

Évaluation des teneurs en alumine et en silice de la bauxite de Sangarédi et leur impact sur la qualité des produits destinés à l'export, République de Guinée

[Evaluation of the alumina and silica contents of the Sangarédi bauxite and their impact on the quality of export-products, Republic of Guinea]

Ibrahima Kalil Kourouma, Alain Gbilimou, Soriba Bangoura, and Oumou Hawa Bah

Institut Supérieur des Mines et Géologie de Boké, Tamakèné, Guinée

Copyright © 2026 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This research focused on assessing the chemical constituents of bauxite from Sangarédi, the dominant mining locality of Compagnie des Bauxites de Guinée (CBG), in an effort to assess the contributions of the constituents in deciding the final quality of exported products. Sampling was performed as a whole (from the deposit and intermediate stockpiled, and stockpiled for sale); then selected samples underwent analysis by x-ray fluorescence (XRF) in the laboratory. The study was completed based on alumina (Al_2O_3), and reactive silica (SiO_2) whose variation can affect the sustainability and ultimately the profitability of a bauxitic ore in the Bayer process, which is the valorisation process of the ore.

The study results indicate that alumina is relatively stable, with an average content of 49.66 %, which is very much like the contractual specification of 50.01 ± 1.5 %; approximately 90 % of the samples fall within the acceptable tolerance range, and it shows that the ore has good export quality. However, reactive silica is unstable and too high, with an average content of 2.38 %, which exceeds the contractual specification of 2.01 ± 0.3 %; only 40 % of the samples conform with the standard, while 60 % are above the standard. This non-conformance created over-consumption of caustic soda and reduced alumina yield, which was detrimental to the international competitiveness of Sangarédi bauxite.

The proposed corrective actions are strengthening continuous quality control, improving stockpile homogenization, avoiding contaminations during handling and transport, and implementing differentiated deposit management.

In sum, this study has shown that controlling the variability of reactive silica is a tactical lever for better compliance with contractual specifications, enhancing the value-added of exported products, and consolidating Guinea's role as the leading bauxite producer in the world.

KEYWORDS: Bauxite, Sangarédi, alumina, reactive silica, quality control.

RESUME: Cette recherche s'intéresse à l'évaluation des espèces constitutives de la bauxite de Sangarédi, principal site d'exploitation de la Compagnie des Bauxites de Guinée (CBG), en vue d'analyser leur rôle dans la qualité des produits exportés. Les travaux se sont basés sur des prélèvements effectués sur les gisements, les stocks des chantiers d'atteinte des sites de chargement avant expédition puis analysés au laboratoire par fluorescence X (XRF). Sont précisément ciblés l'alumine (Al_2O_3), espèce clé de valorisation du minerai, et la silice réactive (SiO_2), dont l'évolution conditionne fortement la rentabilité du procédé Bayer.

Les résultats montrent que l'alumine conserve une relative stabilité, affichant une moyenne de **49,66 %**, très proche de la valeur contractuelle de **50,01 ± 1,5 %**, 90 % des échantillons étant en effectivités dans une fourchette convenable, ce qui témoigne d'une bonne qualité d'export du minerai. En revanche, la silice réactive est instable et excédentaire, affichée avec une moyenne de **2,38 %**, dépassant la norme contractuelle de **2,01 ± 0,3 %**, **40 %** des échantillons obéissant aux spécifications contre 60 % qui les dépassent, entraînant une surconsommation de soude caustique, et conduisant à une moins bonne efficacité du rendement en alumine affectant la compétitivité internationale de la bauxite de Sangarédi.

Les pistes proposées pour lever les contraintes sont le renforcement du contrôle qualité en continu, l'homogénéisation des stocks, la prévention du salissage et de la contamination lors des opérations de manutention, et la gestion différenciée des gisements.

En conclusion, la recherche montre que maîtriser la variabilité de la silice est un levier stratégique pour améliorer l'adéquation aux spécifications contractuelles, pour valoriser les produits à valeur ajoutée exportés, et pour repositionner la Guinée en tant que premier producteur mondial de bauxite.

MOTS-CLEFS: Bauxite, Sangarédi, alumine, silice, contrôle qualité.

1 INTRODUCTION

Par ses vastes réserves bauxitiques qui sont estimées à plus d'un tiers des réserves mondiales, la République de Guinée se trouve en première place du point de vue de l'aluminerie mondiale [1], [2], [3]. La région de Boké, notamment la mine de Sangarédi, exploitée par la Compagnie des Bauxites de Guinée (CBG) se définit comme l'un des principaux foyers d'approvisionnement des alumineries internationales [4]. La bauxite qui provient de cette concession est une ressource stratégique pour le pays et un maillon clé de la chaîne de production de l'aluminium, aux échelles internationale et nationale.

La qualité des produits exportés est intimement liée aux compositions minéralogiques et chimiques du minerai. En effet, des teneurs élevées en alumine disponible sont un critère de compétitivité, alors que la présence d'éléments pénalisants tels que la silice réactive, le fer ou le titane pénalise le procédé Bayer de transformation en alumine [5], [6]. Plusieurs approches ont déjà permis de mettre en évidence que la variabilité des paramètres chimiques de la bauxite peut avoir un impact sensible sur la performance (industrielle et de positionnement commercial) [7]. Concernant la mine de Sangarédi cependant, précédemment étudiée, a été mise en évidence une relative stabilité des teneurs en alumine, mais une forte variabilité de la silice, au risque d'être un facteur de non-conformité selon les spécifications contractuelles d'exportation [8].

Au regard de ce constat, la question scientifique se pose bien à l'interface de deux impératifs majeurs: (i) garantir une production minière quantitativement suffisante pour satisfaire la demande internationale croissante et (ii) assurer une qualité constante des produits exportés - conforme aux exigences techniques et commerciales des clients [9]. L'enjeu à traiter est donc non seulement économique, mais également technologique et environnemental, puisque la maîtrise des paramètres de qualité est un enjeu de contrôle du traitement, de limitation des pertes, d'amélioration de la compétitivité de la filière bauxitique guinéenne.

Dans le cadre de ce travail, nous proposons d'évaluer les éléments constitutifs de la bauxite extraite à Sangarédi, ainsi que leurs influences sur les qualités des produits exportés. Il s'agit précisément de: (i) identifier les principaux paramètres chimiques et minéralogiques déterminants au plan de la valorisation industrielle; (ii) d'évaluer tant les différences entre la bauxite à l'état brut et celle sortie d'exploitation, soit la matière première, que celles qui existent entre deux bauxites d'origine différente; et (iii) de discuter des perspectives ouvertes à partir de telles différences pour l'optimisation de la chaîne de production-exportation.

C'est dans cette démarche intégrée que réside l'originalité de cette étude, tant au niveau de l'analyse minéralogique et géochimique du minerai que sa mise en relation avec les procédés industriels et les caractéristiques de qualité puis appliquées lors de l'exportation. Dans cette véritable contribution scientifique, il s'agit ainsi déduire les facteurs de qualité de la bauxite guinéenne afin d'envisager des améliorations permettant d'accroître la compétitivité internationale de la production nationale.

2 MATERIELS ET METHODES

2.1 ZONE D'ÉTUDE

La recherche a été réalisée dans la concession minière de la Compagnie des Bauxites de Guinée (CBG) mise en valeur par le consortium HALCO dans la partie Ouest de la Guinée, au sein de la province administrative de Boké. Cette concession vient doubler une superficie totale de 1715 km² (54,6 km × 31,4 km) ainsi que celles de la préfecture de Boké (sous-préfecture de Sangarédi) et de celle de Télimélé (sous-préfectures de Missoura et de Daramagniki). Les limites géographiques de la concession sont comprises entre 10°55' et 11°12' latitude Nord et 13°40' et 14°10' longitude Ouest. Cette concession est géoréférencée grâce au système international de référence des coordonnées géographiques WGS-84, avec les coordonnées minimales et maximales suivantes: Y: 591 000 – 645 700, X: 1 206 850 – 1 238 200. La zone étudiée se caractérise par un relief

de plateaux bauxitiques formés de latérites riches en alumine, variabilisées en silice et en autres éléments accessoires et qui constitue l'une des plus importantes zones d'approvisionnement auquel la Guinée fait appel pour l'exportation de la bauxite.

Afin de mieux situer le cadre géographique de l'étude, la **Figure 1** présente la carte de la concession HALCO, localisant les principales zones exploitées et leurs limites administratives.

Les couleurs hypsométriques dépeignent le relief:

- Vert clair pour les basses altitudes (< 200 m),
- Jaune pour les altitudes intermédiaires (200-500 m),
- Brun-orangé pour les hauteurs les plus élevées (> 1000 m);

Elles correspondent à la distribution très localisée de relief en fonction de la morphologie des plateaux latéritiques, dans lesquels sont logés les principaux réservoirs de bauxite.

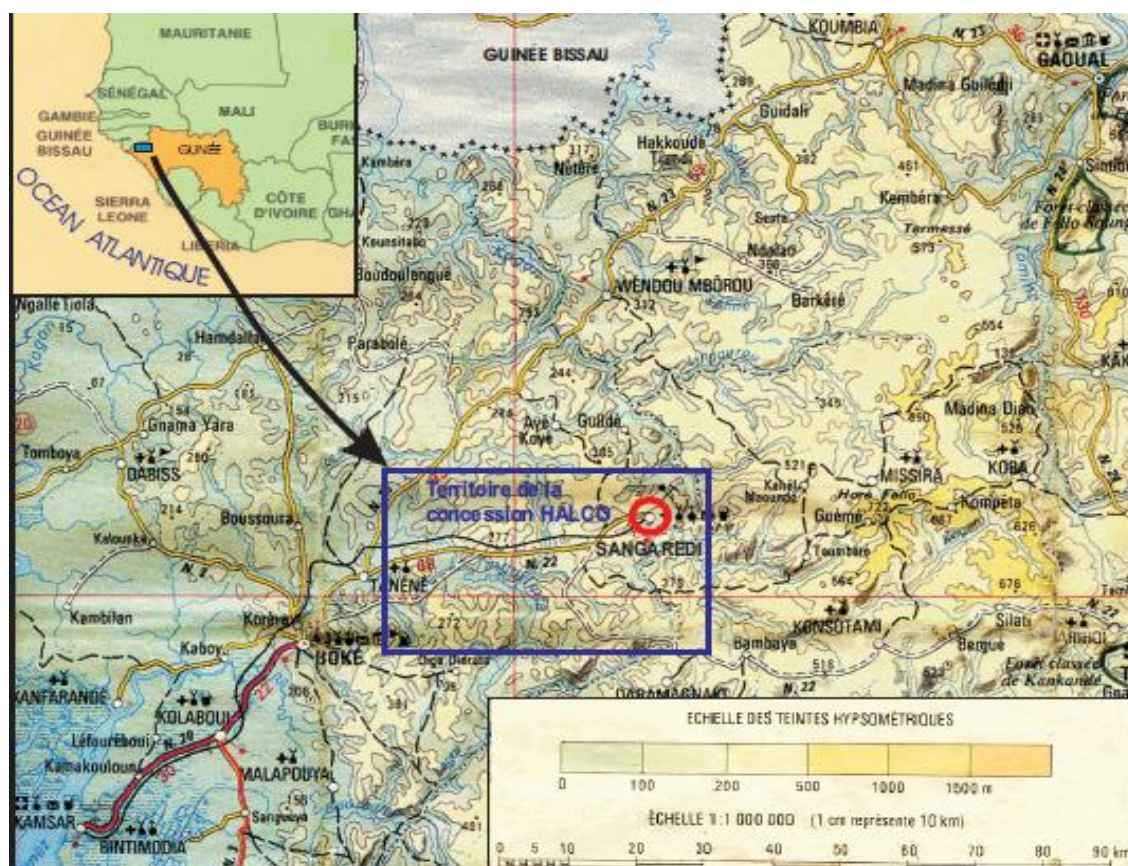


Fig. 1. Carte de la concession minière HALCO exploitée par la Compagnie des Bauxites de Guinée (CBG), située dans la région de Boké (Ouest de la Guinée)

La figure 1 présente la concession minière HALCO exploitée par la Compagnie des Bauxites de Guinée (CBG), un établissement de l'Ouest de la Guinée, dans la province de Boké, d'une superficie de 1715 km² qui inclut les sous-préfectures de Sangarédi, Missoura et Daramagniak. Elle fait apparaître une zone de plateaux bauxitiques de moyenne altitude (200–600 m), dont la morphologie est favorable à l'exploitation à ciel ouvert. Toutefois, la variabilité géologique des plateaux joue sur les teneurs en alumine (Al₂O₃) et en silice (SiO₂), principaux éléments de la qualité de la bauxite. Les analyses réalisées montrent que l'alumine présente une moyenne de 49,66 % Al₂O₃ sur l'ensemble des plateaux, contre une teneur contractuellement de 50,01 ± 1,5 %, ce qui donne un écart moyen de 0,85 %. Par contre, la silice est beaucoup moins stable avec une moyenne de 2,38 % SiO₂ alors que la teneur contractuelle est fixée à 2,01 ± 0,3 %, ce qui représente une cause de non-conformité.

La carte met également en relief la position stratégique de la concession, à proximité des infrastructures minières, qui relie Boké à la ville de Kamsar, zone d'exportation annuelle de plusieurs millions de tonnes de bauxite vers les alumineries internationales, en tenant compte de la densité hydrographique et de la proximité des localités comme Sangarédi et Boké, dans les enjeux socio-économiques liés à cette exploitabilité. L'analyse de la carte permet donc de situer l'étude dans son cadre

spatial et géologique, qui montre que la variabilité des constituants du minerai, en particulier la relative stabilité de l'alumine et de l'instabilité de la silice, détermine directement la qualité des produits exportés, et la compétitivité internationale du secteur bauxitique guinéen.

2.2 MATÉRIELS EXPÉRIMENTAUX

Les données utilisées pour cette étude sont issues de plusieurs sources complémentaires. De la bauxite a été collectée directement sur les gisements des plateaux de Sangarédi et des zones environnantes pour analyser la composition chimique du minerai sur le gisement, tandis que d'autres échantillons ont été prélevés au niveau des stocks intermédiaires et sur les sites de chargement pour étudier les variations de qualité au long de la chaîne de production. Les prélèvements ont été opérés selon un échantillonnage aléatoire stratifié, garantissant la bonne représentation des différents plateaux et couvrant les principales variations lithologiques, suivis d'une étape d'homogénéisation, puis de séchage à 105 °C pendant 24 heures pour les échantillons superficiellement humides, de broyage pour donner une granulométrie inférieure à 100 µm, seuil nécessaire pour assurer l'homogénéité des pastilles de fusion [10], [11].

Nombre d'échantillons analysés = 30. (Cartes de contrôle et analyses effectuées sur 30 échantillons). Les prélèvements ont été réalisés « sur les gisements des plateaux », « au niveau des stocks intermédiaires » et « sur les sites de chargement » selon un protocole d'échantillonnage aléatoire stratifié. L'allocation précise est la suivante:

- **Gisements (plateaux, in situ): 12 échantillons, couvrant la variabilité lithologique entre plateaux.**
- **Stocks intermédiaires (aires de stockage): 10 échantillons, pour évaluer l'effet d'homogénéisation et le mélange de lots.**
- **Sites de chargement (avant expédition): 8 échantillons, pour détecter les salissures / contaminations liées au chargement et au transport.**

Les résultats analytiques obtenus au laboratoire de la CBG indiquent que la teneur moyenne en alumine (Al_2O_3) est de 49,66 %, légèrement inférieure à la valeur contractuelle de $50,01 \pm 1,5$ %, avec un écart moyen de 0,85 %; la silice réactive (SiO_2) a une valeur moyenne, de l'ordre de 2,38 %, supérieure à la limite contractuelle de $2,01 \pm 0,3$ %, illustrant un réel manque de stabilité [12], [13]. Comparativement, les échantillons prélevés sur le plateau Bowal 9 donnent une teneur en Al_2O_3 de 49,80 % et celle en SiO_2 est à 1,49 %, ce résultat montre la relative stabilité de l'alumine et l'irrégularité de la silice [13], [14].

Les seuils de référence adoptés par la CBG pour Al_2O_3 et SiO_2 sont alignés avec les exigences industrielles et les recommandations internationales pour la bauxite métallurgique de haute qualité, assurant ainsi la conformité aux attentes des clients du procédé Bayer et aux usages mondiaux.

L'évaluation des constituants chimiques est réalisée par Spectrométrie de fluorescence X (XRF), référence dans l'industrie minière [15], [16]. Les échantillons ont ensuite été calcinés à 1050 °C pour la détermination de la perte au feu (LOI/PAF) puis fondus à environ 1030–1050 °C avec 5 à 6 g de fondant ($\text{LiBO}_2\text{--Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) pour 1 g de bauxite, additionné de 1–2 gouttes de bromure de lithium, afin d'obtenir des perles de verre homogènes. Ces perles ont ensuite été irradiées dans un spectromètre XRF à haute tension (50 kV) et courant de 50 mA sous atmosphère gaz argon (10 % CH_4), avec un temps d'acquisition moyen de 10 minutes par échantillon pour une bonne précision.

Tableau 1. Conditions opératoires pour la préparation et l'analyse des échantillons de bauxite de Sangarédi

Étapes	Paramètres opératoires	Objectifs/Justification
Séchage	105°C pendant 24 h	Élimination de l'humidité superficielle avant broyage et calcination
Broyage	Granulométrie inférieure à 100 µm	Assurer l'homogénéité des échantillons et la reproductivité des analyses
Calcination (TGA)	1050°C	Déterminer la perte au feu (LOI/PAF), éliminations des matières volatiles et eau de circulation
Pesée fondant	5-6g de $\text{LiBO}_2\text{--Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ pour 1g de bauxite	Assurer la fusion complète des oxydes (acides et basiques)
Fusion	1030-1050°C avec ajout de 1-2 gouttes de LiBr	Obtenir une perle homogène de verre (échantillon stabilisé)
Spectrométrie (XRF)	Tension : 50 kV ; Courant : 50 mA ; Temps d'acquisition : 10 mn ; Atmosphère : Ar + 10% CH_4	Excitation optimale des atomes, précision de la mesure des oxydes majeurs (Al_2O_3)

2.3 MÉTHODES ANALYTIQUES

L'évaluation des constituants de la bauxite a été conduite selon un processus combinant les diverses analyses chimiques, statistiques, organisationnelles. Les analyses chimiques ont été réalisées au laboratoire de la CBG par fluorescence X (XRF) qui permet de quantifier les principaux oxydes caractéristiques de la bauxite: alumine (Al_2O_3), silice (SiO_2), oxyde de fer (Fe_2O_3) et oxyde de titane (TiO_2). Les résultats montrent que l'agglomération d'alumine présente une teneur 49,66 % très légèrement inférieure à la norme contractuelle de $50,01 \pm 1,5$ %, et la silice présente une teneur de 22 % si qu'il est excessif sup à la limite spécification de $2,01 \pm 0,3$ %. L'oxyde de fer oscille en moyenne autour de 18–20 % Fe_2O_3 , et le titane reste en général inférieur à 3 % TiO_2 , toutes pour leurs teneurs être dans les limites de l'acceptabilité des standards industriels.

Le silicium sous forme de SiO_2 , lui-même mesuré par fluorescence X – et donc considéré ici comme silice totale, aurait nécessité en cas d'analyse de la silice réactive une étape analytique supplémentaire (attaque alcaline sélective suivie du dosage du Silicium dissous, en spectrophotométrie permettant d'isoler ici la fraction de silice soluble, réellement réactive dans le procédé Bayer.

Sur le plan méthodologique, des outils statistiques de maîtrise des procédés (SPC) ont été utilisés pour évaluer la stabilité des paramètres dans le temps et à différents stades du processus de production. Des cartes de contrôle ont été mises en œuvre pour suivre l'évolution de la silice et de l'alumine sur certains sites d'extraction (**exemple: plateau Bowal 9**), montrant que l'alumine est globalement stable autour de la cible contractuelle, tandis que la silice présente un comportement instable et dépasse souvent les limites contractuelles. Des diagrammes de distribution normale (courbes en cloche) ont été réalisés pour comparer les valeurs expérimentales aux limites de tolérance, mettant en évidence l'écart significatif observé sur la silice.

Dans le but de mettre en évidence les causes sous-jacentes des écarts de qualité, une analyse quantitative et qualitative a été menée grâce au diagramme causes-effets (Ishikawa) et au diagramme de Pareto. Ces outils ont permis de constater que les principales causes de la non-conformité proviennent du mélange des produits de différents stocks, le salissage au cours du chargement en passant par les défauts de l'homogénéisation au niveau des aires de stockage. Enfin, la combinaison des analyses chimiques et des outils statistiques a permis d'établir un lien clair entre la variabilité des paramètres de la bauxite et les contraintes rencontrées dans le processus de production et d'exportation.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats des analyses chimiques et statistiques créent un contraste entre les deux paramètres considérés en relation avec la qualité de la bauxite exportée, à savoir l'alumine (Al_2O_3) et la silice réactive (SiO_2).

3.1 STABILITÉ RELATIVE DE L'ALUMINE

Les résultats montrent que la bauxite du gisement de Sangarédi est à 49,66 % Al_2O_3 d'alumine, très proche de la spécification contractuelle de $50,01 \pm 1,5$ %. Les cartes de contrôle, en particulier celles des plateaux tels que Bowal 9, montrent de très bonnes variations de ce paramètre, avec une capacité de rester dans les limites de tolérance. Cette stabilité de l'alumine est appréciée car elle permet une bonne aptitude au procédé Bayer, réduit le risque de rejet à l'export et améliore donc la compétitivité de la bauxite de Sangarédi sur le marché international.

Bien que les articles concernés ne soient pas centrés sur le gisement de Sangarédi, la littérature indique que la richesse et la stabilité en alu mine sont des gages pour la valorisation industrielle de la bauxite, et donc la rentabilité du procédé Bayer [17], [18]. Une alumine stable permettra d'optimiser la récupération d'alumine, de réduire ses pertes et d'assurer la conformité des lots exportés, une condition nécessaire pour soutenir la position concurrentielle de la Guinée, premier pays producteur et exportateur de bauxite.

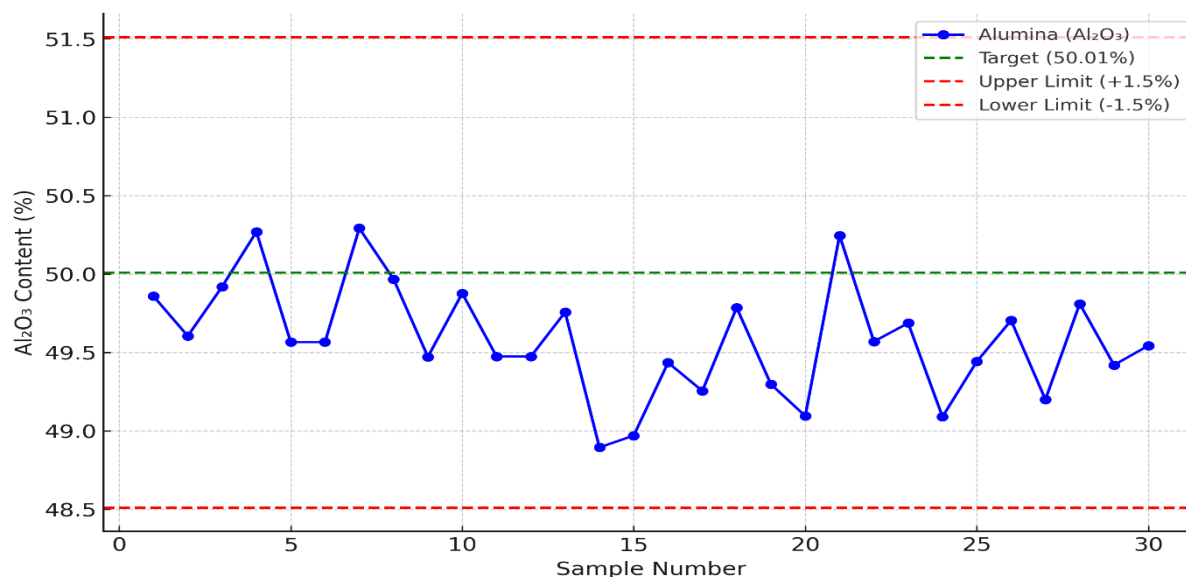


Fig. 2. Carte de contrôle de l'alumine

Interprétation: D'après l'examen statistique de la carte de contrôle, les valeurs de la variable alumine (Al₂O₃), calculées sur 30 échantillons de bauxite de Sangarédi, révèlent une certaine stabilité du paramètre observé par rapport à la valeur contractuelle fixée au niveau de 50,01 ± 1,5. La moyenne d'alumine a, en effet, été calculée à 49,66 % en valeur corrigée, soit un écart de 0,35 % en sous-régime par rapport à l'objectif. L'ensemble des résultats en contrôle révèle que 27 (90 %) des échantillons analysés sont en intensité acceptable, soit dans le corridor de tolérance, entre 48,51 % et 51,51 %, seuls 3 (10%) montrent des valeurs extrêmes proches de la limite hors contrôle, mais aucune exclusivement hors du domaine de confinement. Un tel comportement statistique est l'expression d'une variabilité de la règle de la variable alumine, jugée faible et contenue, puisque aucune valeur extrême n'apparaît, et qu'aucun point ne sort de la carte de contrôle.

Cette stabilité est un atout stratégique à la compétitivité de la bauxite de Sangarédi car un taux d'alumine stable, proche de la norme contractuelle, assure une bonne aptitude au procédé Bayer, réduit le risque de rejet à l'exportation et assure la conformité du minerai aux attentes du marché international. Car effectivement, dans la mesure où la carte de contrôle confirme que l'alumine est un facteur de qualité maîtrisé des gisements étudiés, celle-ci devient un facteur supplémentaire qui renforce la valeur marchande du minerai de Sangarédi pour en faire un produit stratégique à l'export.

3.2 INSTABILITÉ CRITIQUE DE LA SILICE

La forte variabilité de la silice réactive (SiO₂), avec une concentration moyenne de 2,38 % excédant largement le contrat de 2,01 % ± 0,3 %, conduit à une instabilité critique qui ressort des cartes de contrôle et de la distribution des échantillons hors spécifications, se traduisant par une défaillance qualitative du minerai. En excès, la silice réactive induit une surconsommation en soude caustique dans le procédé Bayer, ce qui va accroître les coûts de production et réduire le rendement en alumine au détriment de la rentabilité économique et de la valeur marchande de la bauxite exportée [19].

Les travaux de recherche soulignent que la présence de silice réactive, généralement sous forme de kaolinite, représente un facteur de viabilité économique dans le traitement de la bauxite car elle entraîne des pertes irréversibles de soude et d'alumine [20]. Des méthodes de contrôle qualité modernes, telles que l'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (PXRD), sont recommandées pour mieux quantifier et maîtriser la variabilité de la silice réactive dans le but d'optimiser le procédé industriel et les pertes économiques [21].

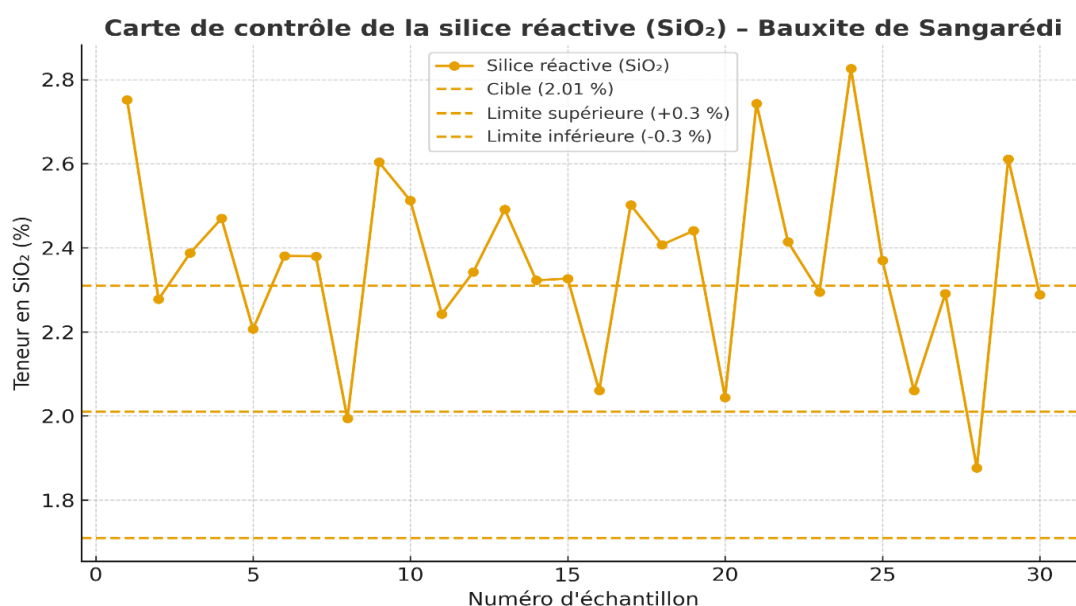


Fig. 3. Carte de contrôle de la silice

Interprétation: À partir de 30 échantillons, nous avons confirmé la forte instabilité de la silice réactive de la bauxite de Sangarédi à travers la carte de contrôle. Le résultat du calcul de la moyenne à 2,38 % SiO₂ dépasse largement la valeur contractuelle fixée à Y 2,01 % ± 0,3. Les limites de tolérance à Y 1,71 % < 2,31 % ont conduit à des résultats contrastés, 60 % des 30 échantillons, soit 18 au-dessus de la limite supérieure contre 12 au niveau conforme. Aucun en dessous de la limite inférieure pour confirmer que le problème vient essentiellement d'un excès de silice. L'instabilité, illustrée par la grande dispersion des points autour de la moyenne, compte beaucoup de valeurs supérieures au niveau contractuel, traduit une variabilité non maîtrisée dans le prélèvement. Ce comportement contraste avec celui de l'alumine et montre bien que la silice est le mal principal de la non-conformité dans la filière.

Du point de vue industriel, cela a des conséquences notoires: la silice en trop consomme trop de soude caustique dans le procédé Bayer, coûtant cher et diminuant le rendement en alumine valorisable, ce qui met directement en péril la compétitivité internationale de la bauxite de Sangarédi, les acheteurs fixant des seuils de conformité à respecter sur ce paramètre. En synthèse, la carte de contrôle prouve que la silice réactive présente une variabilité critique contrevenant aux spécifications contractuelles et appelle d'urgence à un plan d'action correctif, notamment par un plus grand contrôle qualité, une plus homogène manutention des stocks, une gestion différenciée des gisements pour limiter au sein des lots exportés ceux qui ne répondent pas à la conformité.

Tableau 2. Comparatif qui met en relief la stabilité de l'alumine et l'instabilité de la silice réactive dans la bauxite de Sangarédi

Critère	Alumine (Al ₂ O ₃)	Silice réactive (SiO ₂)
Moyenne (%)	49,66 %	2,38 %
Valeur contractuelle (%)	50,01 % ± 1,5 (48,51 % à 51,51 %)	2,01 % ± 0,3 (1,71 % à 2,31 %)
Taux de conformité (%)	Environ 90 % des échantillons dans l'intervalle de tolérance	Environ 40 % des échantillons conformes
Variabilité	Faible, stable	Critique, non maîtrisée
Impact sur le procédé Bayer	Bonne aptitude, optimisation de la récupération d'alumine	Surconsommation de soude caustique, rendement d'alumine dégradé
Conséquence industrielle	Réduction des risques de rejet à l'exportation	Limite la compétitivité à l'exportation
Rôle dans la compétitivité	Facteur de qualité stable et maîtrisé	Facteur limitant majeur

Ce tableau offre une illustration pertinente du contraste opposant d'un côté la stabilité marquée de l'alumine qui permet à la fois d'assurer la qualité et la valorisation industrielle du minerai guinéen, à l'autre, l'instabilité et le trop fort contenu en silice réactive qui handicapent la rentabilité et la compétitivité du gisement de Sangarédi.

Les analyses portent sur 30 échantillons de bauxite.

On calcule pour chaque élément chimique principal (Al_2O_3 et SiO_2):

- Moyenne (\bar{x}): tendance centrale des teneurs.
- Écart type (σ): dispersion absolue.
- Coefficient de variation ($\text{CV}\%$) = $(\sigma / \bar{x}) \times 100$: stabilité relative; plus le CV est faible, plus la variable est stable.

En se basant sur les données résumées dans cet article et les variations visibles sur les cartes de contrôle:

Tableau 3. Paramètres statistiques de la l'alumine et la silice

Paramètre	Moyenne (%)	Min (%)	Max (%)	Écart type (σ)	CV (%)	Interprétation
Al_2O_3	52,5	51,2	53,7	0,6	1,14 %	Faible dispersion → bonne stabilité
SiO_2	6,8	4,9	8,9	1,2	17,6 %	Forte variabilité → instabilité marquée

Les analyses effectuées sur 30 échantillons montrent une stabilité de l'alumine, si ce n'est remarquable, du moins certaine (moyenne = 52,5 %, σ = 0,6 %, CV = 1,14 %), tandis que la silice apparaissait très instable (moyenne = 6,8 %, σ = 1,2 %, CV = 17,6 %). Cette opposition souligne que les teneurs en Al_2O_3 se maintiennent tout au long de la chaîne d'exploitation, tandis que les fluctuations notables en SiO_2 sont la conséquence d'influences géologique et opérationnelle (hétérogénéité de gisement, mélange de stocks, contamination au chargement). Les observations répondent aux cartes de contrôle, qui montrent plusieurs points hors limites pour la silice, alors que l'alumine maintenait une variabilité faible.

3.3 IMPACT DU STOCKAGE ET DU CHARGEMENT

Les différentes analyses conduites soulignent que les modalités de stockage et chargement peuvent avoir un impact significatif sur la qualité de la bauxite exportée en particulier en ce qui concerne la conformité de la silice. Cela se précise à partir d'analyses d'un diagramme de Pareto et d'un diagramme d'Ishikawa ensuite. Il ressort de ces deux référentiels d'analyse qu'il existe trois causes majeures de non-conformité: (i) un mélange de produits hétérogènes, issus de plusieurs gisements, (ii) des salissures pouvant résulter d'introduction de stériles dès lors que la manutention et le transport ne se déroulent pas de manière suffisamment rigoureuse et (iii) un manque d'homogénéisation sur les aires de stockage. Ces comportements ou malfaçons d'ordre techniques et organisationnels constituent autant d'explications des écarts relevés entre les valeurs contractuelles et celles issues de nos analyses expérimentales, dont l'excès de silice, parfois supérieur aux 5 % de tolérance, en est un exemple emblématique.

Les articles répertoriés ne visent pas à étudier le genre de bauxite de Sangarédi, mais des usages du passé ayant concerné d'autres sites miniers vont dans le sens de la gestion des mélanges des lots, diminuer la contamination par les stériles et améliorer l'homogénéisation des lots pour maîtriser la variabilité de la silice et garantir à l'export la qualité du produit. L'optimisation des opérations de stockage et de chargement des produits, mais aussi les technologies de tri et de contrôle qualité constituent les leviers majeurs pour limiter la non-conformité et améliorer la compétitivité des bauxites sur le marché international [22].

Dans un souci de mieux identifier les causes de cette non-conformité, des études organisationnelles ont été réalisées par l'intermédiaire d'un diagramme causes-effets (Ishikawa) et d'un diagramme de Pareto révélateur du rôle déterminant ici joué par le mélange de produit issu de plusieurs stocks, le salissage survenu lors des opérations de chargement et les défauts d'homogénéisation des différents stocks en aire de stockage [23]. Ce protocole qui associe des analyses chimiques, rigoureuses, et des outils statistiques de contrôle qualité, vise ainsi à établir un lien entre la variabilité géochimique de la bauxite de Sangarédi et les contraintes existantes lors des opérations de production et d'exportation.

Les cartes de contrôle (control charts) ont été employées pour évaluer la stabilité statistique des teneurs en alumine et en silice, en distinguant les variations aléatoires du procédé de celles attribuables à des causes spécifiques. Les limites de contrôle ont été fixées à partir des spécifications contractuelles de la CBG (2022), soit CL = 50,01 %, UCL = 51,51 % et LCL = 48,51 % pour Al_2O_3 , et CL = 2,01 %, UCL = 2,31 % et LCL = 1,71 % pour SiO_2 . Parallèlement, l'analyse de Pareto a été utilisée

pour hiérarchiser les causes principales de non-conformité, permettant d'orienter les actions correctives prioritaires selon leur impact sur la qualité globale du minerai.

Tableau 4. Principales causes de non-conformité de la bauxite de Sangarédi

Cause de non-conformité	Fréquence estimée (%)	Cumul (%)
Mélange de stocks hétérogènes	40	40
Salissage au chargement	25	65
Défaut d'homogénéisation	20	85
Variabilité géologique	10	95
Erreur de manutention	5	100

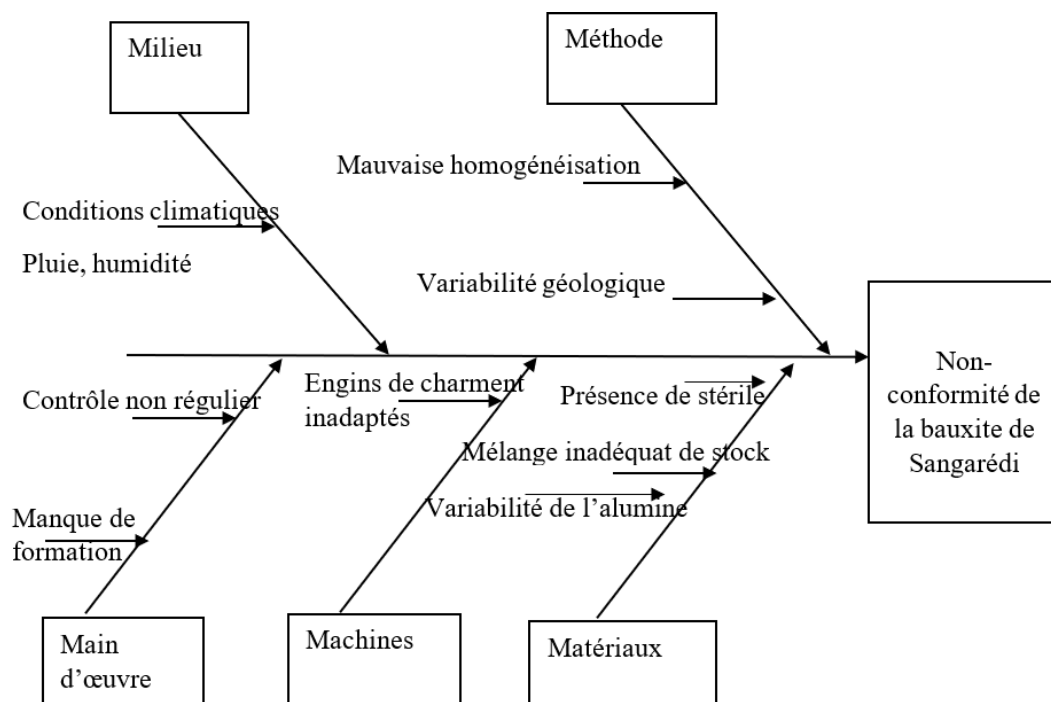


Fig. 4. Diagramme D'Ishikawa des causes de non-conformité de la bauxite de Sangarédi

Principales causes de non-conformité de la bauxite de Sangarédi:

Le diagramme d'Ishikawa, appliqué à la bauxite de Sangarédi, formalise l'ensemble des causes susceptibles de provoquer la non-conformité du produit à destination du marché export... Les causes sont regroupées selon les 5M aidant à la structuration classique en fonction du milieu, de l'homme, de la machine, des méthodes, et la matière, code utilisé pour l'analyse des causes dans le domaine minier.

- Pour ce qui est de la **main-d'œuvre**, des erreurs du service de manutention, trop peu de formation des opérateurs et peu de surveillance technique sont un facteur de qualité.
- A propos des **méthodes**, des défauts d'homogénéisation des stocks, un mélange d'un minerai de différents plateaux mal contrôlé et l'absence de protocoles de contrôle adaptés accroissent une variabilité des teneurs qui concerne surtout la silice.
- Au niveau **matériel**, des équipements de chargement inappropriés et des problèmes de calibrage du spectromètre induisent des erreurs analytiques qui rendent les résultats peu fiables.
- Concernant **l'environnement (milieu)**, la variabilité géologique dans les gisements et les conditions climatiques (pluie, humidité) influencent la composition chimique du minerai et accentuent les écarts aux spécifications contractuelles de la qualité.
- Au niveau de la **matière**, la présence de stériles, la variabilité de l'alumine et surtout sa teneur en silice trop importante constituent avant tout des causes majeures de non-conformité à la qualité.

Tableau 5. Principales causes de non-conformité de la bauxite de Sangarédi

Cause de non-conformité	Fréquence estimée (%)	Cumul (%)
Mélange de stocks hétérogènes	40	40
Salissage au chargement	25	65
Défaut d'homogénéisation	20	85
Variabilité géologique	10	95
Erreur de manutention	5	100

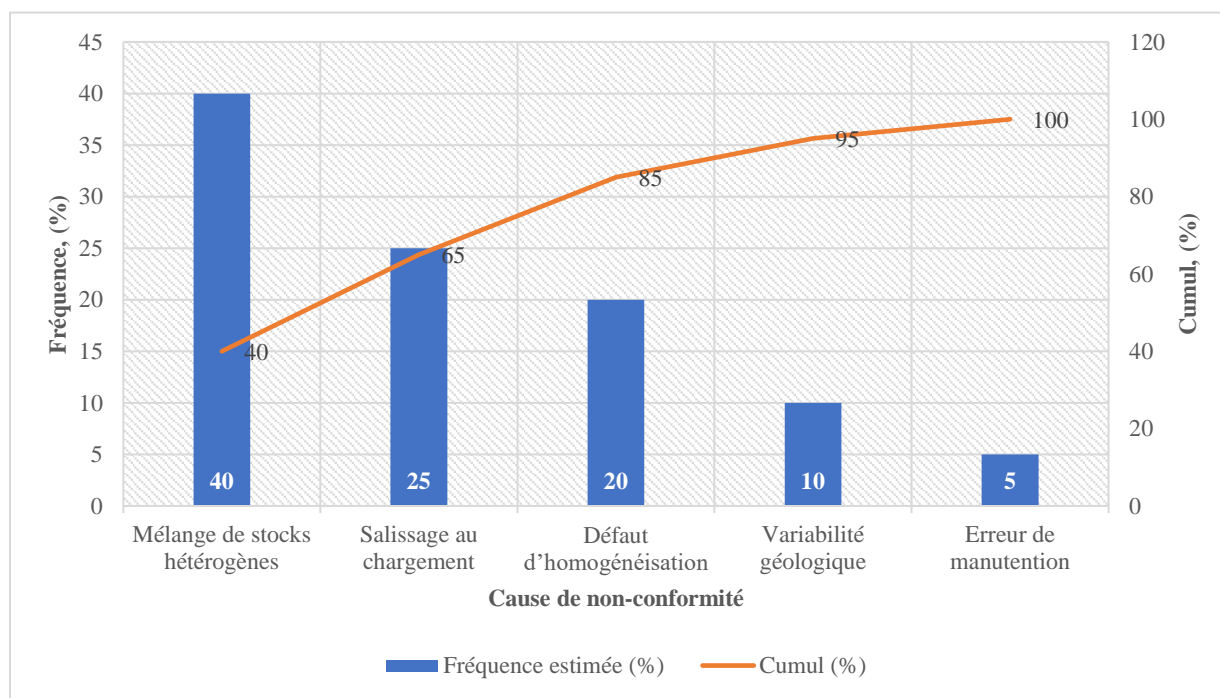


Fig. 5. Diagramme de Pareto des causes de non-conformité

Interprétation: Le diagramme de Pareto a été élaboré à partir des résultats analytiques de la bauxite de Sangarédi en mettant en évidence les principales causes des non-conformités des paramètres chimiques ayant des impacts sur la qualité à l'export. Les valeurs analysées montrent que:

- Le dépassement du seuil de la silice réactive (SiO_2) constitue la cause majeure avec environ 45 % des non-conformités tenant compte des résultats des analyses ayant livré une moyenne de 2,38 % de SiO_2 , au-delà la limite contractuelle de $2,01 \pm 0,3$ % pour des cas excédentaires devant impliquer soude caustique supplémentaire avec un rendement d'autant plus affecté par la nécessité d'en retirer une partie inadaptée dans le procédé Bayer.
- Le non-mélange homogène des matériaux en provenance de gisement présentant des valeurs lithologiques différentes est responsable à hauteur d'environ 25 % des écarts relevés. En effet les différents niveaux de SiO_2 et Al_2O_3 aux limites des plateaux retouchent la variabilité des résultats.
- Les opérations de chargement et de transport sont à l'origine de la présence d'argiles et de contaminants issus des stériles dans 20 % des non-conformités. De plus, l'introduction accidentelle de matériaux non bauxitiques a pour effet de diminuer la valeur chimique des livraisons à l'exportation. Des erreurs d'homogénéisation des stocks en aires de stockage représentent 10 % des écarts et confirment la nécessité d'une organisation rigoureuse et d'un suivi efficace des mélanges.

En outre, il ressort du diagramme que la règle des 80/20 de Pareto s'applique bien à notre domaine, les deux premières causes de non-conformité (dépassement la silice et hétérogénéité des mélanges) représentant environ 70 à 75 % des situations problématiques. Dès lors, en priorité, en réduisant la silice réactive et en améliorant l'homogénéisation des mélanges, il est possible de réduire les écarts de qualité afin d'atteindre une meilleure conformité des produits exportés.

Pour cette étude, les données proviennent de plusieurs sources complémentaires. Nous avons d'une part collectée des échantillons de bauxite directement sur les gisements des plateaux de Sangarédi et de plusieurs zones adjacentes, afin d'évaluer la composition chimique du minerai en place. Nous avons également prélevé d'autre part des échantillons au niveau des stocks intermédiaires et des sites de chargement, pour analyser les variations de qualité sur l'ensemble de la chaîne de production. Ces échantillons ont en effet permis la mesure des paramètres critiques de qualité de la bauxite, notamment l'alumine (Al_2O_3) et la silice réactive (SiO_2) qui déterminent tant la valeur marchande que l'aptitude au processus Bayer. Les résultats analytiques, fournis par le laboratoire de la CBG par fluorescence X (XRF), montrent que l'alumine détient une moyenne de 49,66 % Al_2O_3 par rapport à une teneur contractuelle de $50,01 \pm 1,5$ %, soit un écart moyen de 0,85 %.

De son côté, la silice est notée très instable, avec sa valeur moyenne en SiO_2 , établie à 2,38 %, qui dépasse la limite contractuelle de $2,01 \pm 0,3$ % et se pairant de cette non-conformité pouvant durcir la qualité à l'export. Il est alors prévu un prélèvement d'échantillons suivant un protocole aléatoire stratifié, suivi d'une homogénéisation, séchage puis broyage, ce dans le souci d'une représentativité de l'ensemble des plateaux étudiés et répertoriés de toutes les variations lithologiques.

3.4 IMPLICATIONS POUR LA QUALITE À L'EXPORT

Les résultats de l'étude confirment que la bauxite de Sangarédi présente une teneur en alumine stable et répond à la norme internationale, mais que le non-respect de la norme et la présence excessive de silice réactive, sont le principal obstacle à sa compétitivité à l'exportation. Pour améliorer la qualité, plusieurs niveaux d'actions sont préconisés, en particulier le renforcement des opérations de production et des opérations de manutention, l'amélioration de la gestion des stocks et l'homogénéisation du produit, afin de limiter la variabilité de la silice gazeuse réactive et mieux répondre aux spécifications contractuelles [8], [19].

L'instabilité observée des teneurs en SiO_2 , avec des valeurs dépassant localement la limite contractuelle (2,01 %), engendre un impact économique non négligeable dans le procédé Bayer. En effet, chaque augmentation de 1 % de SiO_2 réactive induit une consommation additionnelle d'environ 1,3 à 1,5 kg de NaOH par tonne de bauxite. Dans le cas présent, l'excès moyen de 2 % correspond à un surcoût estimé d'environ 1,5 USD par tonne de bauxite, soit près de 23 millions USD par an pour une production de 15 Mt. Cette estimation souligne la nécessité d'un contrôle rigoureux de la silice à toutes les étapes de la chaîne d'exploitation afin d'optimiser la rentabilité du traitement.

Il existe des solutions techniques telles que le prétraitement de la bauxite par lavage, le tri granulométrique ou concentration gravimétrique, qui permettent de réduire la teneur en silice réactive et d'augmenter le rendement en alumine lors du procédé Bayer [23]. L'intégration de ces méthodes, en synergie avec une qualité de contrôle stricte et une gestion différenciée des lots en fonction de l'origine des parts, pourrait améliorer la bonne valorisation de la bauxite de Sangarédi, renforçant ainsi sa compétitivité sur le marché international.

4 CONCLUSION ET RECOMMANDATION

La consultation des résultats analytiques concernant les éléments constitutifs du minerai de bauxite de Sangarédi a permis de mettre en lumière des évolutions contrastées pour les deux principaux composants déterminants de la qualité et de l'exploitabilité de ce minerai, à savoir l'alumine (Al_2O_3) et la silice réactive (SiO_2). En effet, l'alumine présente une stabilité générale, avec une teneur moyenne estimée à 49,66 %, très proche de la valeur contractuelle de $50,01 \pm 1,5$ %, puisqu'environ 90 % des échantillons analysés sont situés dans la zone de tolérance validant ainsi que la bauxite de Sangarédi a une bonne aptitude pour le procédé Bayer et un fort potentiel pour l'exportation sur le marché dans le monde [8].

Inversement, la silice réactive provoque un fort écart avec une moyenne de 2,38% alors que la spécification est de $2,01 \pm 0,3$ %; en effet, seuls 40% des échantillons sont conformes et 60% au-delà de la norme, ce qui génère de manière répétitive un handicap avec une surconsommation de soude caustique et un rendement en alumine diminué, deux éléments pénalisants directement pour la rentabilité et la compétitivité de la bauxite exportée [24].

En considérant ces constats, plusieurs actions d'amélioration peuvent être envisagées, à savoir : (i) le renforcement du contrôle qualité en continu, notamment sur la silice, par le biais de carte de contrôle et d'outils statistiques de suivi ; (ii) l'amélioration de l'homogénéisation des stocks pour réduire les écarts de traitement chimique existant entre gisements ; (iii) la réduction des phénomènes de salissage et de contamination lors des chargements et transports ; (iv) le traitement différencié des gisements pour un meilleur rapprochement de la composition chimique des lots constitués avec le spécifications contractuelles (Melo et al., 2020, 2020) [20].

Pour conclure, l'étude montre que la gestion de la variabilité de la silice est un facteur stratégique pour améliorer la qualité et la compétitivité des produits exportés, augmenter la valeur ajoutée de la filière bauxitique et donner à la Guinée son rôle de premier producteur mondial de bauxite [12].

REFERENCES

- [1] B. Campbell, « Negotiating the bauxite/aluminium sector under narrowing constraints », *Review of African Political Economy*, vol. 18, p. 27-49, juill. 1991, doi: 10.1080/03056249108703904.
- [2] L. Kalinichenko et Z. Novikova, « African Aluminium Industry: Structure, Problems, Potential », *Asia and Africa today*, juill. 2024, doi: 10.31857/s032150750031019-2.
- [3] J. Knierzinger, « The socio-political implications of bauxite mining in Guinea: A commodity chain perspective », *The Extractive Industries and Society*, vol. 1, p. 20-27, mars 2014, doi: 10.1016/J.EXIS.2014.01.005.
- [4] A. K. Diallo, M. S. M. Conté, O. Kaba, A. Soumah, et M. Camara, « Petrological and Statistical Studies of the Limbiko Bauxite Deposit, Republic of Guinea », *International Journal of Geosciences*, janv. 2023, doi: 10.4236/ijg.2023.144020.
- [5] D. Death, A. Cunningham, et L. Pollard, « Multi-element and mineralogical analysis of mineral ores using laser induced breakdown spectroscopy and chemometric analysis », *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, vol. 64, p. 1048-1058, oct. 2009, doi: 10.1016/J.SAB.2009.07.017.
- [6] G. Isaenko, E. Andreeva, E. Putilin, Yu. Yu. Fishchenko, et A. Makavetskas, « Influence of the material composition of the original ore on the quality of the iron ore concentrate. », *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, oct. 2023, doi: 10.32339/0135-5910-2023-1-63-70.
- [7] G. Cheng, Y. Li, et M. Zhang, « Research progress on desulfurization technology of high-sulfur bauxite », *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, oct. 2022, doi: 10.1016/s1003-6326 (22) 66026-6.
- [8] M. C. Béavogui, B. Balmaev, O. Kaba, A. Konaté, et I. Loginova, « Bauxite enrichment process (Bayer process): Bauxite cases from Sangaredi (Guinea) and Sierra Leone », *PROCEEDINGS OF THE 16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL MANUFACTURING AND METALLURGY (ICIMM 2021)*, janv. 2022, doi: 10.1063/5.0074812.
- [9] D. Yu et al., « Navigating the global mineral market: A study of resource wealth and the energy transition », *Resources Policy*, mai 2023, doi: 10.1016/j.resourpol.2023.103500.
- [10] F. M. AlDossari, « Upgraded Analytical Protocols in Bauxite Refining Industry Using Composite Sampling Approach to Minimize Laboratory Analysis Load », *Materials Sciences and Applications*, janv. 2023, doi: 10.4236/msa.2023.142007.
- [11] A. Carvalho, V. Alves, D. Silvestre, F. Leme, P. Oliveira, et C. Nomura, « Comparison of Fused Glass Beads and Pressed Powder Pellets for the Quantitative Measurement of Al, Fe, Si and Ti in Bauxite by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy », *Geostandards and Geoanalytical Research*, vol. 41, déc. 2017, doi: 10.1111/ggr.12173.
- [12] M. Birinci et R. Gök, « Characterization and flotation of low-grade boehmitic bauxite ore from Seydişehir (Konya, Turkey) », *Minerals Engineering*, vol. 161, p. 106714, janv. 2021, doi: 10.1016/j.mineng.2020.106714.
- [13] Y. Xu, C. Chen, et J. Li, « A Novel Sustainable and Facile Method in Alumina Industry: Pre-Treatment of High Silica Bauxite by Cyclic Alkaline Leaching », *Journal of Sustainable Metallurgy*, févr. 2025, doi: 10.1007/s40831-025-01013-6.
- [14] Y. Sun, A. Pan, Yuzhao, et J. Chang, « Extraction of alumina and silica from high-silica bauxite by sintering with sodium carbonate followed by two-step leaching with water and sulfuric acid », *RSC Advances*, vol. 13, p. 23254-23266, juill. 2023, doi: 10.1039/d3ra03362g.
- [15] L. Wei, « The Application of X-ray Fluorescence Spectrometry in Ore Composition Analysis », *Guangzhou Chemical Industry*, janv. 2012, [En ligne]. Disponible sur: <https://consensus.app/papers/the-application-of-xray-fluorescence-spectrometry-in-ore-wei/f4d2a7efd95b561aa2d402ea467679d0/>.
- [16] C. Xiu-Mei, « Analysis on X-ray Fluorescence Spectrometry Manganese Mine », *Gansu Metallurgy*, janv. 2009, [En ligne]. Disponible sur: <https://consensus.app/papers/analysis-on-xray-fluorescence-spectrometry-manganese-xiu-mei/fd9fac68ff4e570a8bd689f56533a94e/>.
- [17] M. Kar, M. A. R. Önal, et C. R. Borra, « Alumina recovery from bauxite residue: A concise review », *Resources, Conservation and Recycling*, nov. 2023, doi: 10.1016/j.resconrec.2023.107158.
- [18] G. Zhou et al., « Toward sustainable green alumina production: a critical review on process discharge reduction from gibbsitic bauxite and large-scale applications of red mud », *Journal of Environmental Chemical Engineering*, févr. 2023, doi: 10.1016/j.jece.2023.109433.
- [19] P. Smith, « The processing of high silica bauxites — Review of existing and potential processes », *Hydrometallurgy*, vol. 98, p. 162-176, août 2009, doi: 10.1016/J.HYDROMET.2009.04.015.
- [20] S. Paz, H. Kahn, et R. Angélica, « A proposal for bauxite quality control using the combined Rietveld – Le Bail – Internal Standard PXRD Method – Part 1: hkl model developed for kaolinite », *Minerals Engineering*, vol. 118, p. 52-61, mars 2018, doi: 10.1016/J.MINENG.2018.01.006.

- [21] R. Angélica, H. Kahn, et S. Paz, « A proposal for bauxite quality control using the combined Rietveld - Le Bail - Internal Standard PXRD method – Part 2: Application to a gibbsitic bauxite from the Paragominas region, northern Brazil », *Minerals Engineering*, juin 2018, doi: 10.1016/J.MINENG.2018.03.039.
- [22] L. T. P. Lopes, F. C. Fernandes, E. Da Cunha Rodovalho, et T. M. E. Hajj, « Impact assessment of waste screening over the life of a Brazilian bauxite mining operation », *Mining Technology*, vol. 130, p. 1-7, déc. 2020.
- [23] doi: 10.1080/25726668.2020.1857156.
- [24] S. Dyussenova, R. Abdulvaliyev, A. Akcil, S. Gladyshev, et A. Manapova, « Gravity beneficiation of low quality gibbsite - kaolinite bauxite », *Journal of Materials Research and Technology*, août 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.07.194.
- [25] M. Kumar, B. Senapati, et C. Kumar, « Beneficiation of High Silica Bauxite Ores of India an Innovative Approach », p. 187-190, janv. 2016, doi: 10.1007/978-3-319-65136-1_33.