

SOMMAIRE

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des annexes

INTRODUCTION GENERALE

PARTIE I : GENERALITES ET ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

Chapitre 1 – Le métal or

Chapitre 2 – Les principaux types de séparations gravimétriques

PARTIE II : CONCEPTION ET REALISATION DE SPIRALE

Chapitre 1- Description générale

Chapitre 2- Etudes théoriques

Chapitre 3- Etude de conception et de réalisation

Chapitre 4- Coûts de fabrication

PARTIE III : ESSAIS ET INTERPRETATIONS

Chapitre 1- Procédés de traitement

Chapitre 2- Essais

CONCLUSION GENERALE

Références bibliographiques

Annexes

Table des matières

LISTE DES ABREVIATIONS

- CGS : Centimètre Gramme Seconde
- CT : Critère de Taggart
- DMG : Direction des Mines et de la Géologie
- FM : Minéraux Fins
- HG : High Grade
- HM : Hauteur Manométrique
- LG : Low Grade
- MA : Millions d'Années
- MG : Mean Grade
- MKSA : Mètre Kilogramme Seconde Ampère
- PVC : Polychlorure de Vinyle
- SC : Spirale en Caoutchouc
- SM : Spirale Métallique
- US : United States

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Configuration électronique -----	3
Figure 2 : Or dans une veine de quartz -----	3
Figure 3 : Production mondiale d'or en 2007 -----	8
Figure 4 : Lingots d'or -----	9
Figure 5 : Cours de l'or -----	10
Figure 6 : Carte des zones aurifères -----	16
Figure 7 : La batée -----	26
Figure 8 : Pan américain rainuré -----	27
Figure 9 : Plat finlandais -----	28
Figure 10 : Pan japonais -----	28
Figure 11 : Pan à spirales -----	28
Figure 12 : Exemple de boîte d'alimentation -----	31
Figure 13 : Spirale -----	32
Figure 14 : Séparation des particules -----	33
Figure 15 : Spirales travaillant en parallèle -----	33
Figure 16 : Spirale Washwaterless -----	34
Figure 17 : Spirale Washwater -----	34
Figure 18 : Comparaison des granulométries traitées -----	35
Figure 19 : Types d'écoulements -----	38
Figure 20 : Situation d'une particule sphérique placée sur une pente -----	39
Figure 21 : Angle d'inclinaison -----	40
Figure 22 : Forme du disque -----	41
Figure 23 : Chemin hélicoïdal -----	41
Figure 24 : Triangle droitier -----	42
Figure 25 : Forces d'opposition agissant relativement à une surface raide de l'hélice -----	43
Figure 26 : Courbe de référence de la relation entre le débit et le minerai traité -----	47
Figure 27 : Courbe montrant la relation entre le débit et la pente -----	48
Figure 28 : La coquille de la spirale métallique -----	50
Figure 29 : Coupe de la coquille -----	50
Figure 30 : La boîte de sortie -----	51
Figure 31 : La coquille de la spirale en caoutchouc -----	52
Figure 32 : Procédé de traitement pour le minerai alluvionnaire -----	58

Figure 33 : Procédé de traitement pour le minerai éluvionnaire-----	59
Figure 34 : Localisation géographique du site -----	60
Figure 35 : Essai site A (SM)-----	66
Figure 36 : Essai site A (SC) -----	68
Figure 37 : Essai site B (SM)-----	69
Figure 38 : Essai site B (SC)-----	71
Figure 39 : Essai site C (SM)-----	72
Figure 40 : Essai site C (SC)-----	74

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Le titrage de l'or -----	6
Tableau 2 : Stock mondial d'or dans les banques -----	8
Tableau 3 : Production d'or de Madagascar de 1897 à 1963 (en kg)-----	11
Tableau 4 : Production d'or déclarée de 1964 à 2005-----	12
Tableau 5 : Critère de Taggart-----	17
Tableau 6 : Types de milieux denses -----	19
Tableau 7 : Caractéristiques de quelques jigs -----	26
Tableau 8 : Caractéristiques techniques du Jig Hancock -----	26
Tableau 9 : Relation entre le débit et le minerai traité -----	47
Tableau 10 : Relation entre le débit et la pente -----	47
Tableau 11 : Coûts des matières (SM) -----	54
Tableau 12 : Coûts de la main d'œuvre (SM)-----	54
Tableau 13 : Coût total (SM) -----	55
Tableau 14 : Coûts des matières (SC)-----	55
Tableau 15 : Coût de la main d'œuvre (SC)-----	56
Tableau 16 : Coût total (SC)-----	56
Tableau 17 : Paramètres d'essai-----	62
Tableau 18 : Paramètres d'étalonnage -----	63
Tableau 19 : Essai site A à 10% (SM) -----	65
Tableau 20 : Essai site A à 25% (SM) -----	66
Tableau 21 : Essai site A à 40% (SM) -----	66
Tableau 22 : Essai site A à 10% (SC) -----	67
Tableau 23 : Essai site A à 25% (SC) -----	67
Tableau 24 : Essai site A à 40% (SC) -----	67
Tableau 25 : Essai site B à 10% (SM)-----	68
Tableau 26 : Essai site B à 25% (SM)-----	69
Tableau 27 : Essai site B à 40% (SM)-----	69
Tableau 28 : Essai site B à 10% (SC) -----	70
Tableau 29 : Essai site B à 25% (SC) -----	70
Tableau 30 : Essai site B à 40% (SC) -----	70
Tableau 31 : Essai site C à 10% (SM)-----	71
Tableau 32 : Essai site C à 25% (SM)-----	72

Tableau 33 : Essai site C à 40% (SM)-----72

Tableau 34 : Essai site C à 10% (SC) -----73

Tableau 35 : Essai site C à 25% (SC) -----73

Tableau 36 : Essai site C à 40% (SC) -----73

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Spirale métallique simple pas à 4 tours	i
Annexe 2 : Spirale métallique simple pas à 3 tours	ii
Annexe 3 : Spirale en caoutchouc simple pas à 4 tours	iii
Annexe 4 : Vue de la boîte d'alimentation	iv
Annexe 5 : Vue de face de la boîte de sortie.....	v

INTRODUCTION GENERALE

Depuis les temps les plus anciens, l'or est considéré comme le métal précieux par excellence. Toutes les civilisations l'ont utilisé pour la réalisation de bijoux et d'objets d'apparat, ou comme symbole de richesse. Du fait de sa rareté, l'or est devenu une valeur de référence et une base pour les transactions monétaires internationales. Il était considéré par les alchimistes comme le métal parfait et la découverte de nouveaux gisements a toujours attiré des foules nombreuses.

A Madagascar, l'exploitation de l'or a été autorisée depuis 1883. Cette exploitation se fait souvent, même actuellement, d'une manière artisanale, par les orpailleurs. Elle fournit presque la totalité de la production aurifère malgache. Cependant, les orpailleurs vivent encore dans la pauvreté car la production est très faible (0,2g/jour/orpailleur) et la méthode d'exploitation utilisée n'a pas eu beaucoup d'évolution.

Ainsi dans ce présent mémoire intitulé « **CONCEPTION ET REALISATION DE SPIRALES POUR L'EXPLOITATION ARTISANALE DE MINERAI AURIFERE** », un nouvel appareil de séparation gravimétrique a été conçu dans le but d'augmenter la production, de professionnaliser l'activité et de protéger l'environnement.

Cet ouvrage se divise en trois grandes parties dont la première partie parle des généralités et des études bibliographiques, la deuxième partie concerne la conception et réalisation et la dernière partie montre les essais et interprétations des résultats. Une conclusion générale va terminer cet ouvrage.

Partie I : GENERALITES ET ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

Clicours.COM

Chapitre I : LE METAL OR

1- Présentation [1]

L'or, du mot latin « *aurum* » qui veut dire briller, est un métal précieux.

Numéro atomique	79
Symbole de l'élément	Au
Nom de l'élément	OR
Masses atomique	196,9665
Configuration électronique	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ¹
Encyclopédie Encarta, © Microsoft Corporation. Tous droits réservés.	

Figure 1 : Configuration électronique

- ⇒ Symbole : Au
- ⇒ Couleur : jaune
- ⇒ Numéro atomique : 79
- ⇒ Poids spécifique : 19,3

2- Etat naturel de l'or [1]

L'or est un élément relativement rare dans la croûte terrestre. Cependant, il est largement répandu à la surface de la Terre. On le rencontre :

⇒ *Dans les veines de quartz*

Il n'est pas rare de rencontrer des minéraux précieux à l'état pur, tels que l'or et le platine mélangés à d'autres minéraux, à l'intérieur d'une cavité ou d'un filon d'une roche sédimentaire ou ignée. Il s'agit des veines qui se forment par le dépôt des sédiments transportés par les eaux souterraines au cours des millénaires ou par l'injection de magma dans les fissures des roches ignées. L'or, en particulier, est souvent présent dans les veines de quartz.



Figure 2 : Or dans une veine de quartz

⇒ ***A l'état libre ou combiné dans les sédiments alluvionnaires secondaires***

Il est presque toujours associé à des quantités variables d'argent ; l'alliage naturel d'or et d'argent est appelé électrum. On trouve l'or sous forme combinée avec le tellure (Te) dans les minerais calavérite (AuTe_2) et sylvanite (AgAuTe_4) avec l'argent (Ag), et dans la nagyagite ($\text{Pb}_{13}\text{Au}_2\text{Sb}_3\text{Te}_6\text{S}_{16}$) avec le plomb (Pb), l'antimoine (Sb), le tellure et le soufre (S). Il apparaît encore avec le mercure sous forme d'amalgame et en petites quantités dans les pyrites de fer. La galène, minéral de sulfure de plomb, peut renfermer des quantités appréciables d'or.

3 – Propriétés

3.1 - Propriétés physiques [1]

- o Système cristallin : cubique à faces centrées
- o Densité : 19,3
- o Eclat : métallique
- o Transparence : opaque
- o Point de fusion : 1063°C
- o Couleur : jaune brillant

Finement divisé, il est noir comme les autres poudres métalliques et en suspension colloïdale, sa couleur est rouge rubis ou pourpre.

- o Dureté : 2,5 à 3
- o C'est également le métal le plus malléable et le plus ductile. On peut le réduire en feuilles de 1/10 000 de millimètre d'épaisseur. Il est mou, d'où la nécessité pour certains usages de l'allier à d'autres éléments métalliques (Cu, Ni, etc.)
- o L'or bout à 2807°C
- o Volatilité : après un chauffage de quelques heures et même à basse température, 300°C par exemple, le poids de l'or chauffé baisse considérablement. Il est donc recommandé de ne jamais le chauffer au dessus de 200°C sans le couvrir.

3.2 - Propriétés chimiques

Son état d'oxydation le plus commun est (0). Cependant, il peut former plusieurs composés, et son nombre d'oxydation peut varier de (-I) à (+V). Le Au(I) et Au(III) sont majoritaires. Toutefois, sa relative inertie chimique le protège des attaques de l'oxygène. L'or métallique ne se ternit pas et ne forme pas d'oxyde, et il résiste également à l'action de nombreux produits chimiques, dont la plupart des acides.

a - Ion aureux

L'ion aureux Au(I) se rencontre sur des ligands doux tels que les thioéthers, les thiolates ou les phosphines tertiaires. Ses composés sont généralement linéaires.

Lors du traitement des sables aurifères par cyanuration, l'or est solubilisé sous forme du complexe dicyanoaurate $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, dans lequel se retrouve Au(I). Le dicyanoaurate de potassium est un sel incolore, soluble dans l'eau et très toxique.

Curieusement, les complexes aqueux de l'ion aureux sont rares. Les halogénures d'or binaires, comme AuCl, forment des chaînes polymères en zigzag, de nouveau propre à la coordination linéaire de Au(I). La plupart des médicaments à base d'or sont des dérivés de l'ion monovalent Au(I).

b - Ion aurique

L'autre forme courante de l'or oxydé est l'ion aurique Au(III). Il entre, par exemple, dans la composition du chlorure d'or (III), AuCl_3 . Son dérivé est l'acide chloraurique, HAuCl_4 , qui se forme quand l'or se dissout dans l'eau régale. Les complexes auriques sont typiquement configurés en carré plat, comme la plupart des composés avec une orbitale d^8 .

c - États d'oxydation moins communs Au(-I), Au(II) et Au(V)

Fondu avec du césium, l'or forme de l'aurure de césium CsAu qui n'est pas un alliage, mais un composé ionique. L'atome d'or Au forme alors un ion négatif monochargé. Les propriétés de l'aurure sont similaires à celles d'un halogénure. Parmi les autres aurures, on compte ceux de rubidium, de potassium et de tétraméthylammonium $(\text{CH}_3)_4\text{N}^+$.

Les composés de l'or Au(II) sont généralement diamagnétiques et présentent des liaisons Au-Au.

Dans quelques composés de l'or apparaissent des liaisons aurophiles, qui décrivent l'interaction réciproque d'ions d'or à une distance trop longue pour constituer une liaison Au-Au covalente, mais plus courte que pour les forces de Van der Waals. La liaison aurophile est comparable à une liaison hydrogène en terme de force.

3.3 – Alliages

L'or de joaillerie, c'est-à-dire mélangé à un ou plusieurs autres métaux pour augmenter sa rigidité, peut présenter des teintes blanches (or blanc) ou rouges (or rouge) selon le type d'alliage qui le constitue. La teneur officielle et minimum en or pur est obligatoirement de 750/1000. Faute de quoi, l'appellation "or" est interdite.

- o L'or jaune est en principe constitué de 75 % d'or, de 12,5 % d'argent et de 12,5 % de cuivre
- o L'or rose est normalement composé de 75 % d'or, de 5 % d'argent et de 20 % de cuivre
- o L'or gris comporte habituellement 75 % d'or, d'argent, de cuivre et de palladium
- o L'or bleu est en fait un alliage d'or et de fer. Un traitement thermique oxyde les molécules de fer à la surface du métal et lui donne sa couleur d'azur.

Il faut noter que le terme "or blanc" est souvent utilisé pour désigner l'or gris en bijouterie.

En France et en Europe, le nickel est maintenant interdit, car c'est une source d'allergie. L'or blanc est donc recouvert d'une fine couche de rhodium, qui disparaît avec le temps, redonnant une couleur gris-jaune à l'or.

Pour la dorure à la feuille, l'alliage doit rester le plus mou possible.

- o L'or jaune est composé de 980 ‰ d'or, de 10 ‰ d'argent et de 10 ‰ de cuivre. Il peut être pur
- o L'or rouge est composé de 945 ‰ d'or et de 55 ‰ de cuivre
- o L'or ½ jaune est composé de 915 ‰ d'or, de 60 ‰ d'argent et de 25 ‰ de cuivre
- o L'or citron est composé de 945 ‰ d'or et de 55 ‰ d'argent
- o L'or gris est composé de 750 ‰ d'or, 150 ‰ de palladium et de 100 ‰ d'argent
- o L'or blanc français est composé de 200 ‰ d'or et de 800 ‰ d'argent, ailleurs en Europe, il est à 500 ‰, allié à 500 ‰ d'argent.

Chaque batteur d'or a ses propres alliages qui s'écartent légèrement des alliages standards.

Le carat : correspond au pourcentage massique d'or compris dans le métal.

Carats	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2
% or	100	91,67	83,34	75,01	66,68	58,35	50,02	41,69	33,36	25,03	16,7	8,37

Tableau 1 : Titrage de l'or

3.4 - Propriétés mécaniques

Les atomes d'or sont empilés selon une structure dite «structure cubique à faces centrées ». Cette structure cristalline présente beaucoup de plans cristallographiques denses. Or, la déformation plastique se fait par glissement des plans denses les uns sur les autres. D'une manière générale, tous les cristaux cubiques à faces centrées sont ductiles (le plomb, l'aluminium). L'or pur se déforme facilement à froid, par martelage ou par étirement (tréfilage, laminage), il se cisèle aisément. Il a de ce fait été utilisé très tôt pour fabriquer des bijoux et ornements, ou sous forme de fines feuilles pour plaquer des objets. En revanche, n'ayant qu'une faible tenue mécanique, il n'a pas été utilisé pour faire des outils.

3.5 - Conduction thermique et électrique

L'or est un excellent conducteur thermique et électrique, mais son coût (lié à sa rareté) limite ses utilisations. En raison de cette caractéristique, de son inaltérabilité et de sa grande ductilité, il est utilisé pour réaliser des connexions, notamment dans certains composants électroniques, comme les microprocesseurs.

4 – Economie

4.1 – Production mondiale

En 2007, on extrait environ 2 444 000 tonnes de minerais d'or. Les principaux pays producteurs sont :

- o la **Chine** : 276 000 tonnes
- o l'**Afrique du Sud** : 272 000 t
- o les **États-Unis** : 255 000 t
- o l'**Australie** : 251 000 t
- o l'**Indonésie** : 171 000 t
- o le **Péru** : 167 000 t
- o la **Russie** : 94 900 t
- o le **Canada** : 93 000 t
- o la **Nouvelle Guinée**
- o le **Ghana**

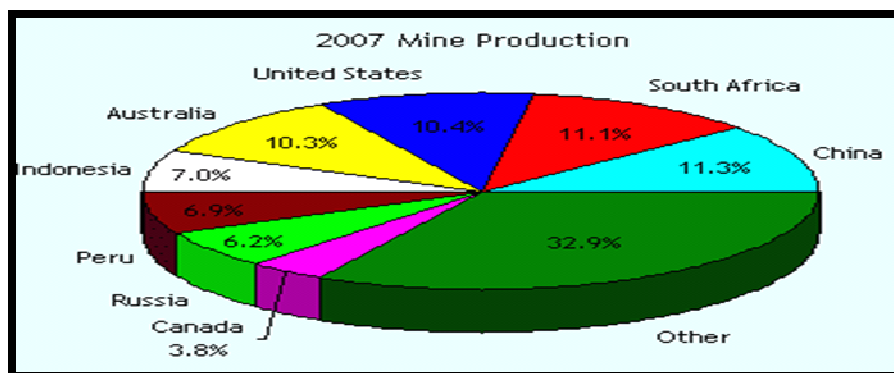


Figure 3 : Production mondiale d'or en 2007

4.2 - Réserves des banques centrales

<i>Banque centrale</i>	<i>2004</i>
Réserve fédérale des États-Unis	8 100
Banque d'Angleterre	312
Banque nationale suisse	1 350
Banque de France	3 200
Banque du Japon	765
Bundesbank	3 400
Banque populaire de Chine	600
Banque centrale de Chine	420
Banque centrale de Russie	400
Inde	350
Venezuela	350
Banque du Liban	286
Ensemble de l'Union européenne	12 700
Banque des règlements internationaux	208
Total banques centrales mondiales	31 400

Tableau 2 : Stock mondial d'or dans les banques (en tonnes)

Source : Conseil mondial de l'or 2004

4.3 – Marché

Par rapport à la plupart des autres marchandises, la particularité du marché de l'or est que les stocks de cette matière inaltérable, accumulés au fil de l'histoire chez les particuliers et différents organismes, sont estimés à environ 50 fois la production annuelle mondiale.

Les cours sont particulièrement fluctuants et soumis à divers facteurs : évolution des stocks d'or des banques centrales, demande d'orfèvrerie, demande industrielle, coûts et volumes de production, état des réserves minières, valeur refuge, ou achats et ventes spéculatives en fonction des incertitudes monétaires. Une partie du marché est opaque, en raison d'un orpillage illégal qui s'est fortement développé à la fin du XX^{ème} siècle en Amérique du Sud.

Les actions des grands groupes aurifères sont cotées essentiellement à Londres, New York, Toronto, Johannesburg et Sydney.



Figure 4 : *Lingots d'or*

L'or est échangé sur le marché des métaux précieux, principalement sur les places de New York, Londres, Zurich et Hong-Kong. Il est coté en once (**1 once = 31,1034768 g**) et en dollars américains.

Début 2004, le cours s'élevait à environ 400\$ contre 300\$ en 2001, et 600\$ en 2005 ce qui représente une appréciation de 50 % en l'espace de 30 mois, on prévoit une hausse de 200\$ entre 2006 et 2009 soit plus de 800\$. En janvier 2008, la faiblesse du dollar et les tensions géopolitiques consécutives à l'assassinat de Benazir Bhutto ont amené les cours de l'or à pulvériser leur record historique.

Le cours de l'or en septembre 2008

Le graphique ci-dessous montre le cours de l'or du premier septembre au 22 septembre 2008.

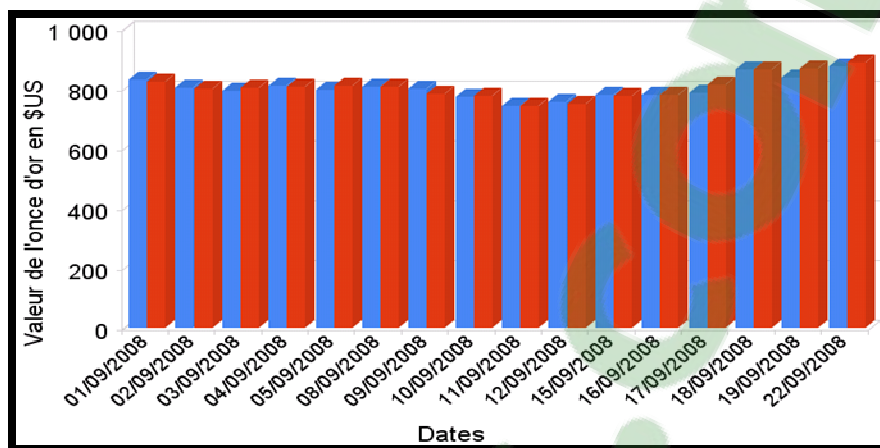


Figure5 : Cours de l'or

5 – L'or à Madagascar

5.1 – Historique [2]

D'après GRANDIDIER, la première découverte authentique de l'or à Madagascar aurait été faite en 1845 par Jean LABORDE, au cours des grandes chasses royales dans le Manerinerina sur la route de Majunga. Mais la reine RANAVALONA I a ordonné qu'elle fût tenue secrète. L'exploitation de l'or était autrefois interdite à Madagascar.

Les premiers codes malgaches, celui de RANAVALONA II, dit de 101 articles en 1868, puis celui des 305 articles en 1881 punissaient de vingt ans de fers tous ceux qui se livreraient à l'extraction de l'or. C'était seulement en 1883 que la reine RANAVALONA III autorisa les premières exploitations gouvernementales.

Depuis cette époque et jusqu'à nos jours, l'orpaillage artisanal a fourni la plus grande partie de la production. Ainsi, la plus forte production inscrite dans la région se situe entre 1901 et 1921 avec le chiffre de 6 733 kg d'or. Après l'épuisement des zones alluviales riches, la production diminue énormément. Ce sont les alluvions et éluvions qui fournirent la plus grande partie de la production qui atteint son maximum en 1909 avec 658 kg.

En 1914, l'attention fut attirée sur les sables noirs de l'Ikopa et sur les latérites aurifères. En 1929, on a délaissé totalement les gisements en place comme le filon de quartz, la latérite et la pegmatite qui offrent généralement des teneurs faibles, et qui sont d'exploitation difficile et

onéreuse (puits, galerie) où se pratiquait l'orpaillage. Actuellement, les orpailleurs exploitent surtout les lambeaux de terrasse, flats et lits de cours d'eau.

5.2 – Production [4]

Madagascar a produit environ 50 tonnes d'or entre 1879 et 1964, à la moyenne de 2 tonnes par an entre 1904 et 1915, avec une chute de 500 à 200kg entre 1919 et 1945. Les $\frac{3}{4}$ de cette production provenaient de l'orpaillage artisanal et les $\frac{1}{4}$ restants des exploitations semi - industrielles.

Année	Production	Année	Production	Année	Production	Année	Production
1897	79,1	1914	1782,5	1931	266,4	1948	65,1
1898	124,6	1915	2078,3	1932	352,6	1949	51,7
1899	386,6	1916	1515,3	1933	449,7	1950	60,1
1900	1114,5	1917	1107,7	1934	496,9	1951	60,6
1901	1045,0	1918	844,2	1935	480,8	1952	55,5
1902	1295,1	1919	562,0	1936	469,9	1953	51,5
1903	1910,7	1920	518,7	1937	418,7	1954	42,7
1904	2460,0	1921	456,2	1938	428,2	1955	33,4
1905	2370,0	1922	577,6	1939	348,9	1956	28,1
1906	2238,0	1923	502,8	1940	360,2	1957	26,8
1907	2940,0	1924	349,2	1941	341,9	1958	24,8
1908	3149,3	1925	419,7	1942	276,4	1959	13,5
1909	3696,8	1926	306,6	1943	285,6	1960	8,5
1910	3234,9	1927	210,3	1944	291,8	1961	10,8
1911	2850,0	1928	195,1	1945	200,0	1962	10,1
1912	2119,5	1929	187,1	1946	121,1	1963	28,1
1913	2058,8	1930	224,8	1947	47,2		

Tableau 3 : Production d'or de Madagascar de 1897 à 1963 (en kg)

Source : Rapports annuels parvenus à la DMG

Au cours des vingt dernières années, la production de l'or a connu à nouveau une baisse considérable jusqu'à devenir insignifiante aujourd'hui.

Ces baisses successives de production sont imputables à la fixation du prix de l'or, à \$35 l'once, jusqu'en 1972, rendant inintéressante la poursuite des anciennes exploitations ou le démarrage de nouvelles exploitations.

<i>Année</i>	<i>Production (kg)</i>	<i>Année</i>	<i>Production (kg)</i>	<i>Année</i>	<i>Production (kg)</i>
1964	13,740	1978	3,943	1992	0,03
1965	18,620	1979	1,378	1993	7,46
1966	26,520	1980	3,534	1994	26,4
1967	23,493	1981	1,016	1995	39,48
1968	16,893	1982	3,232	1996	7,05
1969	20,136	1983	2,601	1997	7,93
1970	16,571	1984	2,43	1998	11,86
1971	12,849	1985	0,87	1999	7,13
1972	5,814	1986	0,79	2000	4,61
1973	2,168	1987	0,35	2001	0,29
1974	2,417	1988	0,23	2002	2,80
1975	4,925	1989	0,006	2003	-
1976	1,537	1990	20,00	2004	12,00
1977	2,356	1991	-	2005	13,00

Tableau 4: *Production d'or déclarée de 1964 à 2005*

Source : *Rapports annuels parvenus à la DMG*

5.3 – Gisements aurifères de Madagascar [4], [5]

a- Les gîtes primaires

Les gîtes primaires, mis à part les filons barytiques aurifères de l'Andavakoera, à la limite socle-sédimentaire de l'extrême NORD EST, se trouvent tous dans les terrains métamorphiques précambriens, sous forme de veines ou de « filons » quartzeux discontinus, ou en minéralisation disséminée dans divers faciès de schistes cristallins.

Clicours.COM

a.1- Gisements primaires appartenant au domaine Archéen

Ce sont les plus nombreux. Ils se présentent le plus souvent sous forme de veines interstratifiées :

- o Associées à des séries des roches amphiboliques basiques : Maevatanana, Andriamena, Alaotra, Ampasary
- o Associées à des quartzites à magnetite : Maevatanana, falaise orientale du Sud d'Antananarivo et du Sud-Est, plus accessoirement Andriamena et Beforona-Alaotra
- o Associées aux séries silico-alumineuses de type Ambatolampy-Andriba (quartzites, gneiss, migmatites, micaschistes alumineux et souvent graphiteux) : régions types d'Ambatolampy et Andriba, Ouest Antananarivo, série de Sahantaha et de Vavatenina, plus accessoirement séries de Maha et de Viohilava-Ampasary et Sud-Est
- o A ces trois types se surimpose un type lié aux intrusions granitoïdes tardives qui affectent localement les faciès énumérés ci-dessous, par remobilisation du stock aurifère, sous forme de filon péritholitique, de stockwers et minéralisation diffuse dans les tactites

L'interférence des phénomènes intrusifs avec les anciennes séries porteuses constitue le métallotecte le plus favorable.

a.2 – Gisements primaires appartenant au domaine Protérozoïque

Ils appartiennent aux faciès à micaschistes ou à quartzites de la série « schisto-quartzocalcaire », et sont transformés par un métamorphisme de contact intrusif. Ils se présentent le plus souvent sous forme de dissémination de sulfures aurifères.

Les deux cas-types les mieux connus sont :

- o La région de Betsiriry (Est Miandrivazo) où les indices aurifères regroupent dans la zone de passage entre les gneiss migmatitiques et la série épimétamorphique « schisto-quartzocalcaire » (front des migmatites)
- o La région d'Itéa où les indices s'alignent dans les formations plus ou moins silicifiées (tactites) bordant le massif granitique intrusif d'Itéa.

a.3 – Gisements primaires liés à la tectonique Permo-triasique

Ce sont des filons constitués par des remplissages quartzo-barytiques de fractures, avec l'or natif et les sulfures associés. Ce type ne se rencontre que sur la bordure socle-sédimentaire de l'extrémité Nord de Madagascar, sur une centaine de kilomètres entre la vallée de Sambirano et la cote Est.

b – Gîtes secondaires

Ils résultent de l'altération météorique des gîtes primaires et de la concentration de l'or par les eaux de surface, cette altération conduisant à la transformation en latérite des roches encaissantes.

Une partie de l'or libéré migre vers le bas et peut éventuellement former des concentrations d'intérêt économique à la limite de la roche saine.

On distingue :

b1 - les gîtes éluvionnaires dans lesquels le matériel latéritique a été transporté le long des pentes, sur une faible distance. L'effet de gravité peut provoquer localement des enrichissements en or, même si le gîte primaire originel a des teneurs très faibles.

b2 – les gîtes alluvionnaires anciens où les alluvions aurifères, plus ou moins consolidés, forment des terrasses surélevées et entaillées par les cours d'eau actuels.

b3 – les gîtes alluvionnaires actuels où les sables et les graviers aurifères forment le lit actuel des cours d'eau. Suivant les cas, l'or peut provenir, soit du démantèlement des terrasses anciennes, soit directement de l'érosion des gîtes primaires ou éluvionnaires. A cause de leur facilité d'exploitation, ces gîtes sont actuellement les plus exploités par les orpailleurs.

5.4- Zones aurifères malgaches

a- Betsiaka (Andavakoera)

- Champ de filons quartzo-barytiques encaissés dans les gneiss du socle et dans les grès de base du Permien, le long de contact socle-sédimentaire
- Production de 1906 à 1934 : 7 285,8 kg
- Anciennes exploitations principales : Ranomafana et Bereziky.

b – Tsaratanana

- Série métamorphique Calco-Ferro-Magnésien d'Andriamena et roches basiques associées
- Anciennes exploitations principales : Ambohipihaonana et Masokoamena.

c – Maevatanana

- Série métamorphique silico-alumineuse de l'Ikopa-Betsiboka et série métamorphique Calco-ferro-Magnésien d'Andriamena
- Production de 1901 à 1921 : 6 733 kg
- Anciennes exploitations principales : Nandronjia, Tainangidina, alluvions des rivières Ikopa et Betsiboka.

d – Betsiriry

- Gneiss migmatitique du groupe de Miandrivazo

- Production de 1901 à 1968 : 2 623 kg
- Anciennes exploitations principales : Dabolava, Ankarongana, Antsaily.

e – Itasy

- Série gneissique silico-alumineuse de l'Itasy
- Production de 1901 à 1921 : 1 097 kg
- Ancienne exploitation principale : Antsolobato.

f – Axe Ambositra-Antananarivo

- Presque tous les gîtes connus sont encaissés dans la série gneissique silico-alumineuse archéen d'Ambatolampy, sauf Itéa qui se situe dans la série schisto-quartzo-calcaire d'Ambatofinandrahana (Protérozoïque moyen)
- Production de 1901 à 1921 : 1 489 kg
- Anciennes exploitations principales : Antsofimbato, Andravoravo et Itéa.

g – Vohilava-Ampasary

- Séries gneissiques silico-alumineuses à lentilles des groupes archéens de l'Ampasary (formation de Betampona) et de Vohilava (au contact du voisinage avec le granite de Befody et les orthogneiss dioritiques de Masora, rapportés au soubassement Antongilien d'âge catarchéen plus rarement à l'intérieur de ce dernier)
- Production de 1901 à 1921 : 8 580 kg
- Anciennes exploitations principales : Bebasy, Andrambo, Tsongolo, Tsaramiadana, gîtes alluvionnaires des rivières Ampasary, Maha, Sakaleona, Sahandrambo.

h – Beforona

- Formation métamorphique calco-ferro-magnésienne de l'Alaotra (Archéen) et roches basiques associées
- Production de 1901 à 1921 : 6 546 kg
- Anciennes exploitations principales : Marovato, Grigri.

i – Andrarona

- Contact entre Antongilien de Masoala et une série de schistes et quartzites
- Production de 1901 à 1921 : 276 kg
- Ancienne exploitation principale : Antsahivo.

j – Vavatenina Anosibe

- Série métamorphique silico-alumineuse d'âge Archéen, envahie par de nombreux filonnets pegmatitiques (front de migmatisation)
- Exploitation des alluvions anciennes et actuelles uniquement.

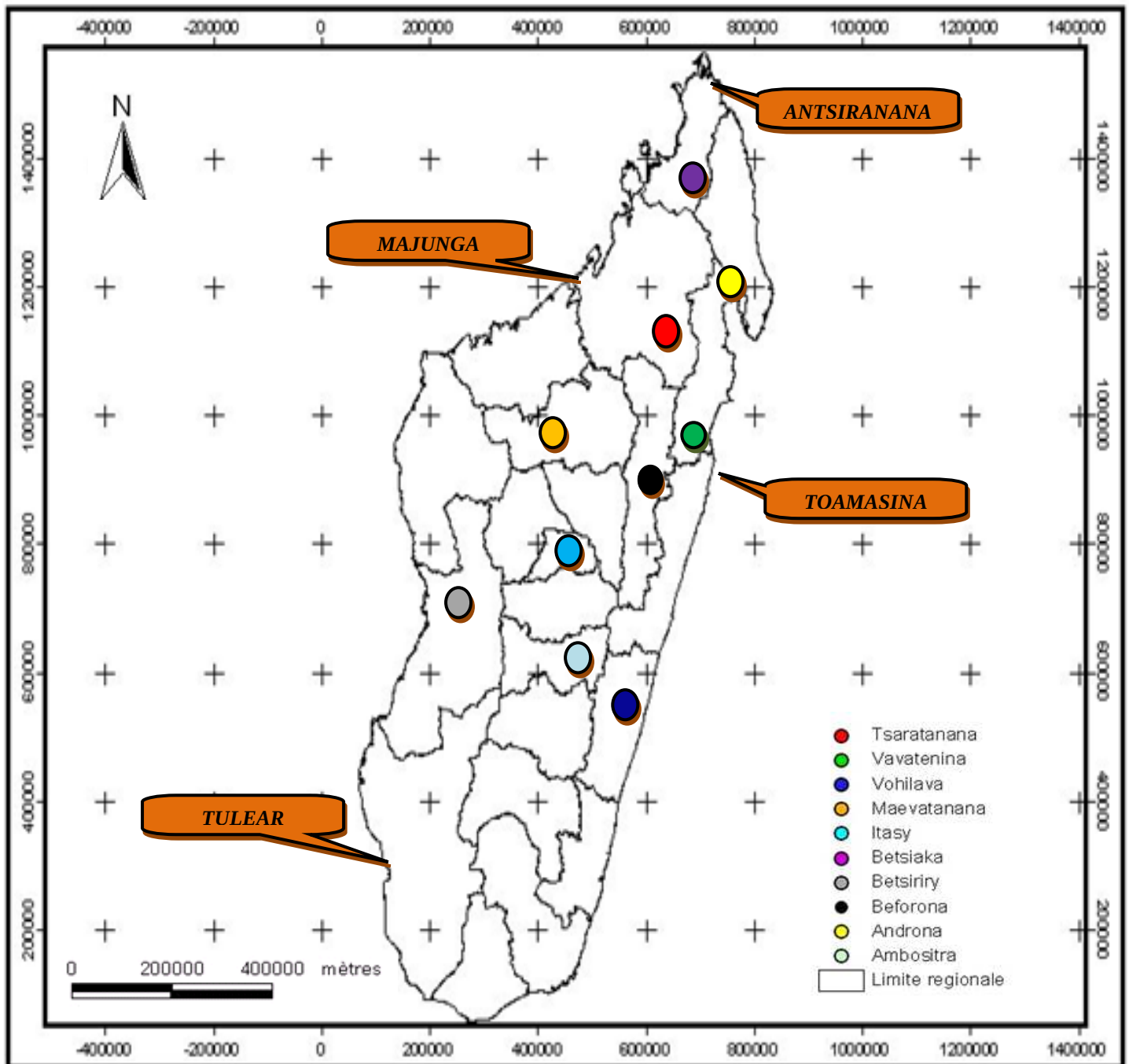


Figure 6 : Carte des zones aurifères

Chapitre II : PRINCIPAUX TYPES DE SEPARATIONS GRAVIMETRIQUES

I – TYPES DE SEPARATEURS GRAVIMETRIQUES

1- Définition [7]

La concentration gravimétrique est la méthode de séparation mettant en œuvre un champ de force de masse. Dans la majorité des cas, le champ des forces est celui de la pesanteur à laquelle se combine l'action d'autres forces : la résistance offerte par un fluide au mouvement des grains ou les forces de frottement entre les particules à séparer et une surface de support.

Elle repose sur la loi de sédimentation par gravité ou par centrifugation.

En effet, dans certains cas, la pesanteur n'est pas suffisante pour vaincre les résistances opposées par les fluides utilisées, on a recours alors à la force centrifuge.

Dans ces procédés, on définit les notions suivantes :

- **Particules équivalentes** : Ce sont des particules ayant la même vitesse limite de sédimentation
- **Raison de sédimentation** (ou raison de classement ou critère de Taggart) : Pour estimer l'aptitude à la sédimentation de particules de dimension identique mais de densité différentes, on a recours au critère de Taggart (C.T) :

$$C T = \frac{D p_2}{D p_1} = \frac{d s_1 - d_f}{d s_2 - d_f}$$

- **Dp1** : diamètre d'une particule lourde [m]
- **Dp2** : diamètre d'une particule légère [m]
- **ds1** : densité des minéraux lourds [m]
- **ds2** : densité des minéraux légers [m]
- **df** : densité du fluide.

Critère de TAGGART	Difficulté de séparation
CT > 2,5	Facile pour toutes les granulométries
1,5 < CT < 2,5	Possibles pour les granulométries >200µm
1,25 < CT < 1,5	Possibles pour les granulométries >1.7µm
CT < 1,25	Impossible

Tableau 5: Critère de Taggart

2. Séparation ou concentration en milieu dense [6]

2.1 Notions théoriques

a. Définitions

La séparation ou la concentration en milieu dense est un mode de séparation des mélanges de particules solides de densités diverses, réalisé suivant les phénomènes de sédimentation libre par gravité ($a = g$) mais dans un milieu fluide ayant une densité supérieure à celle de l'eau.

b. Les flottants et les plongeurs

Les flottants sont représentés par les particules solides de masse volumique $\rho_S < \rho_F$. Ils flottent à la surface du fluide de sédimentation.

Les plongeurs sont représentés par les particules solides de masse volumique $\rho_S > \rho_F$. Ils tombent et se déposent dans la partie inférieure du fluide de sédimentation.

c. Le médium

Le médium est représenté par le fluide de sédimentation. Il a une densité très élevée que celle de l'eau. C'est au sein de ce médium que les particules solides se répartissent en plongeurs et en flottants.

2.2 Mise en œuvre

On opère par étape :

- Première étape : préparation du minerai

Il faut éliminer les particules fines présentes dans le minerai parce que ces particules vont modifier la viscosité et la densité du médium. Pour cela, on opère un lavage préalable du minerai.

- Deuxième étape : préparation du médium

Cette préparation consiste à former plusieurs bains de densités variables. La densité des bains doit être supérieure à 2,65 car la gangue de toutes les matières minérales (minerais, roches) a une densité $d = 2,65$.

- Troisième étape : immersion des particules solides dans les bains de médium préparés

Dans cette étape, on opère la séparation de la gangue en flottants (surverse) et des minéraux de valeur en plongeurs (souverse).

- Quatrième étape : récupération et régénération du médium

Dans le domaine des pratiques industrielles, on opère généralement à une régénération suivie d'une récupération des bains de médium utilisé. Cette quatrième étape revêt une importance technique et économique. Elle permet en fait d'économiser la quantité de médium et de la réutiliser. A la sortie de l'appareil, les plongeurs et les flottants entraînent avec eux un peu de médium. Les

traces du médium entraînées sont éliminées par simple égouttage. Puis par des procédés de concentration (augmentation des teneurs) comme la flottation ou la séparation magnétique du médium, on cherche à retrouver les qualités originelles du médium récupéré.

2.3 Types de milieux denses usuels utilisés

En technologie des séparations gravimétriques en milieu dense, on peut utiliser les liqueurs comme médiums.

Liqueurs	Masse volumique	Diluants
Polytungstate de Sodium	< 2,9	Eau
Tetrabrométhane	2,96	Acétone, éther
Bromoforme	2,85	Acétone, alcool
Iodure de méthylène	3,32	Acétone, éther
Mélange Iodure Méthylène+ Bromoforme	2,9 à 3,31	

Tableau 6: Types de milieux denses

2.4 Etude de quelques appareils de séparation en milieu dense

Parmi les appareils de séparation gravimétrique en milieu dense, 3 principaux types sont les plus usités en technologie minéralurgique actuelle :

Les séparateurs à tambour

- Modèle type : WEMCO
- Élément séparateur actif : un tambour rempli à 30% de son volume
- Caractéristiques techniques :
 - ⇔ Vitesse de rotation du tambour : 1 à 2 tr/mn
 - ⇔ Granulométrie traitée : 10 à 100mm
 - ⇔ Tonnage horaire traité : 60 tonnes/h.

Les séparateurs cyclones

- Modèle type : DYNA-WHIRIPOOL (DWP)
- Caractéristiques techniques :
 - ⇔ Force centrifuge provoquant un tourbillonnement de la phase médium
 - ⇔ Granulométrie traitée : 0,5 mm à 100mm
 - ⇔ Tonnage horaire traité : 100 à 250 tonnes/h.

Les séparateurs à bacs

- 3 bacs de forme conique
- Injection de liqueur dense à la base du bac
- Evacuation des plongeurs et des flottants par voies parallèles concourantes
- Caractéristiques techniques :
 - ⇔ Brassage du médium par air comprimé injecté
 - ⇔ Granulométrie traitée : 2 à 10mm
 - ⇔ Tonnage horaire traité : 80 tonnes/h.

3. Séparation ou concentration par nappe pelliculaire fluente [6]

3.1- Notions théoriques

a- Définitions

La séparation ou la concentration par nappe pelliculaire fluente est un mode de séparation des mélanges de particules solides de densités diverses, réalisé suivant les phénomènes de sédimentation libre par gravité ($a = g$) mais sur un plan incliné fixe ou mobile, à la surface duquel s'écoule une couche mince de liquide.

L'efficacité de la séparation des particules solides dépend de la distance de parcours effectuée individuellement par chaque particule.

b- Phases de séparation par nappe fluente

La séparation par nappe pelliculaire fluente est réalisée en 2 phases :

● **Première phase : phase d'alluvionnement**

Les particules solides vont être entraînées par le film de liquide et se déposent au fond sur la surface du plan incliné à une distance variable selon leur densité, les lourdes et grosses étant les premières à se déposer. A la fin de cette phase, on obtient un dépôt d'alluvions.

● **Deuxième phase : phase de déplacement**

Les particules déposées sur la surface du plan incliné vont faire un mouvement de roulement et prennent des positions finales stables et définitives.

c- Facteurs influençant

Il est démontré que ce sont les caractéristiques physiques des particules qui peuvent avoir une influence très importante. Ce sont la densité, le volume et la forme des particules (les particules plates se déposent les premières, ensuite les particules de forme cubiques et plus loin les particules rondes).

L'état de la surface du plan incliné constitue aussi un facteur influençant (une surface rugueuse de ce plan offre une résistance par frottement très importante à l'effet d'entraînement de l'eau).

3.2- Etude des phénomènes

Au cours de la phase d'alluvionnement, une particule solide en suspension dans le film de liquide mobile réalise une décantation libre dans un fluide en mouvement ; sa trajectoire est parabolique.

Le temps de dépôt des particules sur la surface du plan incliné dépend de la forme des trajectoires effectives de chute des particules.

Durant la phase de déplacement, les particules ne restent pas sur leur point de chute mais sous l'effet conjugué des forces de frottement et des forces d'entraînement du liquide, elles se déplacent le long de la surface du plan incliné jusqu'à un certain point plus bas. Les positions finales et définitives stables des particules dépendent de l'équilibre entre les diverses forces.

3.3- Vitesse d'écoulement d'un film d'eau sur plan incliné

On montre que la vitesse (u_e) d'entraînement de la nappe liquide est fonction de l'angle d'inclinaison α du plan incliné et des coordonnées de position de la particule au sein du film de liquide.

Soit :

- M : la position d'une particule solide quelconque M(x,z)
- Z = e : épaisseur de la nappe mince de liquide
- μ_F : la viscosité du liquide (en Po)
- ρ_F : la masse volumique du liquide (en g/cm³).

$$U_e = \frac{\rho_F * g(2z - y) y \sin \alpha}{2\mu_F}$$

3.4- Etude de quelques appareils usuels de séparation en nappe pelliculaire fluente

a-Traits généraux des appareils de séparation gravimétrique en nappe pelliculaire fluente

D'une manière générale, la technologie de séparation gravimétrique utilisant une nappe mince de liquide s'écoulant sur un plan incliné opère une séparation des particules en plusieurs fractions :

- ▣ Fractions des particules lourdes grossières
- ▣ Fractions des particules lourdes fines
- ▣ Fractions des particules légères grossières
- ▣ Fractions des particules légères fines.

Cela est possible grâce à une sédimentation gravimétrique et un effet d'entraînement de la nappe de liquide mobile. On améliore l'efficacité de la séparation en augmentant :

- l'effet d'entraînement du liquide en utilisant un plan incliné très mobile
- et l'effet de frottement sur la surface du plan incliné en garnissant cette surface des riffles.

Les appareils usuels de séparation par nappe pelliculaire sont classés en 2 grandes catégories suivant que le plan incliné est fixe ou mobile.

b-Catégorie à plan incliné fixe

Parmi les séparateurs les plus courants dans l'exploitation minière dans cette première catégorie, on a les sluices et les spirales.

c-Catégorie à plan incliné mobile

Le plus typique et le plus utilisé des appareils de séparation gravimétrique de cette deuxième catégorie est la table à secousses.

c.1- La table à secousses

Principe

La séparation s'effectue sur les différences des masses volumiques des grains sur une surface plane inclinée transversalement (le deck), parcourue par un mince film d'eau, et portant une série de barrettes (riffles) disposées perpendiculairement au sens d'écoulement de l'eau.

Le deck est animé d'un mouvement longitudinal asymétrique (en dent-de-scie). Les secousses ainsi créées permettent un classement par taille et par masse volumique des particules entre les riffles, le long desquelles elles progressent. Les particules échappées d'un riffle sont reprises par le film d'eau et amenées par le courant au riffle suivant où le même phénomène de classement se reproduit.

La masse du matériau à traiter se différencie en plusieurs bandes correspondant à des familles de particules de même masse et/ou masse volumique. Les particules les plus légères suivent pratiquement la direction du courant d'eau, celles de masse volumique intermédiaire sortent en position diagonale par rapport au point d'alimentation. Les particules les plus denses cheminent le long des riffles sur toute leur longueur avant d'être libérées à l'autre extrémité du deck.

Cllicours.com

Les rifles

Les rifles sont des barrettes en bois ou en plastique. Leur hauteur décroît du côté de l'alimentation au côté d'évacuation : 13 - 22mm à 1- 2mm.

Le type de rifflage est adapté à la phase de traitement considéré : dégrossissage – finissage.

Quelques données sur les caractéristiques techniques courantes

- ✗ granulométrie traitée : 70µm à 2mm
- ✗ tonnages traités : 50 à 150 kg/h
- ✗ séparation diversifiée : lourd/ léger/mixte
- ✗ fréquence de secousses : 250 à 300 secousses/mn
- ✗ angle d'inclinaison (α) de la table à secousses :

$$\cos \alpha = \left[\frac{9k\rho_F}{C(\rho_S - \rho_F)} \right] \left[\frac{e}{D_p} - \frac{3}{8} \right]$$

Avec :

- k : coefficient de forme de la particule
- C : coefficient de frottement
- D_p : diamètre de la particule solide (en µm)
- e : épaisseur de la nappe d'eau (en mm)
- ρ_S, ρ_F : masses volumiques de la particule solide et du fluide (en g/cm³).

4 - Séparation ou concentration par jiggage [6]

a - Notions théoriques

a.1- Définitions

La séparation ou la concentration par jiggage est un mode de séparation des mélanges de particules solides de densités diverses, réalisé suivant les phénomènes de sédimentation libre par gravité ($a = g$) mais au sein d'un fluide auquel on a imposé un mouvement oscillatoire avec une fréquence bien définie.

Le terme « jiggage » vient du mot anglais « jiggle », ce qui traduit parfaitement le mouvement pulsé du fluide.

a.2 - Phases de séparation par jiggage

La séparation par jiggage est réalisée suivant des cycles à 2 phases :

- **Première phase : phase d'expansion**

Sous la poussée de la montée du courant liquide, les particules solides vont monter et s'écarter les unes des autres.

- **Deuxième phase : phase de succion**

Sous l'effet de la descente du courant liquide, il y a réalisation d'une sédimentation à accélération différentielle. Puis les particules se rapprochent en descendant, se bloquent les unes des autres et seules les particules lourdes peuvent traverser le lit formé par l'ensemble des particules et finissent après plusieurs cycles par traverser la grille qui supporte le lit. Ce qui permet de les récupérer dans une huche.

a.3 - Facteurs influençant

Il est démontré que plus la granulométrie diminue, plus les forces de résistance du fluide au mouvement des particules deviennent prépondérantes vis à vis des poids.

Une fréquence très élevée des pulsions est nécessaire pour provoquer les très brèves accélérations de chute des particules. Ce qui réduit l'effet des forces de résistance de fluide.

b - Etude des phénomènes

Au cours de la phase d'expansion, les particules se comportent diversement sous l'effet conjugué de l'entraînement ascendant du courant liquide et de l'accélération différentielle de chute caractérisant la sédimentation commençante.

L'accélération différentielle caractéristique d'une sédimentation commençante se matérialise par une très brève variation de la vitesse de chute des particules solides (de zéro à u_L). Cette accélération différentielle est fonction de la densité des particules, d'où la différence de comportement des particules soumises à l'effet de la montée du courant liquide.

Notons :

- γ_d : accélération différentielle propre à la chute de la particule étudiée
- m et m' : les masses respectives de la particule et du liquide déplacé par le volume de la particule
- F_f : force de frottement.

$$m \gamma_d = (m - m') g - F_f$$

Or : F_f est négligeable

$$D'où \quad \gamma_d = \left[1 - \left(\frac{\rho_F}{\rho_S} \right) \right] g$$

Durant la phase de succion, deux phénomènes se matérialisent :

- o **Sédimentation** : à l'effet d'entraînement descendant du courant liquide, la sédimentation se trouve renforcée normalement mais du fait d'un phénomène de rapprochement entre les particules qui descendent, cette sédimentation est perturbée
- o **Tassement** : Finalement à la fin de la phase de succion, les particules s'entassent en un lit stratifié. Les lourds cherchent à pénétrer à l'intérieur de ce lit stratifié et parviennent à traverser la grille servant comme support du lit stratifié.

c - Etude de quelques appareils usuels de séparation par jiggage

c.1- Traits généraux des appareils de séparation gravimétrique par jiggage

Dans tous les appareils opérant une séparation gravimétrique par jiggage, deux éléments assurent la séparation des particules lourdes et légères :

- o un piston ou un diaphragme pour assurer le mouvement alternatif de jiggage du fluide de sédimentation
- o un crible pour supporter le lit des particules formées et obtenir une bonne stratification des ces particules

A cause des mouvements de jiggage réalisés par le fluide de sédimentation à l'intérieur de ces appareils, on désigne ces derniers par « jigs » ou bacs à pistons. Suivant la mobilité du crible, on distingue :

- o les jigs à crible fixe
- o et les jigs à crible mobile

c.2 – Les jigs à crible fixe

Modèles types : *Jig Harz et jig Bendery et Minéral jig Denver*

Sur la grille du crible fixe, le lit des particules constitue un lit filtrant formé essentiellement des particules lourdes. L'épaisseur de ce lit est réglée à un niveau maintenu constant grâce à un déversoir des particules lourdes.

Par suite des séries de contractions et de dilatations des interstices de ce lit filtrant (qui sont provoquées par le mouvement du liquide), les lourds filtrés à travers ce lit passent à travers la grille fixe et sont recueillis dans le fond de la huche d'où ils sont évacués périodiquement.

Type de jigs	Tonnage horaire traité (en tonne/h)	Granulométrie traitee(en mm)	Fréquence de jiggage (en pulsations/mn)
Jig HARZ	2 - 11,5	0,3 - 20	270 - 120
Jig BENDELARI	14 - 18	0,3 - 2,5	160 - 105
Minéral Jig DENVER	14 - 20	0,3 - 2	300

Tableau 7 : Caractéristiques de quelques jigs

c.3 – Les jigs à crible mobile

Modèle type : Jig Hancock

Ce type de jig est constitué d'une longue caisse à 5 compartiments possédant chacun un crible mobile. Le mouvement de jiggage produit une stratification des particules dans chaque compartiment et une progression horizontale des produits sur le crible.

Tonnage horaire traité (en tonne/h)	Granulométrie traitée (en mm)	Fréquence de jiggage (en pulsations/mn)
9 - 25	1 - 12	195 - 180

Tableau 8 : Caractéristiques techniques du Jig Hancock

II- Quelques séparateurs gravimétriques de l'or

1- La batée

a – Présentation

Le mot batée est un terme générique minier issu de l'espagnol « batea » signifiant cuvette. La batée est une plate circulaire de 40 à 50 centimètres de diamètre, de quelques centimètres de profondeur, dont les bords se relèvent doucement.



Figure 7 : La batée

b – Utilisation

Le prospecteur verse une pelletée de terre dans l'instrument. Tenant la batée légèrement inclinée, il lui imprime un mouvement de rotation. L'eau, agitée, soulève les particules les plus légères, alors que l'or retombe rapidement au fond. De temps à autre, il faut secouer la battée de haut en bas, pour tasser au fond les particules les plus lourdes. Peu à peu, la batée se vide de l'eau, de la terre et du sable. Il ne reste au fond de l'instrument que les pépites, les paillettes et les graviers les plus gros.

Le travail à la batée se fait souvent avec de l'eau jusqu'aux chevilles ou aux genoux (dans les torrents de montagne, par tous les temps, il faut être animé d'une grande foi). Bien souvent, une ou deux saisons dans ces conditions suffisent à déguster un homme normalement constitué. Le procédé consomme peu d'eau, mais il est lent (un mineur traite moins d'un mètre cube par journée de terre, et il faut un terrain riche pour que ses efforts soient honnêtement récompensés).

2 – Le pan

a – Présentation

"Le pan" ou pan américain est un anglicisme mais les orpailleurs l'utilisent pour désigner précisément les batées à fond plat parfois rainurées.



Figure 8: *Pan américain rainuré*

Le pan dit américain était utilisé dans les pays anglo-saxons et en Italie. Un fond plat et des rebords relevés le caractérisent. L'expulsion des sables se fait par débordement.

b – quelques exemples de pans

b.1- Le plat finlandais

Le *vaskooli* terme proche du mot scandinave « vask » est une sorte de pan peu profond et aux rebords très peu pentus.



Figure 9 : *Plat finlandais*

b.2 – Le pan japonais

Le pan japonais a une forme rectangulaire, le fond est un creux de cylindre très ouvert.



Figure 10 : *Pan japonais*

b.3 – Le pan à spirales

Cet instrument innovant, à moteur électrique alimenté en 12v, permet de récupérer les minéraux lourds, d'éliminer les sables et les graviers. L'eau utilisée est recyclée, ce qui le prédispose à une utilisation en plein désert. Il est surtout employé pour séparer l'or des grandes quantités de sables lourds.



Figure 11 : *Pan à spirales*

3 – Le sluice [8]

a – Définition

Le sluice est un appareil statique qui doit permettre l'écoulement idéal d'un fluide composé d'eau, de sables et de graviers, en réalisant une séparation gravimétrique la meilleure possible au moyen des pièges disposés à des endroits déterminés.

b – Description

Le sluice est un équipement de traitement d'or, ayant la forme d'un long canal. Il est constitué d'un ou de plusieurs caissons en série inclinés munis de riffles et de moquette où les concentrés d'or sont collectés. Les riffles ont diverses configurations. Ils retiennent les particules denses et laissent passer la gangue. Le caisson est souvent alimenté par un crible, mais quelquefois il est alimenté directement par une trémie sans utilisation de crible.

Le taux de réussite dépend du débit de l'eau et de la pente qui varient en fonction de la taille des grains, de la nature de la gangue.

- o pour l'or à gros grains : la pente doit être plus forte
- o pour les grains fins : on travaille avec une pente douce
- o et pour les minéraux argileux : le débit doit être plus élevé.

La forme, l'inclinaison et les dimensions du sluice dépendent de plusieurs facteurs tels que la nature du tout-venant, les caractéristiques de l'or, la quantité de matière à traiter par jour, la quantité d'eau...

c – Principe

Pour qu'il soit efficace, il faut qu'il y ait un tourbillon dans chaque compartiment inter-riffle. Le courant descendant et ascendant permet d'effectuer un tri pour les particules de forme égale. Le principe de base pour le fonctionnement d'un sluice est d'avoir un contraste de densité entre le matériau recherché et l'ensemble alluvionnaire.

Partie II : CONCEPTION ET REALISATION DE SPIRALE

Chapitre I : DESCRIPTION GENERALE

I – HISTORIQUE [w2]

La technologie de la spirale s'est progressivement développée dans les 60 ans passés et elle est maintenant usitée dans l'industrie de mines.

Humphrey introduit dans le monde la méthode de concentration en spirale en 1950. Le premier model est fait en métal (fer), parfois en ciment pourvu d'un trou, et utilisé dans le traitement de fer et de minerais de chromite et aussi dans d'autres applications.

En1970, le PVC, la fibre de verre et le polyuréthane sont devenus leurs matériaux de construction. Les spirales se sont progressivement améliorées en même temps en performance et en souplesse.

Avec leur grande capacité, leur aptitude à faciliter la différenciation des particules, leur opération simple et à bas prix, les spirales sont créées pour être les séparateurs de choix.

II – DESCRIPTION [w3], [w4]

1- Définition [6]

Une spirale est un appareil de séparation gravimétrique par nappe pelliculaire fluente.

2- Présentation

a – Description

La spirale est constituée :

↔ d'une boîte d'alimentation : servant à alimenter l'appareil et à introduire l'eau de lavage

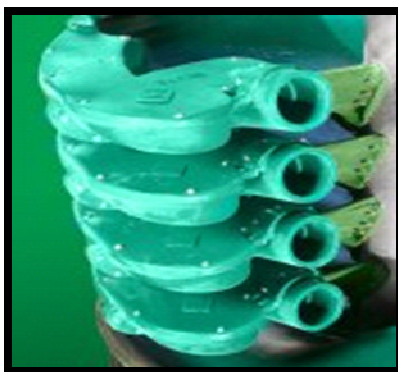


Figure 12 : Exemple de boîte d'alimentation

↔ d'une coquille (hélice) : constituée de un ou plusieurs pas

↔ et d'une boîte de sortie : servant à séparer le minerai traité et à son évacuation

La spirale n'a pas d'organe en mouvement.

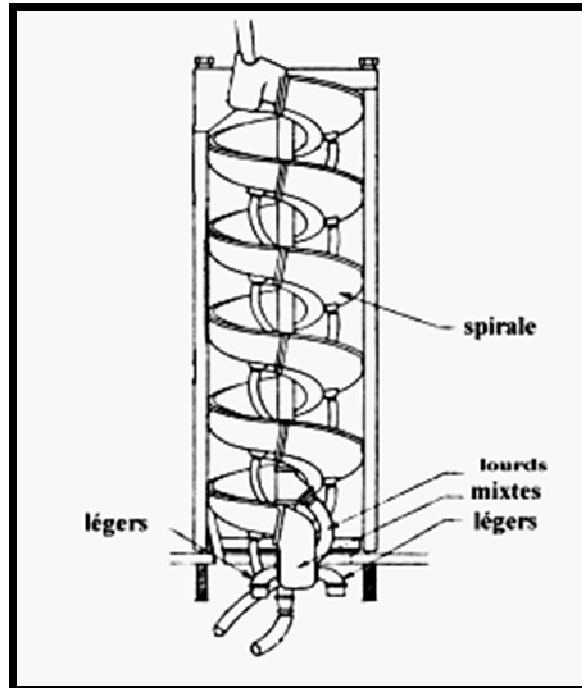


Figure 13 : Une spirale

b – principe

Deux phénomènes sont responsables de la séparation des particules :

- la sédimentation
- la centrifugation.

Le minerai est alimenté sous forme de pulpe au sommet de la spirale, d'où elle descend par gravité suivant le parcours hélicoïdal. Ce parcours crée une force centrifuge qui agit différemment sur les divers types de particules minérales (grossières/fines, lourdes/légères).

Typiquement, les particules lourdes et/ou grossières étant moins affectées par la force centrifuge, ont tendance à rester plus près de l'axe de la spirale tandis que celles plus fines et/ou plus légères sont poussées vers la périphérie. Des orifices placés près du centre de la spirale à des espaces fixes le long du parcours, servent à recueillir le minerai s'y trouvant. Les particules qui ne sont pas recueillies aux ouvertures mentionnées ci-dessus, se ramassent finalement au fond de la spirale et sont recueillies à la sortie des rejets. De l'eau de lavage est injectée à l'intérieur de la spirale pour améliorer la séparation en repoussant davantage les particules fines et/ou légères vers la périphérie.

La figure suivante montre le mode de séparation opéré dans une spirale :

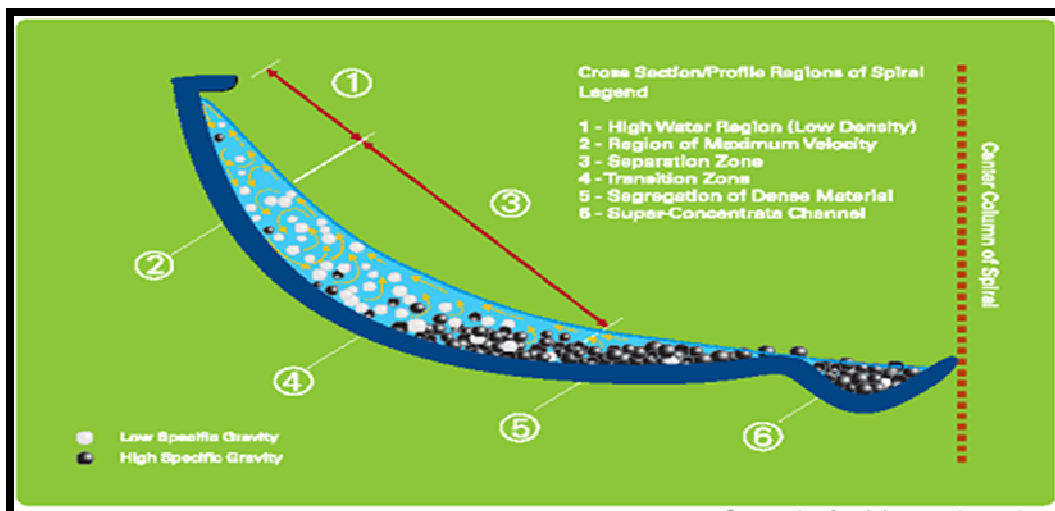


Figure 14 : Séparation des particules

c – Mode de travail

Pour être beaucoup plus efficace et pour augmenter la production, les spirales peuvent être munies de plusieurs pas. Elles peuvent aussi travailler en parallèle.



Figure 15 : Spirales travaillant en parallèle

3- Catégories des séparateurs en spirale

Le développement continu des gammes de séparateurs en spirale pour traiter les minéraux lourds a eu comme conséquence la naissance de spirales spécialisées des fonctions spécifiques :

- Spirales LG: pour concentrer les boues contenant généralement moins de 10% de minéraux lourds (par exemple la spirale LG7D)
- Spirales MG: pour concentrer les boues contenant 10 à 25% de minéraux lourds (spirales MG2, MG4B, MG4CF, MG6.2 par exemple)

- Spirales HG: pour concentrer les boues contenant davantage plus de 25% de minéraux lourds. Les modèles incluent le HG7E, le HG8E et le HG10A
- Spirales FM: elles récupèrent efficacement les minéraux lourds plus fins que 150 μm . Les modèles incluent le FM1.

Cependant, les spirales peuvent être classées en deux grands types :

↔ ***Spirale washwaterless :***

La seule eau exigée est ajoutée avec les solides avant d'alimenter la spirale.



Figure 16 : Spirale washwaterless

↔ ***Spirale washwater :***

La spirale washwater exige l'addition d'eau à divers points de la spirale en fournissant donc un " lavage " du concentré.



Figure 17 : Spirale Washwater

4- Paramètres

La spirale est l'appareil de séparation gravimétrique le plus utilisé.

✘ granulométrie traitée : 75 μm à 2,5 mm

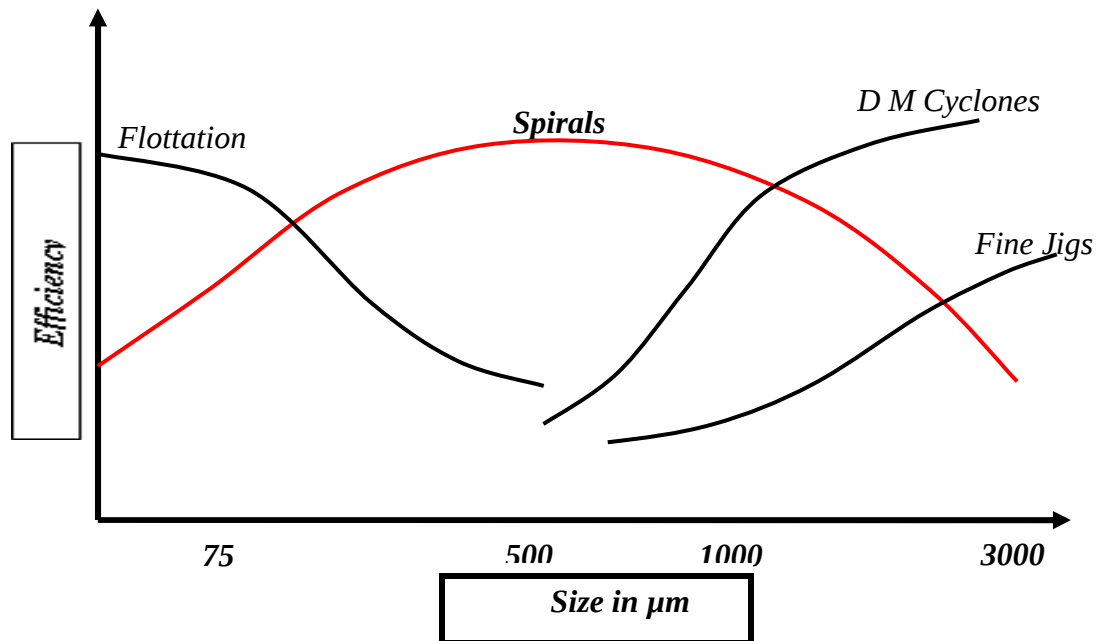


Figure18 : Comparaison des granulométries traitées

- ✘ tonnages traités : 500 à 3000 kg /h
- ✘ eau de sédimentation : $Q_s = 3,5$ à $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$
- ✘ eau de lavage : $Q_l = 0,7$ à $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$
- ✘ hauteur de la spirale : plus de 3,5m
- ✘ nombre de tours : 5 à 7
- ✘ angle radiale : 7 à 35°
- ✘ pulpe : 10 à 40% de matières solides.

Chapitre II : ETUDES THEORIQUES

1. Cinématique [3]

a. Description du mouvement de la masse du fluide selon Lagrange

Suivons le mouvement d'une particule P repérée à l'instant t_0 au point de coordonnées ξ_i ($i= 1, 2, 3$) dans un système fixe orthonormé. La particule P, affectée de son identité (ξ_i, t_0) se trouve à l'instant t en un point de l'espace dont les coordonnées sont x_j ($j= 1,2, 3$). En supposant qu'une particule n'occupe qu'un seul point de l'espace à l'instant t , le mouvement de la trajectoire de P est décrit par les trois fonctions $x_j = x_j(\xi_i, t)$.

Les variables de Lagrange sont ξ_i et t . Connaissant les fonctions x_j , on peut théoriquement les inverser pour obtenir $\xi_i = \xi_i(x_j, t)$. Les composantes v_i de la vitesse et γ_i de l'accélération de P, à l'instant t , sont :

$$V_i = \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right) \text{ et } \gamma_i = \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} \right)$$

b. Description selon Euler

On utilise préférentiellement le mode de description suivant : pour chaque point M (x_i) de l'espace repéré par rapport à un système fixe, on observe le passage des particules au cours du temps. On ne s'intéresse pas aux identités de la particule mais à la vitesse que possède la particule qui y passe à l'instant t : $v_i = v_i(x_j, t)$. Les variables d'Euler sont x_j et t .

Si en un point I de l'espace, on marque toutes les particules qui y défilent au cours du temps, ces particules dessinent à l'instant t une courbe appelée ligne d'émission. Cette trace instantanée est l'ensemble des particules qui sont passées au point I aux instants antérieures à t . On appelle ligne de courant à l'instant t , la courbe qui est tangente en chacun de ces points au vecteur vitesse. Elle correspond à :

$$\frac{dX_1}{V_1} = \frac{dX_2}{V_2} = \frac{dX_3}{V_3} \text{ à } t \text{ fixé}$$

Dans le cas général, le champ des vitesses change avec le temps et les lignes de courant ne sont pas fixes. La trajectoire d'une particule est telle que, dans tout intervalle de temps élémentaire

$$dt : \frac{dX_1}{V_1} = \frac{dX_2}{V_2} = \frac{dX_3}{V_3} = dt$$

2. Type d'écoulements et nombre de Reynolds [9]

L'écoulement d'un fluide peut être de trois types (laminaire, turbulent et intermédiaire). La transition entre les deux premiers régimes dépend de la vitesse, de la densité, de la viscosité du fluide et du nombre de Reynolds.

a- Nombre de Reynolds

C'est un nombre sans dimension caractérisant la nature du régime d'écoulement du fluide. Il est introduit par un ingénieur anglais Reynolds en 1883 pour comparer les forces de viscosité à la force résultante ρdv à qui s'exercent sur un élément de fluide. Il a pour expression :

$$Re = \rho \cdot \frac{Vd}{\eta} = \frac{Vd}{\nu}$$

- ρ : Masse volumique du fluide [kg/m³ ou g/cm³]
- $\nu = \eta/\rho$: Viscosité cinématique
- d : distance caractéristique (par exemple le diamètre de la conduite dans lequel le fluide s'écoule) [m ou cm]
- V : Vitesse d'écoulement [m/s ou cm/s]
- η : Coefficient de viscosité en poiseuille [Ps] (MKSA) ou en poise [Po] (CGS)

$$1Ps = 10Po$$

Les valeurs remarquables de Re sont :

- ↔ $Re < 2$: régime laminaire
- ↔ $2 < Re < 500$: régime intermédiaire
- ↔ $Re > 500$: régime turbulent

b- Écoulement laminaire (régime de Stokes)

Quand la vitesse du déplacement du fluide est faible au voisinage du solide, les filets fluides en mouvement s'écartent du solide. Chaque filet fluide se déplace avec une vitesse légèrement supérieure à celle de son voisin immédiatement proche. Cela est dû à l'effet du frottement de contact du fluide avec le solide. Le régime laminaire correspond à un écoulement du fluide ayant une très faible vitesse.

c- Ecoulement transitoire (régime d'Allen)

Quand la vitesse du solide est importante, des tourbillons stationnaires par rapport au solide commencent à apparaître à l'arrière du solide en mouvement. Ce type de fluide correspond à un régime appelé régime d'Allen. En réalité, ce régime constitue la première phase du régime turbulent.

d- Ecoulement turbulent (régime de Newton)

Quand la vitesse du mouvement du fluide est très élevée et quand la vitesse d'écoulement du solide est très élevée aussi, les tourbillons deviennent libres et sont devenus de plus en plus nombreux à l'arrière du solide en mouvement. Ces tourbillons libres possèdent leur propre mouvement. Ils se déplacent dans le même sens que le solide.

3. Cas de la spirale

Deux types de régimes sont observables à l'intérieur de la coquille :

- ↔ le régime turbulent : présence de la zone des bulles
- ↔ le régime laminaire.

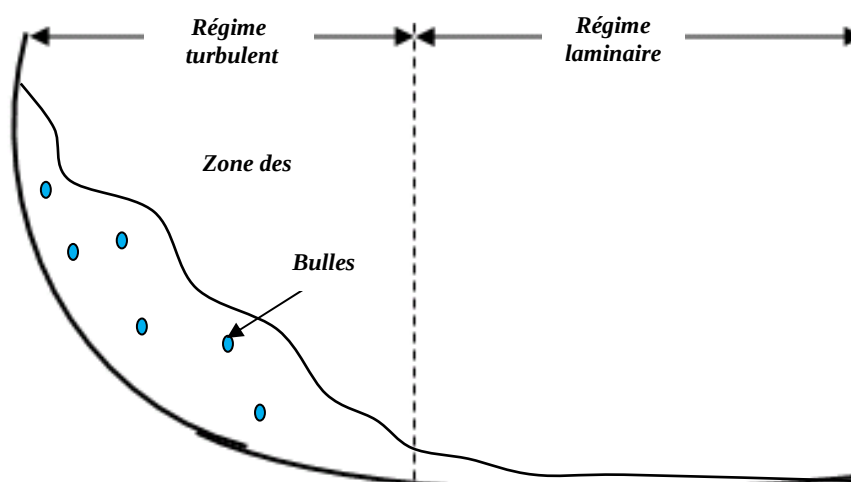


Figure 19 : Types d'écoulements

4. Principes de la pesanteur dans une spirale [w1]

La séparation gravimétrique des particules a une importance fondamentale car c'est la base de plusieurs méthodes pour séparer les particules. La méthode la plus commune est la séparation gravimétrique en spirale.

Les principes fondamentaux de la séparation gravimétrique en spirale sont analysés dans ce paragraphe. La figure 20 illustre la situation d'une particule sphérique placée sur une pente descendante qui gagne une vitesse pendant son roulement. La pente est également inclinée vers l'axe central de sorte qu'une force centripète C_P agisse sur la particule.

Cette force gravitationnelle augmente avec l'angle β de la pente. Une force centrifuge C_F agit sur la sphère. La force centrifuge augmente avec le carré de la vitesse de roulement. Si cette force est plus grande que la force centripète, la particule sphérique va suivre le chemin montré dans la figure 20. La ligne en pointillée indique un autre chemin (le rayon R) que la particule suivrait si les deux forces demeuraient égales l'une de l'autre.

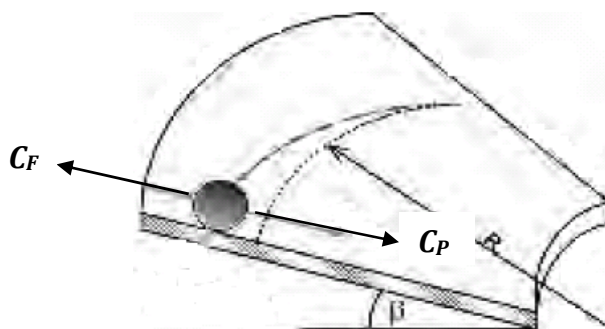


Figure 20 : Situation d'une particule sphérique placée sur une pente

4.1- Accélération gravitationnelle sur une pente plate descendante

Les particules vont rouler vers le bas sur une pente à une vitesse croissante sous l'action de la pesanteur.

a- Roulement

La figure 21 est une illustration d'une particule sphérique roulant vers le bas sur une pente dont l'angle est α et produisant des vitesses croissantes. L'accélération A est liée à l'accélération de la pesanteur g :

$$A = S.g.\sin \alpha$$

Avec :

- S : est le facteur de forme pour le corps en roulement, ayant une valeur de 5/7 pour une sphère parfaite et ayant des valeurs plus basses pour toute autre forme. 2/7 correspond à la fraction exigée pour produire de l'énergie de rotation.
- v : la vitesse des particules qui augmente avec la distance parcourue,
- a_c : l'accélération constante.

Pour une particule commençant au repos, l'équation régissant est :

La substitution de la valeur de l'accélération A aboutit $v^2 = 2S \times g \times \sin \alpha \times a$

Le temps, t , qu'une sphère prend pour rouler sur une distance donnée a $t = 2s/v$

b-Culbutage

Le mouvement de culbutage dépend de la forme de la particule, de l'angle d'inclinaison et de son interaction avec d'autres particules. Des particules stationnaires sur la pente seront heurtées par d'autres particules descendantes les faisant faire davantage de progression. Des expériences simples peuvent, cependant, déterminer les caractéristiques importantes du mouvement de culbutage.

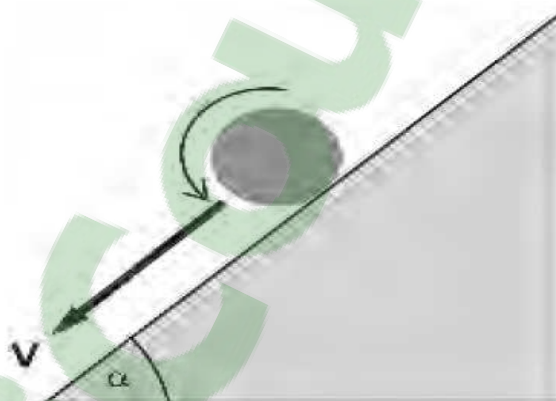


Figure 21 : l'angle d'inclinaison

Considérons, par exemple, une planche en bois inclinée avec des angles prédéterminés, et ainsi qu'une collection de particules de formes irrégulières diverses. Avec une planche inclinée sous un angle de 45° chaque forme se dégringole vers le bas de la pente avec une augmentation de la vitesse. À une inclinaison de 20°, quelques particules restent stationnaires. Pour chaque forme, il y a un angle critique au-dessus duquel le mouvement de culbutage sera lancé.

4.2- La géométrie des séparateurs en spirale

Une manière efficace de voir un aperçu quantitatif de la géométrie d'un séparateur en spirale est de considérer la construction d'un simple séparateur modèle. Les matériaux nécessaires sont composés d'un disque en carton, avec un trou, de la colle et d'un tube vertical.

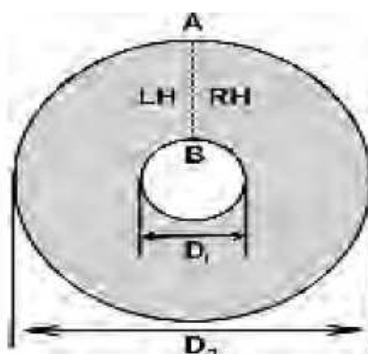


Figure 22 : Forme du disque

La figure 22 montre la forme du disque. Après avoir coupé le long de AB, on soulève vers le haut le bord droit. Le produit obtenu est une spirale droitière. Le terme « droitier » vient de la similitude avec une vis qui progresse vers l'intérieur si on la tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. Réciproquement le levage vers le haut du bord gauche produit une spirale « gauchère ».

Pendant que nous continuons à déplacer les bords, le diamètre intérieur D_1 diminue jusqu'à ce qu'il saisisse le tube vertical de diamètre D le long d'un chemin hélicoïdal.

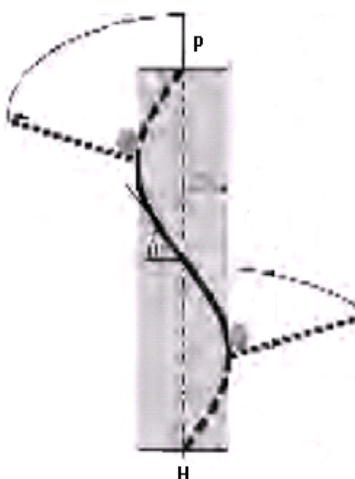


Figure 23 : Chemin hélicoïdal

La quantification des paramètres impliqués dans la géométrie du séparateur en spirale exige seulement l'application des mathématiques de base. Le chemin hélicoïdal PH montré dans la figure 23 est l'hypoténuse du triangle droitier.

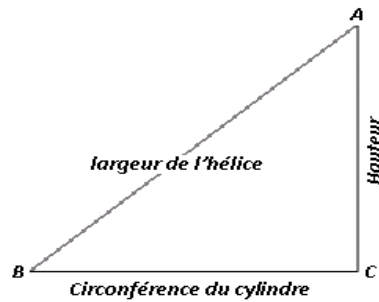


Figure 24 : Triangle droitier

$$AB^2 = AC^2 + BC^2$$

Si l'angle α est de 45° donc AC doit être égal à BC, de sorte que $AB = CA$.

Maintenant, la longueur de chemin hélicoïdale devient la circonférence du cercle montré dans la figure 5. Puisque $D_1 = D\sqrt{2}$ où D est le diamètre du support cylindrique. La circonférence $BC = \pi D$ de sorte que la hauteur soit alors également πD et la longueur de chemin hélicoïdale est $PH = \pi D$.

L'hélice de cette spirale a une pente dépendant de l'importance de D. La spirale formée inclinerait également vers le support cylindrique avec un angle β qui est donné par:

$$= \frac{\pi \times D_1}{2(D_2 - D_1)}$$

Avec :

- D_1 est le diamètre intérieur de l'hélice
- D_2 est le diamètre extérieur de l'hélice.

4.3- Forces centripète et centrifuge agissant sur les particules en roulement

a- Force centripète

La force centripète agissant sur une particule le long du parcours de roulement est constante pour un angle β de la pente. Puisque la force est égale à la masse multipliée par l'accélération, la force centripète C_p est donnée par:

$$C_p = m.g.\sin \beta$$

b- Force centrifuge

Comme les particules progressent dans un chemin circulaire autour du cylindre central, elles deviennent sujettes à une force centrifuge C_F . L'accélération correspondante est égale à v^2/r où v est la vitesse des particules et r est le rayon du chemin circulaire.

$$C_F = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

c- Accélération centrifuge des particules

La figure 25 indique les forces d'opposition agissant relativement sur une surface raide de l'hélice. La force nette détermine si la particule effectue un mouvement centrifuge ou centripète.

La force nette sur la particule est donc $C_F \cos \beta - C_P$. Pour des grandes valeurs de β , la force nette tend à être centripète.

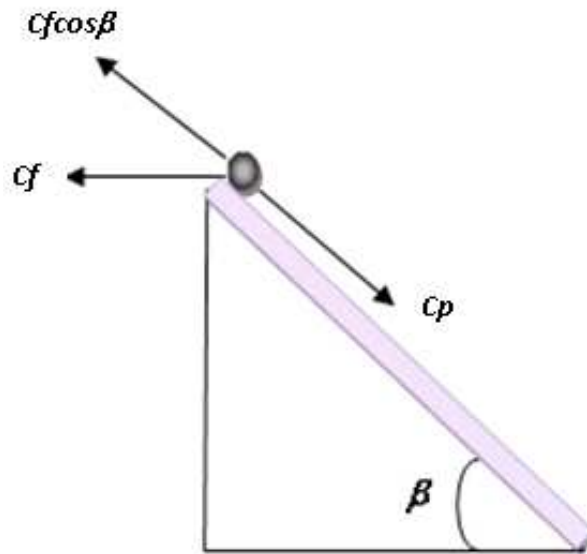


Figure 25 : Forces d'opposition agissant relativement à une surface raide de l'hélice

La masse de particules est la même pour les deux forces. Par conséquent, en utilisant les 2 équations, l'accélération nette devient:

$$A_{net} = (\cos \beta \times (v^2/r)) - g \sin \beta$$

5. Modélisation de l'écoulement dans un séparateur à spirale [10]

5-1. Caractéristiques de l'écoulement

L'écoulement est caractérisé par les nombres de Stokes qui varient de 10^{-1} à 10^3 .

Par la suite, l'hydrodynamisme, l'interaction entre les particules, l'interaction entre la paroi et une particule jouent des rôles importants dans le processus de séparation.

5-2. Equations fondamentales

L'écoulement particulaire d'Euler aboutit à un problème triphasique. Le problème de viscosité et d'inertie avec les phases liquides sont résolus en utilisant les équations de Navier-Stokes et le modèle de turbulence isotropique. Les équations d'une particule sont identiques à celles de Navier-Stokes mais seulement, la viscosité moléculaire varie en fonction de l'écoulement.

En supposant un profile de surface libre fixe, l'équation de continuité d'une phase q (phase fluide ou phase particulaire) est donnée par :

$$\frac{d}{dt}(\alpha_q \rho_q) + \alpha_q \rho_q \nabla \cdot \mathbf{u}_q = 0$$

Avec

- α_q : fraction volumique
- ρ_q : densité.

5-3. Interaction entre la paroi et une particule

Dans l'analyse Lagrangienne de Matthews et al (1998), les équations d'impulsion décrivant l'interaction entre une particule sphérique et une paroi sont utilisées pour déterminer les vitesses de translation après l'impact. La présence ou l'absence de glissement dans le contact donne naissance à une collision. La collision sans glissement se présente si :

$$\left| \mathbf{u}_p - \left(\frac{D_p}{2} \boldsymbol{\omega}_p \right) \right| \cdot \frac{7}{2} \Phi_o (1 + e) \mathbf{v}_p = 0$$

Avec

- $\boldsymbol{\omega}_p$: la vitesse angulaire de la particule
- $\mathbf{U}_p$: la vitesse tangentielle de la particule
- $\mathbf{V}_p$: la vitesse normale de la particule
- e : épaisseur de l'écoulement

Chapitre III : ETUDE DE CONCEPTION ET DE REALISATION

1- Choix du type de matériaux

Pour ce présent mémoire, il consiste à faire la conception et la réalisation de 2 types de spirales ayant les mêmes caractéristiques mais qui se diffèrent selon les matériaux de fabrication :

- ✕ le premier est une spirale métallique
- ✕ et le deuxième est une spirale en caoutchouc.

2- Paramètres opératoires

Les principales variables d'opération sont le débit de pulpe (débit d'alimentation), le pourcentage solide de l'alimentation.

a- Débit de pulpe ou débit d'alimentation

En utilisant le débitmètre Doppler placé sur le tuyau servant à alimenter l'appareil, le débit d'alimentation est donné par la formule suivante :

En utilisant le système international, cette formule peut s'écrire de la manière suivante :

$$Q = 0,8 * V * D^2$$

Avec :

- Q : débit de pulpe en m³/s
- V : vitesse en m/s
- D : diamètre interne du tuyau d'alimentation en m.

b- Pourcentage solide de l'alimentation

Généralement, le minerai servant à alimenter la spirale est en forme de pulpe. Cette dernière doit contenir entre 10 et 40% de matières solides.

Débit (m³/h)		3,5	4	5	6	7	7,5
Minerai traité (m³/h)	10%	0,35	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
	25%	0,875	1	1,25	1,5	1,75	1,875
	40%	1,4	1,6	2	2,4	2,8	3

Tableau 9 : Relation entre le débit et le minerai traité

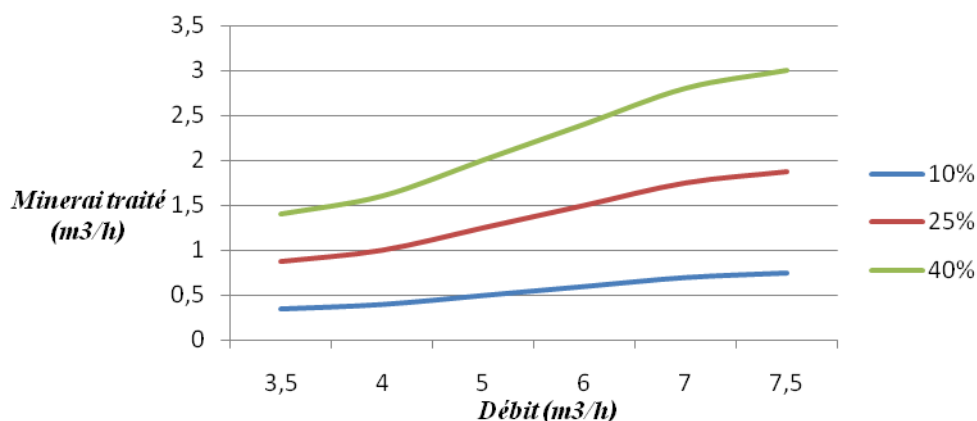


Figure 26 : Courbe de référence de la relation entre le débit et le minerai traité

c-

Relation entre le débit et la pente

La relation entre le débit d'alimentation et la pente de la coquille est très importante pour assurer une meilleure séparation entre les particules d'or et les gangues. Ainsi pour une pente faible, le débit doit être grand. Et pour une pente forte correspondant à une hauteur maximale de pas, le débit doit être faible pour que les particules d'or ne soient pas emportées par l'eau.

Débit d'alimentation (m³/h)	Pente (°)
3,5	16,5
4	15
5	14
6	13
7	12
8	11
9	10
10	9,5

Tableau 10 : Relation entre le débit et la pente

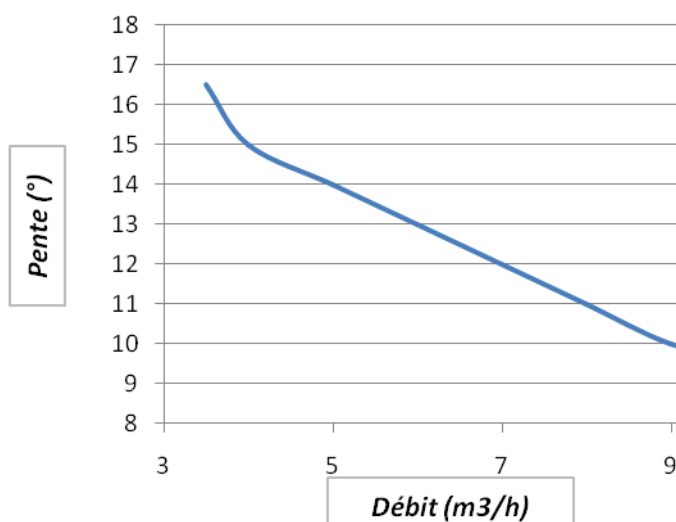


Figure 27 : Courbe montrant la relation entre le débit et la pente

3- Dimensionnement des appareils

Pour qu'une spirale soit efficace, elle doit avoir une hauteur de l'ordre de 3 à 4,5m et un débit suffisant pour assurer une meilleure séparation du minerai traité.

Cependant, pour le cas de cet ouvrage, une hauteur considérable rend difficile l'utilisation de cet appareil car il s'agit d'une exploitation artisanale. Pour résoudre ce problème, on a opté la solution de 2 spirales travaillant en série dont les hauteurs sont de 1,30 et 1,70m.

Le nombre de tours varie selon la hauteur des spirales :

- ⇔ ainsi, il existe une spirale de hauteur 1,70m disposant une coquille simple pas à 4 révolutions
- ⇔ et une spirale de hauteur 1,30m disposant une coquille simple pas à 3 tours.

La hauteur de chaque tour est variable, elle diminue au fur et à mesure que sa position se rapproche de la boîte de sortie. Cette diminution de la hauteur est importante pour le réglage du débit et de la vitesse pour que les particules d'or ne soient pas emportées par l'eau.

La coquille a une forme de $\frac{1}{4}$ d'ellipse avec :

- un rayon r (grand axe) variant de 15 à 30cm
- une hauteur (petit axe) : 15cm

4- Description des appareils

4.1- Spirale métallique

a- la boîte d'alimentation

La boîte d'alimentation est en forme de trémie dont les caractéristiques sont les suivants :

- ⊗ largeur $l = 35\text{cm}$
- ⊗ longueur $L = 40\text{cm}$
- ⊗ hauteur $h = 30\text{cm}$
- ⊗ base $b = 25\text{cm}$

Elle est munie d'une grille (tamis) jouant le rôle de prétraitement pour le minerai. La base de la boîte est légèrement inclinée pour que le minerai puisse glisser avant d'atteindre la coquille.

b- La coquille

La coquille s'enroule autour du tuyau qui sert d'axe et d'appui pour la spirale. La surface interne de cette coquille est tapissée avec du caoutchouc

Les caractéristiques de la coquille sont les suivantes :

- hauteur de pas : variable de 20 à 35cm
- rayon $r = 25\text{cm}$

Vérification

Avec un débit d'alimentation maximal de $Q_{\max}=10\text{m}^3/\text{h}$, on obtient un volume maximal de $20,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ correspondant à une durée de 1s.

$$Q = (S.L)/t \text{ avec } S = A/4$$

Où :

- $A = \pi ar$: section d'une ellipse
- A : le petit axe
- r : le grand axe (rayon)
- $l = 2\pi r$

Donc :

$$\frac{\pi ar}{4} (2\pi r) = 2777\text{cm}^3$$

$$r = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{5554}{a}}$$

En prenant $a = 1\text{cm}$, on trouve : $r_{\max} = 23,73\text{cm}$

Il faut noter que la coquille comporte plusieurs trous appelés cuillères. Ces trous (2cm de diamètre) servent à l'évacuation des minéraux d'or qui se sont déposés sur la paroi interne de la coquille. Comme une grande partie des particules d'or et des minéraux lourds se déposent dans le premier tiers de la coquille se trouvant près de l'axe central, une sorte de bras jouant le rôle de riffle va guider les particules vers le trou. De ces trous partent des tuyaux servant à la récupération et à l'évacuation du minerai ou du concentré en question.



Figure28 : La coquille de la spirale métallique

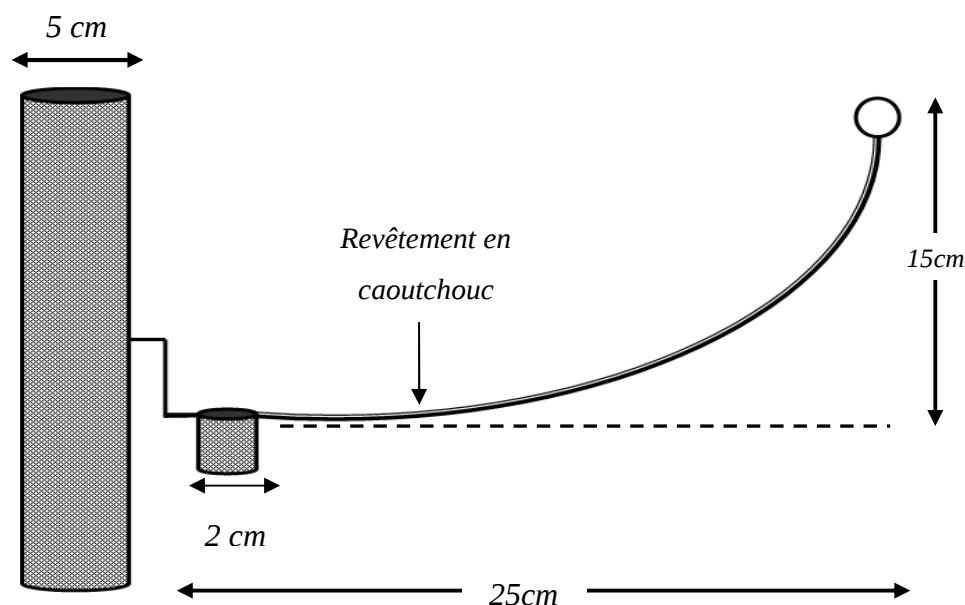


Figure 29: Coupe de la coquille

c- La boîte de sortie

La boîte de sortie est divisée en trois compartiments :

- o sortie des rejets (constitués par des gangues)
- o sortie des mixtes (constitués par des gangues et des concentrés)
- o et sortie des concentrés (constitués par des particules d'or et des minéraux noirs).

Ses caractéristiques sont les suivants :

- hauteur : 20cm
- largeur : 15cm
- longueur : 25cm



Figure 30 : la boîte de sortie

4.2- Spirale en caoutchouc

a- la boîte d'alimentation

Elle a la même forme que celle servant à alimenter la spirale métallique. Seulement, elle s'y diffère par les dimensions.

- ⊗ largeur $l = 30\text{cm}$
- ⊗ longueur $L = 35\text{cm}$
- ⊗ hauteur $h = 20\text{cm}$
- ⊗ base $b = 18\text{ cm}$

b- La coquille

La coquille est constituée par des pneus usagés. Les pneus se déforment lorsqu'ils s'enroulent autour de l'axe, il est donc nécessaire d'utiliser des bras pour les supporter et pour les disposer.

Les caractéristiques sont :

$$\leftrightarrow \text{rayon } r = 18\text{cm}$$

Ici pour $Q_{\max} = 7,5\text{m}^3/\text{h}$, nous obtenons $r_{\max} = 18,5\text{cm}$

$$\leftrightarrow \text{nombre de tours : } 4$$

$$\leftrightarrow \text{longueur de chaque bras : } 24\text{cm}$$

La hauteur de chaque tour est également identique à celle de la spirale métallique. Elle est réglable (20 à 35cm) selon les caractéristiques des minéraux à traiter. Elle dispose aussi des trous servant à l'évacuation du minéral.

Pour cet appareil, les rainures jouent le rôle de riffles et contribuent énormément à la sédimentation de l'or et des minéraux lourds.

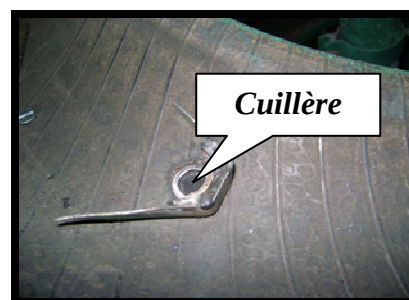


Figure31: La coquille de la spirale en caoutchouc

c- La boîte de sortie

Elle se divise également en trois compartiments :

- o sortie des rejets
- o sortie des mixtes
- o et sortie des concentrés

5- Les accessoires

5.1. Les accessoires de l'appareil

↔ le tamis

La boîte d'alimentation est munie d'un tamis dont les mailles ont un diamètre de 3mm. Ce tamis est utilisé dans le but d'empêcher les particules ayant une grande dimension de passer dans la coquille.

↔ le tuyau

Il sert à transporter l'or et les minéraux lourds qui se sont déposés à l'intérieur de la coquille et qui sont récupérés par les cuillères. Le tuyau se raccorde avec l'entonnoir qui est en contact direct avec la cuillère.

↔ les croches

Les croches sont utilisées pour assurer la stabilité de l'appareil pendant son utilisation sur le terrain. Ce sont des systèmes d'ancrage que l'on enfonce dans le sol.

5.2. La motopompe

La motopompe est un des accessoires indispensables dans le processus de traitement de minerai aurifère utilisant une spirale. Elle permet la conduite d'eau jusqu'à la boîte d'alimentation. Son utilisation assure le réglage du débit favorisant ainsi la séparation.

5.3. La batée

En sortant de la spirale, une sorte de préconcentré contenant à la fois de l'or et des minéraux lourds est obtenue. La batée reste toujours comme l'outil de traitement final pour séparer l'or des minéraux lourds. Elle est toujours nécessaire après usage de presque tous les appareils de séparation gravimétrique de l'or.

5.4. Les cuvettes et le seau

Le seau sert à transporter et à introduire le minerai aurifère dans la boîte d'alimentation. Un seul seau est suffisant pour accomplir ces tâches.

D'autre part, les cuvettes servent à récupérer le minerai traité. Comme la boîte de sortie se divise en 3 (concentré, mixte et rejet), 3 cuvettes sont donc nécessaires.

5.5. Autres

Les autres accessoires indispensables sont :

- une bêche
- une pelle

Chapitre IV : COÛTS DE FABRICATION

I- Spirale métallique

1. Coûts des matières

Les coûts des matières nécessaires pour la réalisation des 2 spirales métalliques sont représentés dans le tableau suivant :

<i>Désignation</i>	<i>Quantité</i>	<i>Unité</i>	<i>Prix unitaire en Ariary</i>	<i>Montant en Ariary</i>
-Tôles plates métalliques galvanisées d'épaisseur 0,5mm (1m x 2m)	5	pièce	30 000	150 000
- Tôle plate métallique e=10/10 (30cm x 30cm)	2	pièce	2 000	4 000
- Chambres à air	3	pièce	7 000	21 000
- Tuyaux en plastique ($\Phi=20\text{mm}$)	7	m	1 700	11 900
- Fer rond ($\Phi=80\text{mm}$)	3,60	m	1 500	5 400
- Fer plat	6	m	1 500	9 000
- Etains	5	pièce	8 000	40 000
- Peintures à huile	2	pièce	7 000	14 000
- Dissolutions	3	pièce	1 200	3 600
- Pinceaux	2	pièce	1 500	3 000
- Boulons et écrous ($\Phi=20\text{mm}$)	5	pièce	900	4 500
- Boulons et écrous ($\Phi=3\text{mm}$)	150	pièce	100	15 000
- Rivets	150	pièce	60	9 000
<i>Coût total</i>				290 400

Tableau 11 : Coûts des matières

2. Coûts de la main d'œuvre

<i>Désignation</i>	<i>Quantité</i>	<i>Prix unitaire en Ariary</i>	<i>Montant en Ariary</i>
<i>Main d'œuvre</i>	2	80 000	160 000

Tableau 12 : Coûts de la main d'œuvre

3. Coût total

<i>Désignation</i>	<i>Montant en Ariary</i>
<i>Matières premières</i>	<i>290 400</i>
<i>Main d'œuvre</i>	<i>160 000</i>
<i>Coût total</i>	<i>450 400</i>

Tableau 13: Coût total

II- Spirale en caoutchouc

1. Coûts des matières

<i>Désignation</i>	<i>Quantité</i>	<i>Unité</i>	<i>Prix unitaire en Ariary</i>	<i>Montant en Ariary</i>
- Pneus (voiture)	4	pièce	-	-
- Tuyau galvanisé ($\Phi=60\text{mm}$)	1	m	15 000	15 000
- Tuyau en plastique ($\Phi=20\text{mm}$)	3	m	1 700	5 100
- Tôle plate métallique $e=0,5$ (1,50m x 1m)	1	pièce	20 000	20 000
- Tôle plate métallique $e=10/10$ (30cm x 30cm)	3	pièce	2 000	6 000
- Fer rond ($\Phi=80\text{mm}$)	7,80	m	1 500	11 700
- Fer plat	6	m	1 500	9 000
- Peinture à huile	1	pièce	7 000	7 000
- Pinceaux	1	pièce	750	750
- Boulons et écrous ($\Phi=20\text{mm}$)	3	pièce	900	2 700
- Boulons à têtes fraisés et écrous ($\Phi=3\text{mm}$)	80	pièce	150	12 000
- Colles plastiques (baguettes)	6	pièce	500	3 000
- Baguettes	15	pièce	100	1 500
<i>Coût total</i>				<i>93 750</i>

Tableau 14 : Coûts des matières

2. Coûts de la main d'œuvre

<i>Désignation</i>	<i>Quantité</i>	<i>Prix unitaire en Ariary</i>	<i>Montant en Ariary</i>
<i>Main d'œuvre</i>	<i>1</i>	<i>80 000</i>	<i>80 000</i>

Tableau 15 : Coût de la main d'œuvre

3. Coût total

<i>Désignation</i>	<i>Montant en Ariary</i>
<i>Matières premières</i>	<i>93 750</i>
<i>Main d'œuvre</i>	<i>80 000</i>
<i>Coût total</i>	<i>173 750</i>

Tableau 16 : Coût total

Partie III : ESSAIS ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS

Chapitre I : LES PROCEDES DE TRAITEMENT

Comme la totalité de la production aurifère malgache provient, jusqu'à maintenant, des gisements alluvionnaires et éluvionnaires, la spirale est conçue pour s'adapter à cet effet. Cependant avant de passer dans l'appareil, le minerai a besoin de subir quelques préparations. Ces préparations dépendent de la nature du minerai à traiter (alluvionnaire ou éluvionnaire).

I. Minerai alluvionnaire

1-Définition

Un minerai alluvionnaire est un dépôt de minerai abandonné par une rivière quand la pente où le débit de celle-ci sont devenus insuffisants.

2-Procédé

Le traitement du minerai nécessite l'utilisation des 2 spirales ($h_1=1,70m$ et $h_2=1,30m$). Le minerai est soit alimenté sous forme de pulpe, soit lavé dans la boîte d'alimentation de la première spirale. Cette dernière est munie d'un tamis de 3mm de diamètre.

- Le mélange de minéraux lourds et de particules d'or provenant des cuillères et de la sortie des concentrés vont passer directement dans une batée pour être lavé.
- Les produits venant des sorties des mixtes et des rejets vont passer dans la deuxième spirale. Les concentrés passent ensuite dans une autre batée pour en extraire les particules d'or restantes.

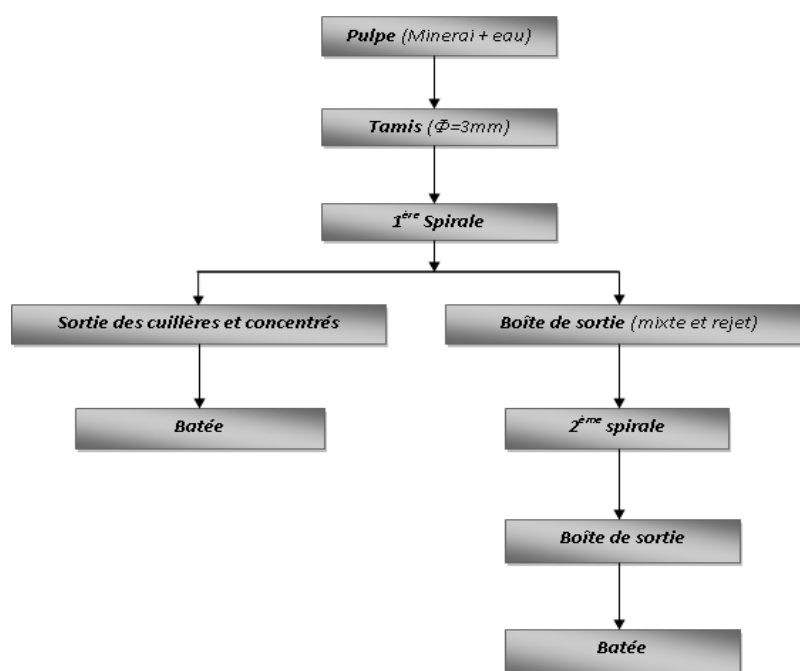


Figure 32 : Procédé de traitement pour le minerai alluvionnaire

II. Minerai éluvionnaire

1-Définition

Un minerai éluvionnaire est une partie du gisement primaire restée sur place après le lessivage de celui-ci.

2-Procédé

Le procédé de traitement est le même que pour la spirale métallique. Seulement, avant d'alimenter la première spirale, un débourbage s'avère nécessaire. Le débourbage consiste à enlever les gangues boueuses.

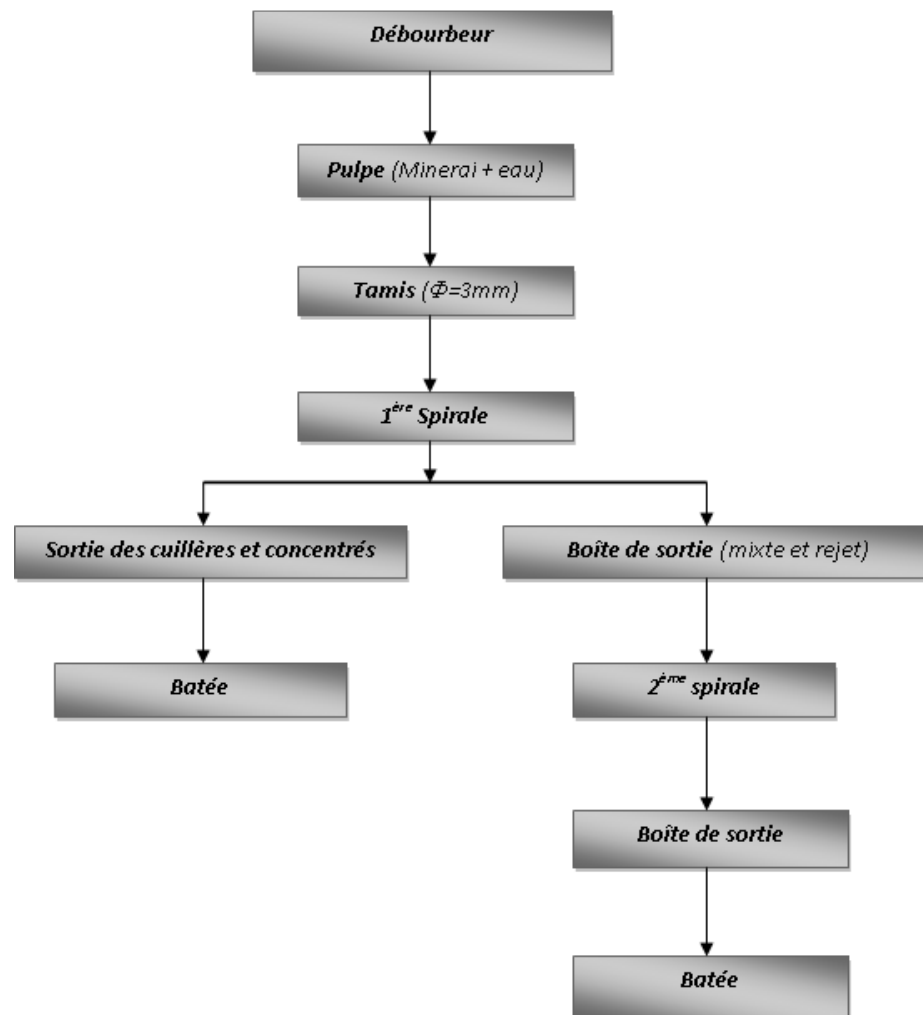


Figure 33 : Procédé de traitement pour le minerai éluvionnaire

Chapitre II : LES ESSAIS

1. Site d'essai

a. Description géographique

Le site d'essai se trouve dans la commune de Soamahamanina, District d'Arivonimamo et Région d'Itasy. Ses coordonnées géographiques sont :

- X = 460 945m
- Y = 790 015m

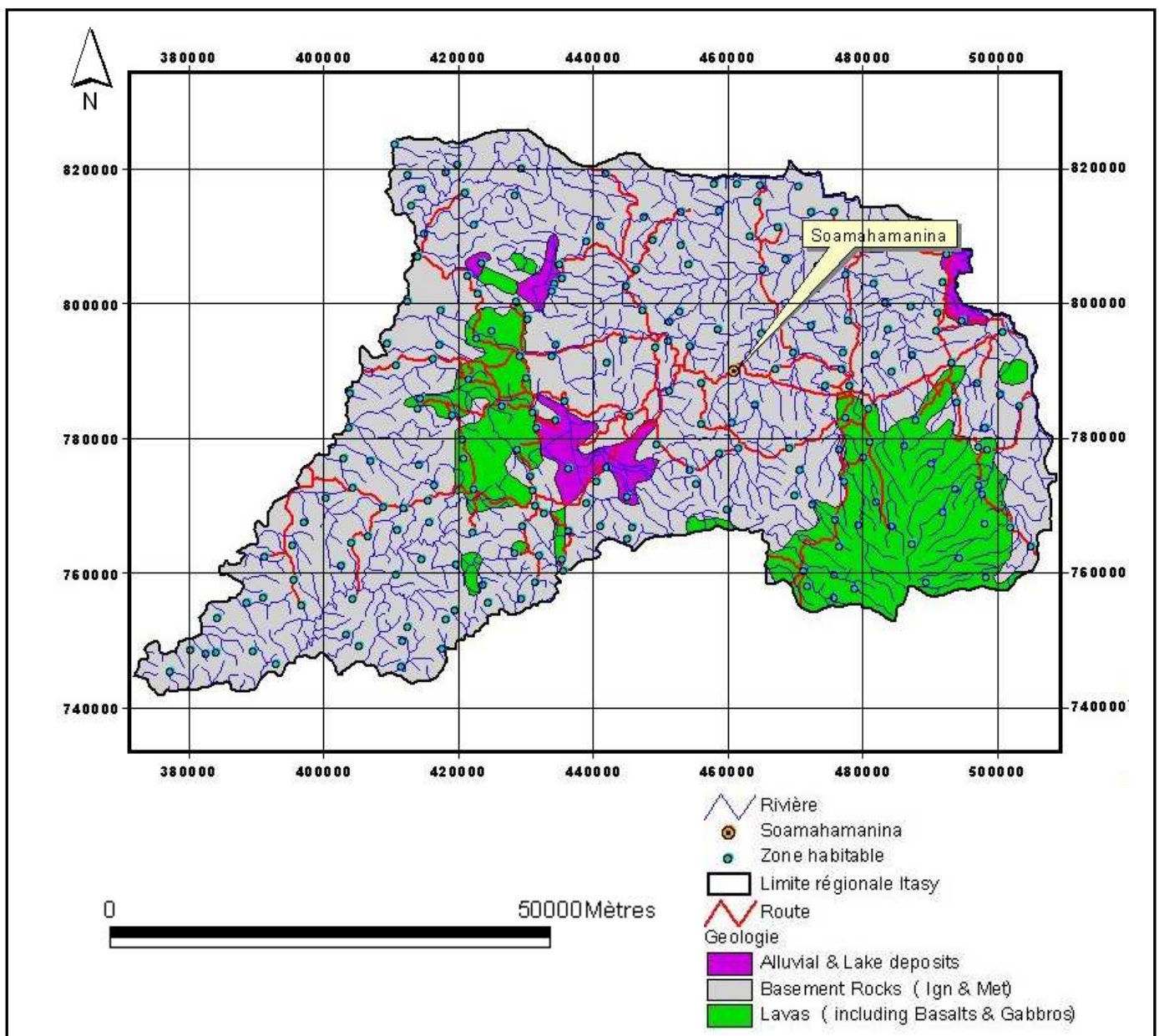


Figure 34 : Localisation géographique du site

b. Description géologique

Géologiquement, le site se trouve dans une formation gneissique rattachée dans le cadre de la stratigraphie malgache au système du graphite.

Les formations alluviales sont peu étendues. En voici les formations de la zone suivant l'ordre chronologique (de la formation la plus ancienne à la formation la plus récente):

- les paragneiss (micaschistes, gneiss, quartzites, amphibolites)
- les migmatites
- les roches de granitisation (granites migmatites, migmatites granitoïdes, granites de types Ambatomiranty)
- les roches filoniennes
- les roches volcaniques (basaltes)
- les formations superficielles (argiles latéritiques, carapaces ferrugineuses et bauxites, alluvions).

2. Protocole opératoire

Les essais que nous avons réalisé se déroulent sur 3 sites. Durant les essais, les matières premières utilisées sont constituées par des minerais alluvionnaires extraites sur les sites.

Pour effectuer la séparation, nous avons utilisé l'eau de la rivière que nous avons aspiré à l'aide d'une motopompe. Les caractéristiques de la motopompe sont les suivantes :

- ↔ Puissance : 2,6KW
- ↔ Vitesse de rotation : 4000TPM
- ↔ Débit : 10L/s
- ↔ HMT : 26m
- ↔ HMA : 7,5m
- ↔ Moteur à essence
- ↔ Refroidissement à air

Avant de réaliser les essais, des batées de référence sont effectuées pour nous permettre de connaître la teneur en or du terrain. Pour chaque essai, nous avons traité un même volume de minerais (0,25m³).

Les minerais sont traités avec des pentes et des débits d'alimentation variés. Et comme la quantité de matières solides de l'alimentation varie entre 10 et 40%, le traitement du minerai est répété trois (3) fois pour chaque pente de la spirale.

3. Essai

Pour les 3 sites, le déroulement des essais reste toujours le même. Les paramètres utilisés sur le terrain sont résumés dans le tableau suivant:

<i>Débit d'alimentation</i>		<i>Pente (°)</i>	<i>Minerai traité (m3)</i>	<i>Débit solide de l'alimentation (m3/s)</i>		
<i>(m3/h)</i>	<i>(m3/s)</i>			<i>10%</i>	<i>25%</i>	<i>40%</i>
3,5	0,00097	16,5	0,25	0,000097	0,00025	0,00039
4	0,0011	15	0,25	0,00011	0,000275	0,00044
5	0,0014	14	0,25	0,00014	0,00035	0,00056
6	0,0017	13	0,25	0,00017	0,000425	0,00068
7	0,0019	12	0,25	0,00019	0,000475	0,00076
8	0,0022	11	0,25	0,00022	0,00055	0,00088
9	0,0025	10	0,25	0,00025	0,000625	0,001
10	0,0028	9,5	0,25	0,00028	0,0007	0,0011

Tableau 17 : Paramètres d'essai

4. Analyse au laboratoire

Après avoir effectué des essais sur le terrain, une analyse au laboratoire de quelques échantillons s'avère nécessaire pour connaître la teneur en or des pré-concentrés, et pour permettre de déterminer la densité des minerais, la teneur moyenne des minerais.

4-1. Produits utilisés

- Solution de Chlorure de Potassium :

↔ 500ml d'H₂O +250ml de HCL concentré
↔ 10g de KCL solide + 1l d'eau distillée
- Solution d'eau régale :

↔ 100ml de HNO₃ concentré +300ml de HCL concentré
- Solution étalon : où solution d'or pur (solution mère)

4-2. Préparation des échantillons

Les différentes étapes de la préparation des échantillons sont les suivantes :

- Etuver les échantillons à 80°pendant une demi-journée
- Les broyer et les tamiser sous 90µm
- Prélever 0.55g de l'échantillon tamisé
- Mettre le prélèvement dans un bêcher
- Verser 10ml de HCL dilué dans le bêcher
- Chauffer et filtrer le mélange obtenu sur un papier filtre
- Recueillir le résidu solide sur le papier filtre
- Mettre ce résidu dans un autre bêcher
- Ajouter 1ml de solution de KCL
- Faire évaporer la totalité sur une plaque chauffante
- Laisser refroidir
- Ajouter 20ml de HCL dilué
- Agité puis filtrer le mélange
- Prendre 10ml de la solution filtrée
- Ramenez-la à 100 ml avec de l'eau distillée
- Mesurer au spectrophotomètre à $\lambda=464\text{nm}$ la densité optique de la solution.

4-3. Préparation de la solution étalon

- Prélever les différentes volume $V_i[\text{ml}]$ étalon qu'on verse dans des fioles référenciées
- Ajouter à chaque fiole 10ml de la solution de HCL dilué
- Agiter pour avoir une dissolution totale du solide contenu dans les fioles
- Mesurer au spectrophotomètre réglé à $\lambda=464\text{nm}$ la densité optique de la solution d'or de chaque fiole
- Tracer la courbe d'étalonnage $DO = f(c)$.

Référence fiole	A	B	C	D	E	F	G
$V_i [\text{ml}]$	0	5	10	15	20	25	30
Masse d'or contenu	0	0,14	0,22	0,17	0,29	0,27	0,13

Tableau 18 : Paramètres d'étalonnage

4-4. Calcul de la teneur en or des échantillons

La teneur T (g/m³) en or des échantillons est donnée par la formule :

$$T [g/m^3] = \frac{M \times d}{2 E} = \frac{20 \times C \times d}{2}$$

Avec :

- C [mg/L] : concentration en or
- $M = C \cdot 10^{-1}$: masse d'or [10^{-6}]
- d : densité du sol à analyser
- E=0.5g : masse de l'échantillon prélevé à mesurer.

4-5. Mesure de densité des échantillons en utilisant le Pycnomètre

La mesure de la densité des échantillons utilisant le pycnomètre suit les étapes suivantes :

- Pesage du pycnomètre à vide : Po = poids du pycnomètre
- Remplissage du pycnomètre avec de l'eau
- Pesage : P1= poids du pycnomètre avec de l'eau
- Diminution de l'eau du pycnomètre à 1/3
- Pesage : P2= poids du pycnomètre avec 1/3 de l'eau
- Ajout d'une quantité de l'échantillon à mesurer (une cuillère à café)
- Pesage : P3= poids du pycnomètre avec 1/3 de l'eau + l'échantillon
- Remplissage à nouveau du pycnomètre
- Mélange et agitation
- Pesage de la totalité : P4.

D'où la formule :
$$d = \frac{P_3 - P_2}{[(P_1 + P_3) - (P_2 + P_4)]}$$

5. Expressions des résultats des essais

● Notion de teneur:

- **Tq** : La teneur moyenne obtenue en laboratoire par quartage du 0,0145m³ (g/m³)
- **Tm** : La teneur moyenne du même volume de minerai obtenu sur le terrain par quartage et lavage à la batée (g/m³). Ces résultats sont obtenus en pesant les grains d'or obtenu après lavage par batée puis en les divisant par 0.0145m³ (1 seau 14,5l)
- **Tc** : teneur du concentré après sluice et lavage par batée sur le terrain (g/m³)

- **Tr** : La teneur du rejet après lavage par batée du concentré de la spirale en laboratoire (g/m³).

● **Formules** :

- Perte mixte $P_m = (T_m - T_c) \cdot (1 - 0,4) = 0,6(T_m - T_c)$ avec : Rendement mixte = 0,4
- Perte totale $P_t = T_m - T_c$
- Perte concentré $P_c = P_t - P_m = 0,4 \cdot (T_m - T_c)$
- Teneur dans la spirale $T = T_m - P_c$
- Rendement $R = 100(T/T_m)$.

● **Essais**

Les essais effectués sur terrain se sont déroulés sur trois sites A, B et C. Pour chaque site, trois essais batées sont effectués pour connaître la teneur moyenne en or. De ces 3 essais batées, on en déduit un essai batée moyen (batée de référence) pour chaque site.

● **Site A**

1-**Essais batées** :

- Batée 1 : poids d'or visible $P_1 = 0,018\text{g}$
- Batée 2 : $P_2 = 0,021\text{g}$
- Batée 3 : $P_3 = 0,017\text{g}$

Le poids moyen d'or visible pour le site A est de $P_A = 0,0187\text{g}$.

2-**Essai avec la spirale métallique**

a. **Essai avec un pourcentage de 10% de matières solides**

Débit (m ³ /h)	Pen te (°)	Volume traité (m ³)	Tq	Tm	Or Visible (g)	Tc	Tr	Rendement (%)	
								Concentré	Mixte
3,5	16,5	0,25	-	0,15	0,017	0,068	20,44	72,36	28,94
4	15	0,25	4,22	0,23	0,026	0,104	9,52	74,85	29,94
5	14	0,25	2,65	0,22	0,021	0,084	-	77,68	31,07
6	13	0,25	-	0,18	0,028	0,112	5,32	78,67	31,47
7	12	0,25	-	0,17	0,02	0,08	14,12	80	32
8	11	0,25	3,45	0,27	0,019	0,076	7,05	75,20	30,08
9	10	0,25	3,67	0,19	0,021	0,084	15,86	76	30,40
10	9,5	0,25	4,07	0,25	0,019	0,076	10,49	76,89	30,76

Tableau 19 : Essai site A à 10% (SM)

b. Essai à 25%

Débit (m ³ /h)	Pente (°)	Volume traité (m ³)	Tq	Tm	Or Visible (g)	Tc	Tr	Rendement (%)	
								Concentré	Mixte
3,5	16,5	0,25	3,26	0,22	0,017	0,068	-	78,13	31,25
4	15	0,25	2,43	0,28	0,026	0,104	18,56	78,09	31,23
5	14	0,25	-	0,19	0,022	0,088	5,97	76,00	30,40
6	13	0,25	2,86	0,24	0,022	0,088	6,75	79,56	31,82
7	12	0,25	4,30	0,16	0,02	0,08	-	78,82	31,53
8	11	0,25	3,78	0,20	0,023	0,092	13,45	73,63	29,45
9	10	0,25	3,19	0,21	0,018	0,072	8,98	75,16	30,06
10	9,5	0,25	5,64	0,18	0,023	0,092	19,08	74,72	29,89

Tableau 20 : Essai site A à 25% (SM)

c. Essai à 40%

Débit (m ³ /h)	Pente (°)	Volume traité (m ³)	Tq	Tm	Or Visible (g)	Tc	Tr	Rendement (%)	
								Concentré	Mixte
3,5	16,5	0,25	5,79	0,26	0,025	0,1	23,07	75,38	30,15
4	15	0,25	3,72	0,30	0,029	0,116	8,74	75,46	30,18
5	14	0,25	3,86	0,22	0,026	0,104	16,21	78,91	31,56
6	13	0,25	-	0,21	0,024	0,096	9,81	78,29	31,31
7	12	0,25	-	0,27	0,029	0,116	9,76	77,19	30,87
8	11	0,25	2,75	0,22	0,024	0,096	13,64	77,45	30,98
9	10	0,25	4,39	0,17	0,019	0,076	7,26	77,88	31,15
10	9,5	0,25	4,15	0,24	0,024	0,096	18,94	76,00	30,40

Tableau 21 : Essai site A à 40% (SM)

d. Courbe

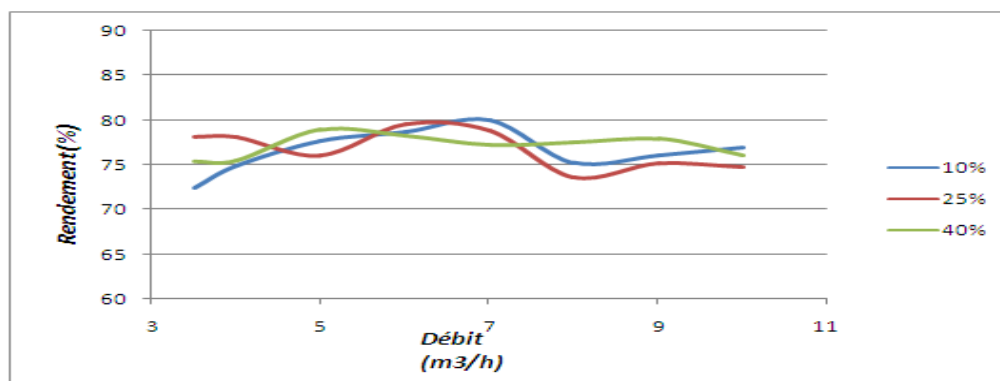


Figure 35: Essai site A

3- Spirale en caoutchouc

a. Essai avec un pourcentage de 10% de matières solides

Débit (m3/h)	Pente (°)	Volume traité (m ³)	Tq	Tm	Or Visible (g)	Tc	Tr	Rendement (%)	
								Concentré	Mixte
3,5	16,5	0,25	2,56	0,22	0,025	0,1	9,69	78,18	31,27
4	15	0,25	4,75	0,28	0,039	0,156	22,25	82,28	32,91
5	13	0,25	-	0,19	0,030	0,12	8,07	85,26	34,10
6	11	0,25	2,78	0,24	0,021	0,084	12,54	74,00	29,60
7	9,5	0,25	3,58	0,16	0,015	0,06	19,28	75	30

Tableau 22 : Essai site A à 10% (SC)

b. Essai à 25% de matières solides

Débit (m3/h)	Pente (°)	Volume traité (m ³)	Tq	Tm	Or Visible (g)	Tc	Tr	Rendement (%)	
								Concentré	Mixte
3,5	16,5	0,25	3,89	0,2	0,023	0,092	10,76	78,40	31,36
4	15	0,25	2,27	0,27	0,032	0,128	14,06	78,96	31,59
5	13	0,25	2,96	0,25	0,032	0,128	13,44	80,48	32,19
6	11	0,25	4,51	0,3	0,028	0,112	9,18	74,93	29,97
7	9,5	0,25	-	0,17	0,018	0,072	10,57	76,94	30,78

Tableau 23 : Essai site A à 25% (SC)

c. Essai à 40% de matières solides

Débit (m3/h)	Pente (°)	Volume Traité (m ³)	Tq	Tm	Or Visible (g)	Tc	Tr	Rendement (%)	
								Concentré	Mixte
3,5	16,5	0,25	4,88	0,28	0,028	0,112	8,09	76,00	30,40
4	15	0,25	4,05	0,21	0,023	0,092	11,32	77,52	31,01
5	13	0,25	2,98	0,18	0,025	0,1	10,66	82,22	32,89
6	11	0,25	3,61	0,24	0,032	0,128	14,66	81,33	32,53
7	9,5	0,25	2,78	0,27	0,025	0,1	10,76	74,81	29,93

Tableau 24 : Essai site A à 40% (SC)

d. Courbe

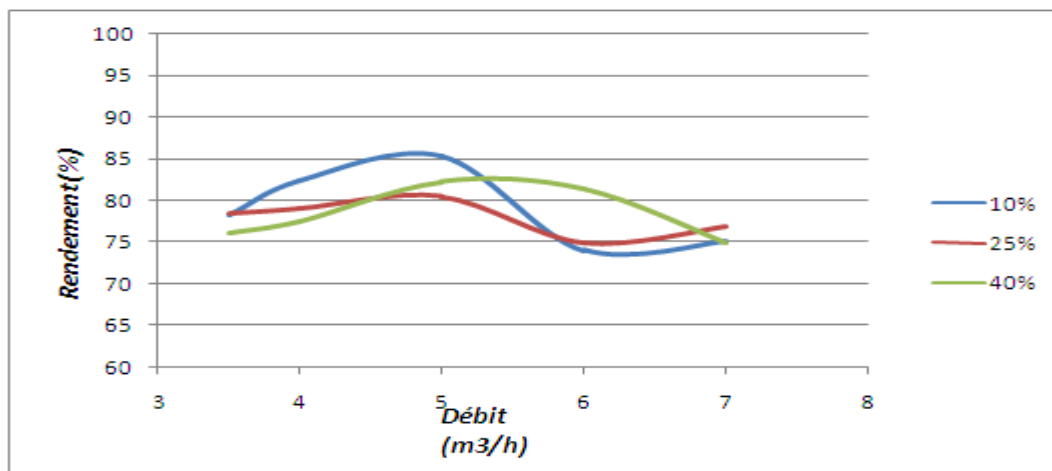


Figure 36: Essai site A (SC)

Site B

1- Essais batées : (sur un volume de 0,25m3)

- Batée 1 : poids d'or visible P1 = 0,021g
- Batée 2 : P2 = 0,027g
- Batée 3 : P3 = 0,019g

Le poids moyen d'or visible pour le site B est de $P_B = 0,0223g$,

2- Essai avec la spirale métallique

a. Essai avec un pourcentage de 10% de matières solides

Débit (m3/h)	Pente (°)	Volume traité (m ³)	Tq	Tm	Or Visible (g)	Tc	Tr	Rendement (%)	
								Concentré	Mixte
3,5	16,5	0,25	1,13	0,23	0,02	0,08	15,60	73,91	29,57
4	15	0,25	5,08	0,29	0,017	0,068	18,07	69,38	27,75
5	14	0,25	-	0,22	0,026	0,104	9,22	78,91	31,56
6	13	0,25	2,44	0,18	0,021	0,084	10,53	78,67	31,47
7	12	0,25	3,40	0,24	0,027	0,108	8,76	78,00	31,20
8	11	0,25	2,21	0,24	0,026	0,104	8,24	77,33	30,93
9	10	0,25	4,89	0,19	0,023	0,092	12,31	79,37	31,75
10	9,5	0,25	2,16	0,27	0,025	0,1	14,46	74,81	29,93

Tableau 25 : Essai site B à 10% (SM)

b. Essai à 25% de matières solides

Débit (m3/s)	Pente (°)	Volume traité (m ³)	Tq	Tm (g/m ³)	Or Visible (g)	Tc	Tr	Rendement (%)	
								Concentré	Mixte
3,5	16,5	0,25	4,51	0,21	0,018	0,072	10,80	73,71	29,49
4	15	0,25	3,16	0,21	0,02	0,08	6,81	75,24	30,10
5	14	0,25	3,22	0,30	0,027	0,108	13,43	74,40	29,76
6	13	0,25	2,18	0,29	0,035	0,14	16,38	79,31	31,72
7	12	0,25	4,09	0,17	0,021	0,084	9,69	79,76	31,91
8	11	0,25	3,87	0,28	0,031	0,124	20,96	77,71	31,09
9	10	0,25	3,79	0,23	0,022	0,088	10,89	75,30	30,12
10	9,5	0,25	2,44	0,19	0,021	0,084	16,05	77,68	31,07

Tableau 26 : Essai site B à 25% (SM)

c. Essai à 40% de matières solides

Débit (m3/s)	Pente (°)	Volume Traité (m ³)	Tq	Tm	Or Visible (g)	Tc	Tr	Rendement (%)	
								Concentré	Mixte
3,5	16,5	0,25	4,07	0,2	0,02	0,08	18,65	76,00	30,40
4	15	0,25	4,15	0,17	0,019	0,076	10,76	77,88	31,15
5	14	0,25	2,27	0,26	0,021	0,084	9,22	72,92	29,17
6	13	0,25	3,11	0,23	0,022	0,088	19,08	75,30	30,12
7	12	0,25	2,44	0,23	0,026	0,104	15,60	78,09	31,23
8	11	0,25	2,18	0,17	0,02	0,08	11,32	78,82	31,53
9	10	0,25	-	0,29	0,026	0,104	12,31	74,34	29,74
10	9,5	0,25	3,72	0,24	0,021	0,084	8,24	74,00	29,60

Tableau 27 : Essai site B à 40% (SM)

d. Courbe

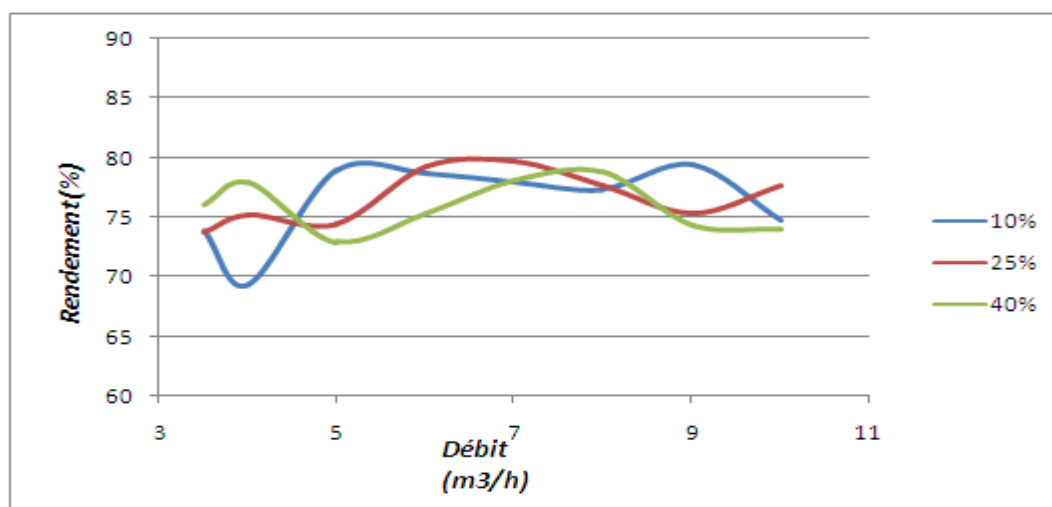


Figure 37 : Essai site B (SM)

3-Spirale en caoutchouc

a. Essai avec un pourcentage de 10% de matières solides

Débit (m3/h)	Pente (°)	Volume traité (m ³)	Tq	Tm	Or Visible (g)	Tc	Tr	Rendement (%)	
								Concentré	Mixte
3,5	16,5	0,25	3,86	0,21	0,026	0,104	10,76	79,81	31,92
4	15	0,25	2,43	0,27	0,037	0,148	9,78	81,93	32,77
5	13	0,25	2,54	0,28	0,039	0,156	13,43	82,29	32,91
6	11	0,25	2,75	0,3	0,033	0,132	16,05	77,60	31,04
7	9,5	0,25	4,16	0,23	0,025	0,1	9,52	77,39	30,96

Tableau 28 : Essai site B à 10% (SC)

b. Essai à 25% de matières solides

Débit (m3/h)	Pente (°)	Volume traité (m ³)	Tq	Tm	Or Visible (g)	Tc	Tr	Rendement (%)	
								Concentré	Mixte
3,5	16,5	0,25	3,45	0,25	0,033	0,132	18,07	81,12	32,45
4	15	0,25	1,23	0,21	0,032	0,128	14,66	84,38	33,75
5	13	0,25	4,31	0,26	0,028	0,112	8,09	77,23	30,89
6	11	0,25	2,15	0,21	0,025	0,1	11,54	79,05	31,62
7	9,5	0,25	-	0,37	0,037	0,148	9,48	76,00	30,40

Tableau 29 : Essai site B à 25% (SC)

c. Essai à 40% de matières solides

Débit (m3/h)	Pente (°)	Volume traité (m ³)	Tq	Tm	Or Visible (g)	Tc	Tr	Rendement (%)	
								Concentré	Mixte
3,5	16,5	0,25	3,16	0,18	0,015	0,06	10,76	73,33	29,33
4	15	0,25	3,86	0,23	0,029	0,116	10,58	80,17	32,07
5	13	0,25	4,39	0,27	0,031	0,124	8,74	78,37	31,35
6	11	0,25	2,43	0,24	0,032	0,128	14,46	81,33	32,53
7	9,5	0,25	3,72	0,29	0,035	0,14	13,85	79,31	31,72

Tableau 30 : Essai site B à 40% (SC)

d. Courbe

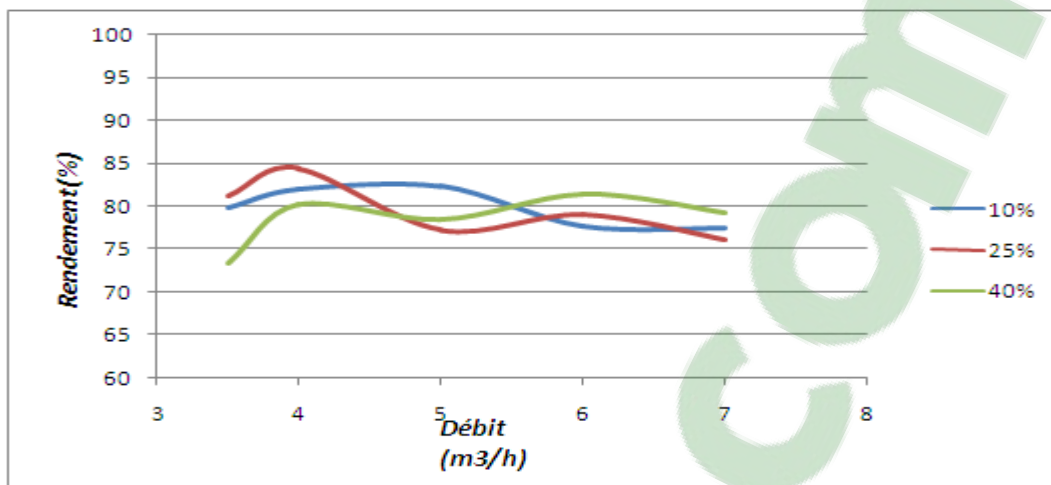


Figure 38 : Essai site B (SC)

Site C

1-Essais batées : (sur un volume de 0,25m3)

- Batée 1 : poids d'or visible P1 = 0,025g
- Batée 2 : P2 = 0,019g
- Batée 3 : P3 = 0,028g

Le poids moyen d'or visible pour le site C est de $P_C = 0,024g$,

2-Essai avec la spirale métallique

a. Essai avec un pourcentage de 10% de matières solides

Débit (m3/h)	Pente (°)	Volume traité (m³)	Tq	Tm	Or Visible (g)	Tc	Tr	Rendement (%)	
								Concentré	Mixte
3,5	16,5	0,25	2,51	0,18	0,017	0,068	7,34	75,11	30,04
4	15	0,25	3,36	0,26	0,02	0,08	14,12	72,31	28,92
5	14	0,25	3,42	0,23	0,022	0,088	17,05	75,30	30,12
6	13	0,25	2,13	0,15	0,015	0,06	10,86	76,00	30,40
7	12	0,25	4,59	0,17	0,02	0,08	13,49	78,82	31,53
8	11	0,25	4,87	0,26	0,028	0,112	8,56	77,23	30,89
9	10	0,25	3,79	0,19	0,022	0,088	15,97	78,53	31,41
10	9,5	0,25	2,64	0,23	0,021	0,084	9,75	74,61	29,84

Tableau 31 : Essai site C à 10% (SM)

b. Essai à 25% de matières solides

Débit (m ³ /h)	Pente (°)	Volume traité (m ³)	Tq	Tm	Or Visible (g)	Tc	Tr	Rendement (%)	
								Concentré	Mixte
3,5	16,5	0,25	2,57	0,22	0,023	0,092	19,76	76,73	30,69
4	15	0,25	2,09	0,25	0,019	0,076	15,64	72,16	28,86
5	14	0,25	1,32	0,23	0,021	0,084	7,26	74,61	29,84
6	13	0,25	3,66	0,17	0,019	0,076	18,94	77,88	31,15
7	12	0,25	4,66	0,26	0,032	0,128	9,69	79,69	31,88
8	11	0,25	1,76	0,27	0,028	0,112	16,25	76,59	30,64
9	10	0,25	2,60	0,18	0,02	0,08	8,07	77,78	31,11
10	9,5	0,25	1,07	0,29	0,029	0,116	14,54	76,00	30,40

Tableau 32 : Essai site C à 25% (SM)

c. Essai à 40% de matières solides

Débit (m ³ /h)	Pente (°)	Volume traité (m ³)	Tq	Tm	Or visible(g)	Tc	Tr	Rendement (%)	
								Concentré	Mixte
3,5	16,5	0,25	1,51	0,17	0,015	0,06	10,8	74,12	29,65
4	15	0,25	3,66	0,21	0,023	0,092	14,81	77,52	31,01
5	14	0,25	1,22	0,19	0,018	0,072	13,43	75,16	30,06
6	13	0,25	2,98	0,29	0,027	0,108	16,38	74,90	29,96
7	12	0,25	3,09	0,22	0,026	0,104	19,69	78,91	31,56
8	11	0,25	3,67	0,25	0,028	0,112	8,95	77,92	31,17
9	10	0,25	2,79	0,25	0,021	0,084	10,89	73,44	29,38
10	9,5	0,25	2,48	0,24	0,021	0,084	16,05	74,00	29,60

Tableau 33 : Essai site C à 40% (SM)

d. Courbe

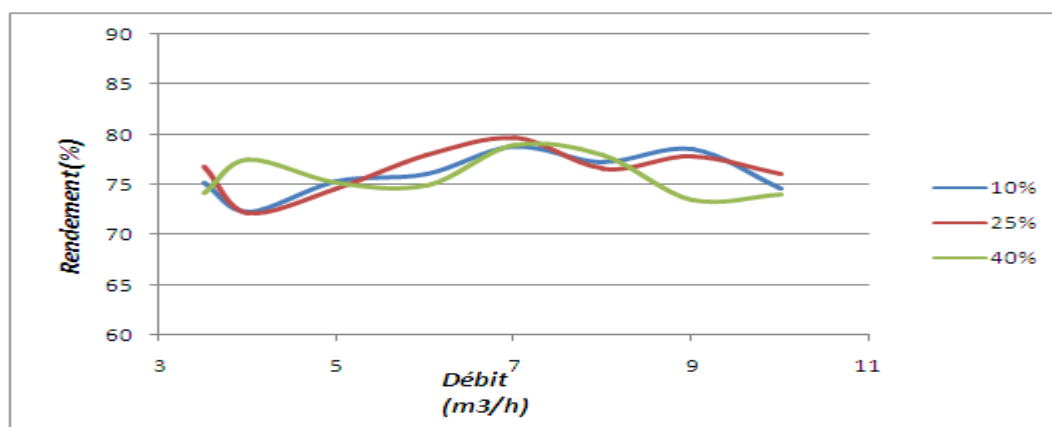


Figure 39 : Essai site C (SM)

3-Spirale en caoutchouc

a. Essai avec un pourcentage de 10% de matières solides

Débit (m3/h)	Pente (°)	Volume traité (m ³)	Tq	Tm	Or Visible (g)	Tc	Tr	Rendement (%)	
								Concentré	Mixte
3,5	16,5	0,25	2,33	0,22	0,018	0,072	12,96	73,09	29,24
4	15	0,25	2,07	0,18	0,026	0,104	11,56	83,11	33,24
5	13	0,25	1,35	0,27	0,03	0,12	9,17	77,78	31,11
6	11	0,25	2,53	0,24	0,022	0,088	19,38	74,67	29,87
7	9,5	0,25	1,72	0,23	0,019	0,076	10,60	73,22	29,29

Tableau 34 : Essai site C à 10% (SC)

b. Essai à 25% de matières solides

Débit (m3/h)	Pente (°)	Volume traité (m ³)	Tq	Tm	Or Visible (g)	Tc	Tr	Rendement (%)	
								Concentré	Mixte
3,5	16,5	0,25	3,92	0,21	0,02	0,08	17,40	75,24	30,10
4	15	0,25	2,77	0,19	0,021	0,084	8,15	77,68	31,07
5	13	0,25	2,91	0,26	0,03	0,12	9,17	78,46	31,38
6	11	0,25	1,04	0,17	0,019	0,076	15,12	77,88	31,15
7	9,5	0,25	3,96	0,19	0,017	0,068	18,23	74,32	29,73

Tableau 35 : Essai site C à 25% (SC)

c. Essai à 40% de matières solides

Débit (m3/h)	Pente (°)	Volume traité (m ³)	Tq	Tm	Or Visible (g)	Tc	Tr	Rendement (%)	
								Concentré	Mixte
3,5	16,5	0,25	4,73	0,26	0,018	0,072	10,40	71,08	28,43
4	15	0,25	2,16	0,21	0,029	0,116	9,01	82,10	32,84
5	13	0,25	4,61	0,18	0,024	0,096	12,89	81,33	32,53
6	11	0,25	3,88	0,23	0,017	0,068	15,53	71,83	28,73
7	9,5	0,25	3,69	0,17	0,015	0,06	18,93	74,12	29,65

Tableau 36 : Essai site C à 40% (SC)

d. Courbe

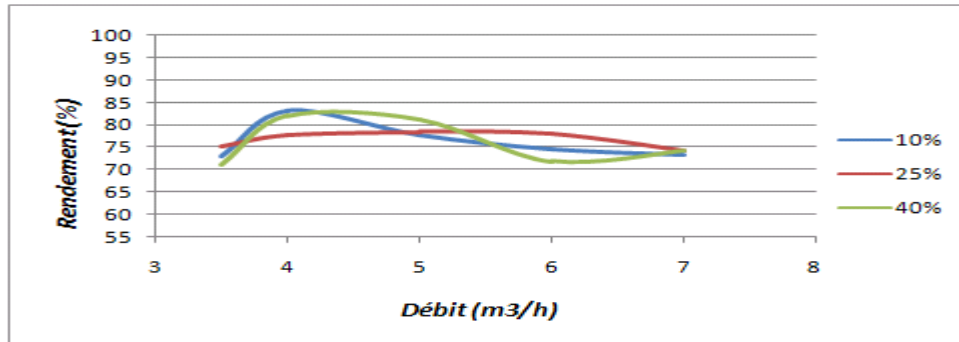


Figure 40 : Essai site C (SM)

6, Interprétations

↔ **Site A :**

- Pour la spirale métallique, les paramètres pour obtenir un rendement maximal de $R_{max} = 80\%$ sont :
 - $Q = 7\text{m}^3/\text{h}$
 - $p = 12^\circ$
 - Pulpe à 10%

Cependant, avec une pulpe à 25%, on peut obtenir un rendement avoisinant le 80%, avec un débit de $6\text{m}^3/\text{h}$ et une pente égale à 13° ,

- Pour la spirale en caoutchouc, les paramètres pour obtenir un rendement maximal de $R_{max} = 85,26\%$ sont :
 - $Q = 5\text{m}^3/\text{h}$
 - $p = 13^\circ$
 - Pulpe à 10%

Cependant, avec une pulpe de 40%, on peut obtenir un rendement supérieur à 80%, avec le même débit de $5\text{m}^3/\text{h}$ et la même pente de 13° ,

↔ **Site B :**

- Pour la spirale métallique, les paramètres pour obtenir un rendement maximal de $R_{max} = 79,76\%$ sont :
 - $Q = 7\text{m}^3/\text{h}$
 - $p = 12^\circ$

- Pulpe à 25%

Cependant, avec une pulpe à 10% et à 40%, on peut obtenir un rendement R autour de 79%, avec un débit compris entre 8 et 9 m³/h et une pente comprise entre 10 et 11°,

- Pour la spirale en caoutchouc, les paramètres pour obtenir un rendement maximal de $R_{\max} = 84,38\%$ sont :
 - $Q = 4 \text{ m}^3/\text{h}$
 - $p = 15^\circ$
 - Pulpe à 25%

Cependant, avec une pulpe à 10% et 40%, on peut obtenir un rendement supérieur à 80%, avec un débit compris entre 5 et 6 m³/h,

↔ **Site C :**

- Pour la spirale métallique, les paramètres pour obtenir un rendement maximal de $R_{\max} = 79,69\%$ sont :
 - $Q = 7 \text{ m}^3/\text{h}$
 - $p = 12^\circ$
 - Pulpe à 25%

Cependant, avec une pulpe à 10% et 40%, on peut obtenir un rendement $R > 78\%$, avec un débit de 7 m³/h et une pente de 12°,

- Pour la spirale en caoutchouc, les paramètres pour obtenir un rendement maximal de $R_{\max} = 83,11\%$ sont :
 - $Q = 4 \text{ m}^3/\text{h}$
 - $p = 15^\circ$
 - Pulpe à 10%

Cependant, avec une pulpe à 40%, on peut obtenir un rendement supérieur à 80%, avec un débit compris entre 4 m³/h et une pente de 15°,

7. Recommandations

Les paramètres optimaux pour obtenir un meilleur rendement en utilisant la spirale comme appareil servant à l'exploitation du minerai aurifère sont :

- Pour la spirale métallique :
 - $Q = 7\text{m}^3/\text{h}$
 - Pente $p = 12^\circ$
 - Pulpe à 25% de matières solides
- Pour la spirale en caoutchouc :
 - $Q = 5\text{m}^3/\text{h}$
 - Pente $p = 13^\circ$
 - Pulpe à 10%

Il ne faut pas oublier que le rendement ainsi obtenu dépend de la teneur en or de la zone exploitée.

CONCLUSION GENERALE

La grande variété de modèles de séparateur en spirale fournit un choix qui assure la plupart des applications comme la séparation gravimétrique des minéraux fins, Elle se repose sur des processus peu coûteux et efficaces, Les avantages de l'utilisation des séparateurs en spirale se résument en :

- une longue durée de vie
- une facilité de la manipulation
- et ne nécessitant que peu d'entretien.

Pour Madagascar, la découverte de nouveaux appareils comme la spirale a pour conséquence l'augmentation de la production des orpailleurs, ce qui va entraîner l'amélioration de leur condition de vie.

Et de plus, l'utilisation de cet appareil apporte des avantages dans leur condition de travail dans la diminution des efforts physiques par exemple.

Une vulgarisation de l'utilisation de la spirale est à envisager.

BIBLIOGRAPHIES

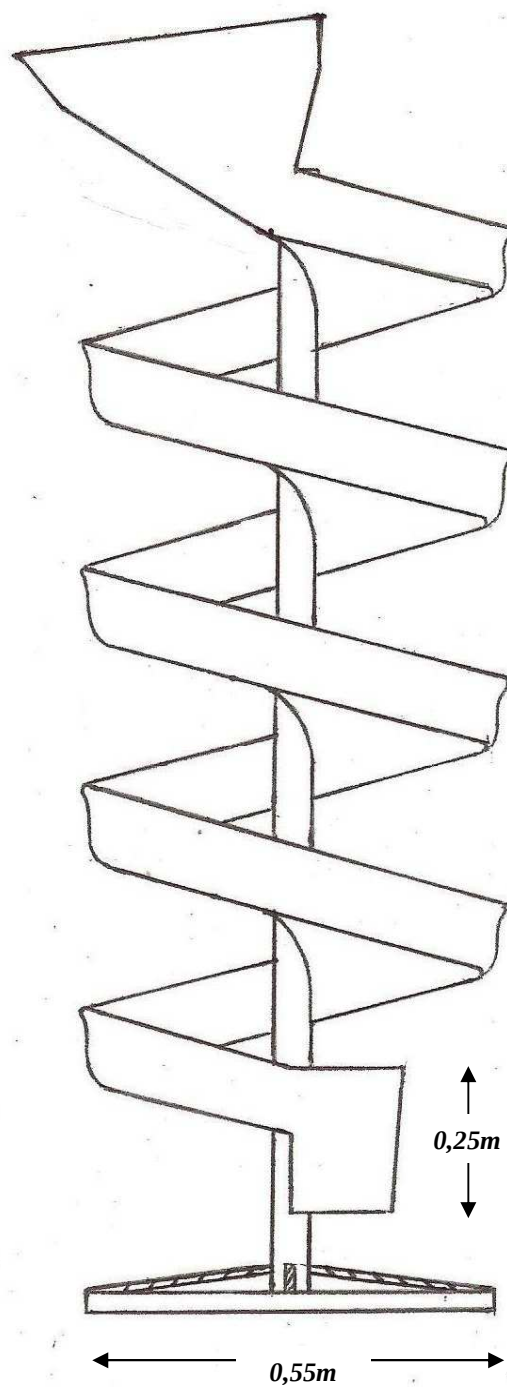
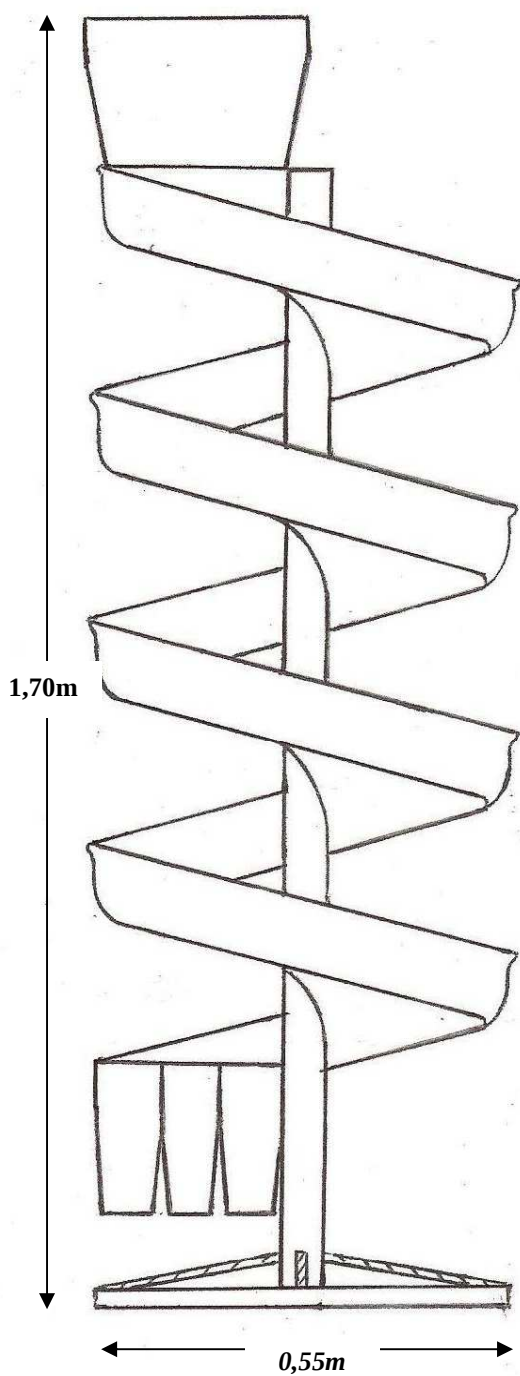
- [1], Encarta 2007 – CD ROM.
- [2], BESAIRIE Henri, « *L’or à Madagascar* », Service Géologique Ampandrianomby, 1966.
- [3], GOSSE Jean, « *Mécanique des fluides* » *Technique de l’ingénieur*.
- [4], « *Plan directeur de l’or à Madagascar* », Service Géologique, Ampandrianomby, 1998.
- [5], PREMOLI, “*Gold in Madagascar, International mineral resources*”, 1996.
- [6], RAKOTOARIVONIZAKA Ignace, « *Cours minéralurgie II* », 4^{ème} Année Mines 2007.
- [7], RANDRIAMIHAZA Holihassina Hervé, et RANDRIANANDRASANA Jochlin, « *Conception, réalisation et modélisation d’un sluice artisanal* », mémoire de fin d’étude à l’ESPA, 2006.
- [8], RAPPORT D’ETAPE, « *Projet d’Exploitation Pilote d’Orpaillage* », VOLET N°4 CHAINE DE TRAITEMENT.
- [9], RAZAFIARISON Tojonirina Fanomezana et RAHARINESY Maminirina, « *Contribution sur l’étude numérique de la turbulence d’une structure non profilée en mouvement accéléré dans un fluide homogène* », mémoire de fin d’étude à l’ESPA, 2004.
- [10], W. MATTHEWS, « *Particle flow modelling on spiral concentrator* », 1999.

WEBOGRAPHIES

- [w1] : [www,ads-shotblast,com](http://www.ads-shotblast.com)
- [w2] : www,e-prospecting,com
- [w3] : www,engineeringnews,com
- [w4] : www,metquip,com

ANNEXES

ANNEXE 1



SPIRALE METALLIQUE SIMPLE PAS A 4 TOURS

E S P A

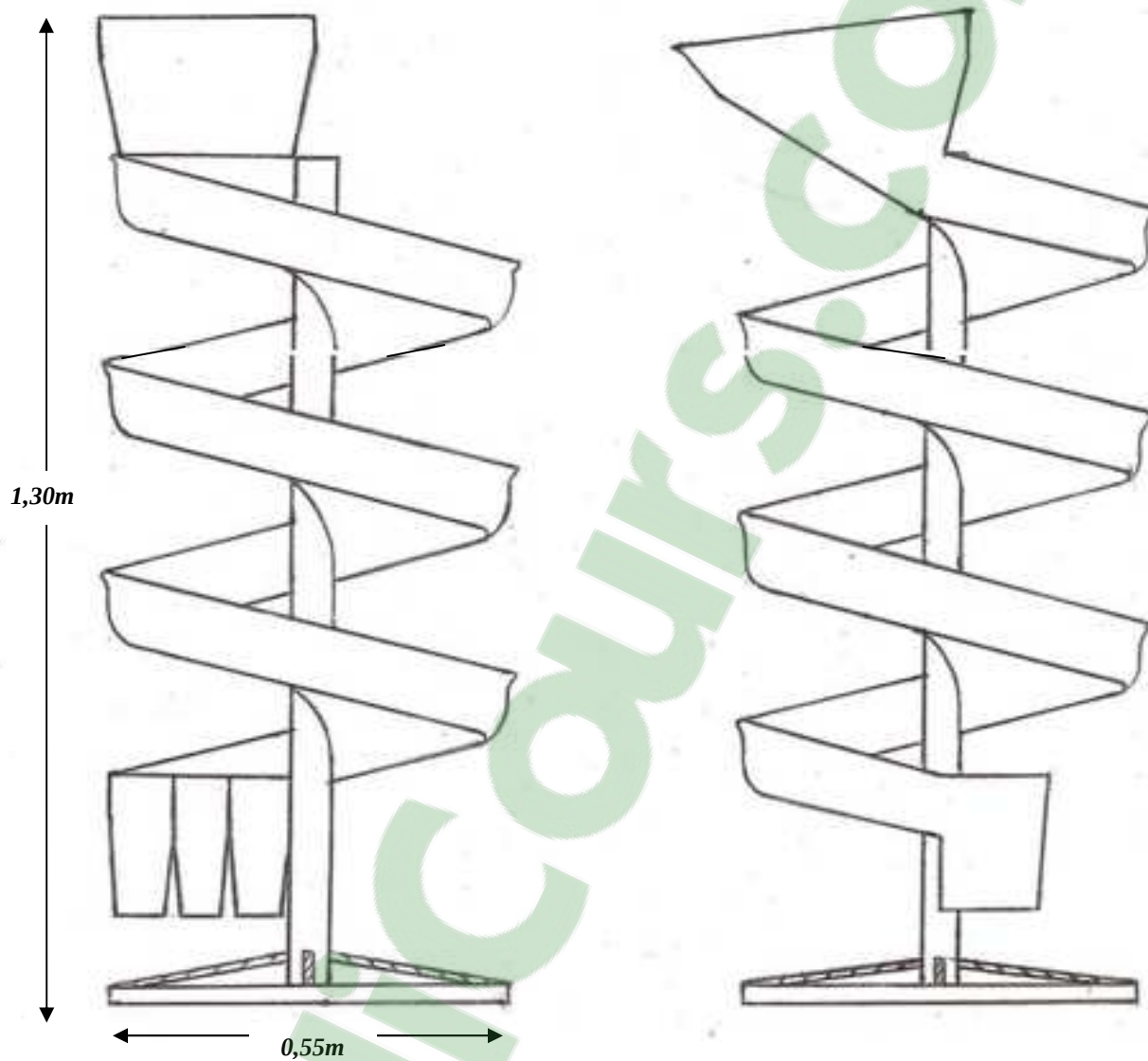
$e = 1/10$

Setra & Fehy



11 Mars 2009

ANNEXE 2



SPIRALE METALLIQUE SIMPLE PAS A 3 TOURS

ESPA

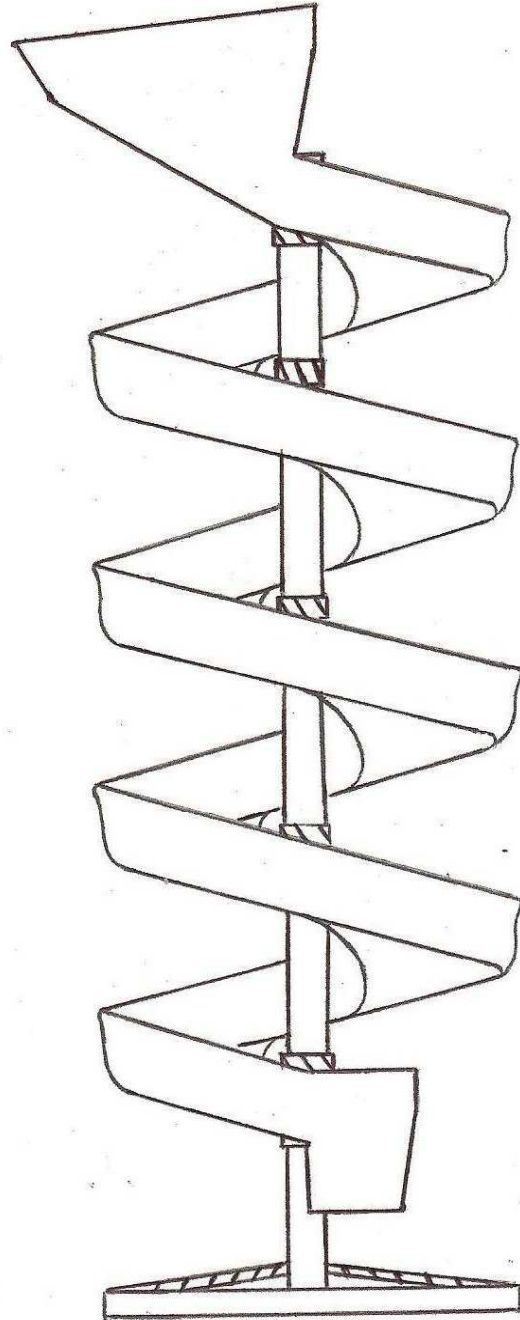
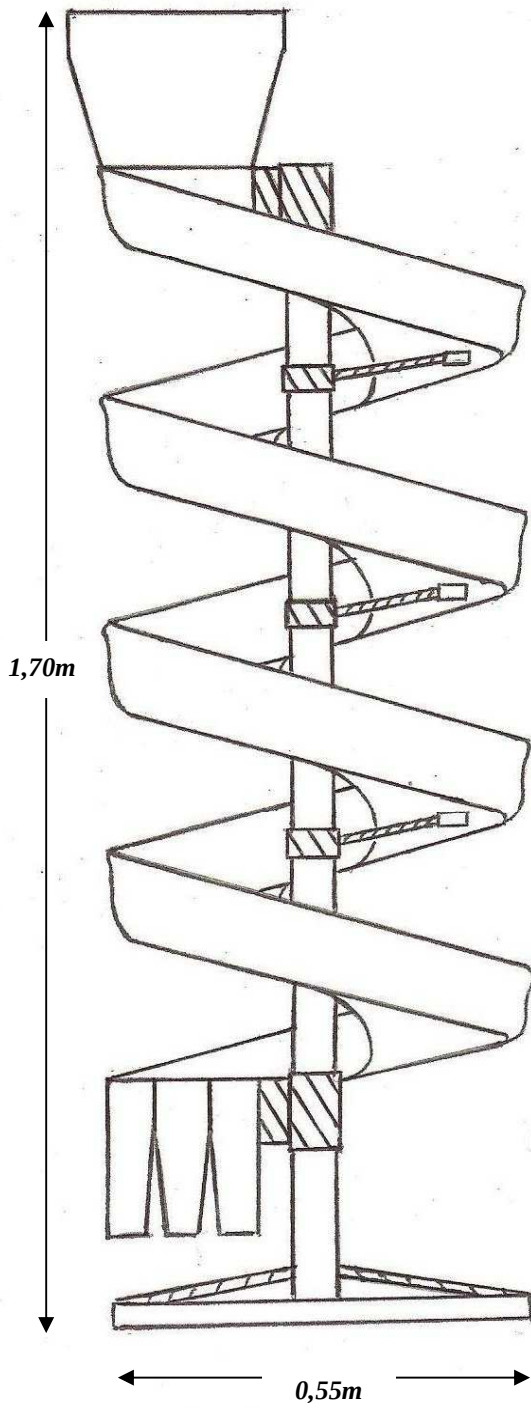
$e = 1/10$

Setra & Fehy



11 Mars 2009

ANNEXE 3



SPIRALE EN CAOUTCHOUC SIMPLE PAS A 4 TOURS

E S P A

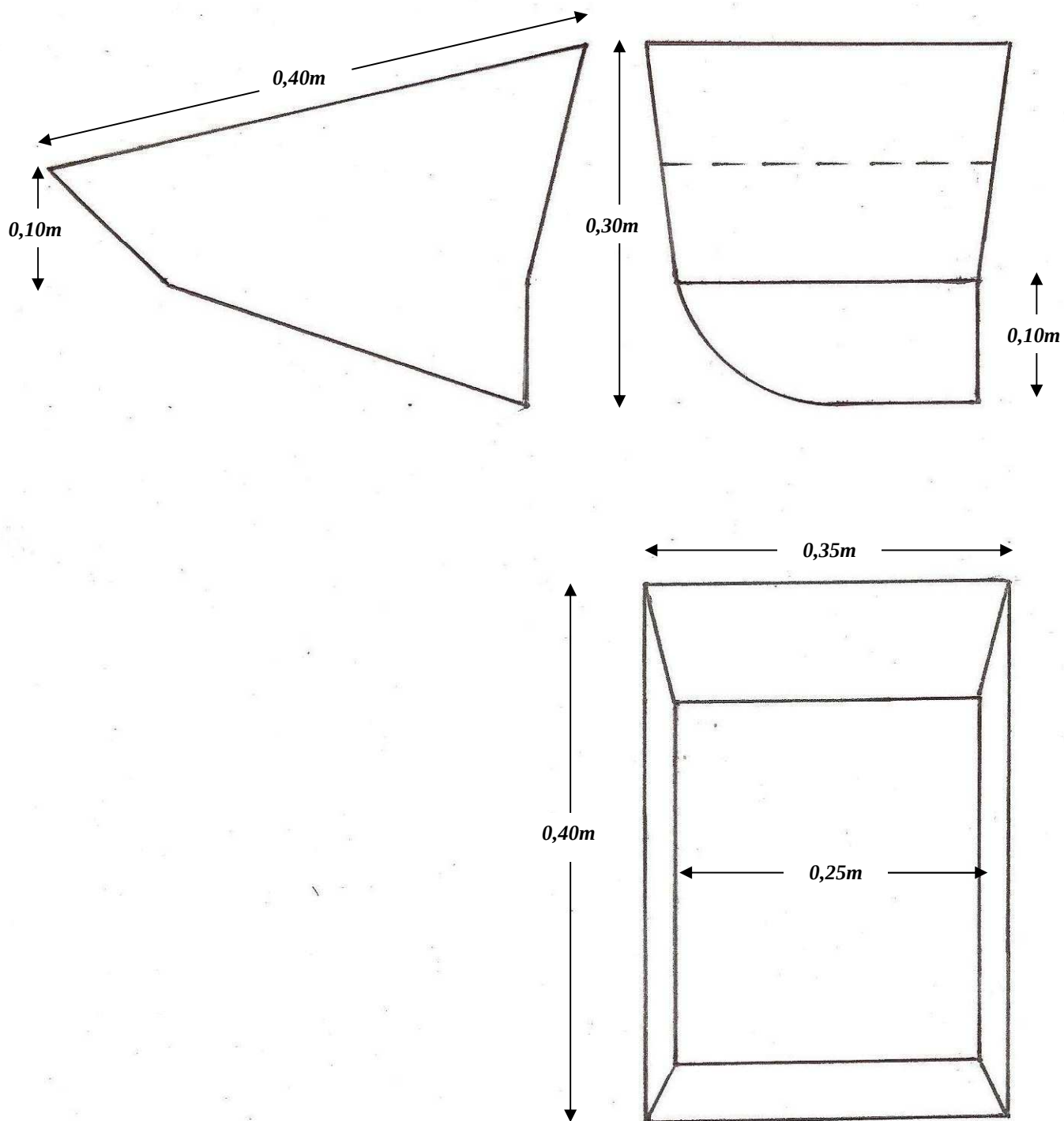
$e = 1/10$

Setra & Fehy



11 Mars 2009

ANNEXE 4



Clicours.com

VUE DE LA BOITE D'ALIMENTATION

ESPA

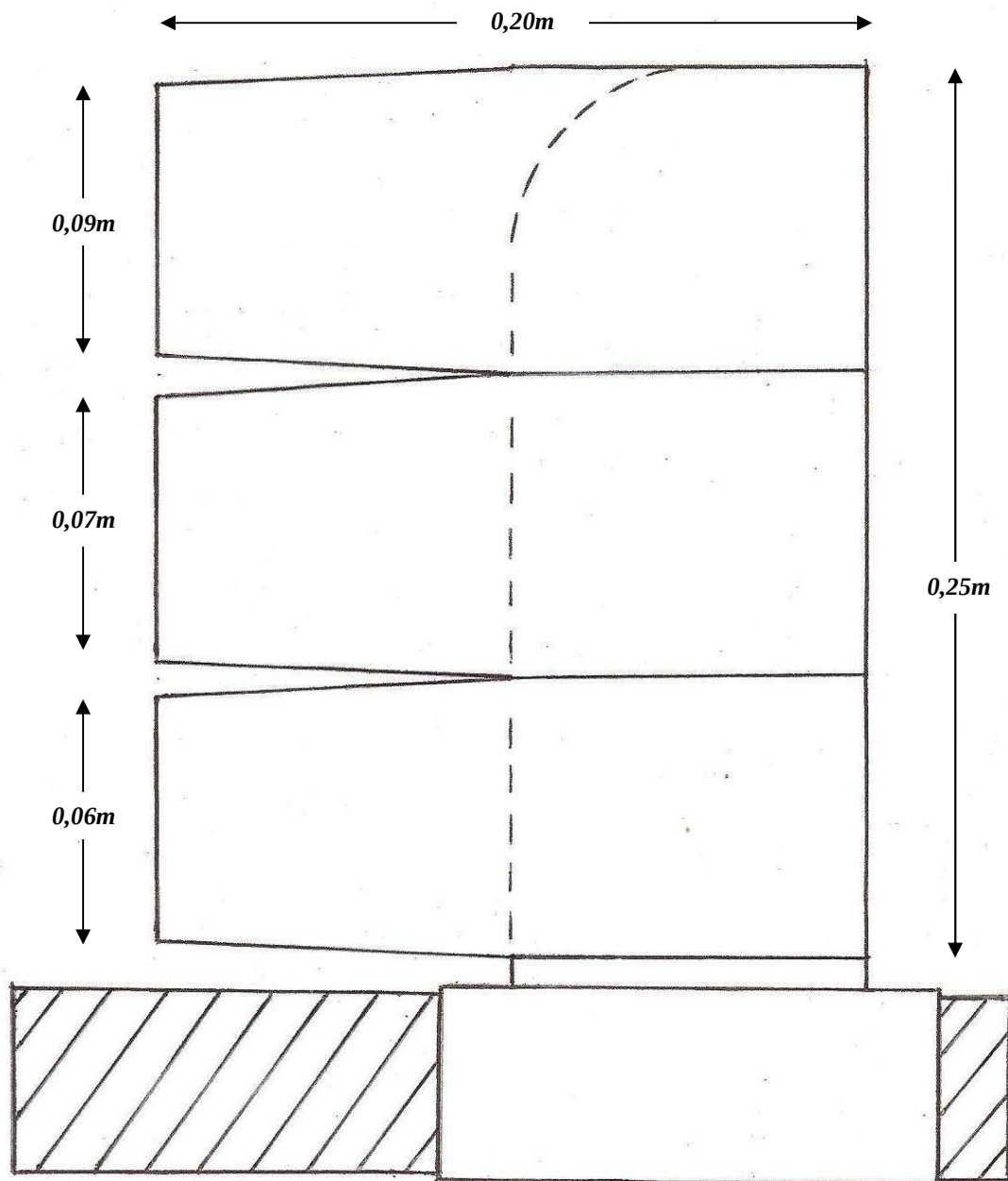
$e = 1/5$

Setra & Fehy



11 Mars 2009

ANNEXE 5



VUE DE FACE DE LA BOITE DE SORTIE

E S P A

$e = 1/2$

Setra & Fehv



11 Mars 2009

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ANNEXES

INTRODUCTION GENERALE 1

Partie I : GENERALITES ET ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES 2

Chapitre I : LE METAL OR 3

1- Présentation [1] 3

2- Etat naturel de l'or [1] 3

3 – Propriétés 4

4 – Economie 7

5 – L'or à Madagascar 10

Chapitre II : PRINCIPAUX TYPES DE SEPARATIONS GRAVIMETRIQUES 17

I – TYPES DE SEPARATEURS GRAVIMETRIQUES 17

1- Définition [7] 17

2- Séparation ou concentration en milieu dense [6] 18

3- Séparation ou concentration par nappe pelliculaire fluente [6] 20

II- Quelques séparateurs gravimétriques de l'or 26

1- Labatée 26

2 – Le pan 27

3 – Le sluice [8] 29

Partie II : CONCEPTION ET REALISATION DE SPIRALE 30

Chapitre I : DESCRIPTION GENERALE 31

I – HISTORIQUE 31

II – DESCRIPTION 31

1- Définition [6] 31

2- Présentation 31

3- Catégories des séparateurs en spirale 33

4- Paramètres 34

Chapitre II : ETUDES THEORIQUES 36

1- Cinématique [3] 36

2- Type d'écoulements et nombre de Reynolds [9] 37

3- Cas de la spirale 38

4- Principes de la pesanteur dans une spirale 39

5- Modélisation de l'écoulement dans un séparateur a spirale [10].....	44
Chapitre III : ETUDE DE CONCEPTION ET DE REALISATION	45
1- Choix du type de matériaux	45
2- Paramètres opératoires	45
3- Dimensionnement des appareils.....	47
4- Description des appareils	48
5- Les accessoires.....	51
Chapitre IV : COÛTS DE FABRICATION	53
I- Spirale métallique	53
II- Spirale en caoutchouc.....	54
Partie III : ESSAIS ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS.....	56
Chapitre I : LES PROCEDES DE TRAITEMENT	57
I,Minerai alluvionnaire.....	57
1- Définition	57
2- Procédé.....	57
II, Minerai éluvionnaire.....	58
1- Définition	58
2- Procédé.....	58
Chapitre II : LES ESSAIS	59
1- Site d'essai	59
2- Protocole opératoire	60
3- Essai	61
4- Analyse au laboratoire	61
5- Expressions des résultats des essais.....	63
6- Interprétations	73
7- Recommandations.....	74
CONCLUSION GENERALE.....	76
BIBLIOGRAPHIES	
WEBOGRAPHIES	
ANNEXES	

**Titre : « CONCEPTION ET REALISATION DE SPIRALES POUR
L'EXPLOITATION ARTISANALE DE MINERAI AURIFERE »**

RESUME

Madagascar est reconnu depuis le 19^{ème} siècle comme étant un pays à potentialité aurifère appréciable. La totalité de la production aurifère provient, jusqu'à maintenant, des gisements alluvionnaires et éluvionnaires exploités d'une façon artisanale avec utilisation de la batée et du "lakan-tany", malgré les tentatives de mécanisation menées depuis le début du siècle.

Sur le plan technique, nous avons mené une étude de conception et de réalisation d'appareil adapté au traitement artisanal des minerais aurifères à partir de données réelles pour mettre en application les méthodes et techniques applicables aux petits gisements d'or: la spirale. A priori, cette méthode est retenue pour sa performance et tient également compte de la grande variété des types de gisements aurifères existants à Madagascar.

Une spirale est un appareil de séparation gravimétrique par nappe pelliculaire fluente, et utilisé en général pour la séparation métallifère et que nous avons conçu pour être utilisé par les orpailleurs en vue d'une augmentation de leur production et amélioration de leurs conditions de travail.

Mots-clés : spirale, traitement, aurifère, nappe pelliculaire fluente.

ABSTRACT

Madagascar has been recognized for the 19th century as being a country with appreciable gold bearing potentiality. The totality of the gold bearing production comes, until now, of the layers exploited in an artisanal way with use of the jamb and the «lakan-tany », in spite of the attempts at mechanization carried out since the beginning of the century.

Technically, we undertook a realization design engineering of apparatus adapted to the artisanal treatment of gold ores starting from real data to apply the methods and techniques applicable to the small layers of gold: the spiral. This method is adopted for its performance and also takes account of the large variety of the types of existing gold bearing layers in Madagascar.

A spiral concentrator is a flowing film separation device., and used in general for the metalliferous separation and which we conceived to be used by the gold washers for an increase in their production and improvement of their working conditions.

Keywords: spiral, treatment, gold, flowing film separation.

Nombre de pages : 76

Nombre de figures : 40

Nombre de tableaux : 36

Encadreurs :

Madame ARISOA RIVAH Kathy

Monsieur RANDRIANJA Roger

LALAFANDEFERANA Zafimifehisoa
Lot 050 I/A Ialasora Fandriana 308
Tél : 033 12 291 12 – 032 41 230 31
Mail : feh_lala@yahoo.fr

RASETRAHARISON M. Tojonirina
Lot FMAI 40 67 Ha Sud Antananarivo 101
Tél : 033 14 069 87 – 032 44 365 40
Mail : gathouzo@yahoo.fr