

Les bébés étoiles ont le hoquet

Détection d'une éruption de rayons X provenant d'une étoile en formation.

Les astronomes pensaient que les étoiles en formation émettent un rayonnement X, mais ils n'avaient aucune certitude. La détection d'une éruption X en provenance d'une proto-étoile a confirmé cette idée : Nicolas Grosso et Thierry Montmerle, du Service d'astrophysique du CEA, ont observé un fort sursaut qui provenait d'une étoile en formation enfouie dans un nuage de gaz et de poussières.

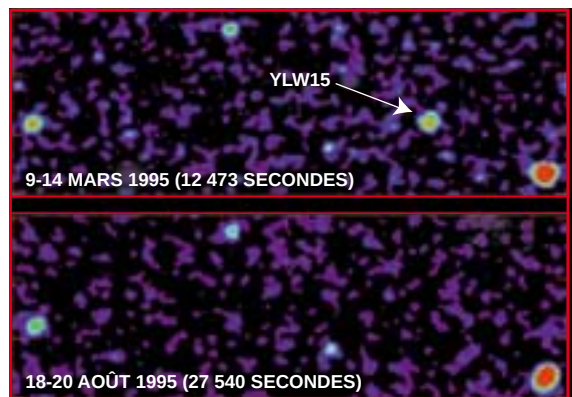
La formation des étoiles est inobservable dans le visible car les cocons de gaz et de poussières qui l'entourent sont opaques à ces longueurs d'onde. En revanche, l'infrarouge les traverse : aussi savait-on que les étoiles en formation sont entourées d'un disque d'accrétion de diamètre compris entre 10 et 100 unités astronomiques (l'unité astronomique est la distance moyenne de la

Terre au Soleil, soit 150 millions de kilomètres).

À l'aide du détecteur à haute résolution du satellite ROSAT, les astronomes ont obtenu une image d'une région dense du nuage rho-Ophiuci situé dans la constellation du Serpentaire, lieu où l'on sait que des étoiles se forment. L'image a révélé plusieurs sources X mais l'une d'entre elles, particulièrement intense, a été attribuée à la source infrarouge YLW15. Cette protoétoile, âgée de 100 000 ans environ, est pourvue d'un disque d'accrétion, et un puissant jet de matière s'en échappe.

Cette brève émission a duré vraisemblablement moins de 24 heures et si elle n'avait pas été aussi intense, elle aurait échappé aux détecteurs. Les astrophysiciens ont estimé que la puissance rayonnée par la source dans la gamme des rayons X était cent millions de fois celle des émissions X des étoiles «adultes», comme le Soleil.

Quel phénomène a pu engendrer, de manière transitoire, une telle débauche d'énergie ? Dans le Soleil et dans les



Région de formation d'étoiles de la constellation du Serpentaire. L'éruption X de la source YLW15 est visible sur l'image prise en mars 1995 (en haut). Quelques mois plus tard, elle a disparu (en bas).

autres étoiles «adultes», on pense que l'émission des éruptions X résulte d'un réarrangement local des lignes de champ magnétique. Une partie de l'énergie libérée chauffe alors le gaz à des millions de degrés : en se refroidissant, le gaz émet des rayons X.

Si toutes les étoiles en formation ont émis ces hoquets de rayons X, le Soleil naissant aussi. Les astronomes devront en tenir compte pour écrire l'histoire du Soleil et du disque planétaire, il y a 4,5 milliards d'années

Un granite producteur d'électricité ?

Évolution de la géothermie Roches chaudes sèches.

La géothermie *Roches chaudes sèches (RCS)*, lancée lors de la première crise pétrolière, diffère de la géothermie classique en ce que l'on crée une circulation artificielle d'eau entre deux forages : on injecte de l'eau froide sous pression dans le premier et l'on récupère l'eau réchauffée dans le second.

Dans les années 1980, les premières expériences peu concluantes menées aux États-Unis, en Angleterre et au Japon, ont démontré que la réalisation d'un dispositif RCS nécessite une bonne connaissance du milieu rocheux, en particulier des fractures, car ce sont elles qui déterminent les caractéristiques de l'échangeur entre les puits. Une bonne production des puits ne peut être obtenue qu'en tirant avantage des discontinuités naturelles du milieu : il est plus rentable de s'appuyer sur les structures préexistantes

que de créer de toute pièce un réseau artificiel dans le bâti rocheux.

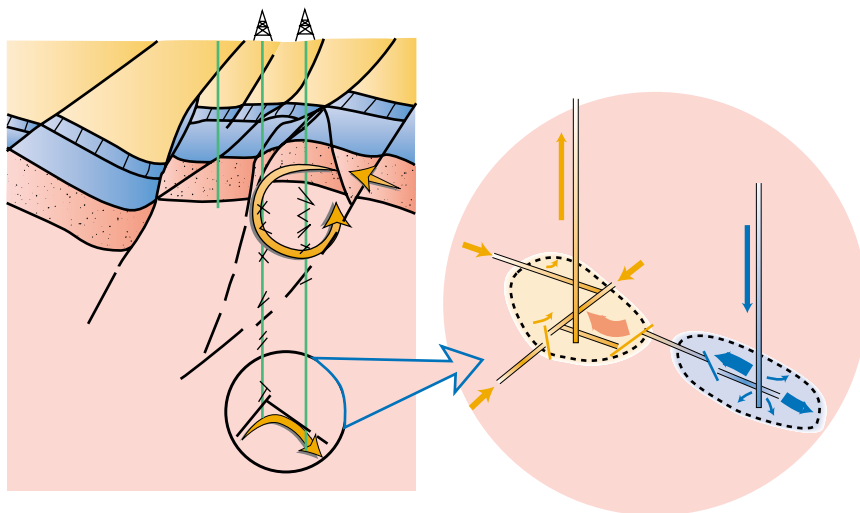
Le dernier espoir de la géothermie européenne *Roches chaudes sèches* est celui de Soultz-sous-Forêts, petite bourgade du Nord de l'Alsace, choisie en raison d'une anomalie thermique de surface résultant de circulations d'eau en profondeur. Trois forages ont été réalisés de 1987 à 1994, à des profondeurs respectives de 2 200 mètres, 3 600 mètres et 3 900 mètres.

Au-delà de 1 400 mètres, sous la couverture sédimentaire, les forages pénètrent le granite à mégacristaux de feldspath roses qui constitue, en Alsace du Nord, le soubassement profond du Fossé rhénan, des Vosges à la Forêt Noire. Entre 1 800 et 3 900 mètres, les forages ont recoupé des fractures. Les plus importantes ont plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur.

Les minéralogies de ces niveaux témoignent d'une succession de phases d'altération du granite. Au cœur de ces fractures, dans les fissures ouvertes, percolent des fluides, trois fois plus salés que l'eau de mer. Ils sont issus des niveaux sédimentaires gréseux du Trias et ont été créés lors de la formation du Fossé rhénan, il y a plus de 25 millions

d'années. L'étude chimique de ces fluides montre qu'ils ont ensuite subi une évolution au contact du grès et du granite, à une température voisine de 230 °C. La partie profonde du Fossé rhénan constitue une zone découplée de la surface, où les circulations correspondent à de lentes boucles de convection. Certaines d'entre elles se situent entre le granite et l'aquifère sédimentaire, d'autres se déroulent entièrement dans le granite, jusqu'à une profondeur de 2,5 à 5 kilomètres au moins.

En 1993, des tests d'injection massive d'eau sous forte pression ont été effectués dans le premier puits profond pour déterminer comment réagissait le du milieu cristallin à la stimulation hydraulique et pour augmenter la perméabilité au voisinage du puits. Durant toute l'injection, des sondes accélérométriques ont enregistré tous les événements microsismiques liés à la propagation de l'onde de pression engendrée par l'injection. Le nuage de points liés à la microsismique dessine une forme allongée dont la direction déterminée par les géologues est celle des fractures majeures. L'eau que l'on a forcée à pénétrer dans le massif a emprunté les anciens chemins de faiblesse de la roche.



Dispositif géothermique profond de Soultz-sous-Forêts. Dans la partie sédimentaire, les structures sont bien connues du fait d'un grand nombre de puits pétroliers et de profils de géophysique. Dans le granite, seuls les forages indiquent la localisation des grandes failles. Au cœur de ces zones, des fluides salés circulent lentement dans la partie profonde du Fossé rhénan (flèches jaunes) depuis des millions d'années. Dans le dispositif géothermique, l'eau est injectée dans le premier puits. Elle circule au sein du milieu fracturé qui constitue un échangeur de chaleur. Elle remonte ensuite dans le second puits, vers la surface, où elle sera à nouveau injectée. À Soultz, le réseau diffus de fractures assure la connexion entre les deux puits : le temps de transit est long, l'échange important, la participation des fluides naturels est prépondérante.

À la suite de l'injection, le puits a été remis en production, et on a constaté que les injections massives ont augmenté très nettement la productivité naturelle du granite, qui est passée de 0,5 à 8 litres par seconde dans des conditions de pression équivalentes. Les échantillonnages et les analyses ont montré que les eaux injectées se sont mélangées aux fluides salés du granite. Très vite, au cours de la production, le pourcentage de fluide issu du granite a augmenté, indiquant par là que le système de failles du granite constitue un véritable réservoir.

Contrairement aux autres sites RCS, l'implantation du second puits de l'échangeur a été décidée à partir des résultats de l'étude du premier puits, en tenant compte des directions des failles majeures. La distance record entre les deux puits est de 450 mètres. Durant l'été 1995 les deux puits ont été connectés et les expériences ont été menées en circulation bouclée : on a injecté ce qui sortait du puits producteur dans le puits d'injection. On a constaté que la variation du débit d'injection influait sur le débit de production, qui pouvait être maintenu à plus de 20 litres par seconde.

La démonstration était patente : la communication entre les deux puits s'est établie au travers d'un réseau de fractures complexes dont le volume est suffisamment grand pour que le temps de cheminement y soit important. Ce

volume peut être estimé à un minimum de 15 000 mètres cubes et la taille de la surface d'échange est d'environ plusieurs kilomètres carrés. Ces chiffres sont de très loin supérieurs à ceux obtenus dans les autres sites RCS.

Le projet de recherches en géothermie profonde de Soultz a donc permis de réaliser le plus grand échangeur géothermique mondial. La température est encore trop faible (160 °C) à la profondeur de 3 500 mètres pour assurer une production rentable d'électricité. Toutefois, la taille de l'échangeur permettra, en optimisant les paramètres du dispositif, d'assurer la viabilité du système.

Pourquoi le site de Soultz semble-t-il plus prometteur que les autres ? La différence principale tient au fait que la circulation ne se fait pas dans un milieu compact et homogène, comme celui des roches volcaniques, mais dans un système préfracturé. La présence d'un important réseau de fractures constitue des drains actifs favorisant le développement d'un échangeur de grande taille. La valorisation de ce réseau au cours de l'implantation des puits a pris plusieurs années, mais les résultats sont convaincants. Toutes les bases sont ainsi jetées et, d'ici quelques années, un nouveau concept de production d'électricité à partir de la chaleur du granite situé à quelques kilomètres de profondeur pourrait être validé à Soultz.

Équipe de projet Soultz, BRGM