

---

# *Géologie profonde de la France*

*Philippe BARTH*

Initié en 1982, le programme « Géologie profonde de la France » (GPF) avait pour objectif de préciser la connaissance de notre sous-sol par une campagne de forages. En effet, si les prospections géophysiques nous dévoilent les profondeurs du globe, il est parfois nécessaire d'avoir une vision plus directe des roches. Bien sûr, dans ce cas, nous ne pouvons viser que des objectifs superficiels car un forage se mesure en milliers de mètres (le record est de 12 km pour un forage scientifique en Russie) alors que la tomographie sismique nous éclaire les parties profondes de notre planète jusqu'à 3 000 km !

Quatre projets ont été réalisés, qui visaient quatre thèmes distincts :

- L'apex d'un massif granitique à Echassières dans l'Allier : un forage de 900 m.

- Le thermalisme d'un socle fracturé dans la zone Cézallier-Chassole dans le Puy-de-Dôme : trois forages de 188 m, 500 m et 1 400 m.

- Une anomalie magnétique dans le bassin de Paris à Sancerre-Couy dans le Cher : un forage de 3 500 m.

- Les interactions fluides-roches sur la bordure du bassin du Sud-Est à Balazuc et Uzer, en Ardèche : deux forages de 1 725 m et 980 m.

Après une rapide présentation de ce dernier thème, nous passerons en revue certaines des recherches qui ont précédé les forages ; ceci nous permettra de présenter un aperçu de la géologie de notre département.

Après la présentation technique des deux forages ardéchois, quelques résultats en rapport avec l'objectif initial seront enfin présentés.

# Carte géologique simplifiée du département de l'Ardèche

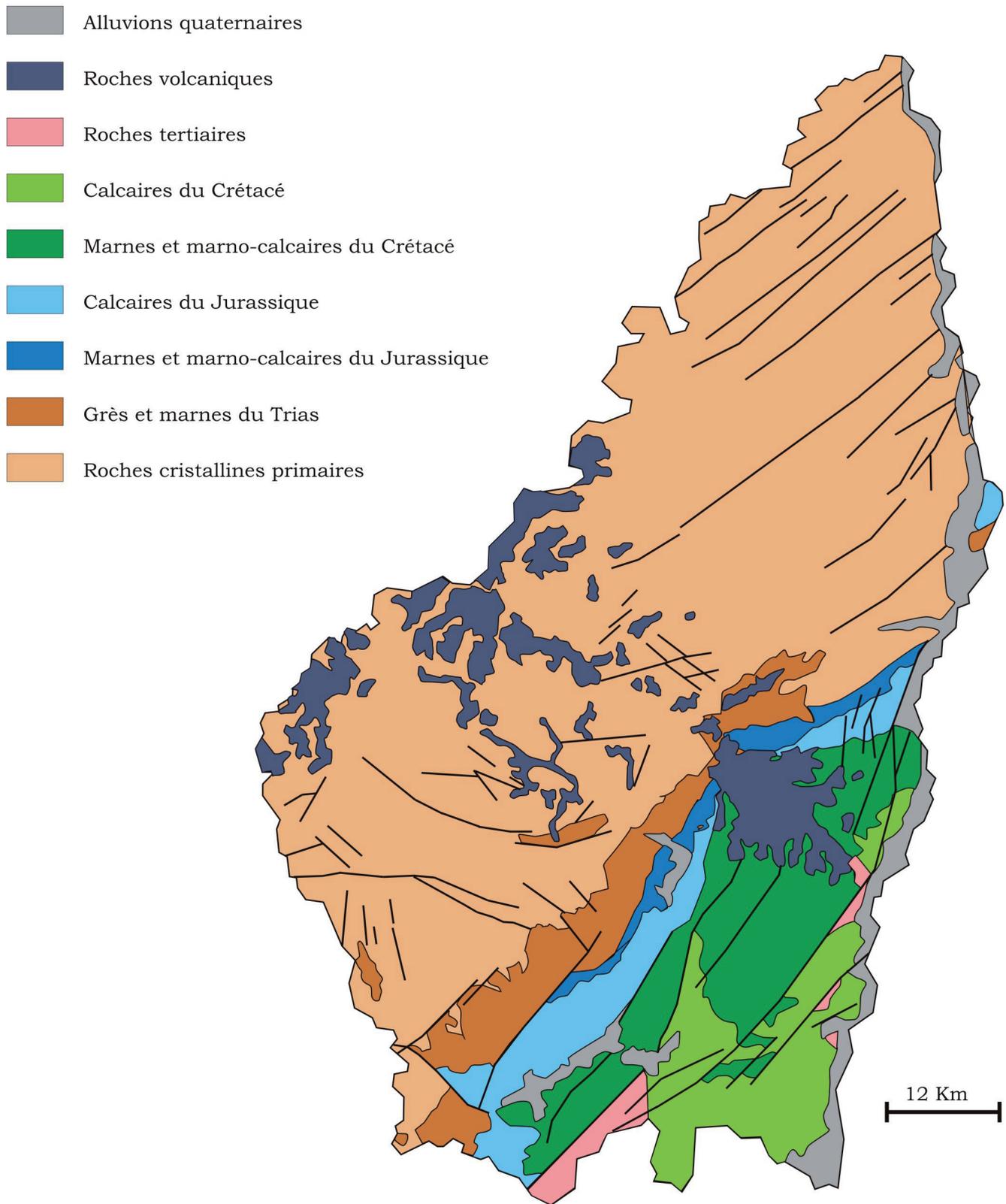


Fig. 1

## Le thème ardéchois : les interactions entre les roches sédimentaires et les fluides qui les baignent

Ce thème a une importance capitale en géologie, tant au niveau fondamental qu'au niveau de la recherche de ressources.

Les roches que nous observons en surface ont une très longue histoire. Si les granites et micaschistes qui forment les deux tiers ouest et nord-ouest de l'Ardèche ont leur origine à la fois profondément dans la croûte terrestre et profondément dans le temps (ère Primaire, environ 300 millions d'années), la partie sud-est a une origine plus récente (ères Secondaire et Tertiaire, 250 à 25 millions d'années) et plus superficielle. En effet, les roches qui composent ce triangle La Voulte - Les Vans - Bourg-Saint-Andéol ont leur origine au fond d'une mer aujourd'hui disparue (figure 1).

Sables et boues argileuses ou calcaires se sont lentement accumulées sur des fonds marins de profondeurs variables en emprisonnant de l'eau de mer. Au fil du temps, le tassement et l'élévation de température provoquée par l'enfouissement ont provoqué des changements physiques et chimiques qui ont transformé ces sédiments en roches. Ce phénomène, qui peut s'étirer sur des millions d'années, est appelé diagenèse. Durant tout ce temps, l'eau de mer originelle se trouve en partie expulsée mais la part qui reste prisonnière des roches en formation peut se déplacer, dissoudre des éléments à certains endroits, en déposer à d'autres endroits.

L'interaction entre ces fluides et la roche peut donc augmenter ou réduire la porosité de cette dernière, l'appauvrir en certains éléments ou, au contraire, les concentrer.

On aperçoit tout de suite l'impact que ceci peut avoir sur une éventuelle exploitation des roches : aptitude à stocker des fluides (eau ou hydrocarbures) et concentration d'éléments métalliques notamment.

## Les données préalables et le contexte géologique des forages

Les études géologiques de surface, notamment l'établissement de la carte géologique de la France au 1/50 000e par le BRGM, permettent d'apprécier, parfois assez finement, les prolongements en profondeur. Les études menées par la société Pennaroya qui a exploité les mines de plomb argentifère de Largentière ont permis d'affiner la connaissance des terrains situés les plus près du socle primaire, notamment grâce à deux forages de plus de 200 m à Uzer. Les terrains plus éloignés ont été reconnus en forage par la Société nationale des pétroles d'Aquitaine, à Vallon-Pont-d'Arc en 1959, à Villeneuve-de-Berg et à Valvignères en 1960.

En 1989, dans le cadre du programme GPF, préalablement à l'implantation des forages, la Compagnie générale de géophysique a procédé à une vingtaine de kilomètres de profils sismiques. Le principe de cette technique repose sur la propagation des ondes sismiques dans le sous-sol. Des camions vibreurs envoient des ondes sonores dans le sol qui sont ensuite enregistrées par des capteurs (géophones) disposés en ligne. Dans un milieu homogène, le temps d'arrivée de l'onde au capteur ne dépend que de la distance de celui-ci à la source. Dans un sous-sol constitué de roches différentes empilées les unes sur les autres, la réflexion des ondes sur les différentes discontinuités, limites de couches et failles, altère leur propagation. Une analyse faisant appel à de complexes traitements informatiques permet d'identifier des structures profondes. Sans aucune connaissance de la nature des roches, cette technique est dépourvue d'intérêt mais la cartographie géologique de surface et les sondages connus à proximité permettent de « caler » les profils sismiques pour les traduire en coupes géologiques.

La figure 2 est une coupe simplifiée traversant toute la série sédimentaire depuis le socle primaire vers Lar-

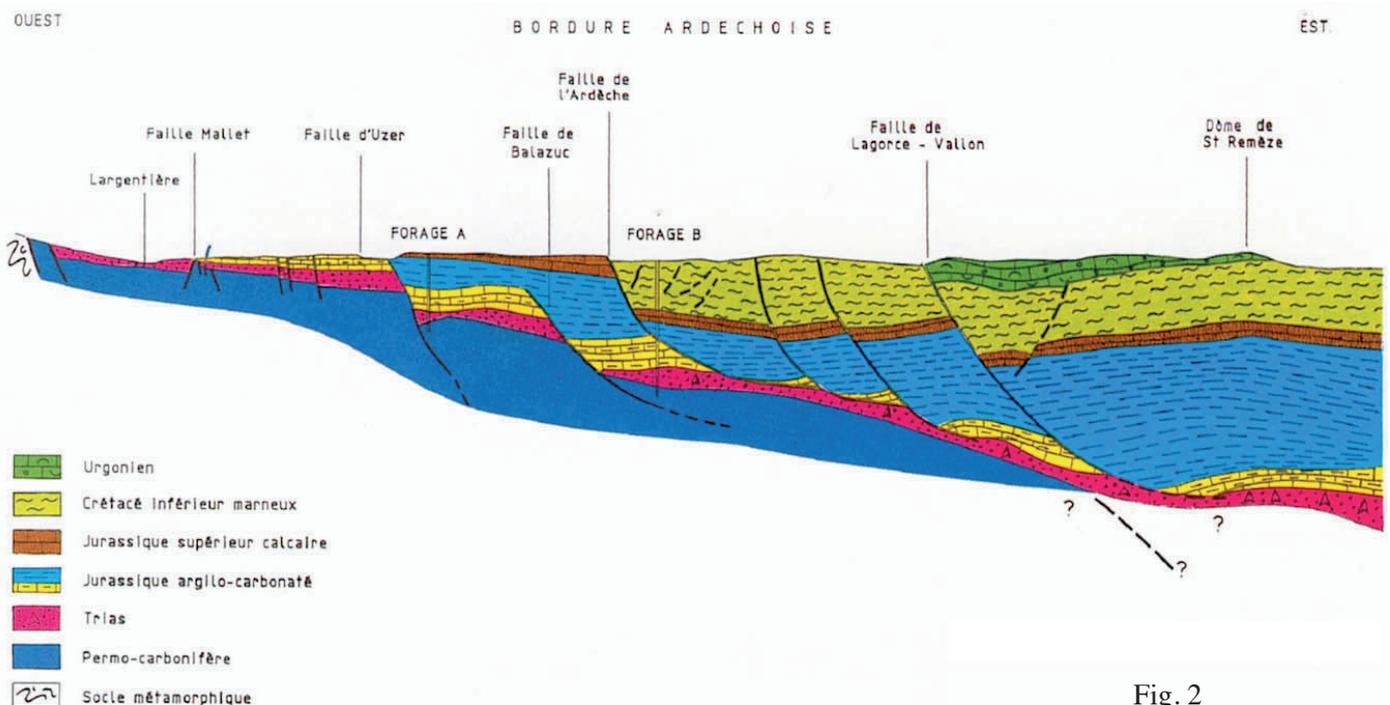


Fig. 2

gentière jusqu'au-delà de Saint-Remèze. Elle constitue une synthèse de toutes les études qui ont précédé les forages.

Cette coupe montre l'empilement des différents terrains sédimentaires déposés durant l'ère Secondaire, très schématiquement :

- Grès, argiles et calcaires du Trias,
- Calcaires plus ou moins sableux et argileux du Jurassique inférieur,
- Calcaires et marnes du Jurassique moyen,
- Calcaires du Jurassique supérieur,
- Marnes et marno-calcaires du Crétacé inférieur,
- Calcaires urgoniens de la fin du Crétacé inférieur.

D'autres niveaux, Crétacé supérieur et tertiaires, sont présents en Ardèche mais non présents sur la coupe.

La coupe fait aussi apparaître de nombreuses failles qui « tronçonnent » la série sédimentaire en l'affaissant vers le sud-est.

Ces failles sont essentiellement de deux types :

- Des failles qui affectent les niveaux primaires (permien et carbonifère) mais pas les niveaux du Jurassique supérieur,
- Des failles qui décalent toute la série mais s'amortissent dans les niveaux argileux du Trias et du Jurassique inférieur.

Initialement, il était prévu d'implanter les deux forages de part et d'autre de la faille de Balazuc : le forage 1 à proximité de la faille d'Uzer, le forage 2 au travers de la faille de l'Ardèche. Au vu des résultats du forage de Balazuc 1, il a été décidé d'implanter le second forage à l'ouest de la faille d'Uzer.

Quoi qu'il en soit, il apparaît que les failles ont largement guidé l'implantation des forages. Ceci s'explique car ces failles peuvent jouer un rôle fondamental dans la circulation des fluides interstitiels dont la relation avec les roches était l'objectif de l'étude.

### Une rapide histoire géologique

Cette coupe nous permet de faire un rapide survol de l'histoire géologique ardéchoise (voir l'échelle géologique simplifiée, figure 3).

Il y a 300 Ma, une puissante chaîne de montagne, la chaîne hercynienne, occupait le Massif central et tous les massifs anciens de France.

Il y a 250 Ma, l'érosion en était venue à bout : elle se limitait alors à une pénéplaine qui a été peu à peu envahie par la mer. En se désagrégant, les derniers reliefs ont alimenté en sable et en argile des bassins marins peu profonds. Ces sédiments dits « détritiques » sont devenus les grès et argilites du Trias. Un épisode d'approfondissement marin est responsable du dépôt d'une couche calcaire entre les niveaux de grès. Ce sont ces niveaux de grès plus ou moins cimentés qui furent la cible de l'opération car ce sont des roches perméables dans lesquels les interactions fluides-roches sont les plus intéressantes.

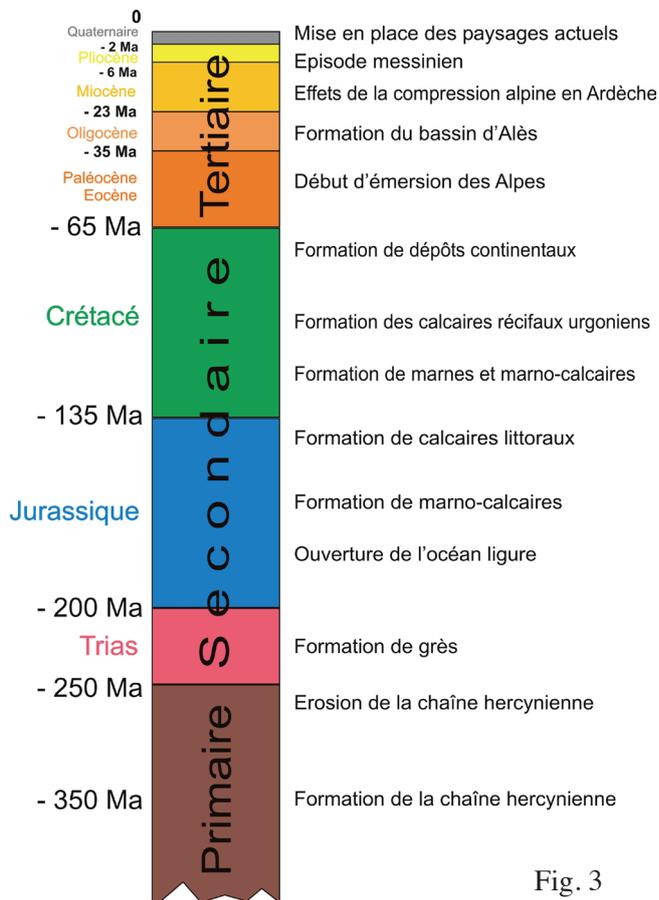


Fig. 3

A partir de -200 Ma, la croûte terrestre s'étire ce qui provoque son enfoncement et sa fracturation par le premier type de failles identifié plus haut. La mer devenant plus profonde, des milliards d'organismes planctoniques à coquilles microscopiques vont alors provoquer l'accumulation de boues calcaires plus ou moins mélangées d'argile.

Pures, les boues vont évoluer vers des calcaires compacts qui forment nos somptueux paysages ; mêlées d'argiles elles deviendront des marnes ou des alternances de marnes et de calcaires à l'origine de reliefs plus doux.

Deux cycles d'approfondissement et de comblement du bassin marin ont produit deux séries superposées comportant des marnes à la base, surmontées de marno-calcaires puis de calcaire compacts. Il s'agit de la série jurassique terminée par les calcaires de Païolive et de la série crétacée coiffée par l'imposante carapace des calcaires urgoniens dans lesquels sont creusées les gorges de l'Ardèche.

Durant le Crétacé supérieur, à partir de 80 Ma, la mer se retire peu à peu mettant fin à l'histoire sédimentaire ardéchoise.

Au Tertiaire, la formation de la chaîne alpine va bousculer la bordure est du Massif central et les roches sédimentaires associées. C'est à cette époque que se mettent en place les failles du deuxième type visible sur la coupe.

### Le forage de Balazuc (BA.1)

Ce forage a été implanté sur la commune de Balazuc au lieu-dit le Jeu de Paume (coordonnées Lambert 3 : x : 759,980 ; y : 3 248,43 ; z : + 255,08).

Il a été réalisé en 1990 selon des techniques proches des forages pétroliers.

Un premier trou a été creusé au diamètre extérieur de 444,5 mm jusqu'à 450,70 mm. Il a été tubé par un cuvelage en acier de diamètre intérieur 226,6 mm. Ce dernier a été cimenté par injection de ciment dans le tube, refoulé dans l'espace annulaire tube-trou par la boue de forage.

Un outil de diamètre 215,9 mm a ensuite été descendu pour forer le sabot du cuvelage et le puits jusqu'à 1 194,80 m.

A partir de cette cote et jusqu'au fond, à 1 724,70 m, le forage destructif a laissé la place à un carottage continu. En effet l'objectif étant les formations de la base de la série, seuls les niveaux profonds (sommet des terrains primaires, Trias et base du Jurassique) ont été carottés systématiquement. Les niveaux supérieurs ont été étudiés en analysant les débris rocheux remontés par la boue de forage et par des carottages ponctuels.

Niveaux traversés (simplifiés) :

De 0 à 276 m : Ensemble calcaire du Kimméridgien supérieur et Oxfordien moyen (Jurassique supérieur),

De 276 à 555 m : Ensemble marneux du Callovien, Bathonien et Bajocien supérieur (Jurassique moyen),

De 555 à 904 m : Calcaire gréseux du Jurassique inférieur,

De 904 à 1 351 m : Alternance calcaire-argileuse du Sinémurien et Hettangien (Jurassique inférieur),

De 1 351 à 1 559 m : Ensemble gréseux marin, lagunaire et continental du Trias supérieur,

De 1 559 à 1 626 m : Ensemble calcaire et argileux du Trias supérieur,

De 1 626 à 1 669 m : Ensemble gréseux du Trias moyen,

De 1 669 à 1 725 m : Ensemble argilo-gréseux du Carbonifère.

Après forage, diverses mesures ont été réalisées dans le puits : résistivité électrique, mesures de porosité, densité, pompages d'essai, prélèvements de fluides...

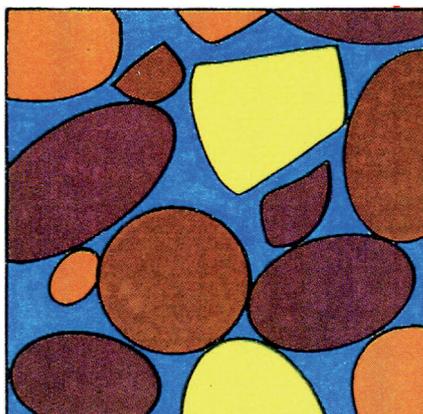


Fig. 4

des...

Un état des lieux opéré en 1994 a montré que le puits était obstrué à - 620 m et rempli d'eau jusqu'à - 75 m.

### Le forage de Morte-Mérie (MM.1)

Ce forage a été implanté sur la commune d'Uzer au lieu-dit Morte-Mérie (coordonnées Lambert 3 : x : 758,978 ; y : 3 248,937 ; z : + 162,44).

Il a été réalisé en 1993 selon la technique des sondages miniers et carotté en continu depuis la surface. Une première série de carottages a été effectuée jusqu'à 320,15 m puis le trou a été tubé par un cuvelage de diamètre intérieur 114,1 mm. Une seconde série est descendue à 519,55 m en diamètre 106,6 mm puis une troisième série a atteint 980,35 m en diamètre 76 mm.

Niveaux traversés (simplifiés) :

De 0 à 2,89 m : Alluvions,

De 2,89 à 134,51 m : Calcaires, marnes et dolomies de l'Hettangien (Jurassique inférieur),

De 134,51 à 325,8 m : Grès, marnes et argilites du Trias supérieur,

De 325,8 à 333,52 m : Calcaires et dolomies du Trias supérieur,

De 333,52 à 417,74 m : Grès et argilites du Trias moyen,

De 417,74 à 980,35 m : Grès et argilites du Paléozoïque supérieur (ère Primaire).

Des mesures équivalentes à BA.1 ont été opérées dans le puits.

En 1994, le puits était légèrement artésien, c'est-à-dire qu'il était plein d'eau et débitait quelques litres par heure.

### L'étude des interactions fluides - roches

Différents types de fluides peuvent être impliqués dans l'histoire d'une roche sédimentaire :

1. Les fluides originels piégés dans le sédiment, c'est-à-dire l'eau du milieu de dépôt.

2. Des fluides expulsés d'une couche et qui migrent dans les couches voisines, au-dessus ou en-dessous, sous l'effet de la compaction (figures 4 et 5). En chan-

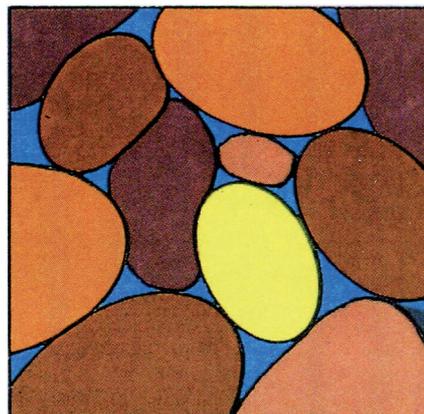


Fig. 5

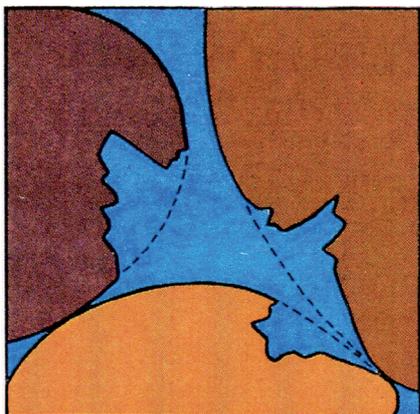


Fig. 6

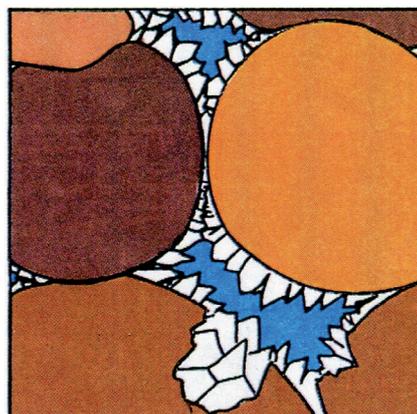


Fig. 7

geant de milieu minéral mais aussi de pression et de température, ces fluides peuvent voir leur équilibre chimique modifié. Ainsi, un liquide qui aurait eu une action dissolvante dans son milieu d'origine pourra libérer les substances dissoutes sous forme de dépôts minéraux dans son milieu secondaire (figures 6 et 7).

3. Des fluides qui se déplacent à plus grande échelle à travers des discontinuités provoquées par les mouvements tectoniques : diaclases si les deux compartiments rocheux ne se sont pas déplacés ; failles si les compartiments se sont déplacés verticalement ; décrochements s'ils se sont déplacés horizontalement. Dans les faits, un accident tectonique a souvent une composante verticale et une composante horizontale (figure 8).

S'il n'est pas toujours possible d'étudier les fluides eux-mêmes, disparus ou difficiles à prélever, les matières qu'ils ont pu déposer dans la porosité de la roche nous renseignent sur leur composition.

Par ailleurs, si les éléments chimiques eux-mêmes sont riches d'information sur la composition du fluide qui les a déposés, leur composition isotopique donne de précieuses informations complémentaires.

En effet, la plupart des éléments existent sous forme de plusieurs isotopes ; l'oxygène par exemple, de numéro atomique 16 existe aussi sous les formes 17 et 18. Chimiquement tous ces isotopes ont le même comportement mais certains processus favorisent certains

d'entre eux. Les périodes froides par exemple voient les eaux océaniques, et donc les sédiments qui s'y forment, s'enrichir en oxygène 18. De même, certains processus biologiques ont pour effet d'opérer un fractionnement isotopique : les éléments intégrés dans les molécules résultantes ont une composition isotopique différente de celle qu'ils ont dans le milieu dans lequel ils ont été prélevés par les organismes vivants.

Le détail de ces études n'aurait pas sa place ici mais on peut signaler que l'étude de la composition isotopique de l'oxygène, du strontium, du carbone et du soufre a permis de préciser les caractères des fluides impliqués dans l'histoire des couches cibles.

### Quelques résultats

Dans la catégorie des minéraux déposés par les fluides résiduels durant les premières étapes de la diagenèse, les carbonates et sulfates prélevés dans les grès du Trias et calcaires gréseux du Jurassique inférieur sont typiques des dépôts en milieu lagunaire soumis à une forte évaporation. Cependant, des périodes d'émersion suffisamment longues ont permis l'intégration de carbonates d'origine atmosphérique : de l'eau de pluie chargée de  $\text{CO}_2$  a imbibé les sédiments lagunaires qui ont gardé la trace de cette contamination. La composition isotopique des sulfates révèle que ceux-ci ont précipité sous l'effet d'une action bactérienne.

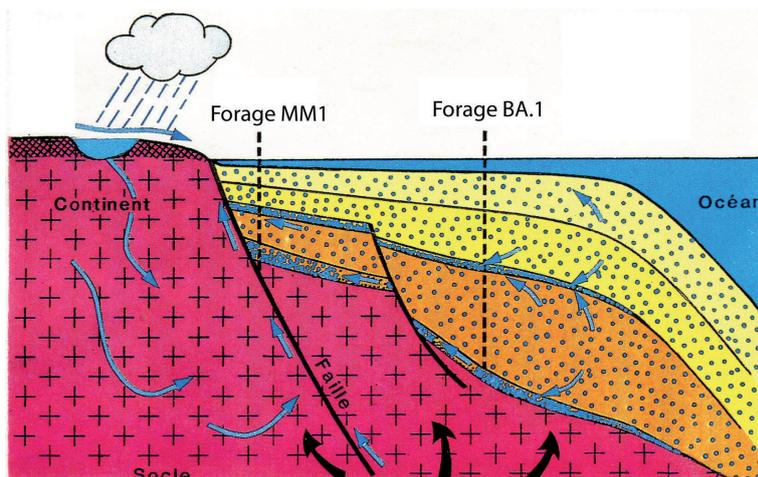


Fig. 8

Le rapport isotopique du soufre dans les couches carbonifères montre que le soufre a une origine plus ancienne et qu'il aurait été expulsé de niveaux plus profonds lors de l'enfouissement de la série sédimentaire durant le secondaire. Ces transferts auraient eu lieu à travers un réseau de petits filons avant le fonctionnement de la faille d'Uzer qui a commencé au Jurassique inférieur.

En revanche, après le fonctionnement de cette faille, ce nouveau drain a permis à des fluides issus du compartiment affaissé de migrer dans le compartiment stable (figure 8). Dans celui-ci, ce sont les niveaux les plus perméables, grès et calcaires gréseux qui reçoivent le plus de minéralisations. Ainsi, du sulfate de baryum (barytine), présent seulement dans les grès supérieurs du Trias à BA.1, se retrouve dans ces niveaux mais aus-

si dans les grès carbonifères et hettangiens (Jurassique inférieur) à MM.1.

### **Conclusion**

Malgré toutes les données acquises par le programme GPF, utilisables tant par la recherche fondamentale que par les entreprises minières, le programme de forages scientifique s'est achevé en 1994 pour être remplacé en 1995 par le programme GéoFrance 3D. Celui-ci, achevé en 2000, fondé sur les avancées de la tomographie sismique, a permis l'acquisition de nouvelles données sur le sous-sol national sans recours à de coûteuses opérations de forage. Néanmoins, les données obtenues sur les échantillons de BA.1 et MM.1 montrent qu'un géologue aura toujours besoin de cailloux pour travailler !

### **Sources documentaires**

Les coupes géologiques détaillées des deux puits ainsi que les rapports des études géochimiques et pétrographiques sont consultables sur le site Infoterre du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).

Carte géologique de la France au 1/50 000e, éditions du BRGM.

Documents du BRGM n°176. Forages scientifiques de l'Ardèche. Travaux préliminaires, projet de forage et programme de recherche.