teneur de la solution chargée est plus élevée qu'avec de petits tas. Et une teneur plus élevée conduit à des coûts opérationnels plus faibles pour les circuits d'adsorption/désorption au carbone ou de précipitation du zinc.

Une autre raison pour limiter la taille des tas est la nécessité d'assurer une teneur suffisante en oxygène dissous dans le tas. Quand on traite des minerais oxydés, ceci n'est pas un problème, même les tas de 300 pieds de Zortman-Landusky (cf § 3.6.8) ont toujours présenté un excès d'oxygène dissous dans la solution chargée. Il y a une tendance croissante à lixivier en tas les minerais sulfurés à faible teneur, la disponibilité en oxygène dissous risque donc de devenir un facteur limitant à la taille des tas. Des hauteurs de lifts de 20 pieds (6 m) pourraient devenir la norme.

On passe en revue, ci-après, les principales techniques de construction .

3.5.1. Déversement en tas et égalisation de tout-venant (run of mine dumping and dozing)

Cette technique ne peut être utilisée qu'avec du minerai contenant beaucoup de silice, qui ne va pas engendrer beaucoup de "fines" quand un tracteur ou un bulldozer va égaliser le haut du tas. La figure 10 schématise le processus de construction : une rampe est construite sur des résidus pour accéder à un bout du tas, à la hauteur choisie pour la première couche de minerai ; une piste étroite est établie au sommet pour permettre le passage des camions qui viennent déverser le minerai sur la pente interne du tas à l'angle de repos ; des déversements successifs de ce type permettent l'extension du tas vers l'intérieur jusqu'à ce que l'aire soit complètement recouverte avec la première couche de minerai. Au fur et à mesure de l'avancée du front de déversement, un bulldozer est utilisé pour égaliser le haut du tas, ensuite on laboure (ripping) profondément le minerai et on l'arrose immédiatement avec la solution de façon à ce que la percolation se produise le plus uniformément possible. Pour limiter le tassement en haut du tas, la circulation des camions est restreinte à la piste étroite ; la pression exercée par un bulldozer sur la surface du tas ne représente que 5 à 20 % de celle exercée par un camion chargé équipé de pneus en caoutchouc.

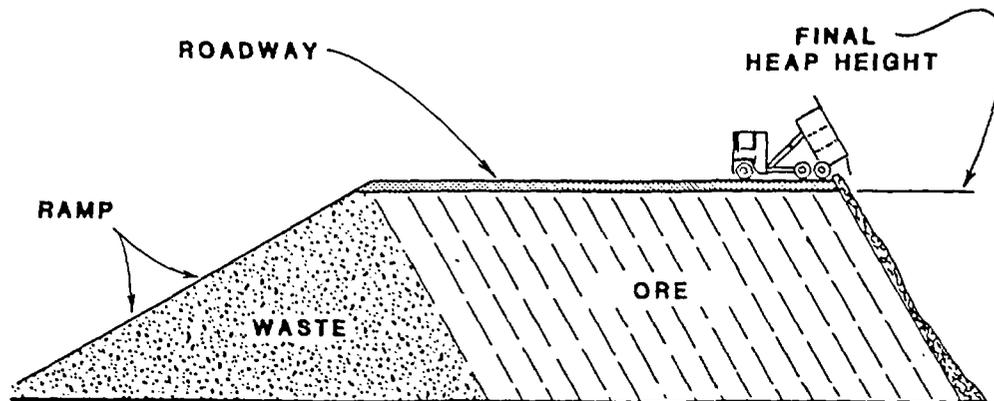
Les couches successives sont construites de la même manière et les lignes d'arrosage sont déplacées de la couche inférieure à la nouvelle couche au fur et à mesure.

3.5.2. Déversement en piles (plug dumping)

Cette technique est utilisée lorsque le minerai est susceptible d'engendrer beaucoup de "fines" durant sa manipulation ou lorsqu'il a subi un concassage avec agglomération. Le processus est schématisé sur la figure 11. Il débute par le dépôt d'une couche de 30 à 50 cm de minerai concassé sur la membrane (liner) pour la protéger des effets du "plug dumping" ; ensuite, un camion dépose le minerai sur l'aire en petites piles qui se recouvrent partiellement ; les piles (plugs) ont en général 2m de haut environ; on obtient un tas global fait de monts et de sillons. Cette technique ne fait intervenir que peu de manipulation du minerai et il n'y a pas de tassement dû au trafic d'engins à la surface du tas.

Une variante consiste à égaliser au bulldozer la première couche après la fin de la lixiviation de celle-ci ; ce qui permet d'avoir une surface plane pour installer la suivante. Avant d'ajouter chaque rangée de la nouvelle couche, le minerai de la précédente est labouré pour remédier au tassement causé par les engins. La seconde couche se présente finalement sous forme de monts et de sillons comme la première. Une troisième et même une quatrième couche peuvent être ainsi ajoutées.

Une autre variante consiste à utiliser une chargeuse (loader) pour entasser le minerai qui vient d'être déversé ; on peut ainsi réaliser des piles plus hautes qu'avec la technique classique (4.3 m au lieu de 2m) et la construction est donc plus rapide ; de plus, on obtient une surface plus lisse ; cependant, on manipule le minerai davantage et on augmente donc le risque de ségrégation entre particules de granulométries différentes.



*Fig. 10 -Construction du tas par déversement de tout-venant
(d'après Muhtadi, 1988).*

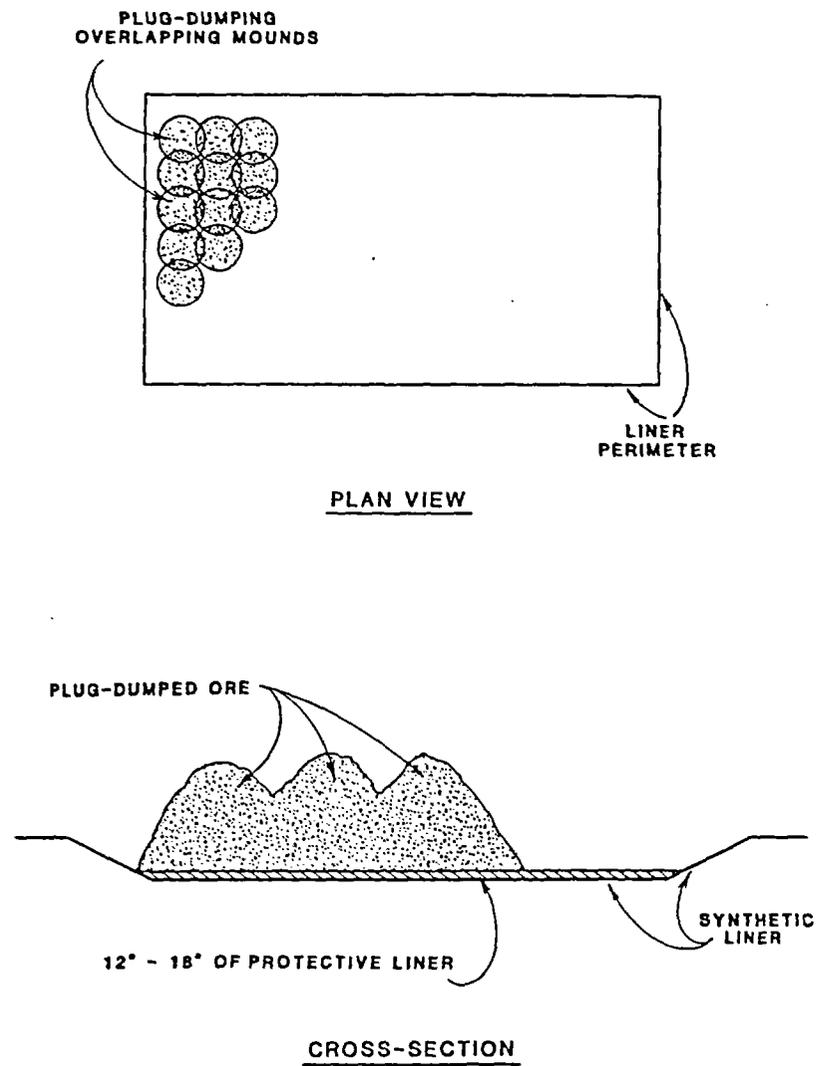


Fig. 11 - Construction du tas par déversement en piles (d'après Muhtadi, 1988).

3.5.3. Entassement au convoyeur (conveyor stacking)

Cette technique, qui se répand de plus en plus, permet d'éviter la circulation d'engin de quelque type que ce soit à la surface du tas. Elle convient à la construction de tas avec du minerai concassé, concassé et aggloméré ou avec des rejets agglomérés ; les systèmes utilisés traitent le minerai avec délicatesse en le manipulant un minimum. Le processus de construction est schématisé sur les figures 12 a à c. Le "stacker" est utilisé pour construire deux cônes de minerai sur deux coins de l'aire ; les cônes sont élargis de façon continue jusqu'à ce qu'ils se rejoignent pour former une crête de minerai à la hauteur choisie pour le premier lift, typiquement 6 m. Le stacker étale alors le minerai sur l'aire en balayant la crête en zig-zag pour remplir l'aire. Lorsque le "stacker" est correctement utilisé, on obtient une surface bien lisse sur laquelle le système d'arrosage peut être directement installé.

3.6. EXEMPLE DE CONSTRUCTION ET DIMENSIONNEMENT DES TAS

Ces exemples sont issus de Randol International Ltd, (1987) et Randol International Ltd, (1992a).

3.6.1. Alligator Ridge, Nevada (Amselco Natural Resources)

Ce gisement où la teneur moyenne en or est d'environ 4 g/tonne, constitue un exemple d'opération où la construction des tas s'est faite avec des couches d'épaisseur inférieure à ce qui était initialement prévu, c'est-à-dire 6 pieds au lieu de 14. Le minerai était poussé par un bulldozer de façon à éviter la circulation de camions sur les tas. Ceci a virtuellement éliminé le tassement et de bien meilleurs taux de percolation ont été réalisés, accroissant le taux de production d'or. L'agglomération de tout le minerai et non pas seulement du minerai argileux et le "labourage" (ripping) périodique vers la fin de chaque cycle ont aussi contribué à améliorer la production.

A Alligator Ridge, une rampe avait été construite au bout de chaque aire jusqu'à la hauteur totale prévue pour le tas. Le minerai avait été placé sur le tas par déversement (end dumping) depuis les camions, qui avançaient depuis la rampe sur toute la largeur de l'aire. Pendant ce temps, le minerai était étalé avec un bulldozer ; une fois le remplissage de l'aire achevé, la surface du tas avait été labourée profondément et une berme avait été construite sur le pourtour pour empêcher la solution de ruisseler sur les côtés. La majorité des premières couches atteignaient la hauteur de 4 m environ ; il n'y eut pas de problèmes sur les tas les plus bas, mais sur le tas C dont la hauteur moyenne était de 6 m, le taux d'extraction ne fut pas satisfaisant ; le tas présentait une perméabilité insuffisante suite à une préparation et à un placement incorrects du minerai ; des tentatives pour améliorer la perméabilité en labourant la surface ne furent que partiellement satisfaisantes ; le tas fut labouré 6 fois avec un bulldozer produisant des sillons de 3 m.

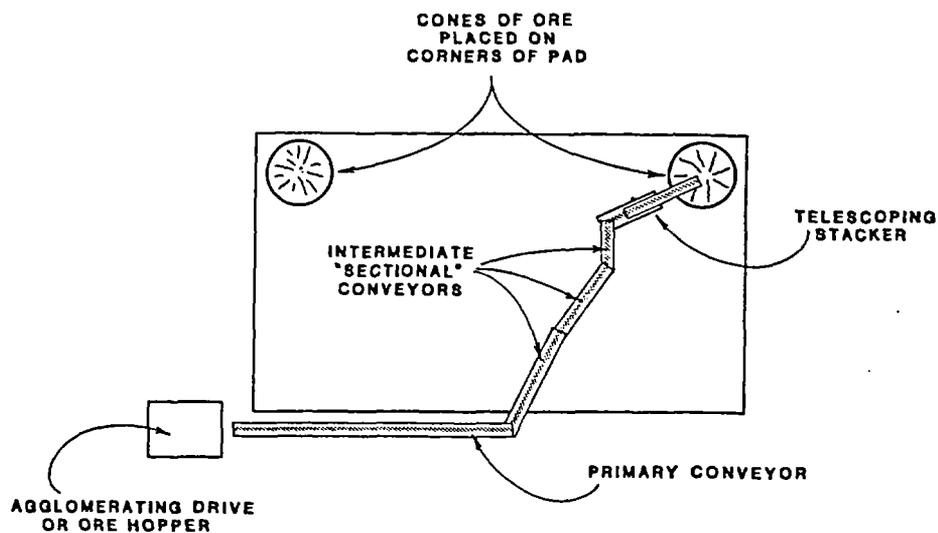


Fig. 12 -Construction du tas par entassement au convoyeur (d'après Muhtadi,1988)
a) Première phase

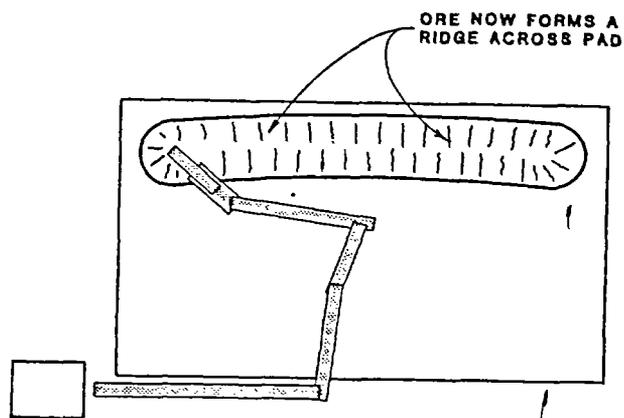
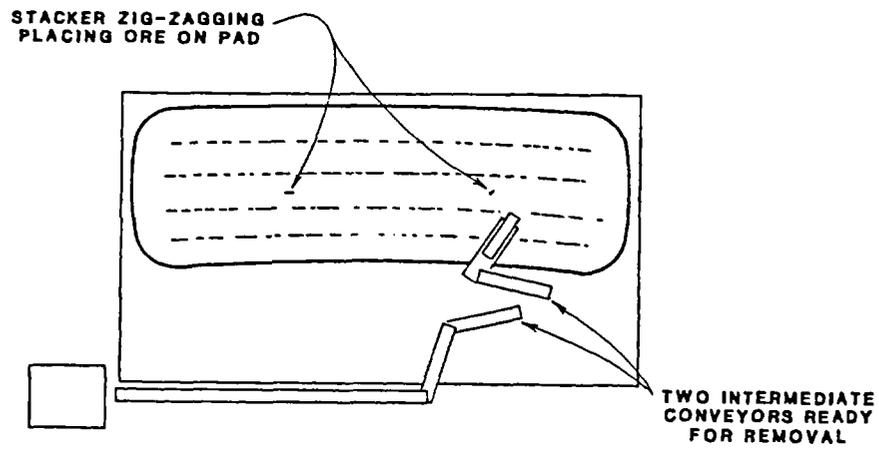


Fig. 12 -Construction du tas par entassement au convoyeur (d'après Muhtadi,1988)
b) Deuxième phase



*Fig. 12 -Construction du tas par entassement au convoyeur (d'après Muhtadi,1988).
c) Phase finale*

La plupart des premières couches n'absorbèrent pas la solution au taux d'arrosage qui avait été envisagé, soit 10,8 l/h/m², ce qui provoqua la formation de mares à la surface des tas ; pour empêcher ce phénomène, il fut nécessaire de réduire de moitié le taux d'arrosage ; malgré cela, des mares ont persisté à se former sur les premiers tas près des bords, occasionnant des ruissellements sur les côtés. Différentes configurations pour le tas et sa pente furent testés de façon à trouver le meilleur moyen d'empêcher la formation des mares sur les bords, la meilleure s'avéra être celle du tas L avec une pente Nord/Sud de 2 % et idem pour Est/Ouest.

Un autre problème persistant sur les premières couches fut la percée de la solution sur les côtés des tas ou au voisinage des rampes d'accès. La circulation d'engins sur les tas durant l'installation du minerai avait provoqué un tassement significatif du matériau près des rampes ; cet effet avait été partiellement compensé par le "labourage" qui avait permis à la solution de percoler jusqu'à la profondeur de labourage ; en-dessous, la solution ayant rencontré une zone fortement tassée à faible perméabilité, s'était écoulée latéralement jusqu'à percoler à l'extérieur.

Bien que les effets néfastes du tassement aient été plus évidents près des rampes d'accès, ils n'étaient pas confinés à ces zones ; la dégradation et le tassement du minerai par le trafic fit décroître la perméabilité et fit obstacle à l'extraction de l'or à des degrés différents sur les premiers lifts de tous les tas. La formation de mares au sommet des tas même avec un taux réduit d'arrosage indiquait que le tassement par les engins avait réduit la perméabilité de l'ensemble ; en plus, le comportement des tas devenait imprévisible : l'effet du tassement sur le comportement d'un tas donné au cours de la lixiviation ne pouvait être évalué avant le démarrage d'un cycle.

Le tas K fut construit en utilisant la technique prescrite par Chamberlin (1981) afin de tenter de réduire le tassement pendant la mise en place du minerai. Une route d'accès centrale fut construite sur le tas, le minerai étant déversé au bout de la route et étalé sur la surface de l'aire avec un bulldozer. Une fois le tas achevé, la route centrale fut excavée et complètement labourée. En dépit de cela, le tas K ne présenta aucune amélioration de sa perméabilité et on suspecta que la pression sur le sol et les vibrations produites par le bulldozer avaient provoqué un tassement aussi important que celui qu'auraient créé les camions. Quelques uns des premiers lifts se lixivièrent très bien mais la performance globale du tas ne fut pas satisfaisante.

L'agglomération du minerai avait quelque peu augmenté la perméabilité mais il devenait évident que des améliorations dans la technique de construction des tas étaient encore à trouver.

Les couches secondaires furent construites de la façon suivante en 1983 : une rampe d'accès fut construite jusqu'en haut de chaque tas existant et le haut du tas fut nivelé puis complètement labouré. Le minerai fut alors déversé en piles (plug/dumping) et en rangées sur la largeur du tas puis chaque rangée fut poussée contre la précédente avec un bulldozer ; la hauteur finale du nouveau lift atteignait en moyenne 2 m et la surface

supérieure se présentait comme une suite de crêtes et de sillons. Cette fois, aucun tassement ne fut créé par les engins en circulation.

Les performances des couches secondaires construites de cette manière se sont révélées excellentes. Chacun des cinq tas auxquels une seconde couche fut ajoutée de cette manière a absorbé la solution au taux prévu initialement et aucune mare ne s'est formée. L'extraction de l'or a été rapide, soit 30 à 40 jours au lieu de 60 à 90 jours pour les premières couches. Le minerai placé dans les secondes avait été aggloméré avec de la chaux et du cyanure. L'amélioration considérable des résultats de la lixiviation est dans ce cas due à la fois à l'agglomération du minerai et à une meilleure technique de construction du tas.

3.6.2. Picacho Peak, Arizona, (Chemgold inc.)

La compagnie exploitante Chemgold inc. affiche des taux de récupération d'or allant de 66 à 70 % par lixiviation de minerai non aggloméré en couches de 20 pieds. Ils retirent 24 pouces de minerai tassé en haut des tas et labourent la surface très soigneusement avant lixiviation. Leur technique de construction est illustrée sur la figure 13 :

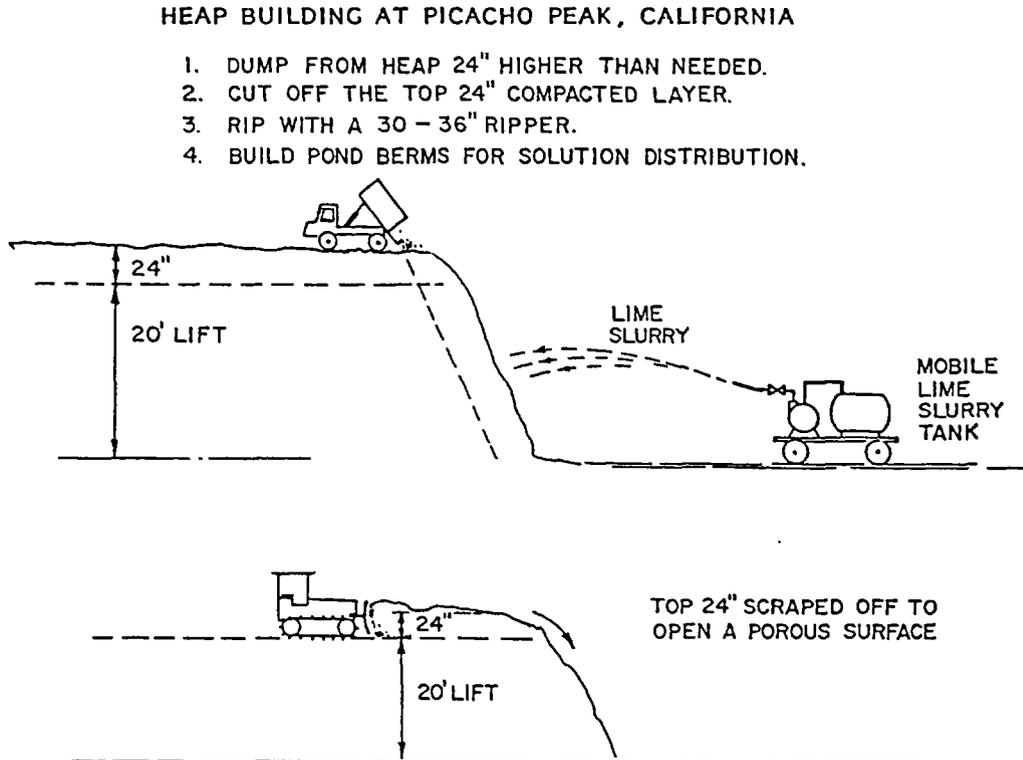


Fig. 13 - Lixiviation en tas à Picacho Peak, Arizona (d'après Randol Int. Ltd, 1987).

A noter la technique selon laquelle ils ajoutent de la chaux à leur tas, ce qui peut résulter en une faible agglomération.

3.6.3. Borealis Mine, Nevada (Echo Bay Mines)

Trois techniques de construction des tas sont employées, chacune étant appropriée à un type de matériau donné.

- Tas primaires :

Sur la première aire de lixiviation, on trouve 4 tas contenant chacun 20000 st (18140 tonnes) de minerai sur une aire de 360 pieds sur 165. Le minerai aggloméré est apporté par des camions de 35 t sur l'aire (reusable) en asphalte et mis en tas par "plug dumping" (cf § 3.5.2) à une hauteur de 10 pieds. Ensuite une rampe est construite jusqu'en haut avec une pente aussi forte que possible pour un camion et le minerai est rajouté sur la première couche de 10 pieds par déversement depuis les camions jusqu'à une hauteur de 30 pieds. Ensuite, un bulldozer arrache la rampe jusqu'à 7 pieds de profondeur et répand le matériau sur le reste de la première couche. Le minerai utilisé dans ce cas contenant peu d'argile, aucun problème de percolation n'a été rencontré malgré la circulation des camions sur la rampe et au sommet du tas. Des taux de récupération allant de 75 à 84 % ont été obtenus en 19 à 28 jours selon le minerai.

- Tas secondaires :

Les rejets (tailings) des tas primaires sont mis en tas de 80 à 90 pieds de haut. Le tas est divisé en 3 sections (sous-tas) : une en cours de lixiviation, une en cours de drainage, une en cours de chargement. En théorie, on devrait laisser drainer une section pendant 30 jours avant de faire monter un camion au sommet pour construire la seconde couche. Un supplément de 20 à 25 % des valeurs résiduelles d'or peut ainsi être obtenu (soit 4 à 5 % de la teneur initiale (headgrade))

- Tas de ROM (run of mine ore) :

Le minerai à teneur marginale est entassé au sortir de la mine sur des aires (expanding pad) stabilisées en couches de 40 à 120 pieds de haut, après avoir reçu de la chaux. Le premier tas de ROM contenait 860 000 t, un autre était prévu pour 2.6 millions de tonnes. On commence à appliquer la solution dès que la moitié d'une couche a été mise en place pendant que la deuxième moitié est encore en construction. Après que le tas a été mis en place, du "pebble mine" (< 1/8 pouce) est répandu sur la couche au taux de 1 kg/t de minerai. Il se mélange au minerai quand la surface est labourée sur une profondeur de 3 pieds.

3.6.4. Winnemucca, Nevada, (Pinson Mining Compagny)

Environ 60 tas mesurant 260 sur 340 pieds contenant 70 000 à 100 000 st (63490 à 90700 tonnes) de minerai ROM devaient être construits. En Novembre 85, Pinson construisait son 17^{ème} tas, 5 ayant un second lift au-dessus du premier. La compagnie avait eu la possibilité d'expérimenter toute une palette de techniques de construction et avait suivi le taux de recouvrement pour toutes.

En Juin 84, les taux de récupération pour un minerai à teneur variant entre 0,34 et 1,37 g/tonne ont été les suivants sur 4 tas :

Tas n° 4	Première année	65 %
Tas n° 3	Deuxième année	5 à 7 %
Tas n° 2	Troisième année	3 à 4 %
Tas n° 1	Quatrième année	2 à 3 %

soit plus de 75 % en 4 ans.

Plusieurs méthodes de construction des tas furent testées et il est intéressant de noter que les meilleurs taux d'extraction ont été réalisés sur les tas qui avaient été construits en piles (plug dumped). Cette technique de construction ne permet de réaliser que des tas qui ne dépassent pas 6 pieds de haut, ce qui peut sembler un inconvénient ; cependant cette technique est la moins coûteuse de toutes puisqu'elle évite l'utilisation d'équipement complexes et elle réduit le risque de ségrégation entre particules. Pinson a développé une méthode pour construire, par piles, des tas au-dessus de tas déjà épuisés. En lixiviant par lifts, il est possible de réduire le coût de l'aire par tonne de minerai traité.

Sur un tel tas "plug dumped" de 4 pieds de haut, le taux de récupération a été de 82 % en 21 jours pour une quantité de 15 000 tonnes, ce qui représente le meilleur taux jamais obtenu sur un tas par Pinson mining (jusqu'en 1985).

Pinson Mining a aussi utilisé la technique de l'entassement à la chargeuse (loader stacking) sur quelques tas. Le minerai est déversé au pied du tas et ensuite entassé avec un appareil à bras extensibles capables d'élever le tas jusqu'à 14 pieds. Les avantages sur la méthode précédente sont une surface plus lissée et des hauteurs de tas de plus du double. L'inconvénient principal est la nécessité d'acquérir un équipement relativement coûteux (chargeuse).

3.6.5. Buckorn, Nevada, (Cominco American)

A Buckorn, où le minerai est très argileux, l'exploitant a choisi une hauteur de couche de 35 pieds alors que leur "satcker" pourrait construire des couches de 50 pieds mais au prix d'une attente plus longue pour obtenir l'or. Le tas de Buckorn est arrivé à une hauteur de 90 pieds en 3 couches, ce qui est remarquable si l'on considère la quantité de "fines"; avant ajout de chaque couche, la couche sous-jacente est labourée sur une profondeur de 7 pieds en vue de limiter le tassement.

3.6.6. Round Mountain, Nevada, (Round Mountain Gold Corporation)

Production 20 000 stpd (18140 t/jour) à 1.47 g/tonne en un seul lift sur une aire réutilisable ; l'exploitant a essayé d'évaluer le taux d'extraction de l'or en fonction de la hauteur du tas ; il conclut que le taux de récupération peut décroître légèrement quand la taille du tas croît parce que un plus grand pourcentage de minerai se trouve sur les pentes où la lixiviation est moins performante. Avec une aire réutilisable (reusable pad), il est souhaitable de construire aussi haut que possible en fonction de la durée maximale acceptable pour un cycle de lixiviation. A Round Mountain, la couche fait 35 pieds d'épaisseur.

3.6.7. Chimney Creek, Nevada

On lixivie du ROM en complément de l'opération principale de CIP/CIL, le besoin de cash flow immédiat est donc moins important ; dans ce cas, les couches sont de 40pieds ; l'exploitant n'a noté aucune différence sur le taux de récupération entre des couches de 40 et de 20 pieds.

3.6.8. Zortman-Landusky, Montana, (Zortman-Landusky Mining Company)

Les tas permanents de ROM dépassent 300 pieds de haut, en 25 couches.

3.6.9. Camperdown Mine, Sherugwe, Zimbabwe, (Mopane Mines pvt ltd)

Une filiale de Union Carbide Corp. traite 400 tonnes/jour, 5 jours/semaine, de minerai titrant 0.8 à 2.5 g/tonne avec un taux de récupération de 61 %, le minerai étant concassé à moins de 75 mm. Le minerai est mis en tas sur des aires de béton contenant 150 tonnes chacune. Le minerai est prélevé dans des piles différenciées par le degré d'oxydation. Les minerais les plus oxydés sont lixiviés en 5 jours et les moins oxydés en 14 à 16jours. On utilise 15 aires distinctes. Le minerai est déversé par un "front end loader" sur les aires et mis en tas jusqu'à une hauteur de 1,2 m. Il s'agit de la première opération de lixiviation en tas réalisée en Afrique.

3.6.10. Royal Family Mine, Filabusi, Zimbabwe, (Cluff Minerais Exploration ltd)

Le minerai (banded ironstone) est concassé, aggloméré et mis en tas sur 4 aires réutilisables de béton au rythme de 600 à 800 tonnes/jour. Le minerai est lixivié pendant 3 à 4 jours, ensuite il est lavé et transporté sur le tas de déchets (waste dump). Chaque tas contient 600 tonnes de minerai à une hauteur de 3 m. Les dimensions de l'aire sont 30 sur 20 m ou 40 sur 15 m. Des taux de récupération de 80 % sont affichés par l'exploitant, ce qui est exceptionnel ; il s'agit du "fastest heap leach in the world" (en 1987).

4. Application et contrôle chimique de la solution

Pour la rédaction de ce chapitre, on s'est référé à Milligan et Muhtadi, (1988) et à Muhtadi, (1988).

4.1. TECHNIQUES D'ARROSAGE DU TAS

Une technique d'arrosage correcte doit favoriser au maximum le contact entre le minerai du tas et la solution de cyanure de sodium destinée à dissoudre le métal. Le débit est en général choisi en fonction des résultats des tests métallurgiques et il doit être pris en compte lors de la conception du système d'arrosage. Sauf en cas de conditions de percolation très défavorables, la plupart des minerais d'or et d'argent vont nécessiter des flux de 3.6 à 21.6 l/h/m², fourchette qui permet d'obtenir des cinétiques de lixiviation optimales pour ces minerais.

En pratique, on peut utiliser différentes techniques : "flooding, ponding, wobblers, wigglers, pressure emitters" parmi lesquelles le "wobbler" et "pressure emitter" sont les plus couramment utilisées car les plus efficaces.

Le "flooding" (inondation) bien que peu pratiqué, est utilisé lorsque l'évaporation est forte par exemple en climat désertique (Arizona) ; si un brouillard fin était appliqué dans ces conditions, les taux d'évaporation seraient encore plus élevés ; le "flooding" ne peut être employé que si la perméabilité du tas n'est pas trop grande afin de limiter l'infiltration et l'apparition d'une importante zone saturée dans le tas.

Le "wobbler" est un système d'arrosage tournant qui produit des très grosses gouttes, ce qui minimise l'évaporation.

Des taux d'arrosage précis adaptés à chaque opération peuvent être obtenus en sélectionnant le type de système d'arrosage avec les pressions et l'espacement adapté entre les arroseurs. Chaque arroseur devrait produire un flux uniforme dans son rayon d'action. La figure 14 résume les schémas que l'on peut obtenir. Il faut donc positionner d'abord un arroseur à chaque coin du tas, puis répartir les autres sur le périmètre avec l'espacement adapté pour assurer un recouvrement correct, ensuite, en ajouter à l'intérieur selon le même schéma de recouvrement.

Les "pressure emitter" sont des systèmes à écoulement turbulent installés en ligne de façon à répartir le flux uniformément ; ces lignes fonctionnent à très basse pression (100-140 kPa) et peuvent être enterrées dans le minerai à une profondeur de 20-25 cm, comme indiqué sur la figure 15. Le facteur déterminant pour décider ou non d'enterrer les lignes est le climat du site : si l'hiver y est rude, on peut arriver à faire fonctionner l'installation plus longtemps (plusieurs mois) avec des lignes enterrées.

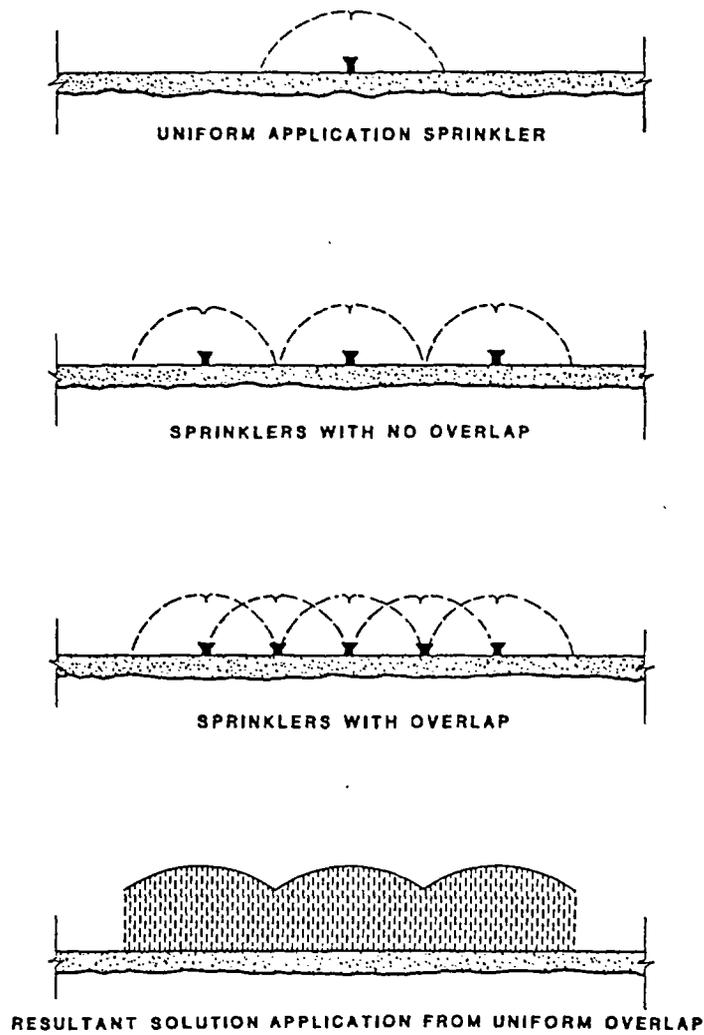


Fig. 14 - Utilisation des arroseurs (d'après Muhtadi, 1988).

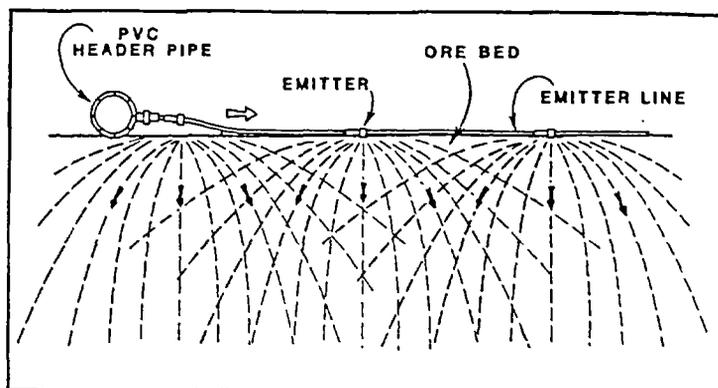


Fig. 15 -Utilisation des "pressure emitters" (d'après Muhtadi, 1988).
a) Installation en surface

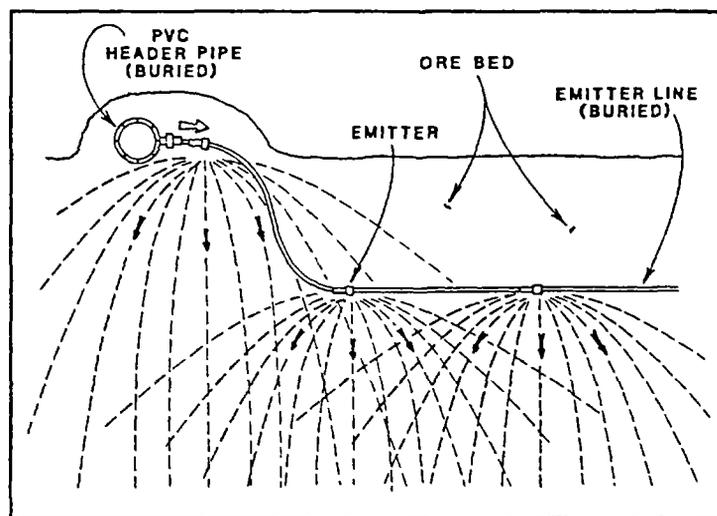


Fig. 15 -Utilisation des "pressure emitters" (d'après Muhtadi, 1988).
b) Installation sous le minerai

La disposition et le nombre de "emitter" sur le tas est calculée sur la base d'un flux souhaité de 10.8 l/h/m².

D'après les constructeurs, un système "pressure emitter" présente l'avantage de produire un égouttement continu avec un impact mécanique faible des gouttes, ce qui minimise le risque de migration des "fines" et la création de parcours d'écoulement préférentiels ; en conséquence de l'égouttement continu, le tas de minerai est humecté verticalement et latéralement par capillarité, de plus, les pertes par évaporation sont réduites avec un tel système ; (cependant, J. Villeneuve fait remarquer que "humecter n'est pas lixivier et que, en réalité, la couche de recouvrement est perdue").

L'inconvénient majeur à l'utilisation de "pressure emitter" est le risque de formation de calcite dans les petits chenaux où la solution circule avant de quitter le tas ; il est donc impératif d'avoir en place un système de détartrage (cf § 4.3.2).

4.2. CONTRÔLE CHIMIQUE DE LA SOLUTION

La solution de cyanure en circulation est le composant le plus actif (et le plus dangereux) d'une installation de lixiviation en tas. La solution dissout le métal précieux du tas puis est traitée pour récupération de ce métal ; elle subit un recyclage continu à travers le tas et à chaque cycle, de l'eau et des produits chimiques sont consommés ; un appoint en eau et produits chimiques doit donc être fait pour contre-balancer les pertes par évaporation, suintement, ruissellement éventuel et réactions chimiques dans le tas.

Ajouter plus d'eau que nécessaire peut conduire à la nécessité de purger l'eau du circuit de lixiviation en cours d'opération, ce qui est est fâcheux du point de vue des coûts de fonctionnement et souvent interdit par la réglementation (qui vise à minimiser les risques de pollution au cyanure).

Le contrôle chimique a pour but de maintenir dans la solution les valeurs optimales du pH, de la teneur en oxygène dissous, de la teneur en cyanure, tout en prévenant l'entartrage. Les principaux paramètres chimiques qu'il faut contrôler sont donc :

- l'alcalinité
- l'oxygène dissous
- le cyanure
- les solides dissous
- les métaux dissous.

Le contrôle chimique de la solution est particulièrement difficile à réaliser durant la phase de démarrage d'une opération de lixiviation en tas ; en effet, de grandes quantités de solution sont nécessaires au début pour mouiller le tas, remplir les bassins et tester le système de récupération du métal ; de plus ce premier cycle est long puisqu'il dépend du temps nécessaire à la solution pour percoler le tas sec. En fonction des dimensions du tas ainsi que de la taille des particules de minerai, la quantité de solution nécessaire pour

mouiller le tas peut atteindre 10 % de son poids, et jusqu'à 10 % supplémentaires peuvent être stockés dans le tas durant le processus de lixiviation. Un minimum de 60 cm de solution doit être en permanence dans les bassins et il faut prévoir une aire de décantation remplie de solution. Sur ces bases, il est évident que les quantités de solution à envoyer au démarrage sont très importantes.

Les produits chimiques, une fois arrivés sur le site, sont mélangés à l'eau dans le bassin des jus stériles à l'aide d'un circuit approprié. Une fois que la lixiviation est opérationnelle avec la solution recyclant librement à travers l'ensemble du système, le contrôle chimique doit continuer avec l'aide d'un système de monitoring ; comme le temps de résidence de la solution dans les divers composants (bassin, tas, système collecteur...) est assez long (souvent 3 jours ou plus), les ajustements chimiques ne font sentir leur effet qu'au bout d'un temps estimé à 3 fois le temps de résidence dans un composant donné ; ainsi on peut s'attendre à un décalage de 9 jours dans la plupart des opérations et de ce fait, un ajustement chimique quotidien est en général suffisant.

4.2.1. Le cyanure

Le cyanure, qui est l'élément clé, est capable de former des complexes avec une trentaine de métaux en particulier avec l'or. Là où la surface du métal est en contact avec la solution cyanurée, le taux de dissolution du métal croît proportionnellement à la concentration en cyanure libre dans la solution jusqu'à ce que le taux de dissolution maximum soit atteint. La dissolution de l'or est aussi dépendante de la température ; des variations saisonnières ont d'ailleurs été remarquées dans les taux de lixiviation atteints sur sites réels, quand la température du tas passe de 0 °C en hiver à 35 °C en été ; en moyenne, le taux de lixiviation en hiver n'est que de 70 % du taux atteint en été.

Le cyanure le plus couramment employé est délivré par le fabricant sous forme d'un produit contenant pratiquement 99 % de cyanure de sodium et environ 0,4 % d'hydroxyde de sodium et de formate de sodium, les deux polluants majeurs ; la poussière produite durant la manipulation de ce produit est la principale source de risque : la dose létale par ingestion est de 180 mg . Ensuite, c'est la formation de gaz de cyanure d'hydrogène au moment de la préparation de la solution qui constitue le risque majeur : la dose létale par inhalation de ce gaz est de 100 ppm ; pour prévenir la formation de ce gaz, il faut rendre la solution alcaline.

Les recherches actuelles s'orientent vers le remplacement du cyanure par d'autres lixivants potentiels : en effet, bien que très efficace (cf § 4.2.4), le cyanure est dangereux et controversé ; de plus, il est mal adapté au traitement des minerais complexes et réfractaires. Les alternatives actuellement testées comprennent entre autres : la thiourée ($\text{CS}(\text{NH}_2)_2$), l'ion thiosulfate ($\text{S}_2\text{O}_3^{-2}$), le malonitrile ($((\text{CH}_2)(\text{CN})_2$). Les réactions chimiques intervenant dans la lixiviation avec ces complexes sont données dans Randol Int. Ltd, (1992b) p 89 .On trouvera dans la même référence, p 237, un exemple de lixiviation de minerai d'or sulfuré à faible teneur avec la

thiourée, et, même référence, p 293, un exemple de lixiviation de l'or avec une solution de thiosulfate de sodium à faible concentration.

4.2.2. L'oxygène dissous

Le taux de dissolution de l'or croît aussi proportionnellement à la concentration en oxygène dans la solution, jusqu'à ce que le taux maximum soit atteint. La concentration en oxygène doit être particulièrement surveillée lorsque :

- la solution lixiviante est injectée en-dessous de la surface du tas (cf § 4.1 "pressure emitter" enterré)
- le tas contient de grandes quantités de matériau réducteur (sulfure, matières organiques)
- le tas a des dimensions très importantes.

4.2.3. L'alcalinité

Le taux de dissolution de l'or par le cyanure est aussi dépendant du pH de la solution ; les réactions de dissolution sont inhibées quand le pH devient supérieur à 12 (pour les solutions à 0,04 % d'hydroxyde de sodium). Le pH optimum est en général proche de 10.5, mais il faut le vérifier dans chaque cas par des tests appropriés. En réduisant l'écart entre les valeurs du pH à la surface du tas et en bas du tas, on minimise les problèmes de contrôle et les risques d'entartrage. L'alcalinité peut être augmentée par ajout de chaux ou d'un produit caustique.

4.2.4. Les métaux dissous

Les métaux en solution forment un complexe avec le cyanure, ce qui entraîne une réduction du cyanure libre dans la solution. Comme l'or forme un complexe très fort avec le cyanure, il peut réagir soit avec du cyanure libre, soit avec du cyanure venant d'autres complexes métalliques, moins forts. Par exemple, le complexe cyanure-zinc en solution se dissocie pour donner du cyanure libre de former des complexes avec l'or et aussi le cobalt, le mercure, le nickel le cuivre et l'argent ; le zinc qui n'est plus complexé précipite, sous forme de carbonate. Par contre, le complexe cyanure-fer en solution ne se dissocie pas en faveur de l'or car la cinétique de dissociation de ce complexe est suffisamment lente pour empêcher le transfert.

Le cuivre forme avec le cyanure un complexe très fort quoique moins fort que le complexe or-cyanure, et il a souvent été la cause de détérioration de la solution (fouled leach solution) ; en effet, dans ce cas, la solution peut ne plus contenir suffisamment de cyanure libre de se complexer avec l'or. Deux remèdes existent à cette situation :

- addition de suffisamment de cyanure pour que les complexes or-cyanure, cuivre-cyanure puissent se former et qu'il reste en plus du cyanure libre dans la solution,
- retrait du cuivre de la solution par cémentation du cuivre avec le zinc, électrolyse du cuivre, adsorption sur charbon actif...

4.3. AUTRES CONTRÔLES

4.3.1. Les solides dissous

Durant certaines phases de la lixiviation (par exemple, pendant et après de grosses pluies), de grandes quantités de sédiments peuvent couler depuis le tas dans le système collecteur. Pour l'empêcher, une aire de décantation doit souvent être mise en place ; sa taille va être fonction des caractéristiques du tas (pourcentage de "fines", débit venant du tas) et des estimations sur la quantité de sédiments produite suite à un PMP (Probable Maximum Precipitation event) de 24 heures.

4.3.2. L'entartrage

L'entartrage résulte de conditions de sursaturation en carbonate ou sulfate de calcium dans la solution de lixiviation, conditions qui peuvent être créées par des réactions chimiques, des variations de concentrations ou de température et/ou de pression. Les systèmes de contrôle doivent être capables de réaliser que la précipitation est imminente une fois les conditions de sursaturation atteintes ; le contrôle du tartre peut prendre 2 formes :

- soit prévenir la sursaturation en changeant les modes opératoires,
- soit forcer la précipitation des composants en sursaturant d'une manière qui n'interfère pas avec la lixiviation.

Il existe plusieurs cas répertoriés d'entartrage si important que le traitement des dépôts de sels de calcium a été un facteur majeur d'accroissement des coûts de l'opération. Un des cas les plus graves s'est produit en 1983, à la mine Zortman-Landusky (Pegasus Gold Corp.) : le colmatage des têtes d'arrosage était tel que les arroseurs ont dû être fermés sur de grandes zones du tas ; d'autres ont dû être remplacés et presque toutes les pompes du circuit de lixiviation ont dû être traitées à l'acide.

On trouvera plus de détails sur ce problème de l'entartrage et les moyens de le prévenir ou d'y remédier dans Milligan et Muhtadi, (1988).

5. Caractéristiques des opérations de lixiviation en tas du BRGM

Pour la rédaction de ce chapitre, on a utilisé les fiches de H. Lesueur réalisées dans le cadre de ce projet, et les rapports BRGM listés en bibliographie.

Les deux principales opérations industrielles de lixiviation en tas réalisées par le BRGM et sur lesquelles nous avons pu trouver de la documentation sont celles de HASSAI (Soudan) et ITY (Côte d'Ivoire). D'autres opérations sont en cours de développement ou peu documentées, par exemple LERO (Guinée) et ne font donc pas l'objet de cette étude.

5.1. HASSAI

On a trouvé dans la documentation BRGM 13 références sur le gisement d'Hassaï, datées de 1986 à 1990 parmi lesquelles on en a extrait 9.

Le gisement de Hassaï est situé sur le versant Ouest des Red Sea Hills, chaîne côtière qui traverse le nord-est du Soudan de l'Ethiopie jusqu'à l'Egypte. La région est désertique et isolée, éloignée de 380 km par la route de Port Soudan, sur la mer Rouge, et de 170 km du Nil.

Hassaï fait partie d'un ensemble de gisements et d'indices, formant le district aurifère d'Ariab. Les réserves d'or du district s'élèvent à 12.8 tonnes prouvées (dont 6,2 à Hassaï) et 27,2 tonnes possibles (chiffres de 89).

L'exploitation décrite ci-après devait servir de pilote pour le projet final, avec une production à la cadence de 150 tonnes de tout-venant traité par jour, compatible avec les ressources locales en eau, sachant que la mise en exploitation de l'ensemble des gisements du district aurait nécessité, pour assurer son approvisionnement en eau depuis le Nil, la construction d'une tuyauterie de 170 km.

Des tests de cyanuration rapide faits sur des composites de tous les sondages ont montré que l'aptitude du minerai à la cyanuration est très variable mais régionalisée.

Dans le minerai, l'or est présent sous forme d'or natif en grains très fins de 1 à 10 microns. L'or est disséminé dans l'ensemble de phases minérales, quartz, oxyde de fer et barytine :

- la barytine est la phase la plus riche, pouvant titrer jusqu'à 50 g/t et contenir 25 % de l'or total ;
- la phase siliceuse contient 75 à 85 % de l'or total sous forme d'inclusions ou bien aux joints de grains.

La principale impureté pouvant représenter une gêne pour le traitement est le cuivre dont la teneur peut varier de 100 à 1000 ppm.

A partir des caractéristiques du minerai de Hassaï, on pouvait prévoir les conséquences suivantes pour le traitement :

- la finesse extrême de l'or natif devait favoriser sa dissolution par la solution cyanurée, on pouvait donc s'attendre à une cinétique d'attaque très rapide ;
- l'enclavement d'une partie de l'or dans du quartz laissait craindre que la dissolution du métal soit imparfaite, lorsque le minerai ne serait pas broyé finement mais seulement concassé ;
- l'abondance de fractions fines primaires dans le minerai rendrait très probablement nécessaire un traitement par agglomération pour améliorer la perméabilité du produit concassé et mis en tas.

5.1.1. Les essais de traitement

Les dispositifs et modes opératoires sont détaillés dans les rapports cités en bibliographie.

La porosité de la roche et son oxydation sont des éléments déterminants pour son aptitude à la lixiviation en tas ; il convient donc de prélever tous les faciès reconnus sur le gisement dans leurs différents degrés d'oxydation. On a donc prélevé deux échantillons par carottage dans les niveaux -20 à -40 m, deux échantillons par puits entre -15 et -20 m et un échantillon de tranchée en surface.

Les essais ont été conduits dans les conditions suivantes :

- essais de percolation en petites colonnes de 7,5 cm de diamètre sur une hauteur de 40 cm, pour différents dosages de ciment ;
- essais de cyanuration en colonnes de 15 cm de diamètre et 1 m de hauteur, (débit spécifique d'arrosage : 10 l/h/m², concentration en cyanure : 0,5 g/l, pH régulé à 10,5 par ajout de chaux) aux mailles de concassage de 16 mm et 5 mm ;
- analyses granulométriques avant et après cyanuration pour estimer la récupération du métal par tranche ;
- essais de cyanuration en bouteille qui permettent de définir le taux d'extraction maximum pour chaque minerai, grâce à un mode de fonctionnement optimal (broyage à 100 microns, excès de réactifs, aération de la pulpe).

Les résultats des tests sont les suivants :

- l'agglomération est indispensable (5 kg/t de ciment et eau à pH 10 pour obtenir un produit à 10 % d'humidité) ;
- pas de différence significative de récupération selon les mailles de concassage (5 ou 16 mm) ;
- cinétiques d'extraction très rapides et similaires pour les différents échantillons traités ; dans la plupart des cas, 90% de l'extraction est réalisée en 3 jours environ ;

- très grande variabilité de la récupération métal (par rapport à l'or total) selon les échantillons ; de 30 % en surface à 90 % au puits 1 inférieur ;
- résultats médiocres pour certains essais "bouteille" qui montrent que le minerai d'Hassaï présente localement un caractère réfractaire à la cyanuration bien que son oxydation intense soit un élément très favorable à une dissolution complète de l'or ; des essais complémentaires ont montré que ce caractère réfractaire était présent dans la fraction siliceuse du minerai.

Une campagne de tests d'aptitude à la cyanuration a été réalisée sur 200 échantillons provenant de cuttings de sondage (par mélange de 50 g de poudre à 50 ml de solution cyanurée dans un tube agité pendant quelques heures) ; les échantillons testés en colonnes ont également été soumis à ce test.

Les conclusions sont les suivantes :

- la répartition des récupérations or dans le gisement correspond à des zones, sans rapport avec la profondeur,
- les récupérations obtenues par cyanuration en tube sont assez bien corrélées avec celles obtenues par essais en colonnes.

A l'issue des essais, les paramètres suivants ont été retenus pour la lixiviation industrielle :

- concassage à la maille de 10 mm,
- agglomération avec 3 kg/t de ciment,
- hauteur du tas : 5 m,
- arrosage pendant 40 jours en 2 cycles de 20 jours à contre-courant,
- consommation prévisible de cyanure : 0,3 kg/t,
- récupération métal prévisionnelle : 65 %.

5.1.2. L'exploitation pilote

L'installation de production a été conçue selon le principe de l'aire abandonnée (expanding pad, cf § 3.4.2) à modules contigus (les différents tas sont jointifs, ce qui permet de réduire l'emprise au sol, mais ne facilite pas l'estimation des bilans d'extraction).

A côté de l'aire de lixiviation de production, on a installé 4 aires expérimentales pour étudier plus facilement certains paramètres de la lixiviation en tas (comme les bilans d'extraction) et un emplacement a été prévu pour la construction d'une stalle en vue de tester la cyanuration statique ennoyée (vat leaching).

La lixiviation s'effectue en 3 cycles de 20 jours chacun : attaque primaire, attaque secondaire, lavage.

La surface du terrain, faiblement pentée (0,15 %) a été utilisée telle quelle pour la pose de la membrane d'étanchéité (PVC 8/10°) qui reçoit directement le minerai aggloméré ; un chemin de roulement est aménagé sur toute la partie centrale d'une aire où une feuille de géotextile recouvre la membrane de PVC et est elle-même recouverte par 30 cm de graviers.

L'aspersion des tas est faite par un réseau à mailles carrées (5 m) d'arroseurs de type "wobbler". Les tas ont une capacité unitaire de 2500 tonnes pour une hauteur variant entre 4 m (tas isolés) et 5 m (tas continu).

Le feu vert de réalisation du pilote a été donné en mars 1985, le démarrage de la lixiviation en tas a eu lieu en janvier 87 et la coulée du premier doré le 1er mars 87.

Les caractéristiques de conception ont été les suivantes :

- capacité de traitement : 40 000 t/an,
- capacité de production : 225 kg d'or/an,
- teneur moyenne : 8,45 g/t,
- taux de récupération global : 65 %.

Les opérations de démarrage du pilote se sont déroulées de façon satisfaisante : dimensionnement des installations correct, récupération conforme aux essais, des améliorations restant possibles pour la cinétique. A moyen et long terme, le problème principal sera celui de la disponibilité de l'eau, la technique de la stalle noyée pourrait aider à le résoudre car elle nécessite une consommation d'eau moindre que la technique en tas. Une stalle pilote devait être construite sur le site...

5.2. ITY

On a trouvé dans la documentation BRGM 25 références sur le gisement d'ITY, datées de 1962 à 1993, parmi lesquelles nous en avons extrait 6.

Le gisement d'or de Ity est situé dans l'ouest de la Côte d'Ivoire à 700 km d'Abidjan, en climat de type tropical humide avec 2 saisons marquées. La pluviométrie annuelle moyenne atteint 1700 mm.

Le gisement d'Ity appartient à la famille des gîtes latéritiques ; en profondeur, il est formé d'argiles, plastiques et collantes, résultant de la transformation de la roche primaire, l'humidité naturelle du minerai de ce faciès est de l'ordre de 20 à 30 % ; vers la surface, cette argile fait place à une latérite dont l'humidité naturelle se situe entre 6 et 12 %.

Les réserves exploitables pour une teneur de coupure de 2 g/tonne ont été évaluées pour le minerai à l'entrée de l'usine à :

- 4950 kg d'or contenu dans 715 000 tonnes de minerai latéritique,
- 10950 kg d'or contenu dans 1 200 000 tonnes de minerai argileux.

Seul le minerai latéritique est exploité pour le moment.

5.2.1. Le développement du procédé

Une campagne d'essais a été menée afin de :

- optimiser les conditions opératoires de l'agglomération, indispensable sur ces types de minerai,
- comparer les performances de la technique percolée (heap leaching) et de la technique noyée (vat leaching) sur des minerais fins et argileux,
- étudier les deux faciès du gisement d'Ity, l'argileux et le latéritique.

Les essais suivants ont été réalisés :

- tests préliminaires de percolation en petites colonnes, destinés à déterminer l'humidité optimale du minerai pour un bon bouletage et à rechercher le rapport des quantités chaux/ciment le plus compatible avec une bonne percolation (boulettes stables, propriétés physico-chimiques des solutions acceptables),
- tests de cyanuration en colonne pour déterminer la récupération or pour chaque faciès et comparer les 2 techniques de lixiviation en ce qui concerne les cinétiques d'extraction et le rendement,
- analyses des teneurs par classe granulométrique sur les minerais avant et après lixiviation afin de calculer l'extraction par tranche granulométrique en vue du choix de la maille de concassage optimale,
- essais de cyanuration en bouteille qui permettent de définir le taux d'extraction maximum pour chaque minerai.

Les dispositifs et modes opératoires sont détaillés dans les rapports cités en bibliographie.

Les principaux résultats sont les suivants :

- l'agglomération est indispensable et s'effectue dans les conditions optimales pour les conditions opératoires du tableau ci-après , extrait de Leclercq, Libaude, et Romero, (1985) :

	<i>Humidité initiale %</i>	<i>Quantité ciment kg/t</i>	<i>Quantité chaux kg/t</i>	<i>Quantité cyanure kg/t</i>
<i>Minerai argileux</i>	12	15	5	0,5
<i>Minerai latéritique</i>	9	5	0	0,5

- les taux de récupération de l'or sont établis comme suit (tab C extrait de Leclercq, Libaude, et Romero, 1985) :

Tableau C : Taux d'extraction de l'or en %

FACIES	TECHNIQUE UTILISEE	DUREE TOTALE EN JOURS	EXTRACTION FINALE EN %
ARGILEUX	Percolée	39	96,2
	Noyée	41	94,6
LATERITIQUE	Percolée	67	94,4
	Noyée	68	95,6

- les consommations de réactifs se répartissent comme suit (tab D extrait de Leclercq, Libaude, et Romero, 1985) :

Tableau D : Consommation en réactifs

FACIES	H ₂ O l/t sèche	CIMENT kg/t sèche	Ca (OH) ₂ kg/t sèche	NaCN kg/t sèche
ARGILEUX	192	17*	5,8	0,5
LATERITIQUE	39	5	0	1,1

*peut être optimisée.

Ces résultats ne permettent pas de privilégier une technique par rapport à l'autre, pour les minerais étudiés ; en effet, les taux d'extraction sont du même ordre de grandeur et les cinétiques comparables pour des consommations de réactifs voisines.

Des tests complémentaires de cyanuration en colonne ont été réalisés sur le minerai latéritique seul et finalement les résultats, dans les conditions de préparation définies ci-dessus, sont les suivants

- granulométrie de 10 mm, extraction de 95 % de l'or en 70 jours (tab C)
- granulométrie de 20 à 40 mm, près de 90 % de l'or récupéré en 3 mois.

5.2.2. L'exploitation industrielle

L'exploitation d'Ity a été conçue pour le traitement de la partie latéritique du gisement, avec une capacité nominale de 110 000 tonnes de minerai par an, correspondant à une production annuelle moyenne d'or de 700 kg.

A l'issue des essais de laboratoire conduits sur la fraction 20/40 mm, la dimension de la maille de concassage du minerai a été fixée à 40 mm en vue d'une durée d'arrosage de 3 mois au moins. Le minerai concassé est aggloméré avec une dose de ciment de 5 kg/tonne et de l'eau cyanurée pour initier la dissolution de l'or le plus tôt possible.

Les autres paramètres sont les suivants :

- tas de 5 m de haut,
- durée totale de lixiviation, 3 mois en 2 cycles d'égale durée,
- trois bassins : liqueur riche, intermédiaire et stérile,
- consommation de 0,75 kg de cyanure de sodium par tonne de minerai,
- récupération attendue pour l'or : 90 % (à comparer aux 94 % envisageables pour une cyanuration classique en cuve après broyage).

Le choix d'aires de lixiviation abandonnées aurait pu être fait car la surface convenable existait, cependant, la pluviosité élevée conduisant à un bilan d'eau excédentaire et la construction d'aires abritées n'étant pas économique, il a été nécessaire de mettre en place une capacité de stockage suffisante pour contenir l'excès d'eau afin d'éviter d'en avoir un trop grand volume à neutraliser et à rejeter ; la capacité de stockage a été calculée pour recevoir les chutes de pluie d'une saison humide moyenne.

Les aires de lixiviation sont divisées en unités de 55 000 tonnes de capacité ; chaque unité s'étend sur une surface de 210 m sur 40 m ; les unités sont disposées de façon contiguë si bien qu'au fur et à mesure du développement de l'exploitation, les tas unitaires finissent par se rejoindre et n'en former qu'un seul. Les aires nécessaires au traitement de 110 000 tonnes de minerai sont construites chaque année.

Les aires sont recouvertes d'une membrane plastique en poly-éthylène haute densité (PEHD) de 1 mm d'épaisseur, reposant sur le sol déboisé, épierré et compacté, les portions les plus caillouteuses ayant été recouvertes d'une couche d'argile de 10 cm ; le PEHD est lui-même recouvert d'une couche de tissu géotextile ; enfin, au-dessus, une couche de gravier de 30 cm permet le déplacement des convoyeurs. A l'intérieur du gravier passent des drains annelés, espacés de 5 m, pour faciliter l'évacuation des solutions percolées.

Les solutions d'arrosage sont distribuées sur le tas par des arroseurs oscillants (wobblers) à un débit spécifique de 10 l/h/m². Ces arroseurs qui répartissent le liquide en gouttelettes, réalisent un bon compromis entre la nécessité de prévenir les envols de solution cyanurée et le besoin d'évaporer le plus possible pour contribuer au maintien du

bilan d'eau. Lorsque le bilan en eau de l'installation devient excédentaire, la liqueur stérile, pauvre en or et en cyanure, est dirigée vers l'unité de destruction des cyanures.

Le résultat le plus marquant de la préparation mécanique est l'extrême facilité avec laquelle le minerai s'agglomère et la qualité du produit obtenu. Malgré une humidité de 12%, le minerai aggloméré est transporté sans collage sur la chaîne de convoyeurs ; la percolation à travers le tas est très rapide et on n'observe aucune flaque à sa surface, même après plusieurs mois d'arrosage.

En quelques jours le tas subit un tassement important, de l'ordre de 15 %, mais celui-ci n'altère en rien la percolation des solutions et il faut noter que même les plus fortes averses n'ont pas détérioré la tenue du tas et de ses talus. Pendant la saison humide, l'humidité du minerai alimenté au concassage est restée stable à 10 % et aucun collage n'a été constaté.

La teneur en or des liqueurs riches est de l'ordre de 10 à 20 mg/l. Le pH des solutions s'est établi à 11 grâce au ciment présent dans le minerai aggloméré ; cette valeur un peu élevée a entraîné la formation d'un dépôt incrustant de carbonates en différents points du circuit mais l'addition d'un produit anti-incrustant dans les bassins a permis d'y remédier.

Les premières observations indiquent que la cinétique, au départ assez rapide, se ralentit après quelques semaines et que l'extraction de l'or se poursuit alors régulièrement, en accord avec les prévisions résultant des essais.

La récupération de l'or sur charbon actif n'a pas posé de problème. Le premier lingot d'or a été coulé par la Société des Mines d'ITY en Janvier 91 et la production a atteint 1 tonne d'or la première année de fonctionnement.

L'expérience acquise pendant le démarrage a conduit à adopter, pour la construction des nouvelles aires, une membrane de PEHD plus épaisse (15 mm) et à remplacer le gravier, difficile à trouver sur place, par du minerai aggloméré avec un surdosage en ciment donnant une meilleure tenue.

Enfin, entre novembre 91 et février 92, une campagne pilote a été conduite sur le site pour adapter le procédé au traitement des minerais argileux. Les résultats positifs montrent la possibilité de poursuivre l'exploitation du gisement sur le faciès argileux sans changement de procédé.

Conclusion

Au terme de cette étude, nous constatons que nous avons assemblé beaucoup d'informations permettant de donner, au non-spécialiste, une assez bonne idée de ce qu'est la technique de lixiviation en tas de minerais d'or, de ses avantages, mais aussi des problèmes de mise en oeuvre qu'elle peut présenter.

Par contre, nous regrettons de n'avoir obtenu que très peu de données concernant les écoulements dans le tas, les paramètres concernés (perméabilité, porosité) ne faisant pratiquement jamais l'objet de mesures, en tout cas dans la littérature recensée.

Bibliographie

B1 : Documentation en anglais

Dorey R., van Zyl D., Kiel J. (1988) - Overview of heap leaching technology. *Introduction to evaluation, design and operation of precious metal heap leaching projects, S.M.E., Littleton Colorado, USA*, p.3-22.

La Brooy, S.R., Linge H.G., Walker G.S. (1994) - Review of gold extraction from ores. *Minerals Engineering*, vol 7, (10), p. 1213-1241, *Elsevier Science Ltd*.

McClelland G.E., van Zyl D. (1988) -Ore preparation : crushing and agglomeration. *Introduction to evaluation, design and operation of precious metal heap leaching projects, S.M.E., Littleton Colorado, USA*, p.68-91.

Milligan D.A., Muhtadi O.A. (1988) -Chemical solution control. *Introduction to evaluation, design and operation of precious metal heap leaching projects, S.M.E., Littleton Colorado, USA*, p.107-123.

Muhtadi O.A. (1988) -Heap construction and solution application. *Introduction to evaluation, design and operation of precious metal heap leaching projects, S.M.E., Littleton Colorado, USA*, p.92-106.

Randol International Ltd (1987) -Gold and silver recovery. Innovations. Phase III, vol 5.

Randol International Ltd (1992a) -Innovations in gold and silver recovery. Phase IV, vol 10.

Randol International Ltd (1992b) -Randol gold forum, Vancouver'92.

Strachan C.,Dorey R. (1988) -Geotechnical studies. *Introduction to evaluation, design and operation of precious metal heap leaching projects, S.M.E., Littleton Colorado, USA*, p.152-175.

Strachan C.,van Zyl D. (1988) -Leach pads and liners. *Introduction to evaluation, design and operation of precious metal heap leaching projects, S.M.E., Littleton Colorado, USA*, p.176-202.

van Zyl D. (1987) -Geotechnical aspects of heap leach design. A.I.M.E.

B2 : Documentation BRGM sur Hassaï

Aloub O. (1988) -Minerai de Hassaï (Soudan)-Effet du broyage sur le rendement en or. Note DAM/MIN/88/1250/mg.

Benz J.P., Ibos Auge J.S., Leclercq M., Libaude J., El Samani Y. (1989) -Le traitement par lixiviation en tas du minerai d'or de Hassaï (Soudan). *Industrie minière. Mines et carrières*, vol 71, (2).

Ibos Auge J.S. (1986) -Pilote au Hassaï (Soudan). Dossier de procédé. Note technique DAM/PM/86/80/339.

Leclercq M., Libaude J., collab. Galle P. (1986a) -Red Sea Hills mining joint venture- Etude de la cyanuration en tas sur le minerai de Hassaï (Soudan). Note technique DAM/MIN/86/383/sm.

Leclercq M., Libaude J., collab. Galle P. (1986b) -Red Sea Hills mining joint venture- Etude de la cyanuration en tas sur le minerai de Hassaï (Soudan). Note technique DAM/MIN/86/417/sm.

Leclercq M., Debarge A. (1987) -Pilote de traitement du minerai d'or de Hassaï (Soudan). Rapport de fin de campagne - Septembre 86 à mai 87. Note DAM/MIN/87/834/cm.

Libaude J. (1994) -Report of site visit to AMC Hassaï operations (Sudan). Note DEP/PEA/MIN/94/219.

Matheus Ph., Libaude J., collab. Richalet G. (1988) -Hassaï (Soudan). Bloc D, résultats des essais laboratoire d'optimisation de l'arrosage. Note DAM/MIN/88/730/cm.

Nguyen D. (1987) -Hassaï-Bloc A et bloc D, cyanuration en colonnes de laboratoire. Note DAM/MIN/87/274/cm.

B2 : Documentation BRGM sur Ity

Essis K., Libaude J., Palanque P., Scavennec M. (1993) -L'exploitation du gisement d'Ity (Côte d'Ivoire) par lixiviation en tas. *Industrie minière. Mines et carrières*, vol 75.

Leclercq M., Libaude J., collab. Romero A. (1985) -Etude comparative : lixiviation en tas-lixiviation en stalle. Application au minerai d'or d'Ity (Côte d'Ivoire). Note DAM/MIN/768.

Libaude J., Crouzet C. (1983) -Essai de cyanuration en stalle noyée d'un minerai d'or fin et humide. Application au minerai latéritique d'Ity (Côte d'Ivoire). Note SGN/MIN/83/1071.

Libaude J. (1991) -Démarrage des installations de lixiviation en tas de la mine d'or d'Ity (Côte d'Ivoire). Note DAM/MIN/91/306/cd.

Matheus Ph., Libaude J., collab. Richalet G. (1988) -Résultats des tests de cyanuration en colonne sur le minerai d'Ity (Côte d'Ivoire). Note DAM/MIN/88/726.

Ollivier P. (1976) -Projet Ity (Côte d'Ivoire). Etude du traitement du minerai. Etude hydrominéralurgique. Rapport BRGM 76 SGN 069 MIN.

BRGM
DIRECTION DE LA RECHERCHE
Département Hydrologie, Géochimie et Transferts
BP 6009 - 45060 ORLEANS Cedex 2 - France - Tél. : (33) 02.38.64.34.34