

Grillot, J.-C., C. Almeida (1982)

Tectonique cassante posthercynienne dans l'Algarve (Sud du Portugal). Incidence sur l'hydrogéologie karstique

Révue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique,
vol. 23(2), p. 119-130.

Tectonique cassante posthercynienne dans l'Algarve (Sud du Portugal). Incidence sur l'hydrologie karstique.

par Jean-Claude GRILLOT* et Carlos ALMEIDA**

RÉSUMÉ. - Dans la série méso-cénozoïque de l'Algarve où les systèmes aquifères sont karstiques, un lien entre épisodes tectoniques cassants et directions préférentielles de karstification est proposé.

Cette relation est étendue à partir d'une connaissance à plus petite échelle des champs de contrainte. Ainsi sur les cinq phases mises en évidence, quatre d'entre-elles (trois en distension, une en compression) sont rattachées à des événements tectoniques connus à petite échelle : ouverture du Golfe de Gascogne, phase de compression « pyrénéenne » et phases de distension plio-quaternaires mises en évidence dans le SE de l'Espagne.

Ces données confrontées aux observations de quelques phénomènes karstiques de subsurface (fractures karstifiées) permettent d'établir un schéma évolutif des directions préférentielles de karstification (orientations N020 et N140 essentiellement) que demande toutefois à être testé par des essais hydrauliques, en cours de réalisation dans l'Algarve. Ainsi, bien que demandant à être précisé par d'autres méthodes, ce modèle dans un premier temps montre que la prospection du karst par forages peut s'appuyer sur des critères géologiques (zones fissurées dans des directions précises). Enfin cette évolution doit être vérifiée à plus petite échelle, en particulier par des observations, selon la même démarche analytique, dans le SE de l'Espagne.

Mots-clés: Tectonique cassante. Karstification, Méso-Cénozoïque, Algarve, Portugal.

ABSTRACT. - *Post-hercynian faulting tectonics in Algarve (Southern Portugal). Incidence on karstic hydrology:* In the Mesozoic formations of the Algarve Province, in which are located aquifer systems of karstic type, a relation is proposed between tectonic episodes of faulting style and preferential directions of karstification.

This relation is extended through the knowledge of the stresses fields at a smaller scale.

So among the five phases pointed out, four (three in distension, one in compression) are connected with tectonic events known at a small scale: opening of the Bay of Biscay, "pyrenean" compression phase, plio-quaternary distension phase brought out in SE Spain.

*Laboratoire d'Hydrogéologie, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Place E. Bataillon, 34060 Montpellier Cedex, France

**Centro de Mineralogia e Geologia, Faculdade de Ciências, Lisboa (Portugal).

These data compared with observations of some subsurface karstic phenomena (karstified fractures) makes it possible to propose a diagram for the evolution of the preferential directions of karstifications (orientations N020 and N140 principally). This diagram must however be verified through hydraulic tests, which are currently performed in the Algarve. Thus, although this model has to be precised by other methods, it shows that prospecting the karst by boreholes, can be supported by geologic criteria (fissured zones in precise directions). At last this evolution has to be verified at a smaller scale, in particular in SE Spain, following the same analytical approach.

Key-words: Faulting Tectonic, Karstification, Meso-Cenozoic, Algarve, Portugal.

Introduction.

Si sur le plan géologique la Province de l'Algarve fait l'objet de nombreuses études lithostratigraphiques, peu de ces travaux relatent en parallèle l'histoire de la tectonique cassante posthercynienne de cette région (J. C. Pratsch, 1958; D. Mougnot et al., 1979). Or cette Province étant en pleine expansion économique, son aménagement doit de plus en plus tenir compte du contexte hydrogéologique local que montre que les réserves en eaux souterraines (seules ressources importantes disponibles), se localisent essentiellement dans des magasins karstiques. En outre on sait maintenant que la tectonique cassante a une incidence prépondérante sur l'organisation et le mode des écoulements souterrains dans ces milieux (C. Drogue et J. C. Grillo, 1976).

Ce cadre hydrogéologique influe donc sur l'aménagement en cours de cette région que doit répondre sur le plan hydraulique à deux priorités: 1) grosses demandes en eau pour un urbanisme touristique côtier sans cesse grandissant; 2) besoin important dans le domaine de l'irrigation lié à la culture de l'oranger en plein développement.

Actuellement, un effort particulier est par conséquent porté sur la reconnaissance et l'exploitation des aquifères. Cette recherche fait d'ailleurs l'objet d'analyses hydrodynamiques entreprises par l'un d'entre nous (C. Almeida).

Toutefois étant donné que l'on est en présence de magasins fissurés, une bonne connaissance de leur géométrie ne peut que contribuer à la compréhension du fonctionnement hydraulique de ces systèmes. C'est pourquoi une étude structurale détaillée a été entreprise dans l'Algarve en visant plus précisément trois objectifs

- reconnaître, s'il y a lieu, une organisation fissurale des magasins;
- individualiser dans le temps des épisodes tectoniques surtout cassants afin de préciser l'incidence des différentes phases de déformation sur l'ouverture (ou la fermeture) des fractures;
- aborder le problème de l'installation, puis du développement, de directions de karstification éventuellement prépondérantes.

I. - LITHOSTRATIGRAPHIE ET HYDROGÉOLOGIE GÉNÉRALE.

Discordantes sur le socle primaire métamorphique (flysch), les séries détritiques et carbonatées méso-cénozoïques de l'Algarve affleurent assez bien dans la région et présentent une structure générale monoclinale plongeant faiblement vers le Sud de 10° à 20° (fig. 1).

A. Contexte sédimentaire.

Dans la série primaire qui n'occupe qu'une faible partie du secteur d'étude, apparaissent des formations flyschoides du Carbonifère. Sur ces terrains reposent en discordance les séries méso-cénozoïques allant du Trias au Pliocène, dans lesquelles prédominent des roches carbonatées: calcaires, calcaires dolo-mitiques, dolomies, calcaires marneux, et marnes.

Le Mésozoïque débute par un ensemble détritique du Trias-Hettangien formé de poudingues, grès, silts et argiles. Des intercalations dolomitiques et des intrusions de roches basiques (dolérites) apparaissent dans ces formations.

Dans cette séquence basale, on a reconnu des produits volcaniques sous forme de brèches et

d'éléments pyroclastiques, alors que les argiles peuvent contenir du gypse et du sel (C. Romariz et al., 1976).

Sur cette série, on rencontre une épaisse séquence dolomitique et calcaire du Sinémurien-Dogger suivie de dépôts argilo-marneux correspondant à la période de régression du Callovien. L'Oxfordien et le Kimméridgien sont marqués par des faciès marneux et calcaromarneux.

Le Jurassique se termine par une épaisse série de calcaire et de dolomie (Portlandien) surmontée par un faciès de transition marneux entre le Jurassique et le Crétacé.

Le Crétacé inférieur et moyen (Cénomanien), de faible extension, est caractérisé par des calcaires dolomitiques et des niveaux détritiques (grès, poudingues, argiles).

Sur ces terrains jurassico-crétacés reposent en discordance les formations cénozoïques où apparaissent, de bas en haut, des calcaires bioclastiques fossilifères à passage de lumachelle et de grès calcaires du Burdigalien, puis des sables blancs miocènes à vertébrés, discordants, surmontés de sables rougeâtres, argileux, à cailloutis quartzeux, du Pliocène.

Soulignons que des terrains paléogènes n'ont pas été reconnus à ce jour, la série se terminant par des sables quaternaires et des alluvions récentes dont l'épaisseur cumulée ne dépasse pas quelques mètres.

B. Inventaire et caractères généraux des aquifères.

Les principaux aquifères de l'Algarve se répartissent comme suit:

- un premier système karstique localisé dans la séquence dolomitique et calcaire du Sinémurien-Dogger;
- un deuxième dans les mêmes faciès mais du Portlandien ;
- un troisième dans la série calcaro-dolomitique du Crétacé mais dont l'intérêt est très local par suite des dimensions réduites du réservoir;
- un quatrième enfin dans les niveaux carbonatés du Miocène, bien que ce karst soit parfois localement colmaté par les sables argileux du Pliocène.

Ces systèmes sont a priori indépendants entre- eux du fait de la présence de niveaux détritiques à faciès argileux et de séries marneuses intercalés.

Dans le cadre de l'aménagement régional en cours, il

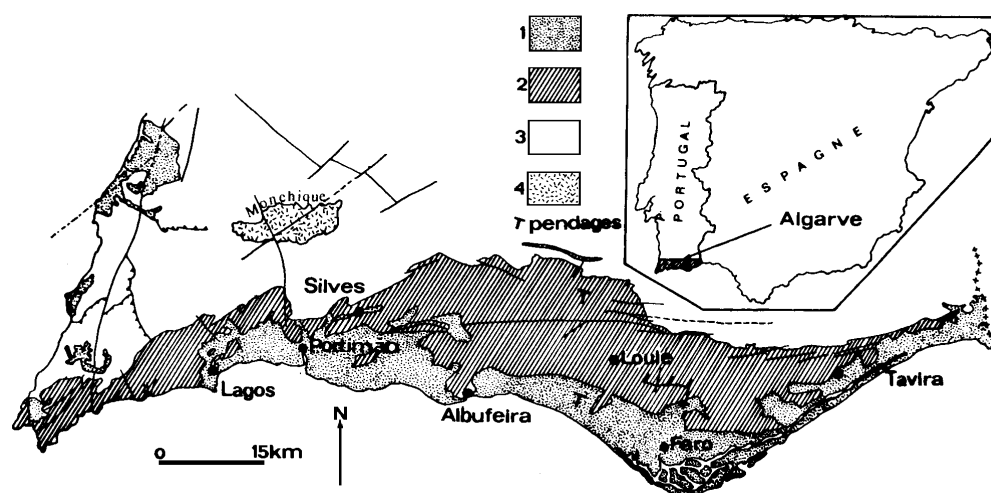


Fig 1. - Schéma géologique de l'Algarve

1 : formations cénozoïques. - 2 : séries carbonatées mésozoïques - 3 : socle primaire (flysch). - 4 : roches subvolcaniques du massif de Monchique (syénites néphéliniques; Crétacé supérieur).

FIG. 1. - Simplified geological map of Algarve

1 : cenozoic formations. - 2 : mesozoic carbonated formations. - 3 : primary basement (flysch). - 4 : subvolcanic rocks of the Monchique mountain (nepheline syenites; upper Cretaceous).

apparaît qu'actuellement deux de ces réservoirs sont fortement exploités : l'un (Sinémurien-Dogger) pour les besoins de l'agriculture; l'autre (Miocène) pour ceux du complexe touristique côtier. Mais il est probable que les deux autres seront aussi fortement sollicités, et à court terme, dès que les plantations d'orangers s'étendront.

La recharge de ces nappes est limitée pour les raisons suivantes

- la pluviométrie moyenne ne dépasse pas 500 mm/an;
- l'infiltration efficace, si elle peut atteindre 50 % des précipitations pour les karsts jurassico-crétacés (faible couverture pédologique), tombe à 20 % pour l'aquifère miocène étant donné sa couverture presque continue de sables argileux peu perméables (Pliocène)

Mais de façon plus précise l'hydrogéologie de l'Algarve pose, ou posera à très court terme, deux types de problème

- celui de l'estimation des ressources disponibles dans la mesure où les exploitations actuelles sont déjà importantes (et les demandes augmentent, alors que les recharges sont faibles);
- celui de la qualité des eaux, particulièrement au niveau de l'aquifère côtier miocène. En effet, à la recharge très limitée de ce système karstique, risque de s'ajouter un processus de contamination par les eaux

salées que les effets de marée océanique, ressentis assez loin de la côte, laissent pressentir (M. Razack et al., 1980).

II. - HISTOIRE DE LA TECTONIQUE CASSANTE POSTHERCYNIE.

A. Méthodes d'étude.

Parallèlement aux techniques classiques de relevés et de traitement des données structurales en tectonique cassante (F. Arthaud et P. Choukroune, 1972) on peut, lorsque les conditions d'affleurement le permettent, analyser la fracturation d'un milieu à différentes échelles

- échelle ponctuelle dans des stations de mesures où l'on comptabilise les discontinuités le long de profils de cheminement, donnant l'expression de l'intensité de fracturation, de la distribution directionnelle, et de la maille élémentaire des joints de rupture appartenant à des familles distinctes (L. Kiraly, 1969);

- échelle régionale à partir de l'exploitation des clichés aériens (relevé des champs de fractures) et du

traitement des informations recueillies selon des techniques basées soit sur des propriétés physiques (banc d'optique, C. Drogue et al., 1975) soit (et) sur le calcul numérique (M. Razack, 1979; G. Brière et M. Razack, 1980).

La synthèse de toutes ces données permet alors d'interpréter de façon rationnelle des champs de fractures mais uniquement en surface des magasins. Or on peut se demander si une extrapolation de cette organisation fissurale en profondeur est objective, le but recherché étant d'appréhender en fin de compte la structure interne du milieu fissuré. Il semble que les quelques travaux réalisés en ce sens apportent une réponse positive à ce problème, en ce qui concerne tout au moins la distribution directionnelle des fractures, alors que le taux de diminution de leur intensité atteint 60 % vers 600 m de profondeur (D. Jamier, 1975). On peut donc dire que l'ensemble de ces méthodes permet d'acquérir une bonne connaissance de l'organisation fissurale d'un milieu depuis la surface jusqu'en profondeur.

B. Reconnaissances structurales.

1. Fracturation des formations méso-cénozoïques.

Sur le terrain, le dénombrement des joints de rupture subperpendiculaires à la stratification (dont le pendage ne dépasse pas en moyenne 20° sauf au voisinage des accidents), permet d'évaluer leur répartition directionnelle et de la représenter sous forme d'histogrammes circulaires.

En comptabilisant tout d'abord toutes les fractures (sans distinction entre joints avec ou sans rejet) on

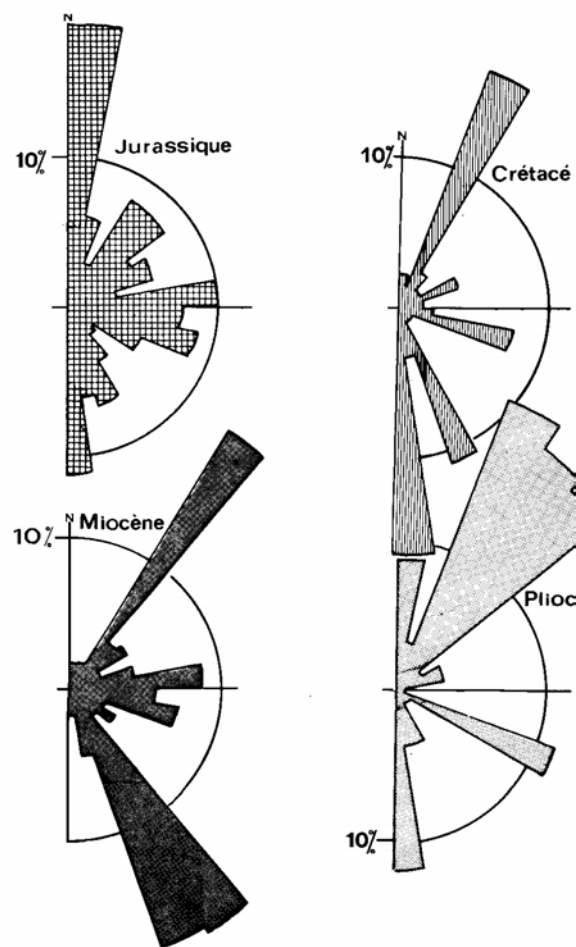
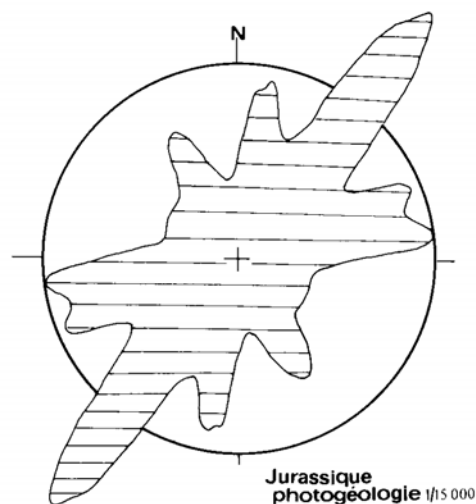


Fig. 2. - Fracturation dans les formations méso-cénozoïques de l'Algarve.

Fréquence dans les stations de mesure (histogrammes du Jurassique au Pliocène); longueurs cumulées à partir des clichés aériens (diagramme du bas). On note une distribution des fractures selon essentiellement trois orientations dans les relevés de terrain (NNE-SSW, NW-SE et E-W); cette distribution se retrouve à l'échelle photogéologique mais avec des intensités parfois différentes (effet d'échelle selon le développement linéaire des fractures et selon leur fréquence).

Fig. 2. - Fracturation in the meso-cenozoic formations of Algarve.

Frequency at the measures'stations (histograms from Jurassic to Pliocene); cumulated lengths from airphotos (lower diagram). We can note: a fractures'distribution according principally to three orientations after the ground data (NNE-SSW, NW-SE and E-W); the same distribution is pointed out after airphotos'data but with sometimes different intensities (scale effect following the linear development and the frequency of the fractures).



obtient, pour les quatre ensembles lithostratigraphiques retenus (Jurassique, Crétacé, Miocène et Pliocène), les histogrammes de la figure 2. Trois caractéristiques apparaissent à leur lecture

- pour chacun d'eux, la fracturation se distribue dans des directions privilégiées;
- ces quatre représentations ont en commun une distribution fissurale préférentiellement orientée selon trois directions;
- cette distribution a une relative constance quels que soient les faciès et l'âge des formations sédimentaires.

Cette répartition directionnelle se confirme à une autre échelle puisque l'analyse photogéologique réalisée dans le Jurassique, à 1/15 000, montre une distribution similaire (fig. 2). Il faut toutefois signaler que

1) les directions ne coïncident pas exactement entre-elles dans les deux modes d'expression. Ce phénomène est imputable à la technique de traitement utilisée dans le cas de l'information photogéologique (banc d'optique) car le tracé en continu de l'histogramme introduit un lissage entre des directions proches les unes des autres;

2) l'effet d'échelle et le mode d'expression des résultats (fréquence pour les données de terrain, longueurs cumulées pour les informations photogéologiques) se manifestent par des intensités de pics différentes. Si le premier facteur est classique, le second est plus original dans la mesure où il montre que selon les faciès et la direction considérée on peut examiner comparativement les liens entre longueurs et fréquence des joints. Ainsi, le Jurassique montre que dans la direction subméridienne les fractures sont courtes et serrées alors que dans les autres séries, et par exemple dans la fourchette directionnelle N020-N050, les joints sont au contraire longs tout en étant de maille relativement serrée. Ce caractère de l'organisation fissurale se retrouve à l'échelle de l'affleurement selon que les séries sont plus ou moins hétérogènes et selon l'épaisseur moyenne des bancs (J. C. Grillo, 1979). Autrement dit, le contexte lithologique influe fortement sur la densité des fractures et sur leur développement linéaire à différentes échelles, au contraire des hétérogénéités dont les effets peuvent s'effacer à petite échelle. On peut d'ailleurs préciser que ces comparaisons entre fréquence et longueurs des joints trouvent leur pleine expression lorsque, dans des conditions d'affleurement précises (structure subtabulaire, couvert pédologique réduit), on utilise des clichés aériens à l'échelle du 1/15 000 (M. Razack, 1978).

En résumé, l'analyse de la fracturation dans les séries sédimentaires de l'Algarve fait apparaître que les

joints de rupture affectent, en conservant les mêmes directions, des roches différentes depuis le Jurassique jusqu'au Pliocène. Il est donc difficile de leur attribuer une origine diagénétique d'autant qu'il s'agit d'un phénomène régional, comme le montre l'analyse photogéologique, commandée par des mouvements du socle (F. Arthaud et P. Choukroune, 1972; J. C. Grillo, sous presse). Il s'agit donc, comme l'ont montré des travaux antérieurs réalisés en milieu carbonaté (J. C. Grillo, 1977), de déformations tectoniques dont il importe de préciser la nature (états successifs d'ouverture et/ou de fermeture) si l'on veut examiner ensuite leur rôle dans les propriétés hydrodynamiques des systèmes aquifères.

2. Déformations cassantes successives.

Compte tenu de l'analyse des microstructures tectoniques associées (stylolites et fentes de tension) et de celle des accidents géologiques cassants, cinq phases de déformation successives peuvent être mises en évidence.

a) Distension E-W. - Les indices d'une distension à allongement E-W (N080-N090) ont été relevés principalement dans trois stations (2, 13, et 18, fig. 3).

Ce sont d'une part des microstructures associées telles que stylolites à pics verticaux et fentes en échelon de direction subméridienne et, d'autre part, des failles normales conjuguées, à rejet centimétrique, orientées en moyenne N 020 et N 140. Ces déformations affectant les séries carbonatées du Crétacé inférieur (station 18), la distension ne peut être que postérieure à ces dépôts. Cependant la rareté des affleurements du Crétacé dans l'Algarve ne permet pas de mieux préciser l'âge de cette phase, d'autant que le faciès dolomitique du Cénomanien est peu propice à l'examen des microstructures tectoniques.

Quant aux accidents imputables sans conteste à cette phase, ils sont peu nombreux en apparence (une dizaine de failles normales à la station 2), cela sans doute du fait de leur faible rejet, de la rareté des stries de glissement, et de leurs rejeux postérieurs.

b) Distension N-S. - La mauvaise qualité des affleurements du Crétacé moyen et l'extrême rareté des terrains de l'Éocène-Oligocène nous ont incités à rechercher la présence de formations qui puissent permettre de dater, avec plus de précision, les déformations observées.

Au NW du bassin méso-cénozoïque de l'Algarve (Monchique, fig. 1), existe en effet un massif subvolcanique (syénites néphéliniques) dont la datation isoto-

Des calcaires à Nummulites seraient toutefois signalés à Luz de Tavira (station 18) selon P. Y. Berthou (Univ. Paris VI), communication personnelle.

rique (Rb-Sr sur roche totale et sur biotites) a donnée un âge de 76 ± 4 m.a. (F. Mendes, 1967-1968). Ces formations sont donc du Crétacé supérieur (Campanien). Dans ce massif, l'observation à l'affleurement et sur fronts de carrières (station 17, fig. 3) montre les effets d'une tectonique cassante :

- failles normales orientées N 060-N 070, à pendage de 85° vers le SE, jouant au contact de filons pegmatitiques de même direction. Ces failles sont soulignées par des stries de glissement à fort pitch (angle entre la strie et l'horizontale du plan allant de 85° à 90°). De plus elles ont une répartition directionnelle très constante donnant un allongement subméridien.

Ces accidents cassants sont en outre systématiquement recoupés par des failles de compression : soit des failles inverses orientées N 120-N 140, à pendage 55° W, portant des stries dont le pitch est voisin de 90° ; soit des décrochements dextres (N 350-N 020) ou sénestres (N 070-N 090), tous subverticaux, portant des stries à faible pitch (de zéro à 10° S).

De ces différentes données on peut en déduire que le massif de Monchique a été affecté par deux phases de déformation cassante : l'une en distension, l'autre en compression postérieurement à la précédente, toutes deux étant post-Campanien et ayant respectivement un allongement N-S et un raccourcissement N 030. Il est à noter qu'aucune structure tectonique ne peut être imputée à des déformations cassantes anté-distension à allongement N-S.

c) Compression N-S. - Les déformations résultant de cette phase se rencontrent sur pratiquement toutes les stations retenues dans le Mésozoïque. Ces structures permettent de déduire ainsi des directions de raccourcissement ponctuelles (fig. 3).

Ce raccourcissement est en moyenne orienté N 015 (jeux conjugués d'accidents décrochants), direction tout à fait compatible avec celle que donne le maximum des microstructures, bien que celles-ci se répartissent dans une fourchette directionnelle allant de N 340 à N 020.

Trois types de commentaires découlent de ces données :

1) Dans l'Algarve, les microstructures se rattachant à cette phase recoupent systématiquement celles qui soulignent les états distensifs antérieurs : c'est le cas pour les stylolites et les fentes de tension associées donnant un allongement E-W qui sont, dans les séries sédimentaires, toujours recoupés par des microstructures identiques mais liées à l'état compressif; c'est aussi le cas dans les syénites de Monchique, mais ici la distension antérieure a un allongement N-S.

On note cependant que le raccourcissement dans le massif subvolcanique (N 030) se situe hors de la fourchette donnée dans les séries sédimentaires par

les microstructures de compression (N 340 à N 020). Ce fait peut être la conséquence de déviations du champ de contrainte au voisinage d'accidents préexistants : en effet, le massif de Monchique appartient à un groupe d'intrusions (massifs de Sintra et de Sines situés plus au Nord) qui s'alignent dans une direction NNW-SSE (C. Teixeira, 1962). De plus, certains auteurs pensent que leur mise en place se situe au début du Campanien lors d'une phase de compression à raccourcissement méridien, le long d'un accident décrochant dextre (A. Ribeiro, 1980; D. Mougnot, sous presse).

Il est donc vraisemblable que la phase de compression post-Campanien, au voisinage du décrochement donc du massif de Monchique, a eu une direction de raccourcissement légèrement déviée par rapport à celle qui apparaît dans l'Algarve sédimentaire. Ainsi, la phase de compression post-Campanien peut-être généralisée à toute la province sud du Portugal.

Enfin, il est à noter que dans les syénites les séries de glissement observées sur plans de faille orientés en particulier N350-N020 (décrochements dextres) n'indiquent qu'un seul mouvement. Il est donc peu probable que l'on puisse leur attribuer un jeu en distension antérieur comme c'est le cas pour des fractures de même direction rencontrées dans la couverture sédimentaire. Autrement dit, la distension à allongement EW est anté-Campanien.

2) Cette compression n'affecte pas le Miocène (Burdigalien) dont les déformations sont, on le verra par la suite, uniquement liées à de la distension postérieure. La compression à raccourcissement N-S est donc anté-Burdigalien. En l'état actuel de nos connaissances, un âge plus précis ne peut être avancé, à moins que la présence d'assises carbonatées de l'Eocène-Oligocène ne se précise par la suite et selon que ces séries présentent ou non des déformations liées à cette phase.

3) Sur la figure 3, on peut remarquer que dans certaines stations la direction du raccourcissement horizontal (Z) s'écarte notablement de sa direction statistique moyenne N 015 : c'est le cas par exemple dans les stations 12, où il est orienté N070, et 16 où se définissent deux raccourcissements suborthogonaux (N 010 et N 100).

Dans le premier exemple, il s'agit sans aucun doute d'une déviation locale du champ de contrainte due à la présence d'un grand accident décrochant visible sur cliché aérien et orienté N140. Cette déviation est sensible, dans une bande étroite de 300 m le long de la faille, distance comparable à celle qui a été par ailleurs définie dans des études similaires antérieures (J. C. Grillo, 1979).

Quant au second, il correspond à des observations faites aussi antérieurement et pour lesquelles une

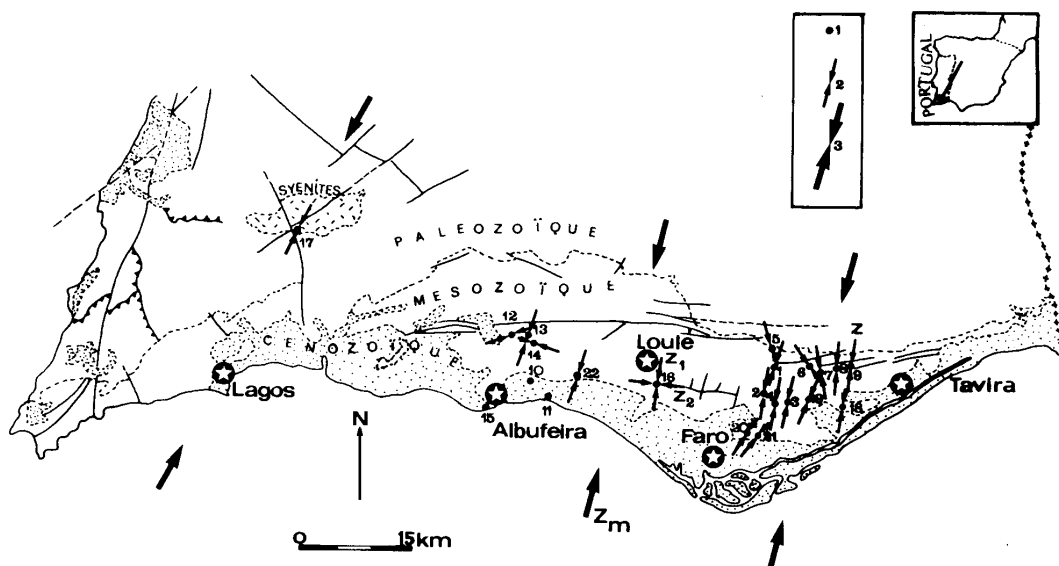


FIG. 3. - Phase de compression « pyrénéenne » dans l'Algarve mésozoïque.

Détermination ponctuelle du raccourcissement horizontal (Z) sur stations de mesures microtectoniques et direction moyenne de ce raccourcissement (Z_m). En cartouche 1 : emplacement des stations et numéro d'inventaire. - 2 : raccourcissement horizontal ponctuel. - 3 : raccourcissement moyen.

Fig. 3. - The "pyrenean" compression phase in the mesozoic Algarve.

Ponctual determination of the horizontal shortening (Z) on microtectonic measures/stations and its mean direction (Z_m); - 1 : stations/situation with their number. - 2 : ponctual horizontal shortening. - 3 : mean shortening

hypothèse avait été émise sur la possibilité d'inversion locale entre contrainte minimale (σ_3) et maximale (σ_1) lors d'une seule et même phase en compression, bien qu'à l'échelle régionale la contrainte horizontale maximum reste constante en direction.

L'observation dans les stations 13 et 14 (Jurassique) de décrochements d'orientation voisine mais à jeux conjugués inversés d'une station à l'autre, et la présence sur des affleurements entre ces stations, distantes d'environ 700 m, de stylolites à pics subhorizontaux perpendiculaires entre-eux et se recoupant mutuellement, tendent à confirmer cette hypothèse (J. C. Grillo, 1981).

d) Distension N-S. - On vient de le signaler, la compression à raccourcissement horizontal subméridien n'affecte pas le Burdigalien.

Dans les bancs lumachelliques de cette formation ne sont en effet visibles que des failles normales à rejet centimétrique et dont les caractéristiques (directions N 080 et N 140 avec des pendages respectifs moyens de 35° N et 80° SW) suggèrent des jeux conjugués suivant un allongement N 020-N 030. Allant dans ce sens, on peut noter d'ailleurs, à l'Ouest du village de Albufeira, la présence de fentes de calcite orientées N 080-N 100 et verticales dans les formations diapiriques du Trias, et

qui recoupent les séquences miocènes. En outre les bancs de lumachelle sont fortement basculés à proximité des failles (stratification N 080, pendage 75° S, station 15). Cette distension est donc post-Burdigalien.

On note toutefois la présence de nombreuses fentes de tension orientées en moyenne N 020 dont les cristaux de calcite sont subperpendiculaires aux épontes. Bien que ces fentes aient la direction du raccourcissement de la phase de compression antérieure, aucune structure tectonique ne permet de les rattacher à cette compression. De plus, il est difficile de se prononcer sur l'ordre chronologique dans lequel elles ont pu apparaître étant donné qu'elles interfèrent, en se recoupant mutuellement, avec des fentes orientées E-W (station 11). Il semble donc qu'elles soient plutôt liées à une phase postérieure dont on va examiner l'éventualité.

e) Distension E-W (?). - Dans les arénites du Pliocène, bien que ce faciès soit peu propice aux observations tectoniques, se dégagent de la matrice par altération différentielle des fentes de calcite statistiquement

le plus fréquemment orientées N 020, plus rarement N 160. Un tel arrangement directionnel suggère une distension à allongement E-W qui serait donc post-Pliocène. Mais il faut signaler qu'en apparence aucune faille normale n'accompagne ces microstructures. Enfin les formations quaternaires n'étant que pelliculaires dans l'Algarve, il n'est pas possible de mettre en évidence des déformations récentes. Cependant, si l'on admet une distension E-W post-Pliocène, on peut expliquer la présence de fentes de tension orientées N 020 dans le Burdigalien et dont la mise en place dans cette série serait alors postérieure à la distension N-S.

3. Synthèse des données structurales.

L'ensemble des données ainsi recueillies permet de proposer une évolution tectonique de l'Algarve mais aussi, en fonction d'une connaissance des déformations affectant le SE de la Péninsule Ibérique, de rattacher ces épisodes à des états de contrainte connus à une autre échelle.

a) Évolution de la tectonique cassante posthercynienne dans l'Algarve. Cette évolution est synthétisée sur la figure 4 où ont été reportés les orientations

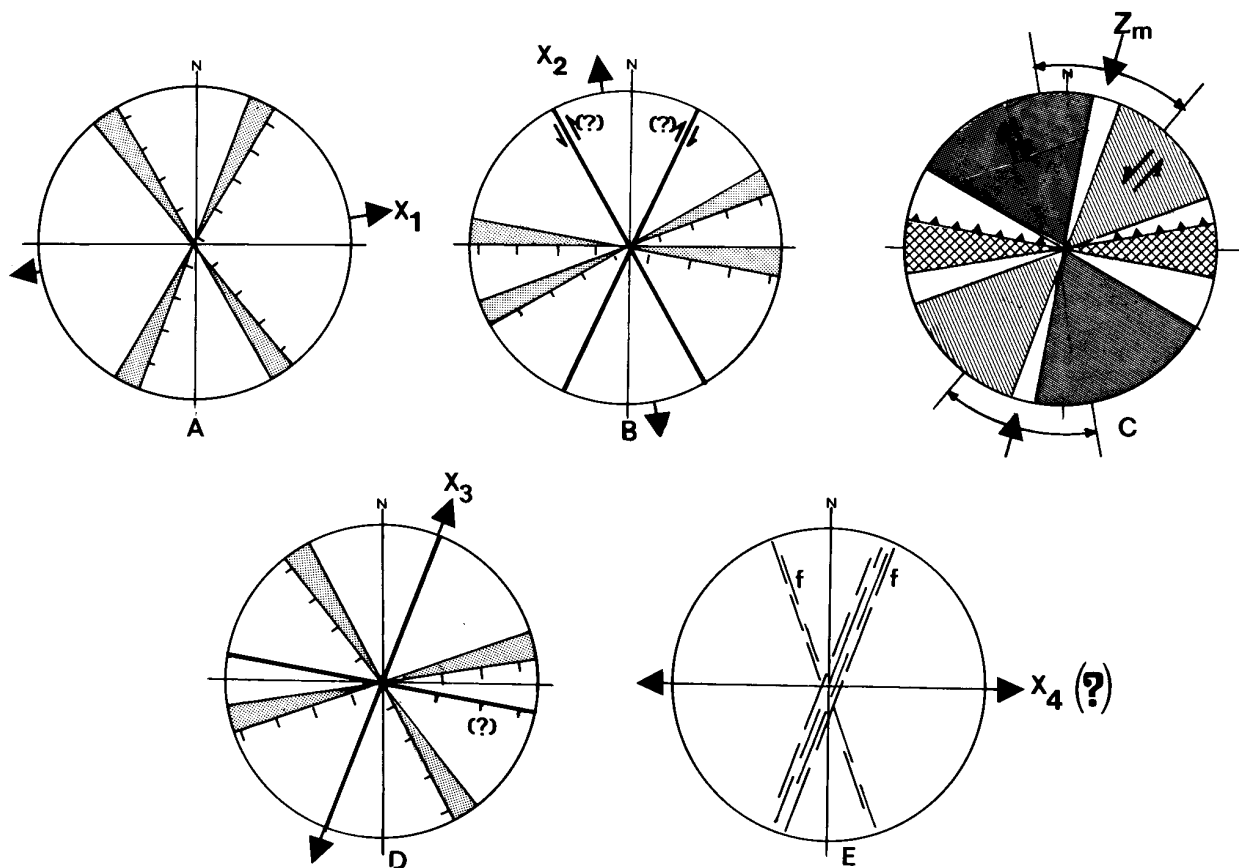


FIG. 4. - Évolution de la tectonique cassante et chronologie des déformations.

A : phase de distension E-W (allongement X_1) et failles normales associées. - B : phase de distension N-S (allongement X_2) avec failles normales associées et jeux décrochants probables sur fractures anciennes (N020-N140). - C : phase de compression N-S (raccourcissement moyen Z_m N015) avec failles inverses E-W (N080-N100) et décrochements conjugués associés NE-SW et NW-SE (N020-N070 et N120-N190). - D : phase de distension N-S (allongement X_3) avec failles normales certaines et possibles (?). - E : phase de distension E-W (allongement X_4) marquée uniquement par des fentes de tension.

FIG. 4. - Evolution of the faulting tectonic and the chronology of the deformations.

A : E-W distension phase (lengthening X_2) and associated normal faults. - B : N-S distension phase (lengthening X_2) with associated normal faults and probable wrench faults on former fractures (N020-N140). - C : N-S compression phase (mean shortening Z_m N015) with E-W inverse faults (N080-N100) and associated wrench faults NE-SW and NW-SE (N020-N070 and N120-N190). - D : N-S distension phase (lengthening X_3) with normal effective or possible (?) faults. - E : E-W distension phase (lengthening X_4) marked only by tension gashes.

moyennes des structures tectoniques observées et leurs différents jeux successifs.

Si l'on compare ces données à l'expression quantitative de la fracturation représentée sur la figure 2, on s'aperçoit qu'il existe une nette superposition directionnelle entre toutes ces structures cassantes : la fracturation n'a donc pas une origine diagénétique, mais matérialise des déformations liées à des états de contrainte tectonique.

On peut ainsi sélectionner des familles de joints qui ont pu bénéficier au cours de leur histoire de plusieurs stades d'ouverture (N 020-N 140 par exemple). Cette idée, importante pour comprendre l'hydraulicité des aquifères karstiques, sera reprise ultérieurement dans le texte.

b) Évolution replacée dans un contexte tectonique à plus petite échelle. De récents travaux portant aussi bien sur les déformations intracontinentales (P. Tapponnier, 1978) que sur les déformations récentes en Méditerranée (Groupe de Recherche Néotectonique sur l'Arc de Gibraltar, 1977), ont montré que les phases tectoniques auxquelles se rattachent bien des structures ont une signification mécanique à l'échelle des plaques. Dans cette optique, on peut tenter de raccorder les observations faites dans l'Algarve à cette signification.

Pour ce qui concerne les deux premières phases de distension, en l'absence d'informations complémentaires sur les autres bassins mésozoïques situés dans l'Ouest de la péninsule Ibérique, il est difficile de leur attribuer une place précise dans les déformations à l'échelle de la plaque.

Toutefois la distension E-W pourrait être synchrone de la fin de l'ouverture du Golfe de Gascogne étant donné en particulier son âge ante-Campanien et la direction moyenne de l'allongement.

Par contre cette signification à l'échelle continentale peut être mieux appréhendée en ce qui concerne la phase de compression à raccourcissement subméri dien bien que son âge soit encore relativement imprécis (post-Campanien et ante-Burdigalien), elle s'apparente à la phase « pyrénéenne » dont le raccourcissement moyen est orienté N 010-N 020 et dont les manifestations tectoniques les plus marquées ont eu lieu à l'Éocène supérieur. Il faut noter d'ailleurs que cette phase a probablement débuté dès le Crétacé supérieur dans le domaine pyrénéen s.s. (M. Mattauer et F. Proust, 1962), ce qui est aussi le cas dans le Sud du Portugal (D. Mougenot, 1980).

Quant aux deux autres phases plus tardives (en distension), elles peuvent s'inscrire dans une reconnaissance des déformations plio-quaternaires effectuée dans le SE de l'Espagne (R. Armijo et al., 1977) : dans le bassin du Guadalquivir en effet, une

extension N-S du Miocène supérieur (Tortonien à Messinien) marque le début de l'histoire tectonique récente de cette région. Dans l'Algarve, la distension à allongement N-S post-Burdigalien semble donc conforme à un modèle de distension généralisé dans tout le Sud de la Péninsule Ibérique à cette époque.

Pour ce qui concerne une possible déformation postérieure liée à une extension E-W, on peut évoquer la période de distension décrite par les mêmes auteurs dans le SE de l'Espagne et qui serait du Pliocène supérieur au Quaternaire ancien. Dans ce cas, il s'agirait là aussi d'un exemple de déformations synchrones dans le Sud de la Péninsule Ibérique.

III. TECTONIQUE CASSANTE ET DIRECTIONS PRÉFÉRENTIELLES DE KARSTIFICATION.

En hydrologie karstique, depuis les travaux de L. Kiraly (1969), il est bien admis que la tectonique cassante, faisant bénéficier certaines fractures d'ouverture, a une incidence prépondérante sur la distribution des perméabilités dans le système : ces ouvertures augmentent la vitesse de circulation des eaux souterraines lesquelles, rendues agressives par leur teneur en gaz carbonique acquise dans l'atmosphère et dans le sol (parfois aussi par émanations profondes), attaquent le calcaire et façonnent des formes karstiques souterraines qui peuvent atteindre de grandes dimensions. Ces formes peuvent avoir l'aspect de véritables conduits dans lesquels la perméabilité est très grande par rapport à celle que présente l'ensemble du magasin finement fissuré. Or comprendre l'hydraulicité de tels systèmes c'est tout d'abord reconnaître l'agencement de ces zones à perméabilités différentes. Pour cela, lorsque l'état de karstification est suffisamment avancé (présence de galeries souterraines naturelles), on peut par l'inventaire et le relevé directionnel des réseaux karstiques (à condition qu'ils soient pénétrables), comparer la distribution de ces conduits à celle du réseau fissural et expliquer, par l'analyse structurale des fractures, pourquoi le karst présente des directions préférentielles de karstification. De plus, en utilisant les données structurales, qui font apparaître des jeux successifs en ouverture et les plans de réseaux, selon que ceux-ci sont fossiles ou actifs, on peut préciser les époques de karstification et montrer que le karst, en s'approfondissant, a (ou n'a pas) changé ses directions préférentielles d'écoulement (R. Guérin, 1973).

Toutes ces données ont trait à l'ensemble du système et concernent sur un plan hydraulique l'écoulement naturel des « nappes ». Mais on peut montrer aussi

qu'en écoulement forcé (pompage sur un forage et observations piézométriques dans la zone influencée), les écoulements empruntent des cheminements qui correspondent à des fractures ayant bénéficié d'ouverture tectonique (C. Droque et J. C. Grillo, 1976).

Dans l'Algarve, les données actuelles sur les systèmes karstiques ne sont que très fragmentaires (analyse hydrodynamique en cours par pompes d'essai; absence de réseau souterrain accessible, bien que les magasins karstiques présentent en surface et en subsurface (fronts de carrières) un lapiaz très développé à fractures ouvertes de près d'un mètre parfois).

Si l'on tient compte toutefois des résultats acquis dans d'autres systèmes karstiques et des observations d'ordre tectonique réalisées dans l'Algarve, on peut cependant aborder le problème du développement des processus de karstification en se basant, pour l'instant,

sur l'organisation fissurale des magasins, les différents stades d'ouverture des fractures et les observations karstologiques faites en surface. Cette démarche débouche sur des problèmes appliqués pour les raisons suivantes :

- elle doit permettre de sélectionner des zones de prospection favorables (recherche de secteurs présentant des fractures d'orientation précise), montrant ainsi que cette prospection n'est pas aléatoire à l'inverse de ce que l'on croit habituellement;

- elle doit fournir aux gestionnaires un outil de travail dans la mesure où elle précise les zones de vulnérabilité des «nappes» aux pollutions (établissement des périmètres de protection).

Dans cet objectif, on peut proposer une évolution directionnelle commune à tous les systèmes karstiques de l'Algarve (fig. 5). Cette reconstitution schématique montre dans quelles directions ont pu se développer les

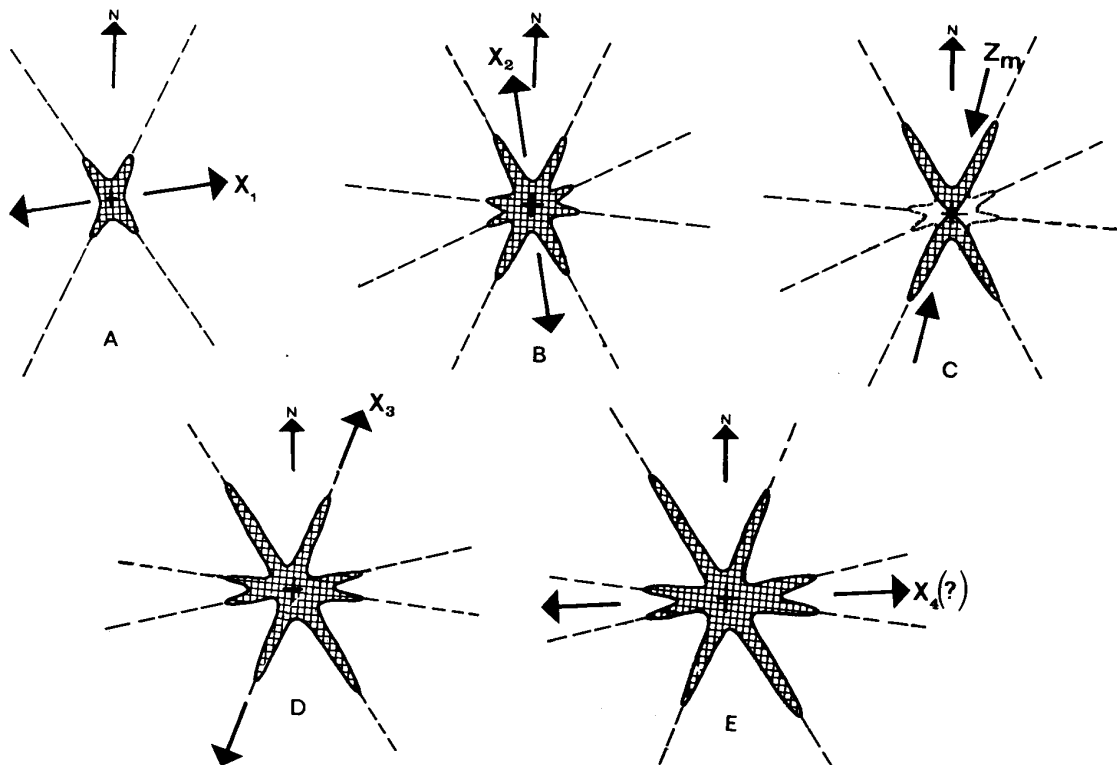


FIG. 5. - Relations entre tectonique cassante et directions potentielles de karstification dans tous les magasins de l'Algarve. Cette évolution tient compte des états de contrainte successifs et des ouvertures des fractures qui en résultent (légende de la figure 4). On notera les ouvertures successives en particulier sur les joints N020 et N140 qui présentent à l'affleurement un développement plus poussé de la karstification que les autres fractures.

FIG. 5. - Relations between faulting tectonic and potential directions of karstification in all the reservoirs of Algarve.

This evolution takes into account the successive stress states and the resulting fractures' opening (see fig. 4 caption). We can note the successive openings in particular on the joints N020 and N140. These joints present at the surface a more developed karstification than the other fractures.

processus de karstification en profondeur en fonction des différentes phases de déformation cassante. En l'absence de critères permettant de préciser la part qui revient à chacun de ces épisodes de karstification, il s'agit d'exprimer un potentiel de karstification qui rend surtout compte des directions selon lesquelles le karst a pu évoluer sans interruption, étant à certaines époques «rajeuni» par des ouvertures de fractures liées à des champs de contrainte successifs. Ainsi on voit que les joints particulièrement orientés N 020 et N 140 ont pu bénéficier de ces jeux ce qui, selon le raisonnement adopté, a favorisé dans ces directions plus que dans d'autres les processus de karstification : or c'est ce qui s'observe au moins en surface puisque, aussi bien dans les karsts jurassico-crétacés que dans le système miocène, ce sont les fractures présentant ces orientations qui sont le plus karstifiées (ouverture métrique).

Bien entendu ceci demande à être confirmé, particulièrement en écoulement forcé par des tests hydrauliques. Mais au-delà de cette analyse régionale, le fait d'avoir pu replacer les différentes phases de déformation dans un contexte tectonique à plus petite échelle (au moins pour quatre d'entre-elles) permet d'envisager que les karsts du Sud de la Péninsule Ibérique ont pu évoluer sur le plan directionnel d'une façon similaire. Ceci demande aussi à être confirmé par des analyses des systèmes karstiques menées de façon semblable en particulier dans le SE de la péninsule.

Conclusion.

Les déformations cassantes posthercyniennes dans l'Algarve relèvent donc d'une tectonique polyphasée. En utilisant d'une part les données fissurales à différentes échelles (sur affleurements et sur clichés aériens à 1/15 000) et, d'autre part, les informations structurales (mouvements sur fractures et microstructures associées), il apparaît que ces déformations résultent de cinq phases

- une distension à allongement E-W, post-Crétacé inférieur et anté-Campanien. Cette extension serait contemporaine de l'ouverture du golfe de Gascogne (phase finale).

- une distension à allongement N-S, post-Campanien et anté-Burdigalien, qui est encore toutefois mal connue à l'échelle régionale et même continentale.

- une compression à raccourcissement subméridien, post-Campanien et anté-Burdigalien, contemporaine de la phase- de compression «pyrénéenne» du Crétacé

supérieur-Eocène inférieur (mouvements précoces) et de l'Eocène supérieur (phase paroxysmique).

- deux distensions plio-quaternaires : la première à allongement N-S, post-Burdigalien, conforme à un modèle de déformations synchrones affectant tout le Sud de la péninsule Ibérique (Tortonien à Messinien); la deuxième à allongement E-W, quoique peu marquée dans l'Algarve, anté-Quaternaire ancien et synchrone elle aussi d'une phase de distension ayant affecté le SE de la péninsule.

Ainsi l'ensemble de ces données tectoniques (à l'exception pour le moment de l'extension N-S anté-Burdigalien) s'intègre à des déformations d'échelle continentale.

Au niveau régional, cette analyse permet de proposer, pour les systèmes karstiques développés dans les séries méso-cénozoïques, un schéma évolutif des directions de plus grande perméabilité (préférentiellement selon les orientations N 020 et N 140). Cependant la vision à plus petite échelle des événements tectoniques suggère que cette évolution touche tous les systèmes karstiques méso-cénozoïques du Sud de la péninsule.

Ces relations entre tectonique cassante et directions préférentielles de karstification demandent bien entendu à être vérifiées à différentes échelles, en particulier par des mesures hydrométriques dans les «nappes» et par des tests hydrauliques sur batteries de forages.

RÉFÉRENCES

- ARMIGO R., BENKHELIL J., BOUSQUET J. C., ESTEVEZ A., GUI RAUD R., MONTENAT C., PAVILLON M. J., PHILIP H., SANZ DE GALDEANO C. et VIGUIER C. (1977). - Les résultats de l'analyse structurale en Espagne (Tortonien à Quaternaire). *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), XIX, n° 3, p. 591-594.
- ARTHAUD F. et CHOUKROUNE P. (1972). - Méthodes d'analyse de la tectonique cassante à l'aide des microstructures dans les zones peu déformées. Exemple : la plate-forme nord-Aquitaine. *Rev. I.F.P.*, XXVII, n° 5, p. 715-732.
- BRIÈRE G. et RAZACK M. (1980). - Application des variables régionalisées à l'étude de la fracturation des magasins aquifères en roches fissurées. *C. R. Acad. Sci., Paris*, t. 291, sér. D, p. 925-928.
- DROGUE C., MAS G., GRILLOT J. C., LLORIA C. et GUÉRIN R. (1975). - Utilisation du filtrage optique pour l'étude de la fracturation des roches carbonatées en Hydrogéologie. *Rev. Géogr. phys. Géol. dynam.*, Fr., vol. XVII, fasc. 1, p. 39-44, 5 fig.
- DROGUE C. et GRILLOT J. C. (1976). - Structure géologique et premières observations piézométriques à la limite du sous-système karstique de Terrieu (périmètre expérimental). *Ann. Sci. Univ. Besançon*, 2^e coll. Hydrogéol. en pays calc., 3^e sér., fasc. 25, p. 195-210, 7 fig.
- GRILLOT J. C. (1977). - A propos de méthodologies d'analyses quantitatives, à l'échelle régionale, de champs de fractures : premiers résultats d'une application. *Rev. Géogr. phys. Géol. dynam.*, Fr., vol. XIX, fasc. 3, p. 219-234, 9 fig.

- GRILLOT J. C. (1979). - Structure des systèmes aquifères en milieu fissuré. Contribution méthodologique à cette connaissance. Thèse Doct. ès Sci., U.S.T.L. Montpellier, 212 p. ronéot.
- GRILLOT J. C. (1981). - A propos des inversions locales de contrainte en tectonique: indices, conséquences sur les déformations, problème de leur signification mécanique (exemple de l'Algarve, Portugal). C. R. Acad. Sci., Paris, t. 292, sér. II, p. 629-632, 3 fig.
- GRILLOT J. C. (sous presse). - Reconnaissance des déformations cassantes à différentes échelles. Nature et essai de corrélation dans l'extrême SW de l'Europe (Portugal). Rev. I.F.P., n° de juillet-août 1981, à paraître.
- GROUPE DE RECHERCHE NÉOTECTONIQUE DE L'ARC DE GIBRALTAR (1977). - L'histoire tectonique récente (Tortonien à Quaternaire) de l'Arc de Gibraltar et des bordures de la mer d'Alboran. Bull. Soc. géol. Fr., (7), XIX, n° 3, p. 575-614.
- GUÉRIN R. (1973). - Liaisons entre karst et tectonique dans le Bas-Vivarais calcaire. C. R. Acad. Sci., Paris, t. 277, sér. D, p. 1617-1620.
- JAMIER D. (1975). - Étude de la fissuration, de l'Hydrogéologie et de la Géochimie des eaux profondes dans les massifs du Mont Blanc et de l'Arpille. Thèse Doct. Sci. Univ. Neuchâtel, 153 p. ronéot.
- KIRALY L. (1969). - Statistical analysis of fractures (orientation and density). Geol. Rundschau, vol. 59, t. 1, p. 125-151.
- MATTAUER M. et PROUST F. (1962). - Sur la tectonique de la fin du Crétacé et du début du Tertiaire en Languedoc. Rev. Géogr. phys. Géol. dynam., Fr., vol. V, fasc. 1, p. 5-11, 2 fig.
- MENDES F. (1967-1968). - Contribution à l'étude géochronologique par la méthode au strontium des formations cristallines du Portugal. Thèse Doct. ès Sci. Fac. Sci. Clermont-Ferrand, Bol. Labo. Minér. Géol. Fac. Ciênc. Lisboa, vol. 11, fasc. 1, 150 p.
- MOUGENOT D., MONTEIRO J. H., DUPEUBLE P. A. et MALOT J. A. (1979). - La marge continentale sud-portugaise évolution structurale et sédimentaire. Ciênc. da Terra, 5, 1^{er} Col. Estrat. Paléog. Méso-Cénoç. portug., Lisboa 1978, n° 5, p. 223-246.
- MOUGENOT D. (sous presse). - Une phase de compression au Crétacé terminal à l'Ouest du Portugal : quelques arguments. Soc. géol. Port., Lisboa, homenagem ao Prof. C. Teixeira, 1980.
- PRATSCH J. C. (1958). - Stratigraphisch-tectonische Untersuchungen im Mesozoikum von Algarve (Süd Portugal). Beith. géol., JB, Hannover, 30, 123 p.
- RAZACK M. (1978). - Contribution à l'étude de la structure des aquifères en roches fissurées : numérisation et analyse quantitative de la fracturation relevée sur clichés aériens. Thèse Doct. Ing., U.S.T.L. Montpellier, 124 p. ronéot.
- RAZACK M. (1979). - Approche numérique et quantitative de l'étude sur clichés aériens de la fracturation des réservoirs en roches fissurées. Rev. I.F.P., vol. XXXIV, n° 4, p. 547-574.
- RAZACK M., DROGUE C., ROMARIZ C. et ALMEIDA C. (1980). - Étude de l'effet de marée océanique sur un aquifère carbonaté côtier (Miocène de l'Algarve, Portugal). J. Hydrology, 45, p. 57-69, 5 fig.
- RIBEIRO A. (1980). - Complexes annulaires subvolcaniques; synthèse de l'évolution paléogéographique et tectonique au Portugal. 26^e C.G.I., Paris, publi. G. 14.
- ROMARIZ C., SILVA M. O., ALMEIDA C. y PALMA F. (1976). - Episódios vulcanosedimentares no Algarve (nota prévia). Bol. Mus. Miner. Geol. Fac. Ciênc., Lisboa, vol. 14, p. 373-376.
- TAPPONNIER P. (1978). - Les mécanismes de la déformation intracontinentale : exemple de la tectonique alpine en Asie et en Europe. Thèse Doct. es Sci. U.S.T.L. Montpellier, 460 p. ronéot.
- TEIXEIRA C. (1962). - La structure annulaire subvolcanique des massifs éruptifs de Sintra, Sines et Monchique. Est. Cient. homenagem ao Prof. J. Carrington da Costa, Junta de Investigações do Ultramar, Lisboa, p. 461-493.

*Manuscrit déposé le 23 janvier 1981,
accepté le 6 juin 1981.*