

BIBLIOTHEQUE

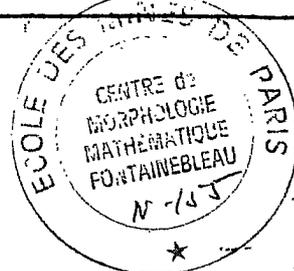
RAPPORT TECHNIQUE DE VISITE AUX MINES DE FER DE CASSINGA (ANGOLA)



G. MATHERON

27 mars 1967

RAPPORT TECHNIQUE DE VISITE AUX MINES DE FER DE CASSINGA (Angola)



1. Préambule

A la demande de la Compagnie Minière de Lobito, et, nommément, du Professeur J. Quintino Rogado, j'ai effectué à Lisbonne un séjour d'une semaine (13-19 mars 1967) puis visité les Mines de Fer de Cassinga en compagnie de l'ingénieur L.C. Cortez (20-25 mars 1967)

Nous avons eu ainsi l'occasion de voir, dans la zone Nord, les gisements de Jamba, Lucunga, Cateruca, Malavi et Mavulo, et, dans la zone Sud, ceux de Tchamutete et de Campulo. Nous avons partout rencontré un accueil à la fois très cordial et très coopératif. J'en remercie les Ingénieurs de la Compagnie Minière, et notamment MM. les Ingénieurs L. Falcao Mena, Directeur Général des Mines de Cassinga, Larangéira et Roxo, Directeurs des zones Nord et Sud, le Docteur R. Korpershoek, Directeur de la géologie, et MM. les Ingénieurs R. Naique, H. Simoes Santos, L. Cardoso, H. Pedro, pour la zone Nord, et C. Santos Pereira et Palhotas pour la zone Sud.

Cette étude avait pour but d'examiner les méthodes de prospection et de calcul des réserves utilisées aux Mines de Cassinga, tant pour le minerai secondaire (éluvionnaire) que pour le minerai primaire (massif) de la zone Sud. L'impression générale a été excellente. En ce qui concerne le minerai éluvionnaire, les réserves prouvées - c'est-à-dire correspondant à des gisements ayant atteint les phases 3 ou 4, telles qu'elles sont définies dans le rapport en date du 21.1.67 établi par le Pr. J.Q. Rogado et L.C. Cortez - nous semblent connues avec un coefficient de variation de l'ordre de 2 %, c'est-à-dire aussi bon qu'il est économiquement raisonnable de le souhaiter. En ce qui concerne les minerais massifs de la zone Sud, les difficultés intrinsèques du problème et le coût plus élevé

des travaux miniers ne semblent pas permettre d'atteindre une précision aussi élevée.

Dans le présent rapport, nous parlerons surtout des gisements éluvionnaires. Les modes de formulation et de calcul que nous proposons ont fait l'objet de discussions approfondies avec les ingénieurs intéressés, notamment avec L.C. Cortez, R. Naique et le Dr Korpershoek. Ils pourront être explicités sous forme numérique, à Lisbonne ou sur place, selon que le recours aux calculatrices électroniques sera ou non indispensable.

En ce qui concerne les minerais massifs du Sud, il nous semble qu'en l'état actuel des travaux seule la zone B de Tchamutete peut faire l'objet d'une estimation quantitative. Nous indiquerons une méthode permettant d'évaluer l'ordre de grandeur de l'erreur correspondante.

2. Estimation du tonnage d'un gisement éluvionnaire.

Le tonnage T de minerai en place (in situ) d'un gisement éluvionnaire se présente sous la forme :

$$(1) \quad T = A \cdot h \cdot d = A \cdot \alpha$$

où A est la surface minéralisée (en mètre carré)

h la puissance moyenne (en mètre)

d la densité du minerai in situ

$\alpha = h \cdot d$ l'accumulation moyenne, ou valeur moyenne du tonnage de minerai par mètre carré de surface minéralisée.

L'estimation de la surface A , et celle de l'accumulation α peuvent être regardées comme indépendantes, de sorte que la variance relative $\frac{\sigma_T^2}{T^2}$, exprimant la précision avec laquelle les réserves d'un gisement sont connues, peut être mise sous la forme:

$$(2) \quad \frac{\sigma_T^2}{T^2} = \frac{\sigma_A^2}{A^2} + \frac{\sigma_\alpha^2}{\alpha^2}$$

Nous examinerons donc chacun des deux termes représentant les erreurs commises sur l'estimation de la surface et de l'accumulation moyenne. De la manière dont ces deux erreurs se composent dans la formule (2), nous déduirons ensuite, selon un critère d'optimisation économique, une recommandation concernant la maille de reconnaissance qu'il convient d'adopter pour chaque gisement dans les phases 3 et 4.

2.1. Estimation de la surface minéralisée A d'un gisement.

2.1.1. - Lorsqu'un gisement est reconnu selon une maille rectangulaire $a_1 \times a_2$, on peut estimer la surface minéralisée à l'aide de la formule :

$$(3) \quad A = n a_1 a_2$$

où n représente le nombre des puits positifs. Le principe qu'exprime la formule (3) consiste à attribuer à chaque puits positif son aire d'influence, égale au produit $a_1 a_2$. Il doit être appliqué en l'absence d'informations géologiques supplémentaires. Mais il va de soi que, si l'on dispose d'indications géologiques permettant de déterminer, de manière plus précise, le contour réel de la minéralisation (failles, contacts, affleurements, etc...), on doit toujours tenir compte de ces indications, plutôt que d'appliquer le principe (3), qui est un principe aveugle. On ne peut ainsi qu'améliorer la précision de l'estimation. Toutefois, comme cette amélioration est difficile à chiffrer exactement, nous conseillons de calculer dans tous les cas la variance d'estimation comme si le principe (3) avait été aveuglément utilisé : on surestimera ainsi légèrement l'erreur que l'on peut commettre, ce qui va dans le sens de la sécurité.

2.1.2. - La variance relative de l'erreur associée à l'estimation de la surface minéralisée A est alors donnée par la formule approchée

$$(4) \quad \frac{\sigma_A^2}{A^2} = \frac{1}{n^{3/2}} \sqrt{\frac{h_1 h_2}{A}} \left[\frac{1}{6} \sqrt{\lambda} + 0,061 \frac{1}{\lambda^{3/2}} \right] \quad (\lambda \leq 1)$$

où l'on désigne par n le nombre des puits positifs.

par h_1 et h_2 la moitié de la somme des projections des éléments d'arc du périmètre sur les directions principales du réseau de reconnaissance à maille rectangulaire

par $\lambda = \frac{a_1/h_1}{a_2/h_2}$ le rapport de maille, corrigé de l'anisotropie du contour. On doit toujours avoir $\lambda \leq 1$ quitte à échanger les rôles de a_1 et a_2 .

[. Pour une justification de cette formule, on peut se reporter à ma thèse "Les variables régionalisées et leur estimation" Paris, Masson, 1965, chapitre 6.]

2.1.3. - Dans les applications pratiques, le véritable contour et la valeur exacte de A sont inconnues. On les remplace par leur estimation. Pour A , on peut utiliser la formule (3). Pour les projections h_1 et h_2 du contour sur les deux directions de la maille, le plus simple est de procéder par simple comptage des éléments horizontaux et verticaux du contour obtenu en attribuant à chaque puits son contour d'influence. Si l'on prend :

$$h_1 = N_1 a_1 \quad h_2 = N_2 a_2$$

on obtient, en effet, $\lambda = N_2/N_1$, et par suite :

$$(5) \quad \frac{\sigma_A^2}{A^2} = \frac{1}{n^2} \left[\frac{1}{6} N_2 + 0,061 \frac{(N_1)^2}{N_2} \right] \quad (N_2 \leq N_1)$$

Sous cette forme, le calcul de la variance est très rapide. On notera que N_2 doit toujours être inférieur ou égal à N_1 (si $N_2 > N_1$ on échange les rôles de ces deux nombres).

On note aussi que, dans le décompte de N_1 et N_2 (ou de h_1 et h_2) on doit faire figurer tous les éléments du périmètre, qu'il s'agisse du contour intérieur ou du contour extérieur.

2.1.4. - Exemple sur la figure 1 ci-jointe, l'aire minéralisée est évaluée à 10 fois, le rectangle de maille, et comporte une lacune (un trou). On lit sur la figure :

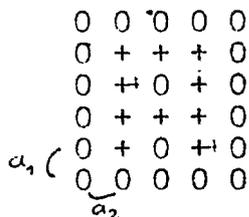


Fig. I

$$2 h_1 = 12 a_1 \quad \text{soit} \quad N_1 = 6$$

$$2 h_2 = 8 a_2 \quad \text{soit} \quad N_2 = 4$$

D'où par conséquent :

$$\frac{\sigma_A^2}{A^2} = \frac{1}{100} \left[\frac{4}{6} + 0,061 \frac{36}{4} \right] = \frac{1,21}{100}$$

soit un écart type relatif (coefficient de variation) $\frac{\sigma_A}{A} = \frac{11}{100}$
 et une fourchette d'erreur relative de $\pm 22 \%$.

2.1.5. - La formule (5) permet de déterminer la variance lorsque les puits ont été exécutés. S'il s'agit, au contraire, de choisir une maille de reconnaissance non encore réalisée, par exemple la maille correspondant à la phase 3, on peut faire plusieurs projets et les comparer entre eux grâce à la formule (4). Les valeurs de h_1 , h_2 et A sont alors estimées, en première approximation, à partir des résultats obtenus dans la phase antérieure (phase 2)

Dans la mesure du possible, le rapport de maille a_1/a_2 doit être tel que l'on ait $\lambda = 1$ c'est-à-dire $a_1/h_1 = a_2/h_2$. La géométrie du réseau de reconnaissance doit être adaptée à la géométrie du gisement, comme le suggère l'intuition la plus élémentaire. A un gisement présentant une direction d'allongement préférentiel, doit correspondre un rectangle de maille allongé dans la même direction.

Cette condition, $\lambda = 1$ peut cependant n'être vérifiée que de manière approximative, sans que cela entraîne une grave perte d'information. Ainsi, pour $\lambda = 1$ l'expression

$$\frac{1}{6} \sqrt{\lambda} + 0,061 \frac{1}{\lambda^{3/2}} \quad \text{prend sa valeur optimale} \quad 0,23 \quad . \text{ Pour}$$

$\lambda = 0,5$ on obtient la valeur 0,29, qui n'est pas encore beaucoup plus élevée. Par contre, pour $\lambda = 0,25$ on obtient la valeur 0,57 qui est franchement plus forte. En pratique, donc, on pourra tolérer des valeurs de λ comprises entre 0,5 et 1.

Cette tolérance, et la souplesse qu'elle entraîne, permettent dans les applications de choisir pour la troisième phase un réseau de puits capable d'intégrer les prélèvements déjà effectués dans les phases antérieures, et ne nécessitant par conséquent que le strict minimum de travaux supplémentaires.

2.1.6. - Lorsque l'on passe de la phase 3 à la phase 4, on est amené à préciser le contour extérieur, à l'aide de sondages à maille plus serrée, et aussi le contour intérieur, à l'aide d'une cartographie précise des affleurements de B.H.Q. Ces opérations permettent d'améliorer l'estimation de l'aire minéralisée A. Mais ce n'est déjà plus là leur objectif essentiel. La phase 4, en effet, a plutôt pour but de réunir des informations permettant d'élaborer un avant-projet d'exploitation. Il ne s'agit donc plus d'améliorer la précision de l'estimation des réserves globales, déjà suffisamment connues, mais bien de dessiner le contour réel de la minéralisation, et d'en détailler la géométrie.

Il ne nous paraît donc pas utile, en phase 4, de refaire un calcul d'erreur tenant compte de ces éléments nouveaux. On peut remarquer, dans le même sens, que, si le contour des affleurements de B.H.Q. est alors parfaitement déterminé, il n'en reste pas moins qu'à proximité immédiate de ce contour, et jusqu'à des distances pouvant atteindre quelques dizaines de mètres, la qualité et l'exploitabilité du minerai demeurent incertaines et variables. Il nous semble donc prudent, même en phase 4, de calculer l'erreur sur l'aire minéralisée comme si ce contour intérieur n'était pas réellement connu.

2.2. Estimation de l'accumulation moyenne α d'un gisement

2.2.1. - L'accumulation moyenne α d'un gisement est la valeur

moyenne du tonnage de minerai supporté par mètre carré de surface minéralisée. Elle doit être estimée par la formule :

$$(6) \quad \alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i d_i$$

où n est le nombre des puits minéralisés, h_i et d_i la puissance (épaisseur) et la densité in situ pour chacun de ces puits. Plus généralement, si les zones d'influence A_i de chacun des puits ne sont pas égales entre elles, on prendra une formule du type :

$$\alpha = \frac{\sum h_i d_i A_i}{\sum A_i}$$

Dans cette formule (6), l'accumulation moyenne α apparaît comme la valeur moyenne du produit $h_i d_i$. Elle n'est pas égale au produit de la puissance moyenne $\frac{1}{n} \sum h_i$ par la densité moyenne $\frac{1}{n} \sum d_i$. En effet, la densité est d'autant plus élevée que le minerai contient d'avantage d'hématite. C'est ainsi que R. Naique a pu déterminer, à Jamba, un coefficient de corrélation de + 0,78 entre densité et teneur en fer. Mais, de son côté, la teneur en fer semble liée à la puissance par une corrélation positive assez forte, imputable sans doute au fait que les zones où de grandes quantités de minerai ont pu s'accumuler sont aussi des zones où les processus d'enrichissement naturel ont pu être poussés le plus loin.

Dans ces deux corrélations positives - entre densités et teneurs, puis entre teneurs et puissances - résulte que densités et puissances sont elles-mêmes en corrélation positive. Par suite l'accumulation moyenne (6) est supérieure au produit de la puissance moyenne par la densité moyenne. A Jamba, selon R. Naique on obtient une différence de l'ordre de 10%. Dès lors deux attitudes sont possibles :

a) - A la fois par mesure de prudence, et pour simplifier les calculs, on peut fixer une fois pour toutes la densité d_i , en lui attribuant une valeur constante pour tous les puits, valeur choisie relativement basse par mesure de sécurité. C'est ainsi que la valeur

2,5 a été retenue pour la plupart des gisements. Cette manière de procéder est incontestablement très prudente, puisqu'elle conduit en principe à une estimation par défaut. On peut se demander toutefois si elle n'est pas trop prudente, compte tenu de la précision assez grande que permettent par ailleurs les données disponibles.

b) - On peut, au contraire, - et je pense qu'il y a lieu de le faire - utiliser réellement la formule (6), en déterminant effectivement la puissance et la densité de chacun des puits. Mais, si la mesure de la puissance h_i , ne soulève pas de difficulté particulière, il n'en est pas de même de la détermination de la densité d_i .

2.2.2. - Pour déterminer la densité d_i , je pense - conformément à une suggestion de R. Naique - que l'on peut profiter de la corrélation existant entre la densité et la teneur en fer. Comme le volume spécifique d'un mélange dépend linéairement des pourcentages de ses constituants, on cherchera plutôt à établir une relation linéaire entre l'inverse $1/d$ de la densité et la teneur en fer $Fe\%$ soit :

$$(7) \quad \frac{1}{d} = b Fe\% + c$$

Les coefficients b et c de la relation (7) pourront être déterminés par une méthode de moindre carré, à partir d'un nombre suffisamment grand de puits étalonnés.

D'ores et déjà, 200 puits environ en fait l'objet d'une détermination de densité à Jamba, et un nombre équivalent est prévu à Cateruca. Le procédé utilisé (compactation) a soulevé certaines objections, théoriquement justifiées, puisque rien ne garantit que l'état de compactation auquel on porte le minerai au cours de ces essais soit une image fidèle de son état naturel. On peut penser pourtant que, si différence il y a, cette différence ne doit pas être très élevée. Il sera sans doute possible de préciser ce point en procédant à quelques déterminations directes de volumes en place.

On peut aussi se poser une autre question : les coefficients θ et C de l'équation (7) ont ils, ou non, la même valeur pour les différents gisements ? La réponse ne peut être qu'expérimentale. Si, les mesures effectuées à Cateruca conduisent aux mêmes valeurs de b et c que celles de Jamba, on pourra admettre que (7) représente une loi physique applicable aux autres gisements. Il suffira alors, à titre de vérification, de procéder à un petit nombre de détermination de densité pour chaque gisement, sans qu'il soit nécessaire de traiter tous les puits.

2.2.3. - Le calcul de la variance d'estimation sur l'accumulation moyenne est particulièrement facile. Les variogrammes montrent, pour le gisement de Jamba, que les puissances en deux points séparés par une distance de 100 m. sont déjà indépendantes l'une de l'autre. Il est probable qu'il en est de même pour les autres gisements (il sera bon, cependant, de le vérifier au moins pour Cateruca). Dans ces conditions, la variance d'estimation s'obtient en divisant par le nombre n des puits positifs la variance $\sigma^2(hd)$ des accumulations $h_i d_i$ des puits. Si donc, comme à Jamba, les densités ont fait l'objet de déterminations directes, on aura simplement :

$$\frac{\sigma_d^2}{d^2} = \frac{1}{n} \frac{\sigma^2(hd)}{(hd)^2}$$

Si, pour d'autres gisements, la densité est déterminée indirectement à l'aide de la relation (7), il faudra tenir compte de la variance résiduelle σ_ϵ^2 de la densité d lorsque la teneur $F_e\%$ est fixée. Cette variance résiduelle sera connue, grâce aux résultats de Jamba et de Cateruca. On aura alors :

$$(8) \quad \frac{\sigma_d^2}{d^2} = \frac{1}{n} \cdot \left[\frac{\sigma^2(hd)}{(hd)^2} + \frac{\sigma_\epsilon^2}{d^2} \right]$$

2.3. Composition des variances d'Estimation

Si l'on a estimé les tonnages T_1, T_2, \dots de différents gisements avec les variances d'estimation $\sigma_{T_1}^2, \sigma_{T_2}^2, \dots$ le tonnage des réserves totales : $T = T_1 + T_2 + \dots + T_n$

est alors avec une variance d'estimation σ_T^2 égale à la somme des variances partielles:

$$(9) \quad \sigma_T^2 = \sigma_{T_1}^2 + \sigma_{T_2}^2 + \dots$$

Cela résulte du fait que les erreurs commises dans l'estimation de chacun des gisements sont manifestement indépendantes. Si l'on utilise les coefficients de variation $C_1 = \sigma_{T_1}/T_1$, $C_2 = \sigma_{T_2}/T_2 \dots$ la règle (9) implique une pondération par les carrés des tonnages. Elle s'écrit, en effet :

$$\frac{\sigma_T}{T} = \frac{\sqrt{T_1^2 C_1^2 + T_2^2 C_2^2 + \dots}}{T_1 + T_2 + \dots}$$

On notera que cette règle conduit, pour l'ensemble des réserves prouvées au 31.12.66 à un coefficient de variation de l'ordre de 2 % seulement. Cela signifie, en pratique, que ces réserves peuvent être considérées comme parfaitement connues.

2.4. Choix de la maille de reconnaissance

2.4.1. - Puisque l'on sait, pour chaque gisement, calculer la précision correspondant à une maille donnée, il reste, pour choisir la maille de reconnaissance définitive (celle de la phase 3), à se fixer, la précision que l'on souhaite. A cet égard, le critère utilisé (obtenir un coefficient de variation inférieur à 20 %, autrement dit faire entrer chaque gisement dans la catégorie des réserves dites prouvées) me semble trop rigide. Appliqué strictement, il conduirait à des dépenses de reconnaissance exagérées sur les petits gisements (ou trop faibles pour les gros gisements). La distinction entre réserves probables et prouvées conduit d'ailleurs à des paradoxes : si quatre gisements de tonnages comparables sont reconnus avec un coefficient de variation de 30 %, leur somme est estimée avec un coefficient deux fois plus petit, soit 15 %. Ainsi la réunion de ces réserves probables passe dans la catégorie des réserves prouvées.

Il n'y aurait donc, en réalité, que deux catégories de

réserves : réserves possibles c.a.d. celles dont l'existence est géologiquement établie, sans qu'elles puissent cependant faire l'objet d'une estimation quantitative ayant une signification réelle, ni d'un calcul d'erreur sérieux - et les réserves - quantitatives pour lesquelles un tel calcul est possible. A cet égard, si l'on a établi l'existence de 10 millions de tonnes avec un coefficient de variation de 25 % (une erreur possible de ± 50 %), on peut aussi bien dire que l'on a 5 millions de tonnes prouvées ou certaines.

2.4.2. - En ce qui concerne le choix de la maille de reconnaissance, deux attitudes extrêmes sont possibles. La première attitude consiste à vouloir estimer tous les gisements, gros ou petits, avec la même précision, ou, ce qui revient à peu près au même, à les faire tous passer dans la catégorie des réserves prouvées. Elle conduit à des travaux excessifs sur les petits gisements. La deuxième attitude consisterait à appliquer la même maille à tous les gisements, gros et petits, de manière à maintenir constantes les dépenses consenties par tonne de minerai reconnu. Elle conduirait, cette fois, à une reconnaissance insuffisante des petits gisements.

Entre ces deux attitudes extrêmes, il doit y avoir un moyen terme correspondant à un optimum économique. Pour déterminer cet optimum, nous suggérons le critère suivant :

2.4.3. - L'objectif de la phase 3 est seulement l'estimation de la somme des réserves globales disponibles, et non pas encore leur étude détaillée gisement par gisement et catégorie par catégorie en vue de l'élaboration d'un projet d'exploitation. Le critère économique que l'on peut se fixer doit donc consister à minimiser la variance résultante (9) pour des dépenses données de travaux de reconnaissance. Or ces dépenses sont -en gros - proportionnelles au nombre total des puits que l'on a creusés. Désignons donc par n_1, n_2, \dots les nombres des puits positifs creusés dans les gisements 1, 2 ... Compte tenu de la condition $n_1 + n_2 + \dots =$ constante, la variance résultante (9) est minimale lorsque la

condition

$$(10) \quad \frac{\partial \sigma_{T_1}^2}{\partial n_1} = \frac{\partial \sigma_{T_2}^2}{\partial n_2} = \dots = \text{constante}$$

est remplie.

Cette condition (10) constitue le critère cherché. Elle exprime que les différents gisements sont reconnus d'une manière économiquement homogène ou cohérente.

2.4.4. - Pour expliciter la condition (10), on remarque que chacune des variances $\sigma_{T_i}^2$ peut, d'après (4) et (8), se mettre sous la forme :

$$\sigma_{T_i}^2 = \frac{B_i}{n_i^{3/2}} + \frac{C_i}{n_i}$$

Les constantes B_i et C_i ne dépendant que des caractéristiques propres du gisement i (et pouvant être évaluées à l'avance à partir des résultats de la phase 2). Le critère (10) peut alors s'écrire :

$$\frac{3}{2} \frac{B_i}{n_i^{5/2}} + \frac{C_i}{n_i^2} = \text{constante}$$

Il est plus imagé de présenter cette relation sous la forme équivalente suivante :

$$(11) \quad \frac{T_1^2}{n_1} \left[\frac{3}{2} \frac{\sigma_{A_1}^2}{A_1^2} + \frac{\sigma_{\alpha_1}^2}{\alpha_1^2} \right] = \dots = \text{constante}$$

Ainsi l'expression $\frac{T^2}{n^2} \left[\frac{3}{2} \frac{\sigma_A^2}{A^2} + \frac{\sigma_\alpha^2}{\alpha^2} \right]$ doit avoir la même valeur pour tous les gisements, gros ou petits.

a) - Si σ_A^2 / A^2 était négligeable, le critère conduirait à $T^2 / n^2 = \text{constante}$ (puisque σ_α^2 est proportionnel à $1/n$). Autrement dit, dans ce cas, on devrait maintenir

constante les dépenses par tonne de minerai reconnue. Cela se comprend, puisque en l'absence de toute erreur sur les surfaces minéralisées, un gisement unique de 10 millions de tonnes équivaut exactement à deux gisements de 5 millions de tonnes.

b) - Si, au contraire σ_a^2 / α^2 est négligeable, on obtient la règle $T^2 / n^{5/2} = \text{constante}$, soit n proportionnel à $T^{4/5}$. Les dépenses à la tonne reconnue décroissent comme $1/\sqrt[5]{T}$ c'est-à-dire très lentement: elles sont divisées par 2 lorsque le tonnage est multiplié par 32.

c) - Dans le cas général, on obtient une figure intermédiaire entre les deux précédentes. Les dépenses à la tonne de minerai reconnu doivent être une fonction très lentement décroissante du tonnage du gisement.

On notera que, dans la formule (11), le coefficient $\frac{3}{2}$ qui figure devant la variance géométrique σ_A^2 / A^2 attribuée à celle-ci une importance plus grande qu'à la variance de l'accumulation. Cela provient du fait que l'erreur sur la surface est plus sensible que l'autre aux variations de n .

Un calcul numérique effectué à Jamba nous a montré que les mailles actuelles conduisent à la même valeur numérique de l'expression (11) - soit 10^{13} environ - pour deux gisements aussi différents que Jamba et Malavi. Les mailles adoptées pour ces deux gisements sont donc économiquement cohérentes. Il est très satisfaisant que notre critère soit en bon accord avec les mailles suggérées directement par l'intuition géologique. Le calcul devra être fait pour tous les gisements ayant déjà atteint la phase 3. Mais son intérêt principal sera de fournir un critère sûr pour choisir la maille de reconnaissance des gisements dont la projection n'est pas encore achevée.

3. Passage à la phase 4

Les trois premières phases de prospection ont pour objectif une

simple estimation globale des réserves de minerai in situ. A partir de la quatrième phase, on cherche à réunir des informations en vue de préparer un avant projet d'exploitation. Il s'agit maintenant de préciser la géométrie réelle du gisement et de le découper en panneaux aussi homogènes que possible quant à la qualité du minerai et aux possibilités d'enrichissement. Les problèmes posés sont plus difficiles, et l'étude en est moins avancée. Les mailles utilisées, qui permettaient une estimation presque parfaite des réserves globales, apparaissent au contraire comme assez lâches pour ce nouveau point de vue.

3.1. - Il n'est pas difficile de délimiter de manière plus précise les contours de la minéralisation, grâce à des sondages supplémentaires à la périphérie, et à une cartographie détaillée des affleurements. Il reste le problème, déjà signalé, que pose l'existence, en bordure des affleurements, d'une zone où la qualité des minerais semble extrêmement variable.

On doit aussi mentionner le problème que pose le minerai des plateaux, localisé sur les affleurements, sous la forme de poches de dimensions souvent petites et très irrégulières, et de qualité extrêmement variable, minerai représentant des tonnages nullement négligeables. Il est possible d'estimer les réserves correspondantes (bordure des affleurements et minerai des plateaux) grâce à des tranchées recoupant l'ensemble, comme il a été fait à Jamba. Mais la question de l'exploitabilité et des possibilités de traitement d'un tel minerai reste ouverte.

3.2. - Au stade actuel, le problème le plus important est celui du degré réel d'homogénéité des panneaux que l'on peut découper dans un gisement comme Jamba. Chacun des 348 puits de Jamba a été étudié de manière très complète (détermination des rendements poids et des teneurs en fer des différentes fractions granulométriques après lavage et traitement aux liqueurs denses). Il reste à savoir dans quelle mesure les caractéristiques ainsi déterminées sont réellement représentatives de ce qui se passe au voisinage de chaque puits. La question présente une grande importance. Il s'agit en

effet de savoir si le découpage en panneaux possède une signification réelle et peut servir de base à un projet d'exploitation.

Il se peut d'ailleurs que la réponse ne soit pas la même pour les différentes zones du gisement. Il se pourrait, comme le pense le Dr Korpershoek, qu'il existe des zones homogènes à minerai de haute qualité (zones "protégées") et des zones hétérogènes à minerai de qualité moins bonne et plus variable.

Je suggère d'aborder ce problème de deux manières différentes. En premier lieu, il convient de construire les variogrammes des différents paramètres distingués par R. Naique pour les 348 puits de Jamba. Le variogramme, en effet, est précisément l'outil qui permet de mesurer le degré de continuité que présente une caractéristique dans sa variation spatiale. Comme il existe sans doute des zones plus homogènes et plus hétérogènes, ces variogrammes devront être construits séparément pour différentes zones du gisement. Compte tenu du nombre des paramètres mis en jeu, le recours aux ordinateurs est indispensable, est indispensable, et ces calculs devront être effectués à Lisbonne sous la direction de L.C. Cortez.

En deuxième lieu, et pour confirmer expérimentalement les indications fournies par les variogrammes, il conviendra, en quelques zones convenablement choisies de Jamba, d'exécuter des lignes de puits à maille plus serrée (10 ou 20 mètres) que permettront de voir dans quelle mesure les caractéristiques des puits sont réellement représentatives de ce qui se passe dans leur voisinage.

3.3. - En ce qui concerne l'estimation des caractéristiques moyennes des panneaux, on devra appliquer strictement les règles habituelles de pondération. Par exemple, si l'on désigne par :

A_i la zone d'influence du puits i
h_i sa puissance.
d_i sa densité

ρ_i le rendement poids pour une fraction et un mode de traitement donné

X_i la teneur en fer correspondante

on estimera le tonnage, le rendement moyen et la teneur correspondante du panneau à l'aide des formules :

$$T = \sum A_i h_i d_i$$

$$\rho = \frac{1}{T} \sum \rho_i A_i h_i d_i$$

$$x = \frac{1}{\rho T} \sum x_i \rho_i A_i h_i d_i$$

Il serait prématuré de donner dès maintenant des règles pour le calcul des variances associées à ces estimations, ou pour envisager la possibilité de mettre en oeuvre des procédés de Krigage. Ces questions ne pourront être abordées que lorsque les varigrammes de ces différentes caractéristiques auront été effectivement construits.

4. La question du minerai massif

L'estimation des amas de minerai massif de la zone Sud pose un problème difficile. Je partage tout à fait l'opinion de MM. Roxo et Pereira selon laquelle cette estimation n'est possible que si l'on dispose de travaux miniers, et non pas seulement de sondages. En l'état actuel d'avancement des travaux, seule la zone B de Tchamutete peut faire l'objet d'une estimation quantitative (et encore avec une précision probablement assez médiocre).

4.1. - Un premier problème consiste à définir exactement ce qui doit ici être considéré comme du minerai. Selon que des portions plus ou moins grandes d'itabirite pourront être ajoutées au minerai massif proprement dit, la géométrie de l'amas et l'ordre de grandeur du tonnage pourront varier notablement. Tout dépend ici du prix de revient des procédés de traitement, et des essais approfondis seront nécessaires.

4.2. - Pour la zone B de Tchamutete, le tonnage a été très correctement estimé de deux manières différentes : à partir de coupes horizontales, effectuées niveau par niveau, et à partir de coupes verticales effectuées selon des plans parallèles. Ces deux estimations diffèrent l'un de l'autre de moins de 10 %. Cet excellent accord ne signifie d'ailleurs pas qu'elles représentent la réalité avec la même précision, car elles ont été construites à partir des mêmes données et des mêmes interprétations. Cependant le procédé utilisé semble très correct et doit conduire à une estimation raisonnable des réserves. Il reste à assortir cette estimation de la variance qui lui correspond. Cela est possible, au moins en première approximation, en utilisant les méthodes dites transitives. Il convient de composer les deux termes suivants :

Variance de l'erreur que l'on commet en estimant la surface d'un niveau à partir de la galerie et des recoupes que l'on y a tracées.

Variance de l'erreur que l'on commet en estimant le volume de l'amas à partir de la surface des deux niveaux effectivement reconnus.

Le premier terme peut se calculer par les formules habituelles du problème géométrique. Le deuxième nécessitera la connaissance du covariogramme transitif (à une dimension) des aires des sections horizontales de l'amas. Mais ce covariogramme pourra être estimé, approximativement, à partir précisément des coupes interprétatives établies niveau par niveau. On ne perdra pas de vue, cependant, que ces coupes interprétatives doivent surestimer, spontanément, la régularité de la géométrie de l'amas et que, par conséquent, la variance d'estimation que l'on calculera à partir de leur covariogramme aura sans doute une valeur un peu trop faible.

Le 27 Mars 1967.

G. Matheron

