

Un laser dans l'œil

L'ordinateur portable de demain n'aura pas d'écran, mais un système de laser qui formera directement l'image sur la rétine. La Société *Microvision* a mis au point un tel appareil constitué de lasers de très faible puissance. Son utilisateur voit une image flotter à un mètre de lui.

Le pénis manquant

Jadis les mâles de toutes les espèces d'oiseaux avaient un pénis. Pourquoi trois pour cent seulement des oiseaux mâles ont-ils conservé leur attribut? Pour des raisons d'économie.

Les mâles pénis déposent leur sperme à l'ouverture génitale de la femelle, qui choisit de faire ou non entrer le sperme dans des tubules de stockage où il subsiste jusqu'à la ponte d'un œuf.

Chez les espèces dont les œufs sont gros par rapport au corps, les femelles doivent être sélectives. Aussi, plutôt que de se débarrasser des œufs dus aux mâles munis de pénis, les femelles préfèrent s'accoupler avec les mâles sans pénis, car elles contrôlent alors l'insertion du sperme dans les tubules et la fécondation de l'œuf. La disparition de l'organe est un avantage adaptatif pour les mâles : ils sont plus souvent acceptés par les femelles.

Chez les espèces les plus grosses, telles les autruches, les femelles acceptent mieux le pénis (les œufs sont moins précieux), et les mâles ont pu, au cours de l'Évolution, garder leur organe.

Mort aux gorilles

La guerre civile au Zaïre fait d'innombrables victimes. Les singes payent aussi un lourd tribut aux malversations humaines. Peut-on s'en préoccuper alors que des dizaines de milliers de réfugiés sont dans la détresse? À chacun de répondre. Toujours est-il que mines, déforestations, fusillades et maladies font une hécatombe parmi les gorilles et les chimpanzés.



Courir sous la pluie

Pour être le moins mouillé possible par la pluie, doit-on courir ou marcher d'un pas stoïque? T. Peterson et T. Wallis ont calculé la quantité d'eau qui frappe le promeneur : un marcheur dont la vitesse est de 1,5 m/s est 23 pour cent plus mouillé qu'un coureur dont la vitesse de course est de 4 m/s.

fruits d'un même accouplement, ont 75 pour cent des gènes en commun : chacune hérite de l'unique jeu de chromosomes paternels (soit 50 pour cent de son propre génome) et de la moitié des chromosomes maternels (soit 25 pour cent de son propre génome). Contrairement aux mâles, les femelles ont deux jeux de chromosomes qui se recombinent au cours de la division cellulaire, de sorte que deux sœurs peuvent n'avoir aucun gène commun ou les avoir tous. De même, on calcule qu'elles ne partagent que 25 pour cent de tous leurs gènes avec leurs frères.

Partant de ces asymétries génétiques, le biologiste anglais William Hamilton a proposé l'hypothèse de la sélection de parentèle, pour expliquer l'origine du comportement social des hyménoptères : les ouvrières auraient avantage à promouvoir le développement des individus qui ont le plus grand patrimoine génétique en commun avec elles pour favoriser l'expression de leurs propres gènes dans les générations futures. Cela justifierait pourquoi les ouvrières, génétiquement plus proches

de leurs sœurs (75 pour cent) que de leurs propres descendants (50 pour cent) sont stériles. Comme elles sont également plus proches de leurs sœurs que de leurs frères (25 pour cent), elles n'hésitent pas à les tuer, voire à les dévorer. Au contraire, la reine, qui transmet la moitié de ses gènes tant à ses filles qu'à ses fils, pond autant de mâles que de femelles.



Deux larves mâles ont été détruites (en bas), tandis que les trois autres sont intactes.

L'équipe de Toulouse a vérifié que les ouvrières favorisent la survie des femelles : ces biologistes ont prélevé des œufs et des larves d'âges différents d'un couvain de fourmis d'Argentine qui prolifèrent sur le littoral méditerranéen. Ils les ont confiés à des sociétés orphelines, c'est-à-dire privées de reine, et ils ont observé que les ouvrières font le tri entre les mâles

et les femelles dès l'éclosion des œufs, juste au moment où apparaît la larve. À ce stade l'observateur humain ne fait aucune distinction entre un mâle et une femelle. Les ouvrières opéreraient cette sélection grâce à une molécule odorante, une phéromone, spécifique du sexe de la larve.

Marie-Thérèse LANDOUSY

Un accident stimulant

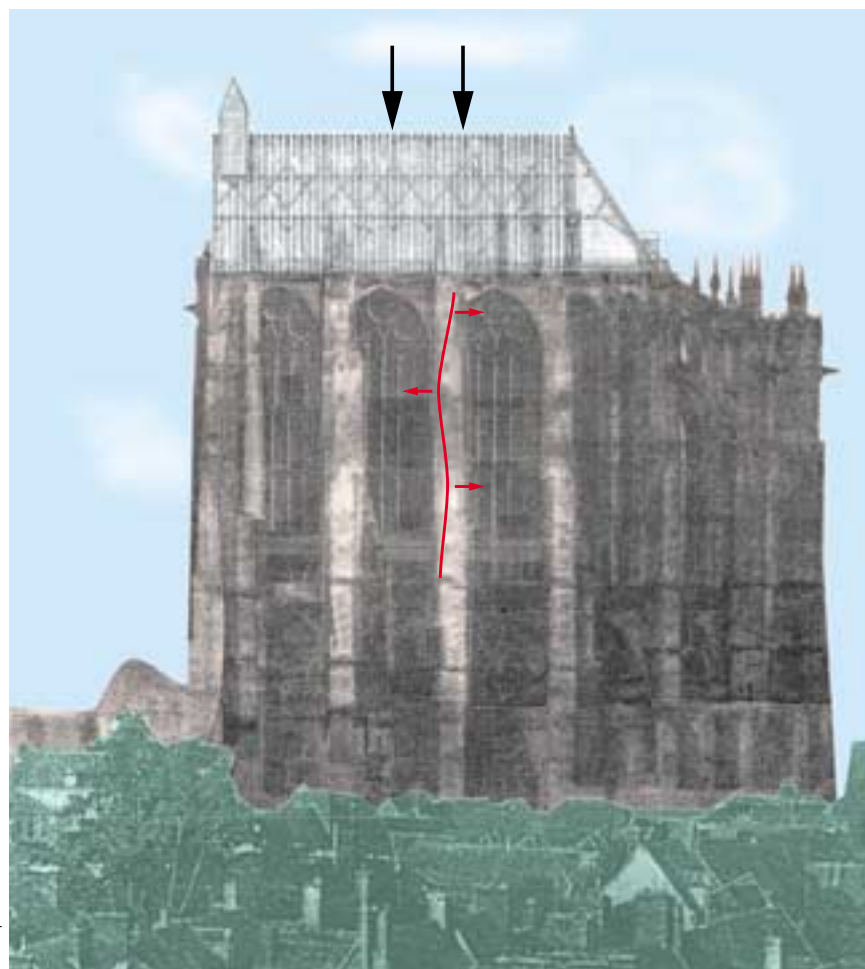
En 1284, l'écroulement partiel de la cathédrale de Beauvais a fait évoluer l'architecture.

La cathédrale de Beauvais, dont la construction a commencé en 1227, n'a jamais été achevée. Son histoire mouvementée est légendaire : la témérité de ses constructeurs, qui projetaient le plus haut édifice de leur temps, aurait été sanctionnée par des écroulements. Celui d'une partie de la voûte qui arrêta temporairement les travaux du chœur en 1284 n'a toutefois pas l'ampleur décrite par la tradition. En outre, les architectes en ont très vite tiré les leçons et ont inventé de nouvelles structures plus sûres.

Avec Patrick Hoffsummer, de l'Université de Liège, nous avons daté, par dendrochronologie (l'étude des cernes de croissance des arbres) la charpente du chœur de la cathédrale, qui s'étend de 48 à 65 mètres au-dessus du sol. Son

squelette qui couvre, sans discontinuité, les trois quarts de la longueur du vaisseau est constitué de bois coupés durant l'hiver 1257-1258 et vraisemblablement assemblés dans leur position actuelle en 1258 ou 1259. Cette date se situe 25 ans avant l'écroulement de 1284. L'examen des pièces montre qu'elles n'ont pas chuté de 50 mètres de haut. Elles n'ont pas non plus été démontées puis remontées. Elles appartiennent donc à la charpente originelle dont elles sont toujours le noyau.

L'écroulement de 1284 n'est toutefois pas imaginaire. Stephen Murray, de l'Université Columbia, a étudié attentivement les ouvrages de maçonnerie et situé l'avarie dans un espace restreint, à cheval entre la deuxième et la troisième travée du chœur. Cette hypothèse est confirmée par deux anomalies visibles dans la charpente au voisinage immédiat de cette zone. Au rang 6 de la charpente, un bois postérieur de quelques années a été placé en renfort sous un assemblage disloqué. À la cime de la charpente, un poinçon, pièce verticale



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.

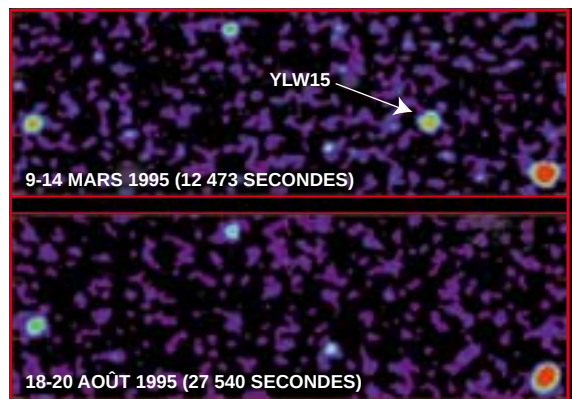
La formation des étoiles est inobservable dans le visible car les cocons de gaz et de poussières qui l'entourent sont opaques à ces longueurs d'onde. En revanche, l'infrarouge les traverse : aussi savait-on que les étoiles en formation sont entourées d'un disque d'accrétion de diamètre compris entre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

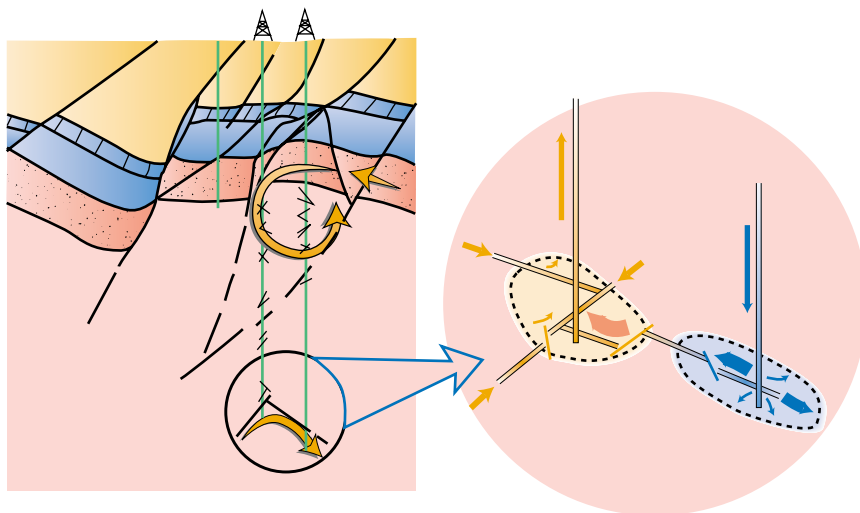
Le dernier espoir de la géothermie européenne *Roches chaudes sèches* est celui de Soultz-sous-Forêts, petite bourgade du Nord de l'Alsace, choisie en raison d'une anomalie thermique de surface résultant de circulations d'eau en profondeur. Trois forages ont été réalisés de 1987 à 1994, à des profondeurs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



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



Unités mixtes de recherche CNRS / Entreprises