

LES PHENOMENES KARSTIQUES DANS LES PROCESSUS DE LA BAUXITISATION SUR SUBSTRAT CARBONATE. EXEMPLES DE GISEMENTS DU SUD-EST DE LA FRANCE

par

Jean-Louis GUENDON¹ & Claude PARRON²

(6 figures)

RESUME. - L'analyse des distributions verticales et latérales des faciès, de la minéralogie et de la géochimie dans les formations bauxitiques a permis d'apporter quelques résultats nouveaux concernant les mécanismes de la bauxitisation et ses relations avec la karstification du substratum.

- Verticalement, ces distributions consistent en suites évolutives, à différenciation croissante vers le sommet des profils (argiles kaoliniques à la base, passant progressivement à des bauxites pisolitiques gibbsitiques au sommet), caractéristiques d'une altérite, *in situ*, de type ferrallitique.

- Latéralement, elles sont en relation avec le relief karstique du mur, qui, avec ses dômes et ses pitons, métriques à décamétriques, aux formes arrondies, séparés par des dépressions en entonnoir, correspond à une morphologie acquise par dissolution sous couverture. Dans les dépressions, la bauxite est en effet plus évoluée, à tous les points de vue: plus pisolitique, plus gibbsitique et moins siliceuse, que sur les dômes voisins. Le degré d'altération est donc croissant vers les dépressions karstiques, c'est-à-dire vers les exutoires hydrologiques.

Le processus de bauxitisation apparaît ainsi synchrone du processus de karstification et chaque dépression, et ses versants, avec sa couverture bauxitique, constitue une unité géochimique évolutive, dans laquelle la répartition des faciès, de la minéralogie et de la géochimie résulte du jeu simultané de l'évolution latéritique et de l'évolution karstique.

ABSTRACT. - Karst phenomena in processes of bauxitization on carbonate rocks. Examples of deposits of the South of France.

Analysis of vertical and lateral disposition of facies, mineralogy and geochemistry within bauxite formations has provided new results on the bauxitization process and its connections with the karstification of the substratum.

- Vertically, the dispositions form evolutive sequences increasingly differentiated towards the top of the profiles (kaolin clays at the base, grading progressively into pisolitic-gibbsite bauxites at the top), characteristic of ferrallitic *in situ* weathering.

- Laterally, they are related to the relief of the karst floor. The morphology of the floor, metric to decametric rounded domes and cones, separated by funnel-shaped depressions, indicates dissolution under cover.

In the depressions the bauxite is more evolved (more pisolitic, richer in gibbsite, and poorer in silica) than on the neighbouring domes.

The extent of weathering therefore increases towards the karst depressions, that is, towards the hydrological outlets.

The bauxitization process appears to be synchronous with the karstification process. Each depression with its slopes and its bauxite cover forms an evolutive geochemical unit, in which the disposition of facies, mineralogy and geochemistry is the result of simultaneous laterite and karst evolution.

Les bauxites du Midi de la France, comme toutes celles de la bordure nord-méditerranéenne, sont des bauxites karstiques typiques. Elles se localisent sur une aire s'étendant sur 600 km, depuis le département du Var à l'Est, jusqu'aux Pyrénées Atlantiques à l'Ouest. Notre étude a porté sur les formations bauxitiques provençales et plus particulièrement sur celles de la chaîne des Alpilles (Bouches-du-Rhône).

Les bauxites provençales se sont développées au Crétacé moyen et supérieur, sur les territoires émergés de "l'isthme ou bombement durancien". Elles cons-

1 ERA 282 du CNRS, Institut de géographie, 29, av. R. Schuman, 13621 Aix en Provence (France).

2 Laboratoire de Géologie Dynamique et LA 132 du CNRS, Faculté des Sciences et Techniques de St. Jérôme, 13397 Marseille cedex 13 (France).

tituent actuellement des gîtes stratiformes d'extension latérale variable, décamétrique à kilométrique. La puissance de la couche, également très variable, est en moyenne d'une dizaine de mètres. Cette couche repose sur un mur calcaire ou dolomitique karstifié, dont l'âge varie du Jurassique au Barrémien. Le toit, argilo-ligniteux, gréseux ou calcaire s'étage du Cénomaniens supérieur au Campanien.

Les nombreux travaux concernant ces gisements ont donné lieu à plusieurs hypothèses génétiques, parfois diamétralement opposées :

- Dans la théorie autochtoniste (De Lapparent, 1930) les bauxites de karst proviendraient de l'altération sur place des résidus de dissolution du calcaire.
- Dans la théorie allochtoniste (Nicolas, 1969), elles résulteraient de la sédimentation, dans des dépressions karstiques, de matériaux issus du démantèlement de profils latéritiques.

- Les théories mixtes, parautochtonistes (Bonte, 1969; Combes, 1972), envisagent le transport et le dépôt de matériaux peu ou pas évolués, dans des dépressions karstiques où l'évolution bauxitique se poursuit.

Nous présentons ici les principaux résultats de travaux récents (Parron *et al.*, 1983; Guendon & Parron, 1983) effectués dans le cadre d'un contrat de recherche avec le CNRS (ATP "Géochimie et Métallogénie"). Dans ces formations bauxitiques, des distributions géochimiques, minérales et structurales organisées, verticales et latérales, ont pu être mises en évidence. L'analyse de ces distributions permet de préciser certains mécanismes de la bauxitisation et leurs relations avec la karstification du substratum calcaire.

I. - ANALYSE DES DISTRIBUTIONS VERTICALES

Dans tous les gisements étudiés les organisations verticales résultent de transformations structurales,

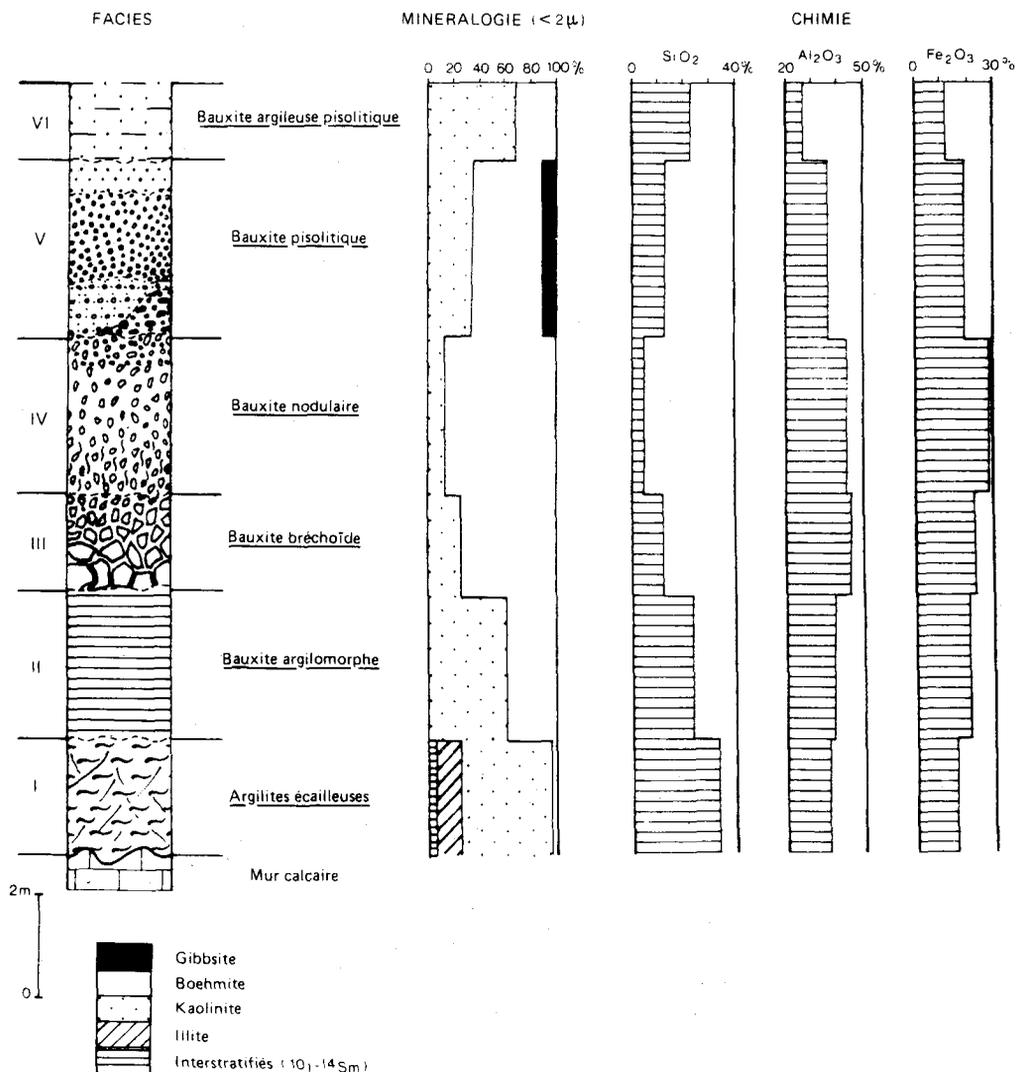


Figure 1. - Evolutions verticales dans une coupe-type de bauxite karstique du gisement des Canonettes (Alpilles).

Figure 1. - Vertical evolution of facies, mineralogy and chemistry of a typical karst bauxite section of the Canonettes deposit (Alpilles).

minérales et géochimiques successives dont nous avons pu suivre les étapes. De bas en haut, on passe progressivement (fig. 1) :

- d'un ensemble argilo-bauxitique (argilites écaillues et bauxite argilomorphe), silico-alumineux, riche en kaolinite, caractérisé par une importante accumulation argileuse illuviale (cutanes et papules);

- à un ensemble bauxitique à structures bréchoïde et nodulaire où l'accumulation progressive du fer (hématite) et de l'aluminium, et l'appauvrissement en silice, s'accompagnent de la déstabilisation croissante de la kaolinite et du développement d'un plasma boehmitique. La structuration en volumes bréchiqes de la base de cet ensemble résulte du découpage des faciès argilomorphes par re-concentration centripète du fer. L'intensification de ce processus provoque la sphéritisation des volumes bréchiqes, et on passe ainsi, progressivement, à des volumes nodulaires très riches en hématite. Vers le sommet des faciès nodulaire, l'hématite se transforme en goéthite à la périphérie des nodules. Ainsi se différencie un fin cortex goéthitique périnodulaire qui s'épaissit ensuite aux dépens du coeur des nodules. On passe alors à des volumes à structure concentrique : les pisolites.

- L'ensemble bauxitique sommital à structure pisolitique se caractérise par l'apparition de la gibbsite, qui cristallise après déstabilisation du plasma boehmitique dans des microsites préalablement déferruginisés. Vers le haut, l'intensification de la déferrugination provoque l'effacement des structures pisolitiques, tandis que le cristalliplasma gibbsitique se développe. Le sommet des coupes présente un phénomène de kaolinisation des

faciès bauxitiques qui correspond à des resiliifications secondaires, voire épigénétiques tardives, en relation avec le toit de la formation bauxitique.

Ces transformations progressives et successives conduisent donc depuis des matériaux argileux peu altérés à la base, à des faciès bauxitiques de plus en plus évolués et différenciés vers le haut des coupes. Ces transformations constituent des suites évolutives structurales (faciès argilitiques → argilomorphes → bréchoïdes → nodulaires → pisolitiques), minéralogiques (kaolinite → boehmite → gibbsite) et géochimiques (désilicification, ferruginisation, aluminisation) caractéristiques d'une différenciation in situ et qui présentent des analogies certaines avec les suites évolutives des bauxites latéritiques des régions intertropicales (Boulangé, 1983). Les formations bauxitiques provençales analysées représentent donc des paléoprofils d'altération en place, de type ferrallitique.

II. - ANALYSE DES RELATIONS ENTRE LA KARSTIFICATION ET LA BAUXITISATION

Le mur de la bauxite montre des relief résiduels largement arrondis (dômes), séparés par des dépressions en entonnoir plus ou moins profondes, et une frange superficielle, parfois épaisse de plusieurs centimètres, de calcaire altéré, pulvérulent. Ces caractères sont symptomatiques d'une dissolution du calcaire sous-couverture (Bonte, 1969). Nous avons été amenés alors à analyser les relations éventuelles entre cette karstification et l'évolution de la couverture bauxitique.

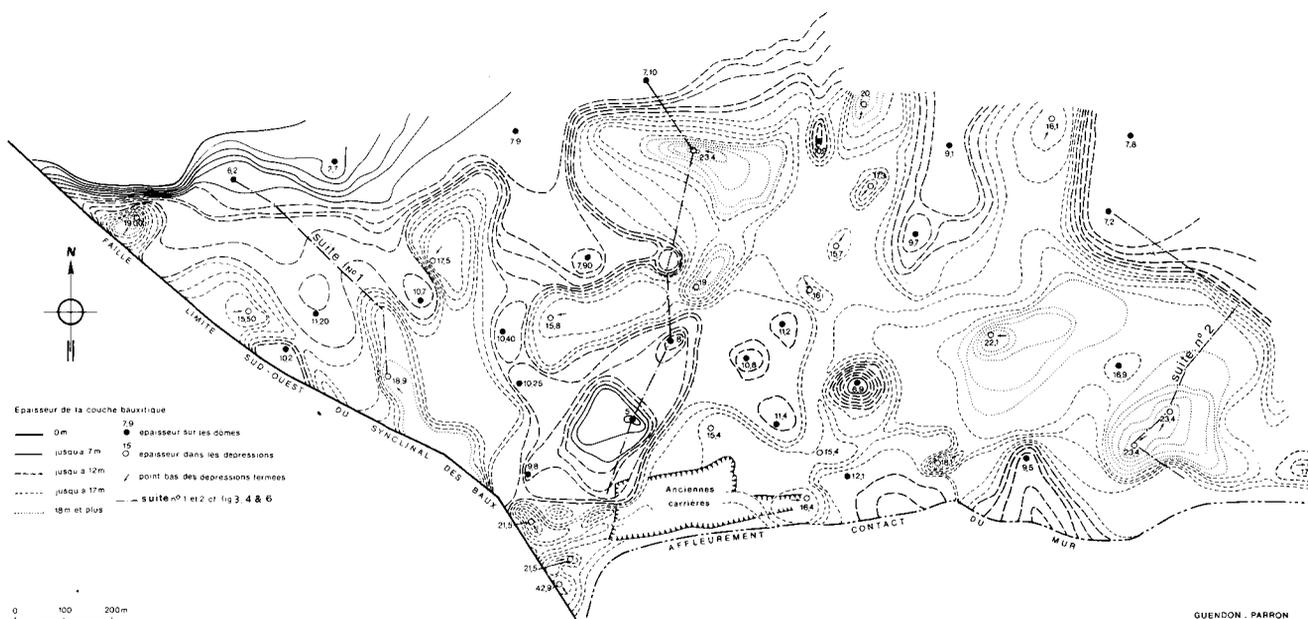


Figure 2. - Carte des variations d'épaisseur de la couche bauxitique du gisement des Canonettes (Alpilles) : visualisation de la morphologie karstique sous-bauxitique.

Figure 2. - Map showing variation of thickness of the bauxitic layer of the Canonettes deposit (Alpilles) : illustration of the underlying karst morphology.

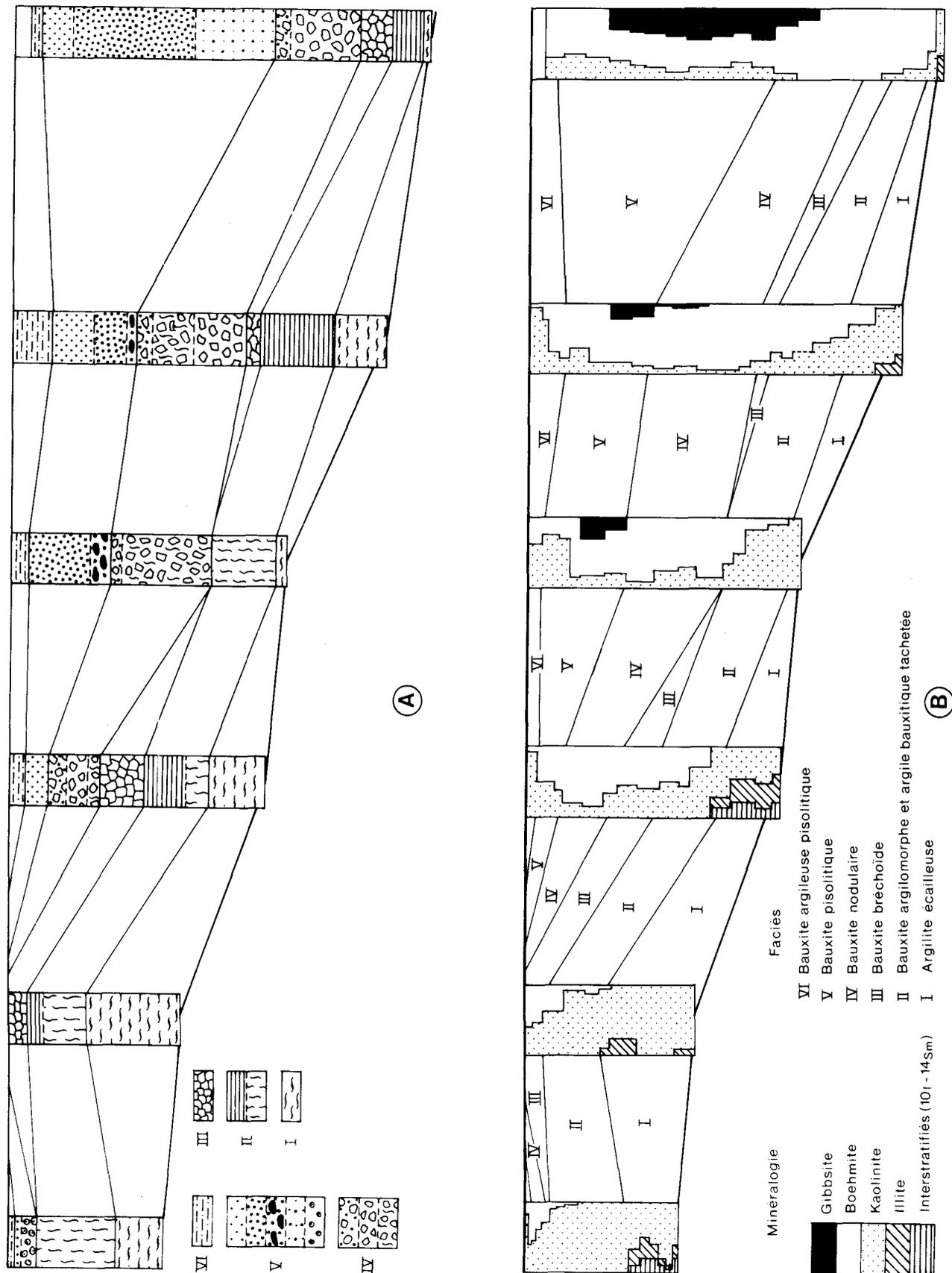


Figure 3. - Variations latérales des lithofaciès (A) et de la paragenèse minérale alumineuse (B) dans la suite toposéquentielle n° 1 du gisement des Canonnettes (fig. 2).

Figure 3. - Lateral variations of lithofacies (A) and of the aluminous mineral paragenesis in n° 1 topo-sequential series of the Canonnettes deposit (fig. 2).

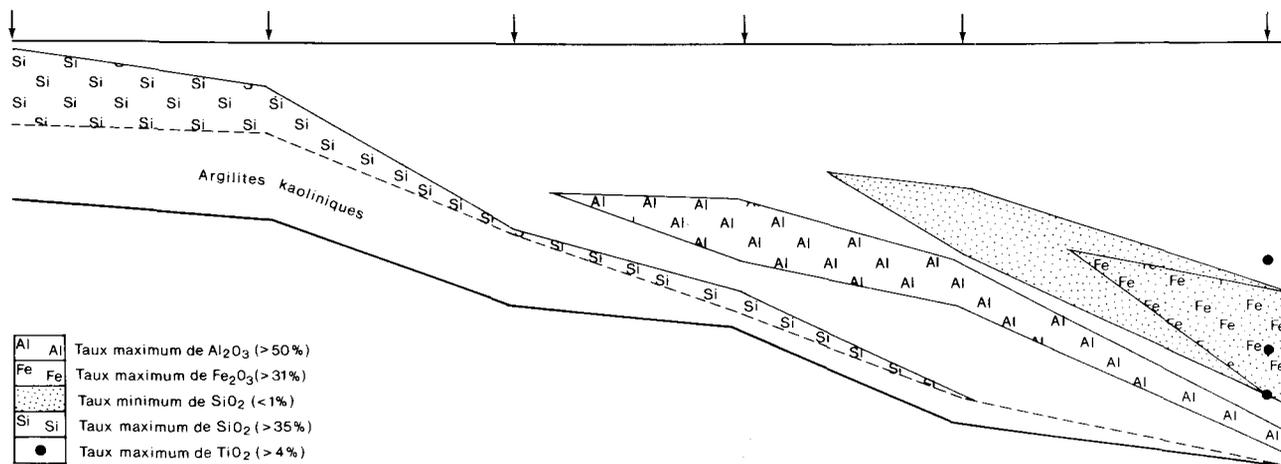


Figure 4. - Schéma de la répartition latérale des zones à plus forte concentration en SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 et à plus faible concentration en SiO_2 , dans la suite toposéquentielle n° 1 du gisement des Canonnettes.

Figure 4. - Illustration of lateral distribution of zones with high SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 content and zones with low SiO_2 content in no 1 topo-sequential series of the Canonnettes deposit.

A. - LES DISTRIBUTIONS LATÉRALES DES FACIÈS, DE LA MINÉRALOGIE ET DE LA GÉOCHIMIE DANS LA COUVERTURE BAUXITIQUE

A partir de 150 sondages carottés du gisement des Canonnettes (au SW des Baux), en utilisant les variations d'épaisseur de la couche bauxitique, nous avons dressé une carte qui traduit l'aspect de la surface karstique du mur (fig. 2). Cette carte du relief sous-bauxitique nous a permis de sélectionner et d'étudier des suites de sondages qui constituent des toposéquences depuis les dômes jusqu'aux dépressions karstiques.

Dans tous les sondages, les successions verticales des faciès, de la minéralogie et de la géochimie définies précédemment se retrouvent. Mais des variations latérales importantes apparaissent.

- **Variations latérales des lithofaciès** (fig. 3A). L'épaisseur des faciès supérieurs, les plus évolués (faciès pisolithiques), augmente régulièrement depuis le dôme jusqu'à la dépression. Et cela, au détriment des faciès inférieurs les moins évolués (faciès argilitiques), dont l'épaisseur s'amenuise dans la dépression.

- **Variations latérales de la paragenèse alumineuse** (fig. 3B). Le taux de kaolinite décroît progressivement depuis le dôme jusqu'à la dépression karstique, corrélativement à l'augmentation des taux de boehmite et de gibbsite. De plus, alors que la boehmite est le seul hydroxyde d'aluminium présent à l'amont de la toposéquence, la gibbsite apparaît et se développe de plus en plus vers l'aval. La différenciation et l'enfoncement croissants des faciès les plus évolués vers l'aval s'accompagnent donc d'une différenciation et d'un enfoncement croissants des hydroxydes d'aluminium.

- **Les variations géochimiques latérales** (fig. 4) montrent une désilicification, une aluminisation et une ferruginisation croissantes des matériaux bauxitiques vers l'aval des séquences. On distingue ainsi :

- à l'amont un domaine riche en silice (taux moyens du sondage sur dôme : SiO_2 : 35,7 %/o, Al_2O_3 : 27,4 %/o, Fe_2O_3 : 15,8 %/o;
- et à l'aval un domaine d'accumulation du fer et de l'alumine et d'appauvrissement en silice (taux moyens du sondage au centre de la dépression : SiO_2 : 4,6 %/o, Al_2O_3 : 40,4 %/o, Fe_2O_3 : 26,2 %/o.

Latéralement, les distributions structurales, minérales et géochimiques s'ordonnent donc en suites évolutives analogues aux suites évolutives verticales. Dans les suites évolutives verticales, la différenciation est croissante vers le haut des profils. **Dans les suites évolutives latérales la différenciation est croissante vers l'aval des séquences, c'est-à-dire vers le centre des dépressions karstiques**, où vont se trouver les profils les plus évolués à tous les points de vue. La distribution latérale orientée des faciès, de la minéralogie et de la géochimie, vers un exutoire qui est la dépression karstique, souligne le rôle du drainage karstique dans le contrôle des mécanismes de la différenciation bauxitique sur substrat carbonaté. Elle met en évidence la **simultanéité de l'évolution karstique et de l'évolution bauxitique**.

B. - LE ROLE DE LA KARSTIFICATION DANS L'ORGANISATION DES GISEMENTS BAUXITIQUES

La simultanéité des processus de bauxitisation et de karstification va induire une compétition entre :

- l'altération de la couverture, dont l'évolution, orientée par le drainage karstique, conduit à l'enfoncement géochimique des horizons bauxitiques,
- et la dissolution karstique, sous la couverture en voie de bauxitisation, responsable de la déformation et de l'enfoncement mécanique de cette couverture.

Ainsi, par le jeu des enfoncements géochimique et mécanique, une "structuration en grand" des forma-

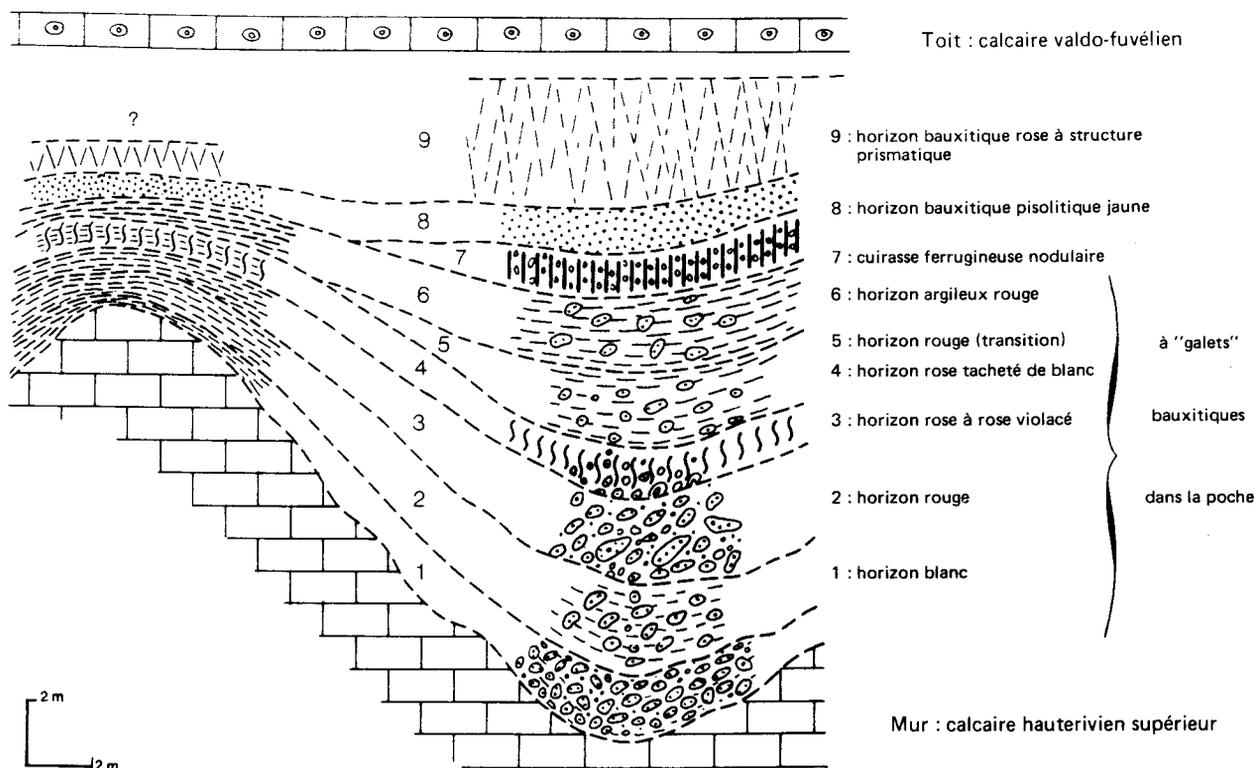


Figure 5. - Organisation schématique des profils bauxitiques sur dôme et dans la dépression karstique (gisement des Fléchons, Alpilles). Localisation des structures emboîtées et effondrées.

Figure 5. - Sketch of the disposition of bauxitic profiles over a dome and in a karst depression (Fléchons deposit, Alpilles). Situation of inter-fitting and collapse structures.

tions bauxitiques de karst va se dessiner au cours de leur histoire.

- **Les structures emboîtées.** Dans ce cas, les différents ensembles de la formation bauxitique s'incurvent vers le bas, au niveau des dépressions (fig. 5) et dessinent alors une structure emboîtée. Ces déformations simples sont liées à une aspiration et à un infléchissement de la couverture bauxitique au centre de la dépression au fur et à mesure de l'enfoncement et de l'élargissement de l'entonnoir de dissolution. Cet effet mécanique de soutirage s'accompagne de failles de tassement et de figures d'étirement (structures feuilletées et écailleuses).

- **Les structures fragmentées et déplacées par soutirage.** L'intensification du processus de soutirage karstique peut conduire à une fragmentation et à un effondrement de la couverture bauxitique. On obtient ainsi des faciès d'aspect conglomératique ("blocs" et "galets" de bauxite pisolitique emballés dans des argilites kaoliniques à structure écailleuse) auxquels une origine sédimentaire a parfois été attribuée (Nicolas & Hieronymus, 1973). L'analyse de ces faciès met en évidence une répartition latérale des "blocs" et des "galets" bauxitiques qui permet de préciser leur origine. Ainsi, dans les Alpilles, au Nord de Mouriès, dans le gisement des Fléchons, le profil relevé sur un dôme karstique montre une formation bauxitique dépourvue de "blocs" et de "galets". Ces derniers sont au contraire très abondants au

sein du profil situé dans la dépression karstique voisine (fig. 5). Cette répartition latérale permet de considérer ces faciès "conglomératiques" comme le résultat de la fragmentation sur place d'un ancien profil bauxitique et de la dissémination de ces fragments relictuels, par des déplacements gravitaires, vers les lieux où se réalise le soutirage karstique. De plus, l'analyse de ces coupes confirme l'existence d'une **karstification active sous couverture pendant la période de bauxitisation**. En effet, sur ces structures relictuelles d'un premier profil bauxitique soutiré, se surimpose un deuxième profil, peu déformé (structure emboîtée), où se retrouvent les distributions verticales et latérales définies précédemment.

- **Les profils successifs surimposés.** Dans la suite toposéquentielle n° 2 du gisement des Canonnettes (fig. 2), la suite évolutive verticale des faciès et de la minéralogie, définie précédemment, se retrouve répétée deux fois verticalement (fig. 6). Cette superposition de profils est particulièrement nette au niveau de la dépression karstique et s'atténue, puis disparaît lorsqu'on se dirige vers les dômes. On peut ainsi distinguer :

- un profil inférieur dont l'analyse pétrographique et minéralogique permet de caractériser un faciès bréchoïde à nodulaire surmonté par un faciès pisolitique gibbsitique caractéristique du sommet des profils.
- un profil supérieur, qui occupe, lui, toute la partie supérieure de la suite toposéquentielle, et qui montre

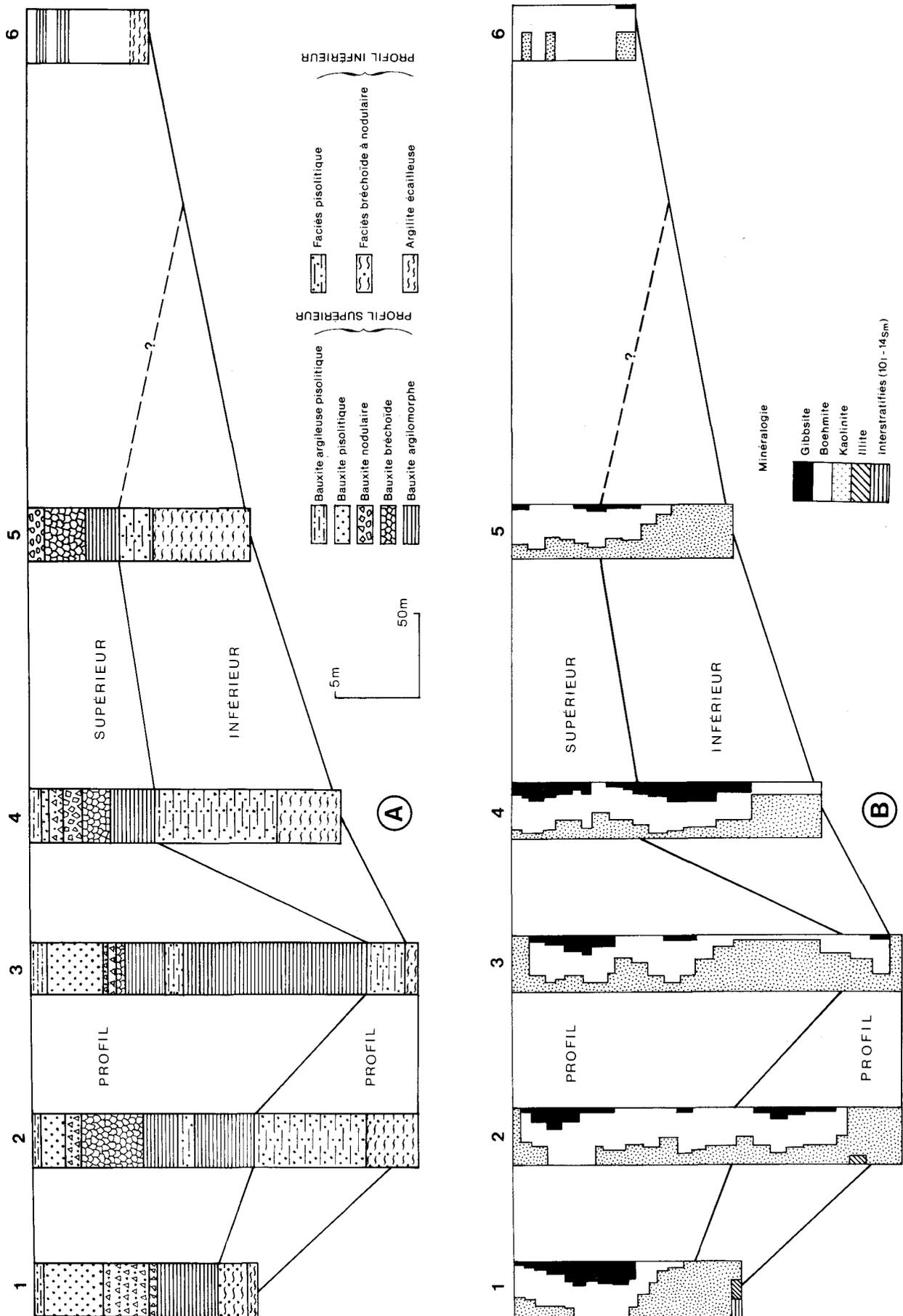


Figure 6. - Variations latérales des lithofaciés (A) et de la paragenèse minérale aluminieuse (B), dans la suite toposéquentielle n° 2 du gisement des Canonnettes (Alpilles).

Figure 6. - Lateral variations of lithofacies (A) and of aluminous mineral paragenesis in n° 2 topo-sequential series of the Canonnettes deposit (Alpilles).

la succession complète et ordonnée des faciès bauxitiques différenciés *in situ*.

Le passage du profil inférieur au profil supérieur se fait par l'intermédiaire du faciès argilomorphe qui caractérise la base du profil supérieur. Ce faciès argilomorphe kaolinique se différencie, à partir du faciès pisolitique sous-jacent, par une importante accumulation argileuse illuviale, et par la disparition progressive des caractères structuraux (effacement des pisolites) et minéralogiques (kaolinisation par resilicification des hydroxydes d'aluminium) des faciès pisolitiques. C'est à partir de ce faciès argilomorphe d'accumulation secondaire que le profil bauxitique supérieur va alors s'individualiser. L'analyse de la transition entre ces deux profils montre donc qu'ils ne sont pas simplement superposés, mais que le profil supérieur, qui succède dans le temps au profil inférieur, se surimpose à lui.

Le faciès argilomorphe intermédiaire est de mieux en mieux développé vers le centre de la dépression karstique où il est plus kaolinique et plus épais. Ainsi, dans la dépression karstique, l'accumulation argileuse, responsable de l'individualisation du faciès argilomorphe secondaire, s'enfonce plus profondément dans le profil inférieur, oblitérant ses caractères minéralogiques et structuraux, qui ne subsistent plus qu'à l'extrême base de la formation (sondage 3, fig. 6). On saisit là les influences du milieu karstique :

- sur le déplacement et le développement de l'accumulation argileuse, par le jeu des circulations vers les dépressions karstiques;
- sur la disposition complexe des profils (succession et surimposition) qui se crée dans la dépression, par le jeu simultané de la karstification qui soutire des profils complets, et du processus de bauxitisation qui élabore de nouveaux profils qui se surimposent à ceux qui sont soutirés.

Les différents types d'organisation des gisements que nous venons de voir représentent, en fait, différents stades de l'évolution bauxitique en milieu karstique, que l'on retrouve figés à un moment ou à un autre de cette évolution. Et on conçoit que l'évolution différentielle d'un point à un autre d'un même paysage karstique permette la coexistence de ces différents types d'organisation dans un même domaine bauxifère.

CONCLUSIONS

Dans les gisements étudiés, les formations bauxitiques présentent des différenciations spatiales, structurales, minérales et géochimiques organisées :

- verticales, croissantes vers le haut des profils;
- latérales, croissantes vers le centre des dépressions karstiques.

Ces différenciations résultent d'une évolution *in situ*, par altération supergène de type ferrallitique, syn-

chrone du processus de karstification du mur.

Le rôle du milieu karstique dans la bauxitisation se traduit de plusieurs façons. Le karst commande :

- l'orientation préférentielle du drainage qui assure les évolutions latérales et les différenciations maximales au centre des poches;
- l'orientation des transferts de matière (fragments bauxitiques, particules argileuses, solutions) vers les dépressions karstiques;
- la "structuration en grand" des gisements, qui peut être simple (structures emboîtées) ou de plus en plus complexe (fragmentation et surimposition de profils).

Ainsi, chaque dépression karstique - et ses versants - avec sa couverture bauxitique constitue une unité géochimique évolutive élémentaire dans laquelle les distributions structurales, minérales et géochimiques sont conditionnées par le jeu simultané des processus d'altération bauxitisante et de karstification. La prise en compte de ces différents facteurs d'évolution devrait permettre de définir de nouveaux guides d'exploitation pour ce type de bauxites karstiques.

REMERCIEMENTS

Nous remercions la Société Pechiney U.K., qui a mis à notre disposition les sondages carottés du gisement des Canonnettes.

BIBLIOGRAPHIE

- BONTE, A., 1969. Mise en place et évolution des bauxites sur un mur calcaire. Ann. Inst. Geol. Publi. Hungar., LIV (3): 29-49.
- BOULANGE, B., 1983. Les mécanismes de la bauxitisation latéritique en zone tropicale (Côte d'Ivoire). Thèse doct. sciences, Paris VII, 280 p.
- COMBES, P.J., 1972. Les différents types de bauxites sur substrat carbonaté dans le Languedoc et l'Ariège. Remarques sur la notion d'allochtonie et d'autochtonie. C.R. Acad. Sc. Fr., 247 (11) : 1613-1616.
- GUENDON, J.L. & PARRON, C., 1983. Bauxites et ocres crétacées du SE de la France. Mécanismes de l'altération des roches sédimentaires. Trav. Lab. Sci. Terre, Marseille St. Jérôme, série B, n° 23, 142 p.
- LAPPARENT, J. de, 1930. Les bauxites de la France méridionale. Mém. Carte Géol. Fr., Impr. Nat., 187 p.
- NICOLAS, J., 1969. Problème de la genèse des bauxites à mur karstique de France. Preuves pétrographiques, paléontologiques et géochimiques de la nature sédimentaire des formations bauxitiques de Provence. Ann. Inst. Géol. Publi. Hungar., LIV (3) : 135-164.
- NICOLAS, J. & HIERONYMUS, B., 1973. Essai synthétique sur la genèse et l'évolution des bauxites provençales à travers l'exemple de certains modèles africains. I.C.S.O.B.A., 3e Congrès, Nice : 117-128.
- PARRON, C., GUENDON, J.L., BOULANGE, B. & BOCQUIER, G., 1983. Bauxites du Midi de la France. Evolutions minérales et microstructurales. Mécanismes de la bauxitisation sur substrat carbonaté. Rapport scientifique CNRS, ATP "géochimie et métallogénie". Trav. Lab. Sc. Terre, Marseille St. Jérôme, série X, n° 54, 51 p.