

Étude par photo-interprétation des phénomènes d'effondrement liés à la dissolution du gypse

Pierre POTHÉLAT
Ingénieur géologue
Section Géologie et matériaux naturels
Division Mécanique des sols et géologie de l'ingénieur
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

L'étude des effondrements de cavités souterraines développées au sein du gypse du Trias a mis en évidence, dans tous les cas, un lien spatial étroit entre ces événements et les anticlinaux à cœur triasique. Cette liaison a pour origine des phénomènes d'halotectonique (bourrage de masses importantes de gypse) survenus dans les charnières anticlinales. La formation de ces pseudo-diapirs s'accompagne, dans les terrains surincombants, de l'ouverture de discontinuités rayonnantes, centrées sur les intumescences.

Ce réseau de fractures, associé au réseau régional, participe au drainage de l'aquifère et à la formation de grands volumes de vides par dissolution du gypse. Proche de la surface, le toit de ces chambres de dissolution est susceptible de céder brutalement en donnant les effondrements que nous connaissons à l'heure actuelle.

L'examen des photographies aériennes a permis d'identifier rapidement les zones d'effondrements potentiels, où la présence de diapirs cachés est révélée en surface par un système de discontinuités rayonnantes ou par une forte densité de structures circulaires. Il a permis également de conclure à un phénomène polyphasé : un ancien effondrement peut être réactivé plusieurs centaines, voire milliers d'années plus tard.

MOTS CLÉS : 41 - Photo aérienne - Gypse - Dissolution - Détection - Cavité - Souterrain - Glissement (terrain) - France - Reconnaissance (prospect.) - Évolution - Mouvement - Fracturation -/Photo-interprétation.

Introduction

Les terrains triasiques sont depuis des milliers d'années le théâtre d'effondrements mettant en jeu d'importants volumes de matériaux (50 000 à 100 000 m³) qui constituent une menace permanente pour les habitants des régions concernées. Ces phénomènes sont dus à la présence de niveaux de gypse, très soluble dans l'eau (2,5 g/l), dans lesquels s'est développé un important réseau de galeries souterraines (karst) souvent proche de la surface.

À une époque où la fatalité est de moins en moins admise par l'opinion publique en cas de catastrophe naturelle, les derniers effondrements de la Clape (1983), de Tourettes (1989) et de Bargemon (1992) dans le Trias provençal, de même que celui de Malbosc (1984) dans le Trias de la bordure cévenole, heureusement sans conséquences pour les vies humaines, furent à l'origine d'une étude dont la motivation principale reposait sur la question suivante : aurait-il été possible de prévoir ces phénomènes, sinon dans le temps du moins dans l'espace, par la recherche d'indices de surface ?

La prévision des effondrements passant par la compréhension des mécanismes mis en jeu, une reconnaissance géologique poussée a été décidée pour reconnaître la nature et la structure des formations dans lesquelles se sont développées les cavités. La première phase de cette étude a reposé sur la photo-interprétation qui, grâce à la vision stéréoscopique, peut permettre de repérer d'anciens effondrements (et/ou affaissements) et les discontinuités associées, et de mettre en lumière un cadre structural, favorable à la formation de vides souterrains, afin de faciliter l'identification de zones potentiellement dangereuses.

La commune de Bargemon (Var) a servi de zone pilote pour la validation de cette méthode en raison de l'occurrence récente d'un effondrement important au lieu-dit le Peyrui [7], qui a fait l'objet d'une reconnaissance géophysique et par forages.

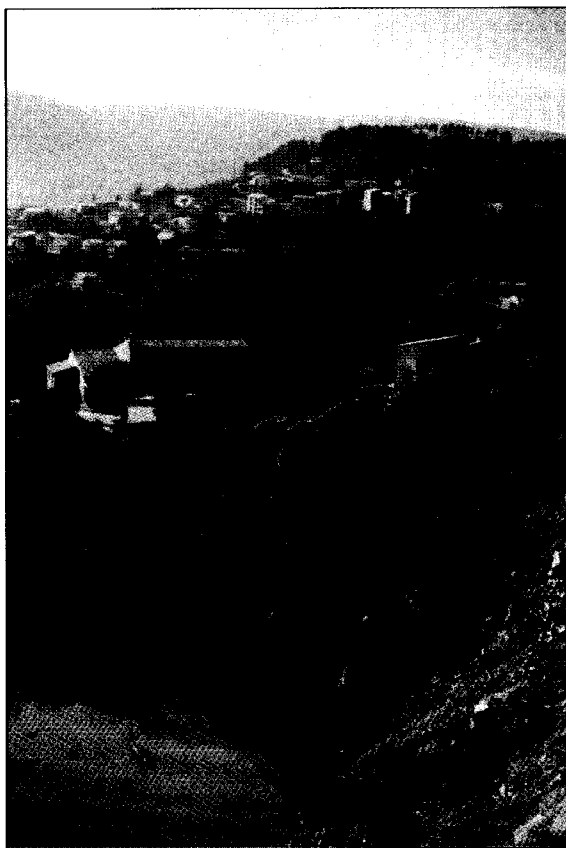


Fig. 1 - Vue de l'effondrement du Peyrui (commune de Bargemon).

L'effondrement du Peyrui

Fin août 1992 s'est produit sur la commune de Bargemon, au lieu-dit le Peyrui, un effondrement de grande ampleur (diamètre : 70 à 80 m, profondeur : 25 à 40 m), mettant en jeu 50 000 m³ de matériaux et situé entre deux routes départementales desservant un secteur pavillonnaire gravement menacé par les possibilités d'extension du phénomène (fig. 1). En 1995, 15 000 m³ de matériaux ont, à nouveau, été engloutis dans le trou.

Afin d'enrayer la poursuite éventuelle des dégradations et de prévenir l'apparition de désordres du même type, l'étude de la dynamique des mouvements s'est avérée indispensable.

À cet effet, un lourd programme de reconnaissance, basé sur des moyens géophysiques (gravimétrie et sondages électriques) et sur la réalisation de dix-huit forages semi-profonds (jusqu'à 92 m), dont un seul destructif, fut mis sur pied.

Rappel de la géologie régionale

La région de Bargemon est située sur la carte géologique à l'échelle 1/50 000 de Fayence (fig. 2), [2].

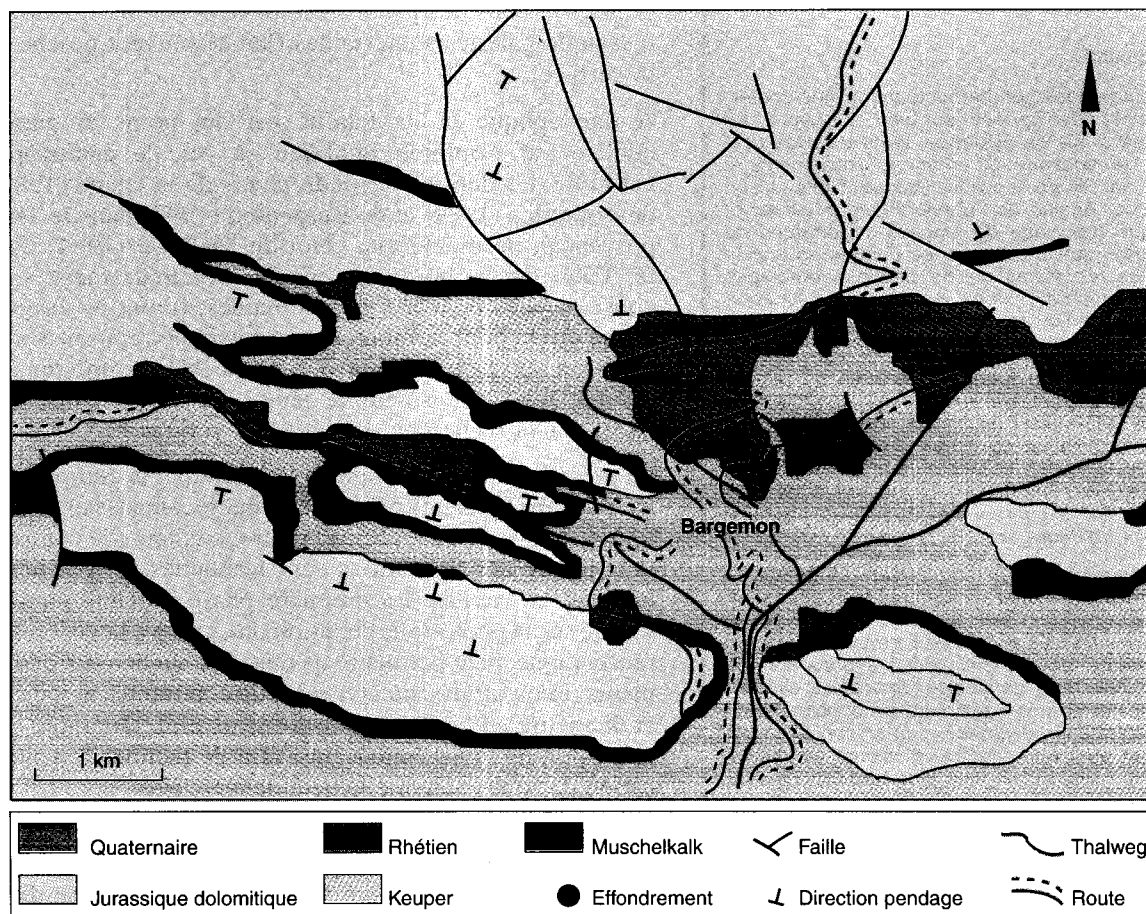


Fig. 2 - Esquisse géologique du secteur de Bargemon (d'après la carte à 1/50 000 de Fayence).

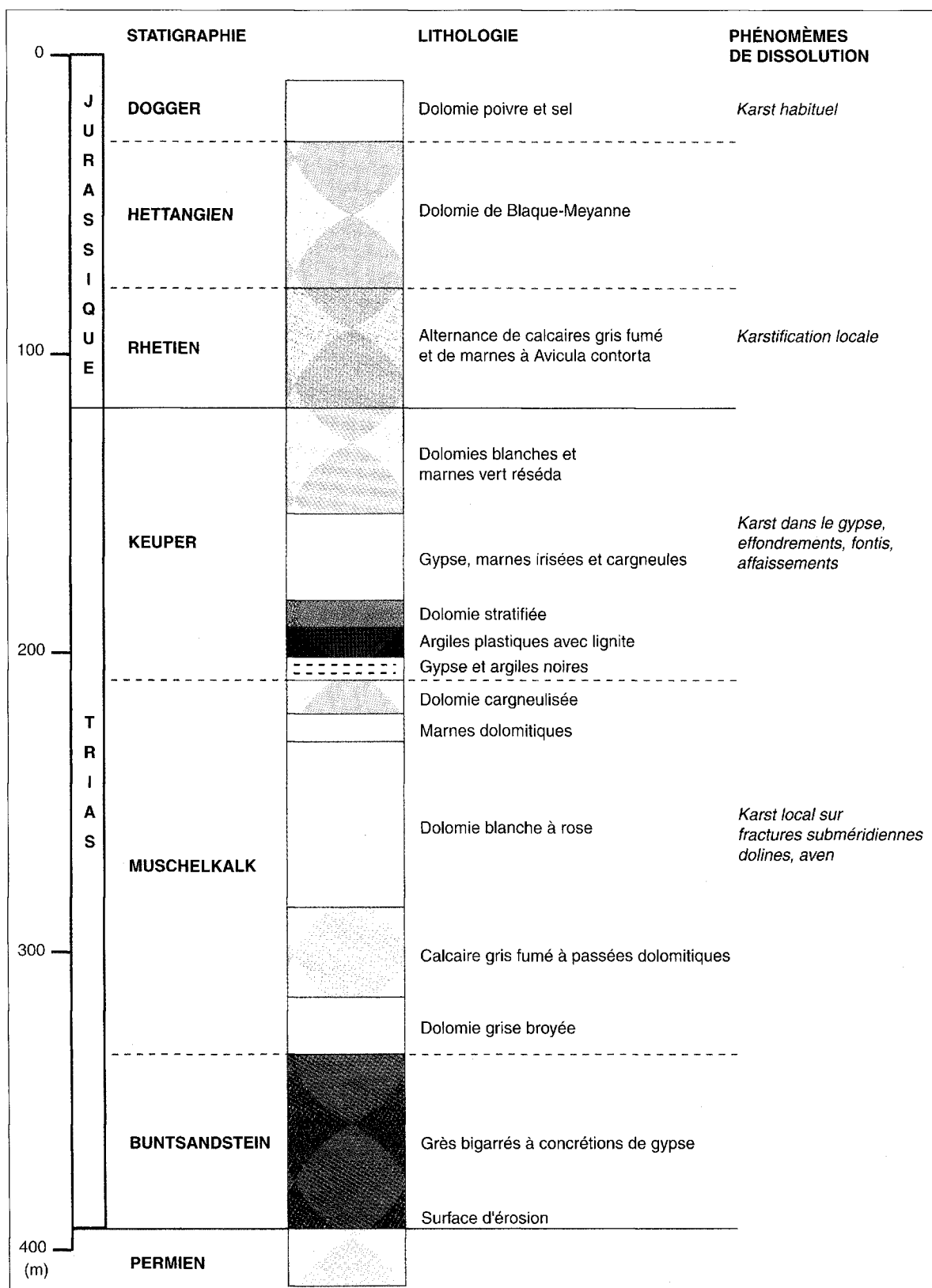


Fig. 3 - Colonne stratigraphique du Trias Provençal.

Lithologie

Le Trias est la formation prédominante dans le secteur étudié (fig. 3).

□ Le Buntsandstein (t1) à la base est représentée par 20 à 30 m de grès bigarrés à concrétions de gypse et galets de rhyolite.

□ Le Muschelkalk (t2), voit se succéder trois épisodes sédimentologiques :

- marnes verdâtres et cargneules (roche calcaireo-dolomitiques vacuolaires), calcaires azoïques et dolomies cargneulisées à la base.
- calcaires dolomitiques alternant avec des mar-

nes, des dolomies cargneulisées, du gypse et de l'anhydrite au centre. Cette formation admet en son sein deux niveaux volcano-détritiques repères, – le Muschelkalk supérieur est fait de calcaires coquilliers.

❑ Le Keuper (t3), importante masse chaotique, renferme de bas en haut : des marnes cargneules et gypse puis des marnes noires avec gypse, des marnes vertes et des argiles plastiques à lignite, des dolomies stratifiées et enfin des marnes irisées à vert pastel, des cargneules et des dolomies blanches. La succession y est difficile à établir en raison de la forte tectonisation locale.

❑ Le Lias inférieur (Rhétien), alternance peu épaisse de calcaires et marno-calcaires, repose en contact anormal sur le Trias.

❑ Il est surmonté par l'Hettangien dolomitique de Blaque Meyanne (80 m). Ces formations, ainsi que la puissante série jurassique du causse de Canjuers surincombante, constituent un réservoir aquifère important.

Structure

Le secteur de Bargemon est remarquable par la succession de structures anticlinales et synclinales à légère vergence sud et d'axes arqués de direction moyenne E-W [2]. Ces plis, contemporains de la phase provençale majeure du Lutétien supérieur, seront repris lors de la phase Oligocène supérieur au cours de laquelle apparaîtra le déversement vers le sud (fig. 4).

La courbure axiale, en relation avec la phase tectonique majeure post-Miocène, a, semble-t-il, favorisé le développement d'un réseau de fractures subméridiennes qui drainent le causse jurassique et s'amortissent dans le Trias.

Au cours de ces épisodes tectoniques, les masses gypseuses du Keuper furent fortement sollicitées en tant que surfaces de décollement. Dans le cœur même des plis, des bourrages, évoluant parfois en diapirs, se sont développés au même titre que des extrusions du noyau dur constitué par le Muschelkalk (secteur du Peyrui).

Interprétation des résultats du programme de reconnaissance préliminaire

Géophysique

La synthèse des résultats de la géophysique est représentée sur la figure 5.

Gravimétrie

La carte des anomalies résiduelles peut être interprétée comme liée à deux directions d'axes légers (anomalies négatives), traduisant un

déficit de matière (cavité ou terrain décomprimé) en profondeur, respectivement N10-20° E et N160-170° E et se coupant au droit de l'effondrement. Le décalage entre les axes légers et l'effondrement lui-même peut être dû à l'attitude (direction, pendage) des failles, légèrement pentées vers l'ouest d'une part et vers le sud-ouest d'autre part.

De fortes anomalies négatives au nord et à l'est de la carte signalent la présence probable d'autres vides (ou de zones décomprimées).

Sondages électriques

Les profils de sondages électriques, réalisés sur une direction équatoriale, de part et d'autre de l'effondrement, corroborent les observations de l'étude gravimétrique, en ce sens que les directions de fractures mentionnées précédemment sont également détectées par cette méthode.

Les sondages

Les faciès rencontrés vont de la roche en place (calcaires plus ou moins fracturés et décomprimés, interbanks argileux) aux matériaux de remplissage (brèche calcaire, argile graveleuse ou éboulis en partie supérieure des forages). Le gypse n'a été rencontré que dans le forage S1 et paraît avoir été lessivé précocement.

Le bloc diagramme de la figure 6 fournit une interprétation de la campagne de sondages :

- les galeries souterraines, à plancher marneux imperméable, sont creusées dans des brèches carbonatées,
- au niveau de la RD 19 la section du réseau karstique montre que le boyau, large d'une quinzaine de mètres, possède une hauteur de 75 m. Le mur (plancher) de la galerie est à la cote 400 m alors que son toit est à 10 m seulement sous la route, qui, à cet endroit, se trouve désolidarisée du substrat par un vide de 0,5 à 3 m de hauteur.

La géométrie des vides ne correspond donc pas à celle d'un karst intragypseux, caractérisé par des chambres de dissolution importantes, compte tenu de la forte solubilité de cette roche (2,5 g/l dans l'eau pure), mais plutôt à celle d'un karst en milieu carbonaté.

Photo-interprétation

Le support de l'étude est représenté par des photographies aériennes panchromatiques noir et blanc à l'échelle du 1/14 500, datant de 1979 (fig. 7).

Les observations relatives à l'examen de ces photos ont été validées sur le terrain.

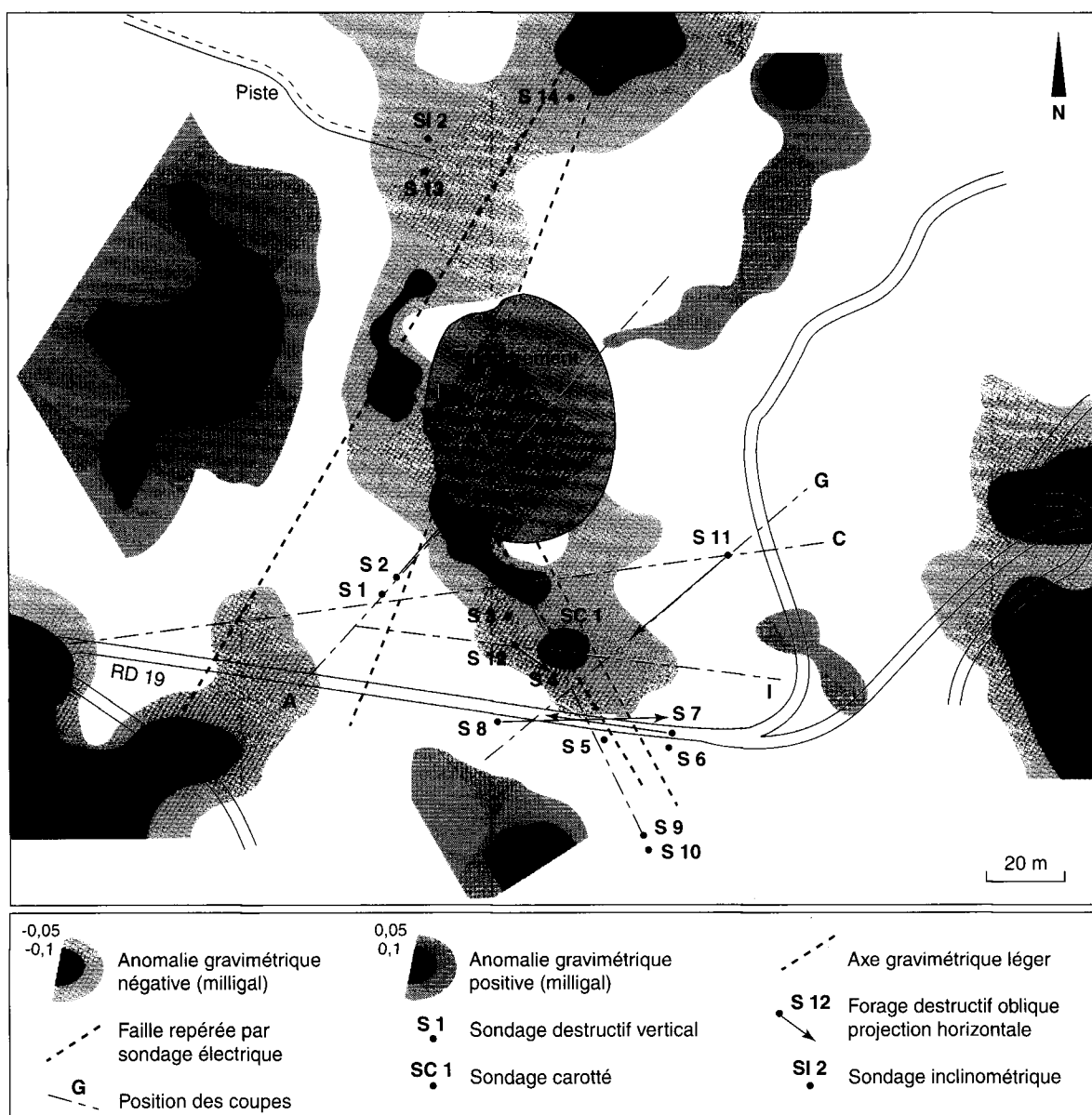
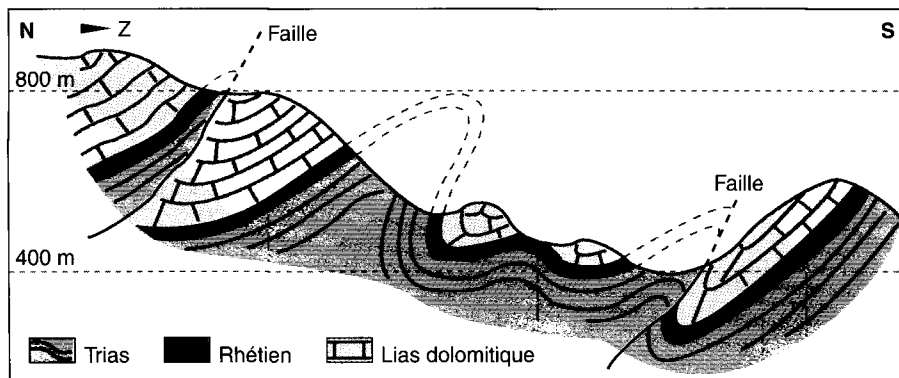


Fig. 5 - Interprétation des données géophysiques, emplacement des forages et des coupes.

Fig. 6 -
Bloc diagramme
schématisant l'interpré-
tation de la campagne de
sondages destructifs.

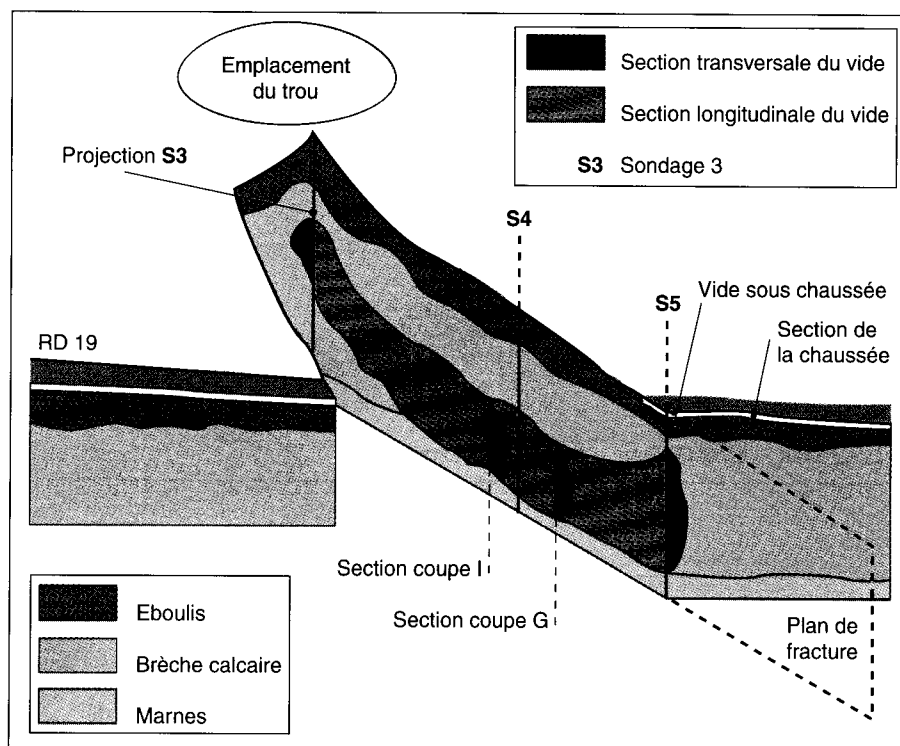
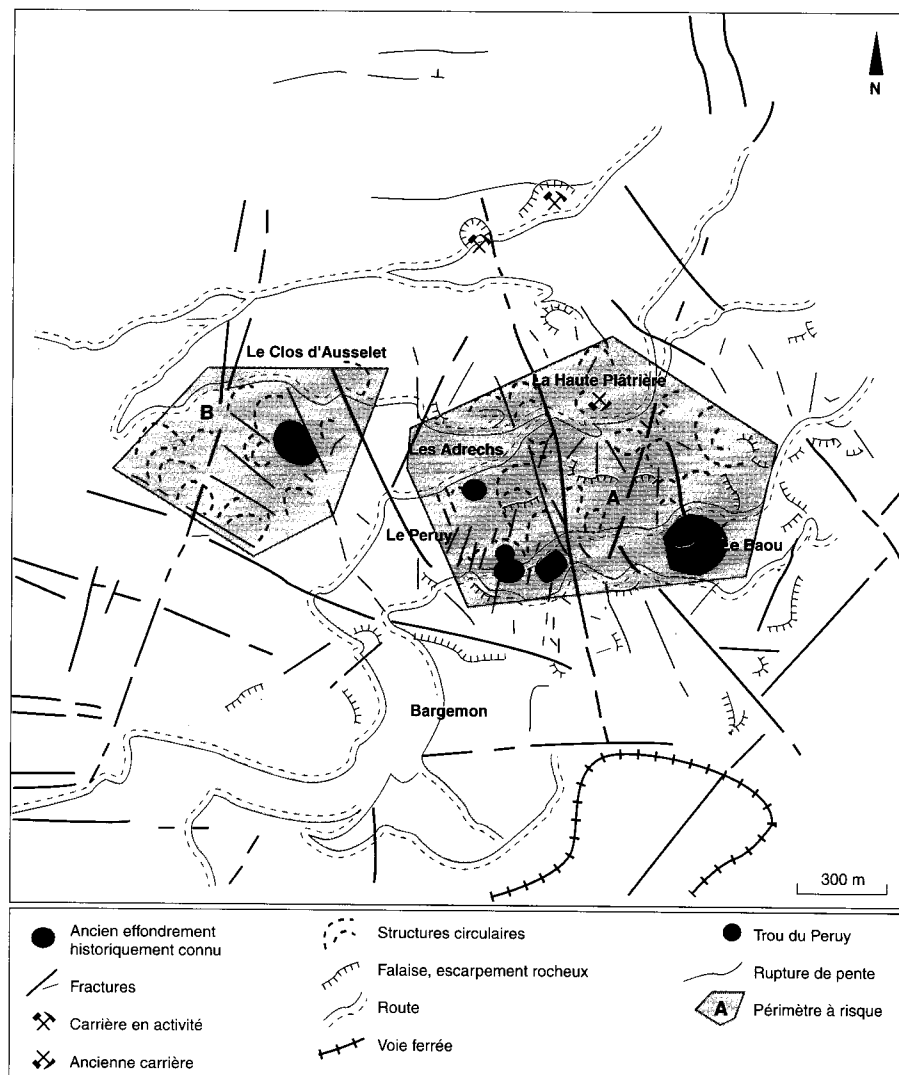


Fig. 7 -
Esquisse structurale
de la région de
Bargemon, d'après
photo-interprétation
(Mission IGN, 1979
à 1/14 500 ;
cliché n° 3007).



La fracturation

Deux familles de discontinuités affectent la zone d'étude (fig. 8) :

- > des accidents subméridiens, visibles sur photographies aériennes, sont synchrones des phases de serrage Nord-Sud qui se sont succédées dans la région. Ces failles, d'extension régionale, drainent l'aquifère jurassique, situé au nord, vers les formations gypseuses très solubles du Trias ;

- > de nombreuses fractures rayonnantes, de moindre extension, se superposent aux directions principales, dans les secteurs du Peyrui, des Adrechs et du Clos d'Ausset.

Ces structures, caractéristiques d'une poussée verticale [3], s'observent habituellement dans l'encaissant des formations affectées par la montée d'un corps intrusif de type magmatique ou salifère (fig. 9). La phase terminale de la mise en place d'un corps magmatique est marquée par un phénomène de subsidence qui se traduit dans l'encaissant par la formation de fractures concentriques. L'absence de celles-ci, de même que le contexte géologique régional (présence de Trias), plaide en faveur de l'occurrence de phénomènes d'halocinèse (tectonique salifère).

La tectonique salifère

Les dômes de sel sont des colonnes essentiellement composées de halite (sel gemme), d'anhydrite ou de gypse, montées par gravité dans les couches supérieures et débouchant ou non à la surface du sol. Dans la formation des diapirs (plis à noyau salifère), nous distinguons les phénomènes d'halocinèse au sens strict et les phénomènes d'halotectonique [4].

L'halocinèse

Trois configurations autorisent la montée d'une couche de sel, de densité voisine de 2, au travers d'une couche de sédiments plus récents et plus denses (fig. 10a) :

- > la flottabilité : si la couche supérieure présente une zone de faiblesse, le sel aura tendance à monter en empruntant cette dernière ;
- > la surcharge différentielle : un corps sableux d'extension limitée (chenal) peut provoquer la montée de deux diapirs de part et d'autre de ce dernier ;
- > la convection thermique : le gradient de densité induit par le flux géothermique peut provoquer une stratification entre une couche supérieure « lourde » et froide et une couche inférieure « légère » et l'apparition d'une cellule de convection capable de faire monter les couches de base dans les couches supérieures (fig. 10a3).

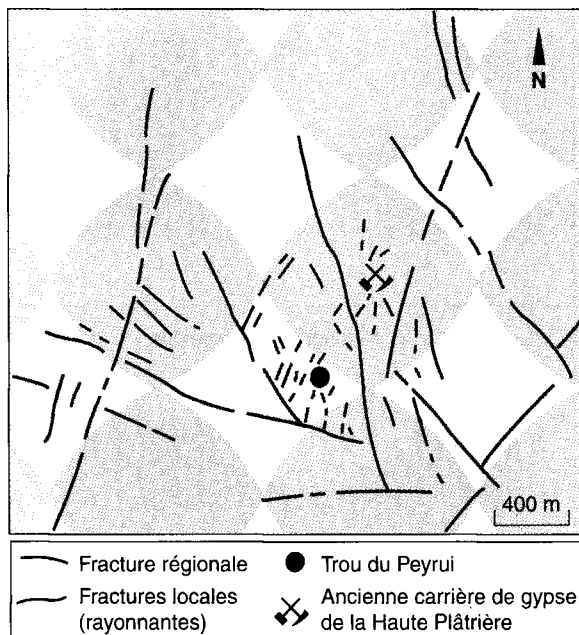


Fig. 8 - Schéma structural du secteur du Peyrui.

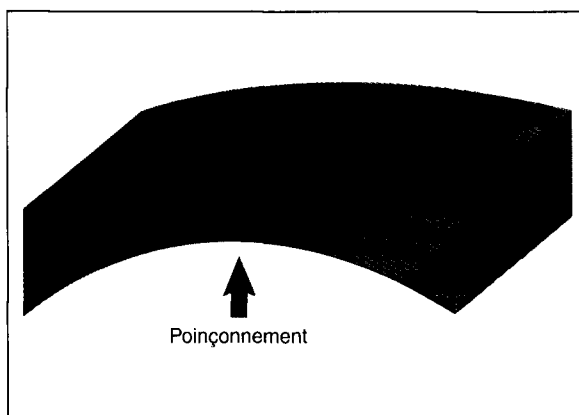


Fig. 9 - Modèle de genèse des failles rayonnantes et concentriques par poinçonnement vertical puis subsidence (les fractures vertes sont créées par la montée de l'intrusion).

L'halotectonique

Les diapirs peuvent prendre naissance sous l'effet de phénomènes compressifs aussi bien que distensifs (fig. 10b) :

- > décollement : les niveaux de gypse, surfaces de décollement par excellence, peuvent être injectés dans des accidents de type pli faillé ;
- > plissement : des surépaississements dans les charnières (bourrages) sont souvent caractéristiques de plis disharmoniques affectant des strates de compétences différentes (la compétence d'une roche est déterminée par son aptitude à la fracturation : un banc de calcaire massif est plus

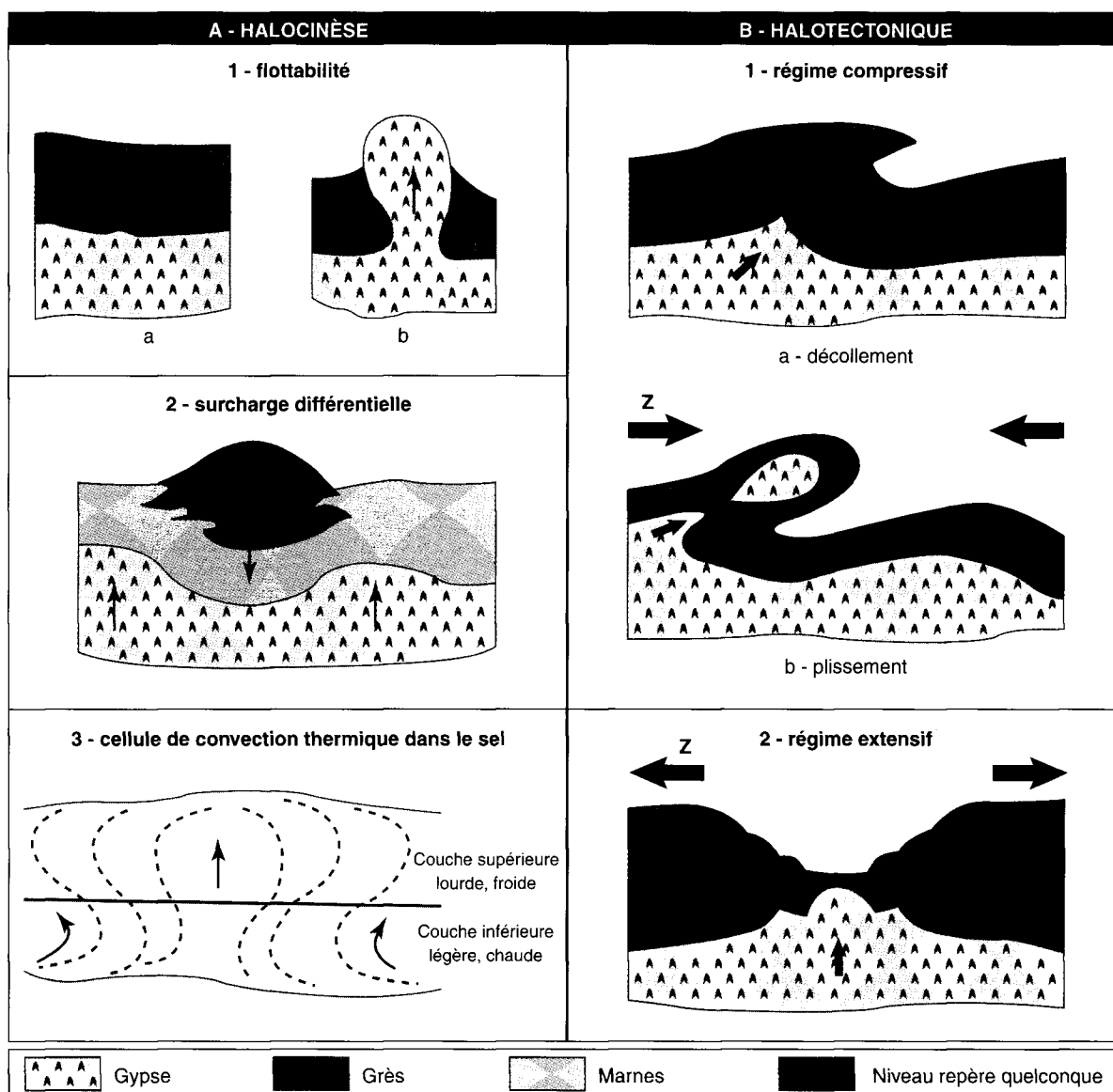


Fig. 10 - Différents modes de genèse des diapirs.

compétent qu'un banc marneux qui se déforme plus facilement). Des masses de gypse peuvent être isolées de la strate de départ dans certaines charnières anticlinales ;

➤ diapir en régime extensif : cette configuration est équivalente à la flottabilité (discontinuité dans la strate surincombante).

Compte tenu du contexte tectonique régional (régime compressif ayant généré des plis à vergence sud), nous pouvons nous attendre à trouver des bourrages de gypse dans les charnières anticlinales et *ipso facto* des vides plus importants dans ces secteurs.

L'examen de la carte géologique de Fayence à l'échelle 1/50 000 confirme cette hypothèse, puisque le secteur du Peyrui est situé au niveau d'un axe anticlinal (fig. 11).

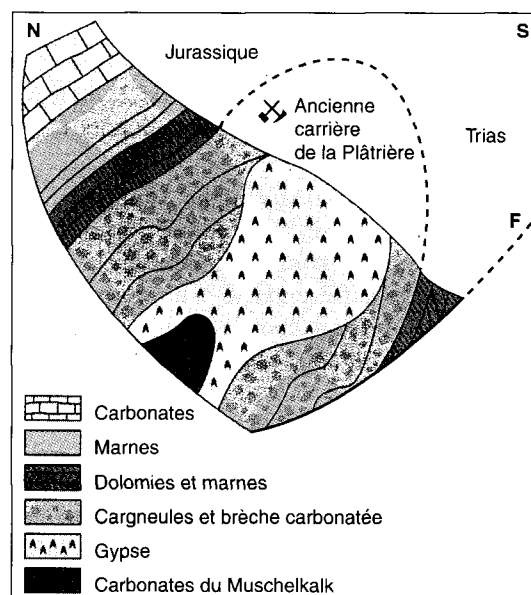


Fig. 11 - Coupe N-S au niveau du Peyrui.

Les structures circulaires

Cinq anciens effondrements ont été répertoriés au nord de Bargemon (fig. 7). Tous de forme circulaire, ils ont l'apparence, soit d'une dépression à bords abrupts (type trou du Baou), soit d'une doline à fond plat.

Ces structures circulaires, facilement repérables sur les photographies aériennes, sont toutes traversées par un ou plusieurs accidents qui semblent matérialiser, en surface, la trace du réseau karstique profond.

L'examen approfondi des photos met en relief la présence d'autres structures circulaires, plus ou moins emboîtées, réparties en deux groupes dans les secteurs du Peyrui (A) et du Clos d'Ausselet (B), où l'on a suspecté la présence de phénomènes d'halocinèse (fig. 7). Elles correspondent soit à d'anciens effondrements comblés, généralement à fond plat, soit à des tassements consécutifs à la formation d'un vide sous-jacent.

À l'emplacement du trou du Peyrui, une structure circulaire, visible sur les photos de 1979, est située à l'intersection de deux discontinuités d'azimuts N10-20° E et N160-170° E également détectées par les méthodes géophysiques. Un effondrement s'est donc déjà produit à cet endroit. Il s'agit vraisemblablement d'un phénomène polycyclique : la direction de la contrainte régionale principale (σ_1) n'ayant pratiquement pas varié depuis la phase majeure alpine : raccourcissement « Z » nord-sud [5], les fractures subméridiennes sont toujours restées ouvertes et on s'accorde à penser que les processus de dissolution/effondrement ont joué de façon pérenne depuis plus de 10 millions d'années (anté- Vindobonien).

La dissolution du gypse du Muschelkalk moyen et du Keuper, rapide dans un premier temps en raison de sa forte solubilité, a présidé au large développement d'un karst dont l'effondrement du toit a entraîné la formation de brèches calcaires et dolomitiques du Muschelkalk supérieur ou des terrains surincombants, ainsi que nous le voyons dans l'ancienne carrière de la plâtrière où des brèches polygéniques comblent une ancienne cavité de dissolution intra-gypseuse (fig. 12).

La reprise de la dissolution par les eaux séléniteuses, plus lente dans les niveaux bréchiques carbonatés (13 mg/l dans l'eau pure), aboutit aux effondrements actuels.

Immédiatement au nord et à l'est de l'effondrement de 1992, deux structures circulaires bien marquées coïncident avec des anomalies gravimétriques négatives et doivent faire l'objet d'une grande attention.

La géométrie de l'aquifère karstique est subordonnée aux directions de fractures subméridiennes sollicitées en traction par la contrainte régionale :

près de Figanières, dans le talus de la route, des fissures ouvertes de direction N20° E, tapissées de calcite, témoignent du jeu de la contrainte actuelle et des phénomènes de dissolution/recristallisation associés (fig. 13).

Il était raisonnable de penser que les vides à l'origine des effondrements récents seraient étroits et allongés selon cette direction, ce qui a été confirmé par la campagne de forages et par la géophysique.

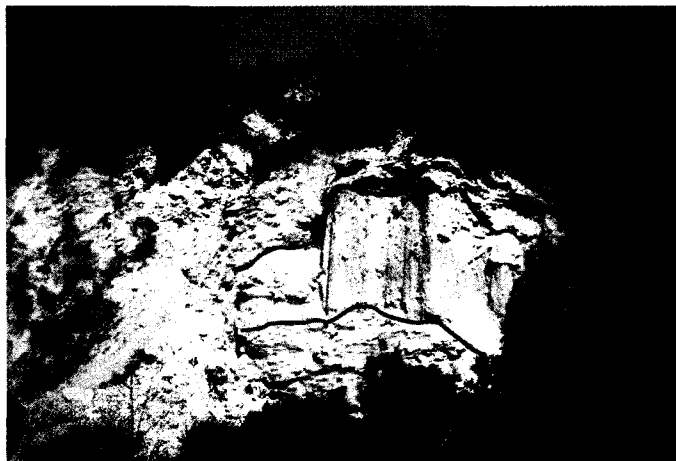


Fig. 12 - Vue de l'ancienne carrière de gypse des Plâtrières (nord du Peyrui) avec poches karstiques remplies de matériaux bréchiques.

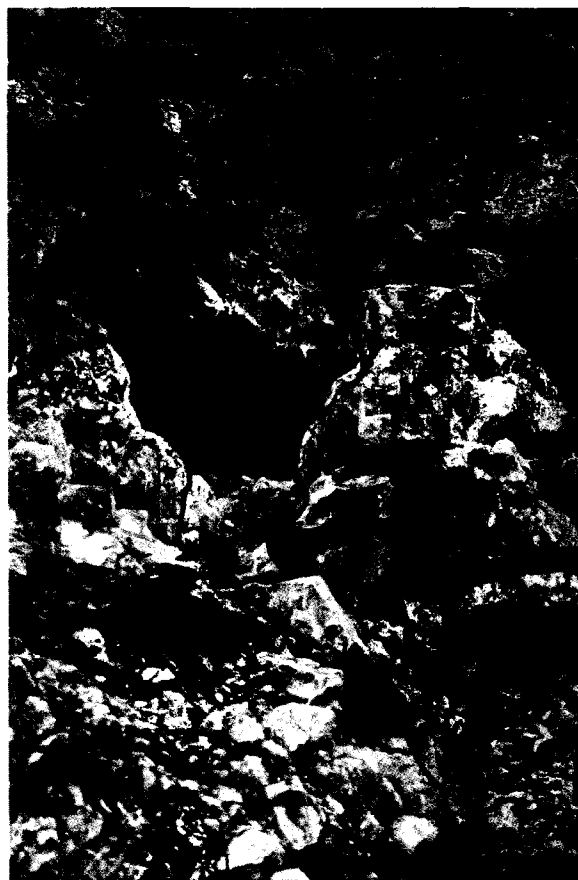


Fig. 13 - Fissures N.20° E et géode tapissée de calcite dans les cargneules du Keuper.

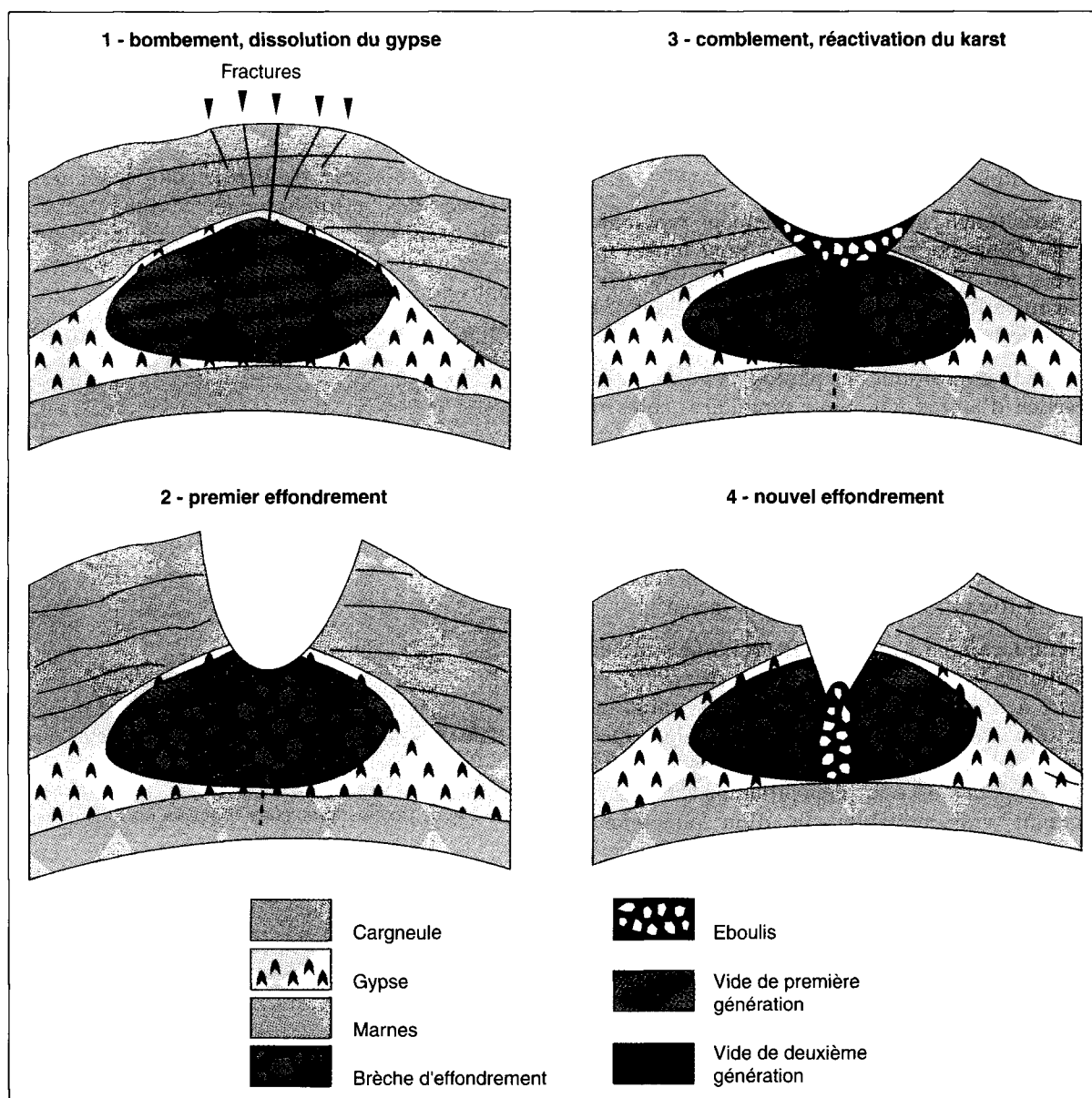


Fig. 14 - Schéma interprétatif de la formation polycyclique du karst et des effondrements (sections perpendiculaires aux circulations d'eau).

Modèle d'évolution

À la lumière des observations précédentes, nous pouvons proposer un modèle d'évolution des effondrements dans le Trias provençal (fig 14) :

➤ les dépôts évaporitiques sont plissés lors des phases tectoniques du Lutétien supérieur puis de l'Oligocène supérieur (première moitié de l'ère tertiaire) qui déterminent le canevas structural de la région (phénomènes halotectoniques et fracturation) ;

➤ les processus de dissolution sont enclenchés dès le Vindobonien (10 millions d'années) avec le lessivage du gypse par des eaux issues de l'aquifère du causse jurassique et circulant le long de fractures subméridiennes sollicitées en traction par σ_1 . La forte solubilité du gypse est à l'origine de la création rapide de grands volumes

de vides : à titre d'exemple, dans le Trias de la bordure cévenole, au sud de la Grand'Combe, les eaux infiltrées du Gardon sont capables de lessiver 4 000 tonnes de gypse par an sur 4 à 5 km, pour un débit de 500 l/s, entre la zone des pertes et les résurgences, ce qui correspond à la formation de 170 000 m³ de vides en un siècle [6]. Les premiers effondrements, très précoces, surviennent au niveau des zones de bourrage où les cavités karstiques sont les plus développées. Ces dernières se remplissent d'un matériau bréchique dolomitico-calcaire ;

➤ la direction de la contrainte régionale n'ayant pas varié, le karst est réactivé et la dissolution reprend le long des mêmes structures. Cependant le processus est plus lent car le gypse a été remplacé par des brèches carbonatées moins solu-

bles. Ceci explique l'allure étroite, haute et allongée des galeries, typique des karsts en pays calcaire. Le développement de chambres plus importantes peut néanmoins se faire aux nœuds des fractures, sites favorables à la montée de fontis au jour (cas du trou du Peyrui). De nouveaux effondrements peuvent alors survenir, tels que celui du trou du Baou, celui des Adrechs, à la fin du siècle dernier ou plus près de nous ceux du Peyrui, de la Clape et de Tourettes.

Extension de la méthode à d'autres secteurs

La définition des secteurs à risque sur l'ensemble de la zone d'étude étant rendue possible par le repérage des structures circulaires et de la fracturation associée, la photo-interprétation a été étendue à une zone comprise entre Draguignan et Fayence.

Les effondrements

Outre les cinq anciens effondrements identifiés à Bargemon, de nombreux autres événements du même type ont pu être repérés près de Draguignan (La Clape). Leurs diamètres varient de 20 m (Tourettes, fig. 15) à 200 m (trou du Baou à Bargemon). De forme circulaire, ces effondrements présentent une bordure généralement raide, voire abrupte. Certains d'entre eux ont le fond plat, témoignant de la présence temporaire d'un petit lac à l'intérieur, tels que l'Estégnaou, près de Figanières, ou la Regagnade au nord de Fayence. D'autres ont la forme d'un cône renversé (les plus récents) ou sont plus ou moins comblés, d'autres encore sont remplis d'eau (aven du Chautard, au sud de Tourettes).

Les anomalies circulaires

Dans les secteurs précédemment cités, des structures circulaires ou en arc de cercle témoignent d'une instabilité du sous-sol en relation avec des processus de dissolution. Il s'agit soit d'anciens effondrements comblés, soit d'affaissements qui peuvent représenter des effondrements potentiels.

Les dolines

De forme variable, circulaire, ovale ou en étoile, de nombreuses dolines affectent la couverture liasique, particulièrement au nord de Draguignan où elles s'alignent suivant des directions N100 et N50° E. Le Causse de Canjuers est également riche en dolines. En bordure du Keuper, elles peuvent déboucher sur un karst triasique. Quelques-unes affectent également les carbonates du Muschelkalk (domaine de l'Eouvière).



Fig. 15 - Fontis du Chautard, commune de Tourettes (1989).

La fracturation radiale

Plusieurs réseaux de fractures radiales, témoins de la proximité de crypto-diapirs, caractérisent certains sites tels que ceux de Fayence-Tourettes et de Trans en Provence. Des effondrements leur sont à chaque fois associés.

Par endroits, l'érosion aidant, des diapirs affleurent, tels que ceux observés près de Seillans (diapir du Baguier, fig. 16) ou au nord-ouest et au sud de Draguignan. Ces diapirs présentent une auréole bréchique parcourue par des discontinuités radiales qui s'amortissent dans le cœur de l'appareil où affleure la masse gypseuse moins compétente à la fracturation (fig. 17).

Des effondrements sont visibles à la périphérie et/ou au centre de ces structures.



Fig. 16 - Diapir de Baguier avec trace d'effondrement au centre de la photo.

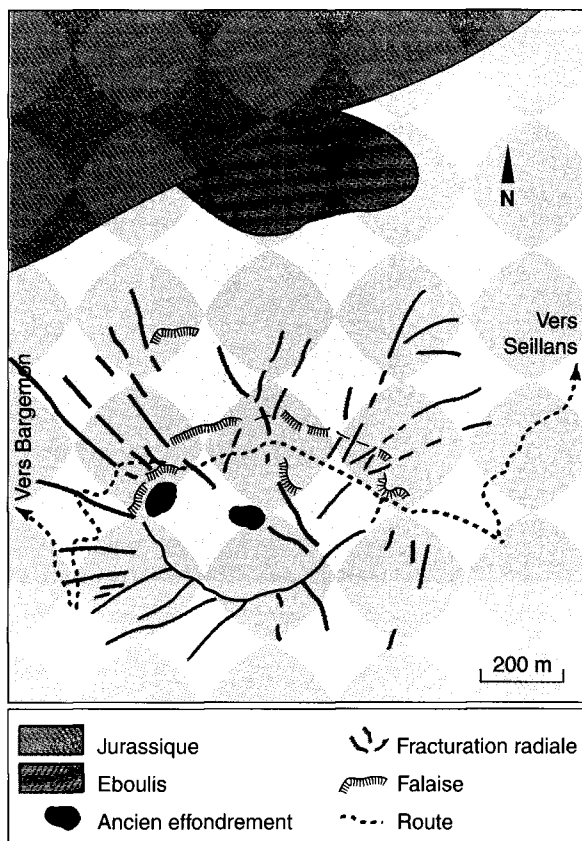


Fig. 17 - « Diapir » de Baguier.

Relations avec la tectonique

Le report des anciens effondrements et des anomalies circulaires sur une carte structurale met en lumière leurs relations spatiales avec les différents objets tectoniques.

Les axes anticlinaux et les failles rayonnantes

Les effondrements surviennent préférentiellement le long des axes de plis anticlinaux, caractérisés par de fréquents bourrages de gypse dans leur charnière. Les bourrages de gypse évoluent parfois en pseudo diapirs décelables grâce à des fractures rayonnantes caractéristiques d'une poussée verticale. Les effondrements sont dans leur grande majorité associés à ces fractures et aux axes anticlinaux. Leur nombre décroît quand on s'éloigne de ces axes (fig. 18).

Les effondrements associés au karst dans le gypse triasique de la région de La Mure (Isère) se sont également produits au niveau de structures anticlinales [7], [8].

Près de Roquevaire (13), des fractures en disposition radiales centrées sur une zone déprimée sub-circulaire témoignent là encore de phénomènes d'halotectonique : les anciennes exploitations de gypse se sont développées sur les flancs d'un diapir résultant de bourrages d'évaporites du Trias au front de la nappe de la Sainte-Baume [9].

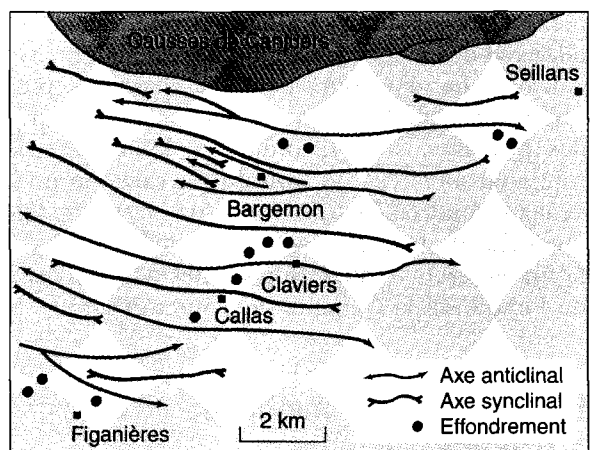


Fig. 18 - Relations spatiales entre les axes de plis et les effondrements de Figanières à Seillans.

Les failles subméridiennes

Les fractures subméridiennes étant restées ouvertes, depuis plus de dix millions d'années sous l'action de la contrainte régionale principale, les phénomènes de dissolution/effondrement se sont développés le long de ces directions.

Une étroite corrélation spatiale est logiquement observée entre cette famille de fractures et les effondrements :

- le trou du Peyrui est situé à l'intersection de deux discontinuités d'azimuts N10° E et N160° E,
- le trou de Tourettes est situé sur une fracture nord-sud empruntée par le ruisseau du Chautard.

Nous pouvons remarquer que les secteurs qui comptent le plus d'effondrements et de structures circulaires sont remarquables par une fracturation nord-sud très développée.

Conclusions

L'occurrence de phénomènes de dissolution/effondrements associés au karst triasique résulte d'une étroite complémentarité entre facteurs lithologiques, structuraux et hydrologiques :

- présence de niveaux de gypse (Keuper) ;
- structures anticlinales pincées (bourrage de gypse) ;
- fractures rayonnantes (diapirisme) et/ou ;
- fractures subméridiennes (jouant en extension sous la contrainte régionale nord-sud) ;
- présence d'un aquifère important drainé vers les formations gypseuses.

Les zones les plus propices aux mouvements de terrain sont caractérisées par la présence de structures annulaires et une fracturation rayonnante visibles sur les photographies aériennes, toujours en relation spatiale directe avec les axes anticlinaux, d'où l'importance de la connais-

sance de la géologie régionale qui permet d'orienter efficacement les investigations.

La technique mise en œuvre lors de cette étude n'est évidemment pas adaptée à la prévision d'effondrements imminents, mais elle permet de circonscrire des secteurs à risque potentiel.

Pour préciser la présence de cavités sous les structures circulaires en relation avec des frac-

tures subméridiennes et/ou radiales, compte tenu de la géométrie du réseau karstique, les meilleurs moyens paraissent être la microgravimétrie qui est la méthode la plus performante actuellement connue [10] et les sondages obliques.

Le suivi précis des déformations des routes traversant un secteur à risques représente un autre moyen de repérage des vides sous-jacents.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] LCPC - CETE d'Aix-en-Provence (1996), *Étude photo-interprétative appliquée à la détection de zones à effondrements potentiels. Le Trias provençal de Fayence à Draguignan (Var)*, rapport de recherche.
- [2] *Notice stratigraphique de la carte géologique à 1/50 000 de Fayence* (1966), Éditions du BRGM.
- [3] GIDON M. (1987), *Les structures tectoniques*, Manuels et méthodes n° 15, Éditions du BRGM.
- [4] GAULLIER V. (1993), *Diapirisme salifère et dynamique sédimentaire dans le bassin liguro-provençal : données sismiques et modèles analogiques*, thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI).
- [5] MÜLLER B. et al. (1992), Regional Patterns of Tectonic Stress in Europe. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, B8, pp. 11 783-11 803.
- [6] INERIS SSE (1994), *Effondrements dans le karst triasique gypseux du secteur Malbos (La Grand'Combe - Gard)*, note de synthèse.
- [7] INERIS SSE (1994), *Recherche de karsts dans le gypse triasique - Hameaux de la Sauzie et de Versenat, commune de Susville-La-Mure (Isère)*, note de synthèse.
- [8] INERIS SSE (1994), *Recherche de karsts dans le gypse triasique près des habitations des hameaux de la Sauzie et de Versenat - Bilan de la campagne de forages profonds 1994 - Commune de Susville, canton de La Mure (Isère)*.
- [9] LCPC - (1996), *Anciennes carrières de gypse de Roquevaire (13) ; Risques d'effondrement associés*, rapport interne.
- [10] LAGABRIELLE R. (1994), La détection des cavités souterraines, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 191, mai-juin, pp. 91-92.

ABSTRACT

A photogeological study of collapse phenomena due to the dissolution of gypsum

P. POTHERAT

A study of the collapse of underground cavities in Triassic gypsum has shown that in all cases there is a strong spatial association between these events and anticlines with Triassic cores.

This association is caused by halotectonic processes which take place in the anticlinal hinge (which are filled with large amounts of gypsum).

The creation of these pseudo-diapirs is accompanied by the appearance of cracks in overlying formations which radiate from the raised areas.

With the regional network, this network of cracks contributes to drainage of the overlying aquifer and the formation of large cavities as a result of dissolution of gypsum. Near the surface, the roof of these chambers is likely to cave in suddenly giving rise to the collapse phenomena which are currently observable.

By examining aerial photographs we can identify rapidly potential collapse zones produced by hidden diapirs. These appear on the surface as a system of radiating cracks or a high density of circular structures.

We have also reached the conclusion that a multiphase process is involved. An existing collapse may be reactivated hundreds, or even thousands, of years later.