

Evaluation quantitative des bauxites de karst

Gy. BÁRDOSSY

L'auteur a évalué les gisements connus des bauxites de karst de notre globe. Il a calculé leur quantité, puis il a effectué des calculs statistiques de leurs paramètres gîtologiques, pétrographiques, minéralogiques et géochimiques. Il a établi des valeurs moyennes pour le total des bauxites de karst et pour chaque ère géologique. Des rapports de corrélation ont été établis entre les différents paramètres de la bauxite.

Se basant sur les résultats de ces calculs une nouvelle classification pétrographique des bauxites a été élaborée. De plus, l'auteur propose un nouveau système génétique des minéraux de la bauxite.

La position tectonique de chaque gisement a été déterminée. Une corrélation a été démontrée entre la situation tectonique et les paramètres pétrographiques et minéralogiques de la bauxite. L'auteur a démontré un rapport étroit entre l'évolution tectonique du globe et la formation des bauxites.

I. INTRODUCTION

Au cours de ce travail les données gîtologiques, pétrographiques, minéralogiques et géochimiques de tous les gisements connus des bauxites de karst ont été évaluées par des méthodes statistiques. Nos connaissances des bauxites latéritiques sont moins complètes, les recherches se limitant en général à la partie exploitable de ces gisements. C'est pourquoi, à notre avis, une évaluation statistique des bauxites latéritiques n'est pas encore possible.

Aussi, pour les bauxites de karst le degré de la connaissance de leurs gisements est très différent. Heureusement les gisements les plus importants sont en général les mieux connus. Ceci nous permet d'estimer que les valeurs moyennes de nos calculs ont une consistance assez bonne, les déviations ne dépassant pas $\pm 10\%$. Bien entendu, pour les gisements particuliers les déviations peuvent être plus larges dépendant du nombre et de la valeur des données dont nous disposons.

Le but de notre évaluation étant scientifique nous avons tenu compte des gisements entiers, c'est-à-dire nous avons inclus la bauxite déjà exploitée et les parties inexploitable des gisements aussi.

Selon nos calculs, 65% des bauxites connus de notre globe sont du type latéritique; 31% sont du type karstique et 4% seulement du type sédimentaire ou type Tikhwin.

La répartition géographique des bauxites de karst est la suivante :

Région de la Méditerranée	40,5 % en 100 gisements
Région de la mer Caraïbe	24,6 % » 11 »
Région de l'Asie orientale	16,6 % » 9 »
Région de l'Oural, Sibérie, Asie centrale	15,7 % » 33 »
Iran, Afganistan, Pakistan Kashmir	1,7 % » 12 »
Iles du Pacifique occidental	0,9 % » 5 »
	100,0 % en 170 gisements

Il se voit que les bauxites de karst sont répartis sur un territoire très limité de notre globe. La plupart se trouve dans la région de la Méditerranée et de la mer Caraïbe. En comparant la quantité de la bauxite et le nombre des gisements on constate que dans la région Caraïbe et en Asie orientale une grande quantité de bauxite est concentrée en relativement peu de gisements. Au contraire, dans les autres territoires de l'Asie et du Pacifique beaucoup moins de bauxite est répartie dans plus de deux fois de gisements; c'est-à-dire que la plupart de ces gisements sont beaucoup moins larges.

La Jamaïque constitue le plus grand gisement de bauxite de karst connu sur notre globe.

2. GITOLOGIE

Nous distinguons cinq types de dépôts des bauxites de karst. En calculant le tonnage de chaque gisement nous avons obtenu les valeurs suivantes :

Type méditerranéen	73,8 % en 135 gisements
Type Kasachstan	22,4 % » 26 »
Type Ariège	2,4 % » 4 »
Type des gisements ultérieurement remaniés	1,3 % » 4 »
Type Tulska	0,1 % » 1 »
	100,0 % en 170 gisements

La plupart des gisements sont donc du type méditerranéen. Dans les pays de l'Ouest les gisements de type Kasachstan son moins connus, car ils se trouvent presque tous sur le territoire de l'URSS et de la Chine. Soulignons qu'il y a des transitions gîtologiques entre le type méditerranéen, de Kasachstan et de l'Ariège, mais le nombre de tels gisements est restreint.

3. CARACTÈRES PÉTROGRAPHIQUES

Nous avons calculé pour chaque gisement le pourcentage des différentes roches bauxitiques dont il est composé. Pour ce travail nous avons utilisé la classification pétrographique présentée par G. Bârdossy et J. Nicolas au colloque de l'ICSOBA de Leoben en 1971. Pour ces calculs plus de 12 000 données ont été utilisées. La fréquence des différentes roches bauxitiques pour la somme des bauxites de karst est la suivante :

	%
Bauxite (sensu stricto)	39,2
Bauxite pauvre en fer	4,4
Bauxite ferrugineuse	8,6
Bauxite argileuse	20,2
Bauxite (sensu lato)	72,4

	%
Argile bauxitique	13,9
argile (« pseudobauxite »)	5,5
Minerai de fer bauxitique-argileux	3,5
Argile bauxitique ligniteuse	1,9
Minerai de fer bauxitique	1,6
Bauxite calcaire, bauxite dolomitique	0,7
Brèche de calcaire à ciment bauxitique	0,4
Bauxite phosphatée, phosphate bauxitique	0,1
	100,0

La roche la plus fréquente des gisements est donc la bauxite proprement dite. Sa proportion est la plus haute dans les gisements du type méditerranéen, elle atteint en plusieurs gisements 70-80%. Elle est la plus haute dans le gisement de l'île de Rennel, où elle dépasse 90%. Au contraire dans les gisements du type Kasachstan sa proportion en général n'atteint pas 20%.

La bonne bauxite passe le plus souvent vers les argiles, mais avec une nette diminution de fréquence : bauxite 39,2% — bauxite argileuse 20,2% — argile bauxitique 13,9% — argile (« pseudobauxite ») 5,5%. Vers les minerais de fer cette diminution de fréquence est encore plus nette : bauxite 39,2% — bauxite ferrugineuse 8,6% — minerai de fer bauxitique 1,6%. Dans les gisements latéritiques cette transition est beaucoup plus fréquente : nous connaissons des larges gisements de fer latéritique étroitement liés aux bauxites latéritiques. De plus, on connaît de larges gisements de manganèse latéritique, mais pas un seul gisement de bauxite de karst passant dans un minerai de manganèse.

Bien que les bauxites de karst soient étroitement associés aux roches carbonatées les transitions de bauxite-calcaire et de bauxite-dolomie sont très rares (0,7%). Elles se limitent au type méditerranéen. Les roches de transition vers les lignites sont un peu plus fréquentes (1,9%). Ce fait s'explique par la fréquence des couches de lignite au toit immédiat des gisements. La transition vers les roches phosphatées est la plus rare, elle se limite aux îles du Pacifique.

Nous avons trouvé que les *textures* des bauxites de karst sont constituées par 15 éléments texturaux. Par une combinaison différente de ces éléments on peut distinguer 70 textures dans les bauxites de karst. Nous avons calculé la fréquence de ces textures à la base de plus de 5 000 déterminations de texture ; dont nous démontrons ici les plus fréquentes :

	%
1. Texture pélimorphe	25,7
2. Texture oolitique et pisolitique	9,6
3. Texture microdétritique-arénitique	7,4
4. Texture conglomératique-arénitique	4,8
5. Texture pisolitique	3,0
6. Texture arénitique	2,8
7. Texture arénitique-graveleuse	2,7
8. Texture microdétritique	2,6
9. Texture microdétritique-pélitomorphe	2,1
10. Texture oolitique	2,0
	62,7

Donc les 60 autres textures n'ont qu'une fréquence très limitée. Pour les bauxites latéritiques nous pouvons donner un ordre de fréquence sans valeurs de pourcentage :

1. Texture relicte
2. Texture collomorphe

3. Texture pisolitique et méga-pisolitique
4. Texture péliteomorphe
5. Texture concrétionnée

La différence est considérable. Pour les bauxites de karst les textures détritiques sont spécifiques témoignant de leurs remaniements répétés. Les textures spécifiques des bauxites latéritiques se formaient sur place par l'altération latéritique de la roche mère (texture relicte) ou par la mobilisation colloïdale de leurs composants (textures collomorphes et concrétionnées). Les textures communes des bauxites de karst et des bauxites latéritiques sont la texture péliteomorphe et la texture pisolitique et oolitique.

Selon l'opinion générale, les bauxites de karst sont caractérisées par un manque de *stratification*. Nos études systématiques n'ont pas confirmé cette opinion. Nous avons trouvé le rapport suivant entre l'âge des gisements et le degré de leur stratification :

	<i>Non stratifié</i>	<i>Faiblement stratifié</i>	<i>Bien stratifié</i>	<i>Sans données</i>
Gisements néogènes	13	—	—	—
Gisements paléogènes	36	4	—	2
Gisements mésozoïques	67	24	—	2
Gisements paléozoïques	3	11	7	1

Ce tableau ne veut pas dire que tout le gisement est bien stratifié, il indique plutôt une tendance générale. Etant donné que la stratification est un caractère syngénétique, nous devons conclure que les conditions de la sédimentation et l'accumulation des bauxites ont changé au cours des temps géologiques. Ce sont surtout les gisements paléozoïques dont les conditions de sédimentation devaient différer le plus fortement de celles du Néogène et de nos jours. A cet égard, nous devons limiter la valabilité générale de notre actualisme.

La couleur de la bauxite est significative de sa composition minéralogique et de son état géochimique : les couleurs rouge, rose et violet sont dues à l'hématite ; les couleurs jaune, jaune-brun et brune à la goethite ; la couleur verte aux chlorites ; les couleurs grise et noire à la matière organique. Du point de vue géochimique les couleurs rouge, rose, violet, jaune, jaune-brun et brune caractérisent les bauxites oxydées ; les couleurs verte, grise, noire les bauxites réduites. Les bauxites blanches se sont formées aussi par des processus de réduction, accompagnée par une déferrification complète. La plupart des bauxites bigarrées est à l'état oxydé.

A la base de plus de 15 000 données nous avons calculé la fréquence de ces couleurs dans les bauxites de karst :

	%
Rouge, rose, violet	54,8
Gris	16,7
Bigarré	11,3
Jaune, jaune-brun, brun-jaunâtre	8,9
Vert	5,4
Blanc	2,3
Noir	0,6
	100,0

Nous avons calculé aussi la fréquence de ces couleurs par chaque époque géologique:

<i>Age des gisements</i>	<i>Rouge violet</i> %	<i>Jaune</i> %	<i>Bigarré</i> %	<i>Blanc</i> %	<i>Vert</i> %	<i>Gris</i> %	<i>Noire</i> %
Quaternaire	100,0	—	—	—	—	—	—
Pliocène-miocène	76,8	10,2	8,6	4,4	—	—	—
Oligocène	57,3	3,1	31,6	—	0,4	7,5	—
Eocène-paléocène	48,1	18,2	21,7	5,3	1,1	5,4	0,2
Crétacé supérieur	60,9	12,6	18,4	1,6	1,2	5,3	—
Crétacé inférieur	72,4	7,2	13,3	1,0	1,8	4,0	0,3
Jurassique	81,2	11,4	0,2	0,1	3,9	3,2	—
Triassique	71,6	—	11,5	0,4	8,4	8,1	—
Permien	12,8	—	5,4	—	26,4	48,2	7,2
Carbonifère	5,9	0,4	2,0	0,7	18,2	72,5	0,3
Dévonien	54,8	7,4	5,2	—	11,5	16,3	4,8
Ordovicien	50,0	—	—	—	—	35,0	15,0
Cambrien	83,3	—	—	—	15,0	—	1,7

Les couleurs des bauxites tertiaires indiquent une prédominance des conditions oxydantes de leur formation. Dans les bauxites mésozoïques les fréquences des couleurs indiquant des conditions de réduction augmentent nettement. Les bauxites permienues et carbonifères sont les plus réduites avec une prédominance de la couleur grise. Dans le Paléozoïque inférieur il y a de nouveau plus de bauxite oxydée. Nous avons évalué en détail les processus d'oxydo-réduction qui peuvent être soit syngénétiques, soit diagénétiques, soit épigénétiques. La dimension limitée de cette conférence ne nous permet pas de les exposer, nous voulons les donner dans un livre consacré à l'évaluation des bauxites de karst, à paraître dans un proche avenir.

4. COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

On a dénombré, jusqu'à nos jours, 126 minéraux dans les bauxites de karst, mais il n'y en a que 40 dont la quantité moyenne dépasse 1 % dans un dépôt entier. Ces derniers sont les minéraux essentiels des bauxites. Nous avons recherché dans combien de gisements ils sont représentés et voilà le résultat :

1. Kaolinite	dans 150 gisements
2. Hématite	» 142 »
3. Anatase	» 135 »
4. Goethite	» 120 »
5. Boehmite	» 113 »
6. Gibbsite	» 73 »
7. Diaspore	» 70 »
8. Maghemite	» 32 »
9. Pyrite	» 25 »
10. Chlorite trioctaédrique	» 24 »

Il est suprenant que ce ne soient pas les minéraux d'aluminium, mais la kaolinite, l'hématite, l'anatase et la goethite qui sont répartis dans le plus grand nombre de gisements.

Notons aussi que la boehmite est presque deux fois plus répandue que la gibbsite et le diaspoire. Les autres trente minéraux essentiels sont présents dans un nombre limité de gisements.

Nous avons effectué à part nos calculs statistiques pour les minéraux d'aluminium, de fer, de titane et les silicates. Dans chaque groupe nous avons comparé les rapports de leurs minéraux. Dans notre laboratoire nous avons fait plus de 2 000 déterminations quantitatives de la composition minéralogique, plus de 2 000 déterminations semi-quantitatives ; enfin, nous avons utilisé plus de 7 000 données publiées dans la littérature. En somme, 11 000 données minéralogiques ont été évaluées.

Dans le groupe des *minéraux d'aluminium* la fréquence des différents types minéralogiques est la suivante :

	%
Bauxite gibbsitique	24,1
Bauxite boehmitique	22,7
Bauxite diasporique	20,0
Bauxite boehmitique-gibbsitique	15,3
Bauxite boehmitique-diasporique	14,0
Bauxite gibbsitique avec corindon	2,2
Bauxite diasporique avec corindon	0,8
Bauxite à corindon (émeri)	0,6
Bauxite à gibbsite-boehmite-diaspoire	0,3
	100,0

La fréquence sommaire des types à un composant est 67,4%, celle des types à deux composants 32,3% et celle du type à trois composants 0,3%. Ceci démontre que chez les minéraux d'aluminium les processus minéralogiques favorisaient la formation des types à un composant correspondant à un état d'équilibre thermodynamique. Chez les types à deux composants cet équilibre doit être moins parfait. La fréquence minime des types à trois composants s'explique par le déséquilibre thermodynamique de la coexistence de trois minéraux d'aluminium. Chez les types simples la fréquence de la bauxite gibbsitique, boehmitique et diasporique est presque la même. Dans les bauxites latéritiques c'est le type gibbsitique qui prédomine, la boehmite est beaucoup moins fréquente et le diaspoire très rare. Cette grande différence s'explique en partie par les différentes conditions physico-chimiques de leur formation, en partie par les processus diagénétiques et épigénétiques qui influençaient considérablement la composition minéralogique des bauxites de karst.

La fréquence de ces types minéralogiques dans les époques géologiques est la suivante:

Age des gisements	Type minéralogique								
	Gibbsite	Gibbsite boehmite	Gibbsite boehmite diaspoires	Gibbsite corindon	Boehmite	Boehmite diaspoires	Diaspoires	Diaspoires corindon	Corindon
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Quaternaire	83,4	16,6	—	—	—	—	—	—	—
Pliocène-miocène	64,6	34,4	—	—	1,0	—	—	—	—
Oligocène	5,3	17,3	—	—	6,2	28,9	42,3	—	—
Eocène-paleocène	29,0	34,2	0,1	9,7	20,7	3,2	3,1	—	—
Crétacé supérieur	11,0	9,0	0,1	4,0	49,6	12,7	13,6	—	—
Crétacé inférieur	13,6	1,4	2,1	1,1	61,2	9,1	11,2	0,5	—
Jurassique	—	—	—	—	60,0	37,5	2,5	—	—
Triasique	4,0	—	1,0	—	27,0	40,5	26,0	1,5	—
Permien	—	—	—	—	—	23,9	53,6	12,6	9,9
Carbonifère	3,0	2,3	—	—	2,4	26,4	64,3	1,1	0,5
Dévonien	—	—	—	—	18,6	33,8	42,8	2,7	2,7
Ordovicien	—	—	—	—	—	—	50,0	50,0	—
Cambrien	—	—	—	—	—	50,0	50,0	—	—

Il se voit bien que les bauxites tertiaires sont les plus gibbsitiques, celles d'âge mésozoïque sont les plus boehmitiques et celles d'âge paléozoïque les plus diasporiques. Il y a ainsi une tendance générale de la composition minéralogique qui correspond à l'augmentation de l'âge des gisements. Nous avons analysé séparément les fréquences de chaque époque géologique. Dans la plupart des cas nous avons trouvé un rapport direct avec le tectonisme : plus le gisement est tectonisé, plus la bauxite est diasporique. Au contraire les gisements calmes, non disloqués sont les plus gibbsitiques. Mais ce rapport n'est pas sans exceptions, car des facteurs physico-chimiques (pH, Eh, dissolutions et précipitations) influençaient aussi la composition minéralogique des gisements.

Des calculs pareils ont été effectués pour les autres groupes minéralogiques aussi. Nous n'avons pas la place d'exposer ici des résultats, ils seront publiés dans le livre mentionné ci-dessus.

5. LES RAPPORTS ENTRE LES BAUXITES ET L'ÉVOLUTION TECTONIQUE

La position tectonique de chaque gisement était déterminée et selon le tonnage les pourcentages de fréquence calculés : 85,6 % des bauxites de karst se trouvent dans des zones orogéniques, 14,4 % sur les plaques continentales et rien sur les plaques océaniques. Au contraire, environ 90 % des bauxites latéritiques se trouvent sur les plaques continentales, 5 % sur les plaques océaniques et 5 % sur les zones orogéniques. A notre avis, cette différence est la raison fondamentale de leur différente composition et genèse.

La répartition des bauxites de karst dans les zones orogéniques est la suivante :

Dans les chaînes géosynclinales	70,4 %
Dans les chaînes intracontinentales	7,3 %
Dans les massifs intermédiaires	7,9 %
	85,6 %

Il y a environ la même quantité de bauxite dans les chaînes miogéosynclinales et eu-géosynclinales.

Il y a un rapport très étroit entre le type géologique et la position tectonique des gisements : pratiquement tous les gisements du type méditerranéen et du type Ariège se trouvent dans les formations des chaînes orogéniques ; tous les gisements du type Kasachtan sont situés sur des plaques continentales ou dans des formations postorogéniques au-dessus des zones orogéniques déjà consolidées.

Il y a un rapport net entre l'âge de la formation des bauxites et l'évolution des chaînes orogéniques : il ne se formait pas de gisements pendant la première phase de l'évolution géosynclinale, caractérisée par une subsidence et une sédimentation marine, continue. La phase suivante était la plus favorable pour la formation des gisements : de courtes émergences alternaient avec les subsidences dans une mer peu profonde. Sur les territoires émergés les roches carbonatées se karstifiaient et devenaient le mur de la bauxite. Le relief était peu accidenté, ainsi l'érosion ne pouvait pas entraîner les gisements déjà formés. La phase orogénique proprement dite augmentait considérablement le relief de la région donnée suivi par une forte érosion et sédimentation détritique. La bauxite formée pendant cette période était érodée. Pour la même raison très peu de bauxite pouvait s'accumuler pendant toute la période tardi-géosynclinale. C'est après la terminaison de l'orogénèse — pendant la période post-orogénique que la formation de bauxite recommence. Nous avons trouvé que les gisements formés pendant l'évolution orogénique sont du type méditerranéen et ceux formés pendant la phase post-orogénique sont du type Kasachstan.

Le pourcentage de la quantité des bauxites de karst formées pendant les époques géologique est le suivant :

	%
Quaternaire	1,2
Pliocène-Miocène	24,4
Oligocène	0,6
Eocène-Paléocène	13,3
Crétacé supérieur	20,0
Crétacé inférieur	8,1
Jurassique	3,2
Triasique	4,0
Permien	3,1
Carbonifère	15,9
Dévonien	5,9
Silurien	—
Ordovicien	0,1
Cambrien	0,2
	100,0

On voit bien que l'intensité de la formation des bauxites de karst changeait d'une manière cyclique. Ceci est en bon rapport avec la succession tectonique exposée ci-dessus : chaque maximum de l'intensité correspond à une période « bauxitisante » de l'évolution d'une chaîne orogénique. Mais il y a aussi une augmentation générale dans cette évolution qui se voit mieux si nous regardons les pourcentages des ères géologiques entières:

Tertiaire et Quaternaire	39,6 % pendant 65 millions d'années
Mésozoïque	35,3 % pendant 160 millions d'années
Paléozoïque	25,1 % pendant 345 millions d'années

Les raisons de cette évolution ne sont pas encore éclaircies, mais elle est certainement en relation avec l'évolution générale de la sédimentation terrestre. Il est très probable que l'augmentation de la formation des roches carbonatées a eu un rôle dans cette évolution.

*Académie des Sciences de Hongrie
Kossuth ter 18, 1055 Budapest V (Hongrie)*