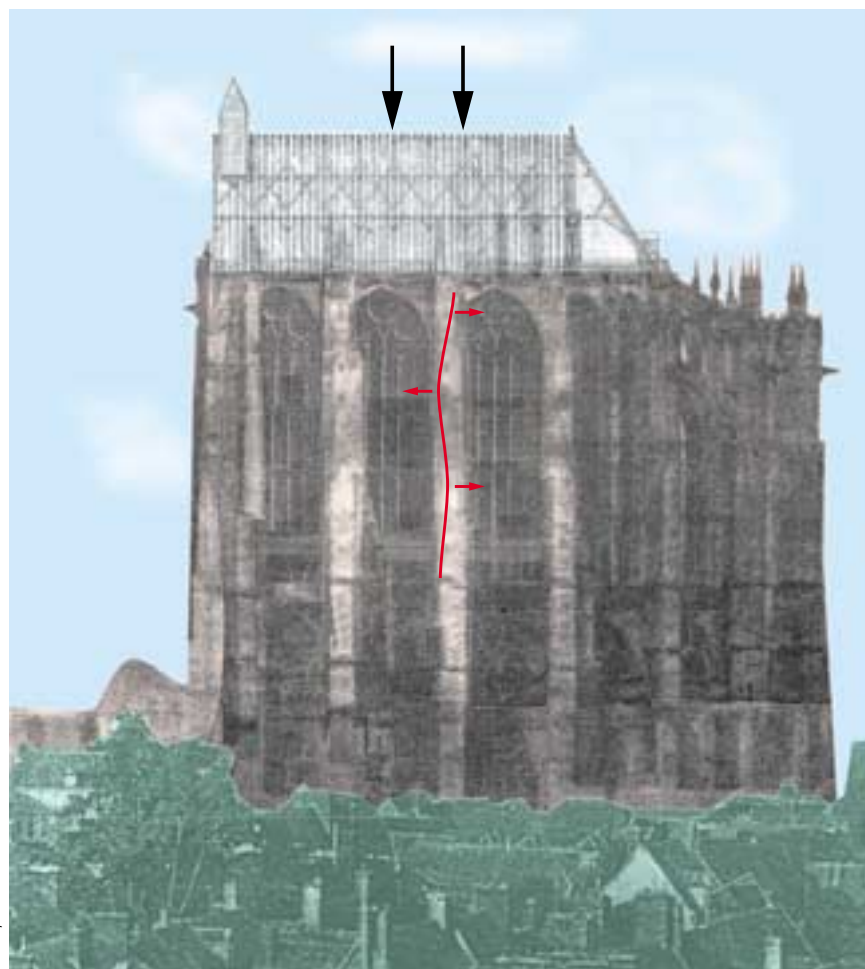




J.-L. Taupin/PLS

En 1284, une partie de la charpente du chœur de la cathédrale de Beauvais, seule partie achevée, s'est écroulée. Sur cette reconstitution, la zone qui s'est écroulée est située entre les flèches noires ; l'écroulement a été provoqué par l'oscillation résonante d'un pilier (en rouge) sous les rafales de vent.

servant à suspendre la partie médiane des grandes poutres transversales, rompu comme sous un choc violent, a été minutieusement réparé par de longues bandes de fer.

Quelle est l'origine de l'accident ? Dans les années 1960 à 1980, des tirants de fer anciens ont été enlevés. Ils reliaient les palées d'arcs-boutants et de piles constituant le dispositif de contrebutement en pierre de la partie orientale du chœur. Depuis, on voit mieux comment cette forêt de piliers est mise en résonance par les turbulences que produit le vent circulant entre ces structures. La chronique, qui mentionne l'effondrement de « piliers extérieurs » au soir du 29 novembre 1284, incite à penser que ce phénomène de mise en résonance, amplifié jusqu'au seuil d'instabilité élastique, a été le moteur des dégâts : il a déterminé la chute d'un pilier extérieur intermédiaire.

Après cet accident, qui a révélé la fragilité de cette charpente sous les chocs, la conception des charpentes des

cathédrales a été modifiée. À Beauvais même, la réparation du poinçon brisé a été complétée ensuite par une modification du dispositif de contreventement longitudinal, ensemble de X destinés à empêcher que la structure se penche dans le sens de la longueur ; ce dispositif parcourait la charpente de bout en bout. Très rigide à l'origine, il a été modifié de manière que l'action des éléments obliques participant individuellement à ce contreventement opère par l'intermédiaire de pièces horizontales élastiques.

En outre, la dendrochronologie révèle que la cathédrale d'Amiens, à 60 kilomètres de Beauvais, a été entreprise immédiatement après l'accident de Beauvais : le désastre de Beauvais aurait stimulé la créativité des bâtisseurs d'Amiens. Avec succès : l'aspect de la charpente est si moderne que l'on a longtemps cru qu'elle avait été construite au XVI^e siècle.

Jean-Louis TAUPIN, Architecte en chef des Monuments historiques

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.

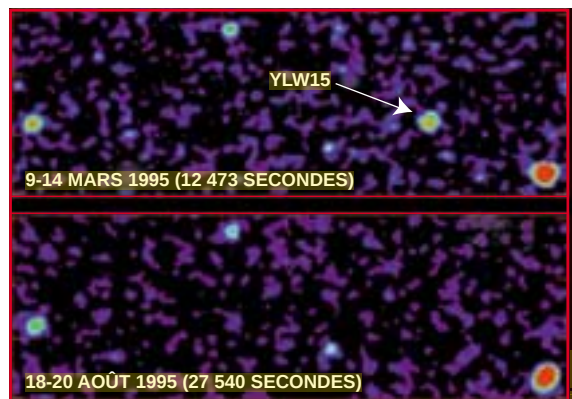
La formation des étoiles est inobservable dans le visible car les cocons de gaz et de poussières qui l'entourent sont opaques à ces longueurs d'onde. En revanche, l'infrarouge les traverse : aussi savait-on que les étoiles en formation sont entourées d'un disque d'accrétion de diamètre compris entre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