

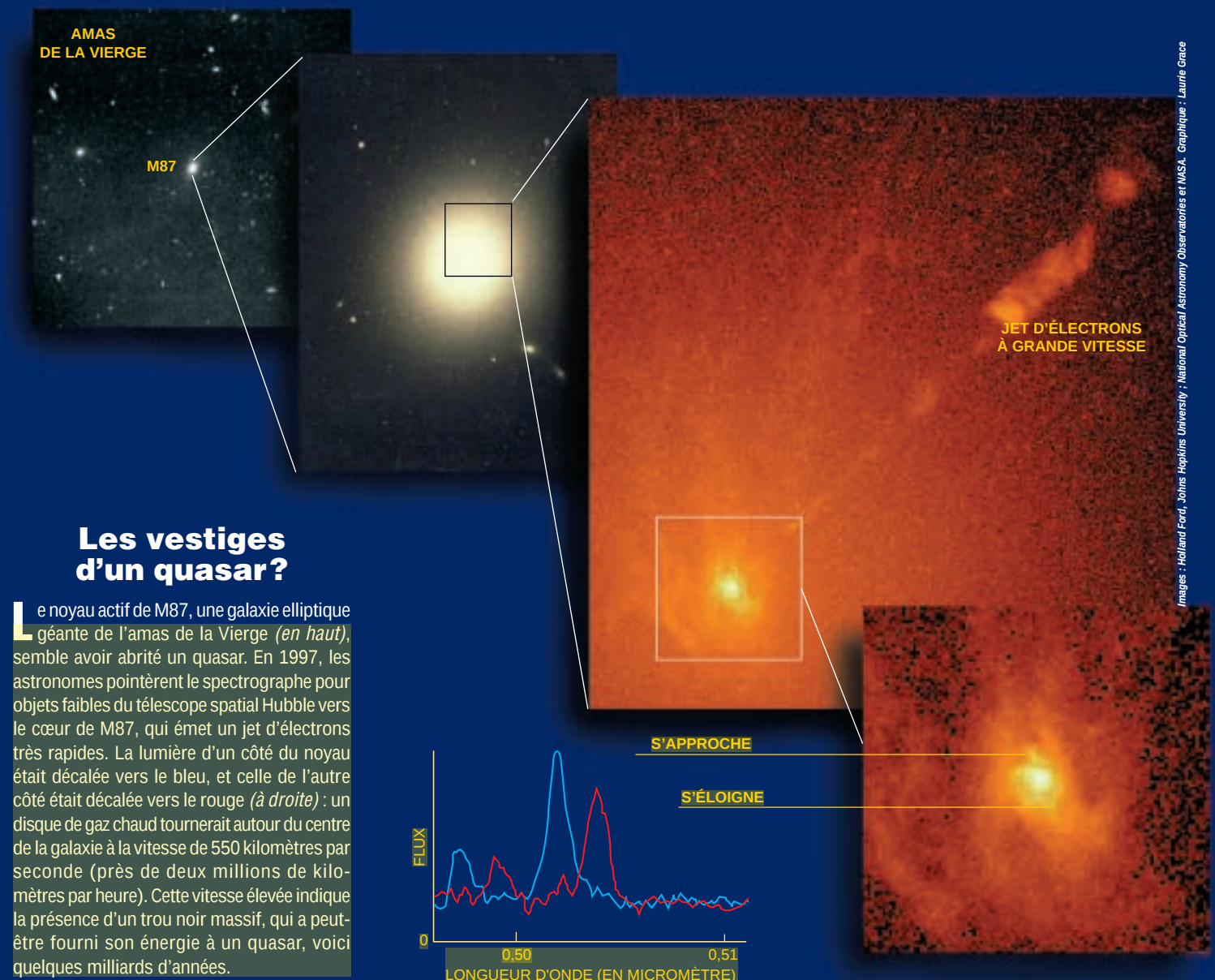
avait déjà été rapporté par des astronomes canadiens, qui avaient utilisé un télescope au sol avec une optique adaptative. Cependant, grâce à sa meilleure résolution, le télescope *Hubble* a montré l'importance des interactions galactiques dans les quasars. Les images indiquent que des galaxies en collision (en fait en interaction proche) alimentent la production d'énergie du quasar : les étoiles et le gaz brassés par les effets de marées peuvent être canalisés dans un trou noir massif, au centre de l'une des galaxies. Ainsi, l'émission des quasars est amplifiée.

Ce mécanisme expliquerait les variations du nombre des quasars, au

cours de l'histoire de l'Univers. Immédiatement après le Big Bang, il n'y avait pas de galaxies, donc pas de collisions galactiques. Si les trous noirs existaient alors, aucun mécanisme ne canalisait la matière. Par conséquent, peu de quasars ont un très grand décalage vers le rouge, qui correspond à une distance de 11 milliards d'années-lumière. De surcroît, à ces distances, l'Univers est obscurci par les poussières, de sorte que l'échantillon observé est biaisé. Lorsque les galaxies se formèrent, le nombre d'interactions entre galaxies augmenta, ainsi que le nombre de quasars. Finalement, l'expansion de l'Univers éloigna la plupart des galaxies, ce qui

réduisit le nombre de collisions galactiques, et donc le nombre de quasars.

Pourquoi un quart des galaxies hôtes observées par *Hubble* – telle la galaxie spirale autour du quasar PG 0052+251 – ne montrent-elles aucun signe de collision avec une autre galaxie? Les autres galaxies sont-elles trop peu lumineuses, de sorte qu'elles sont occultées par le quasar? Ou bien le mécanisme d'amorçage des quasars n'est pas celui qui a été supposé? Nous savons en tout cas que la grande majorité des galaxies qui interagissent ne semblent pas produire de quasars ; dans le cas contraire, les quasars seraient beaucoup plus nombreux que ce que nous observons.



Les vestiges d'un quasar?

Le noyau actif de M87, une galaxie elliptique géante de l'amas de la Vierge (*en haut*), semble avoir abrité un quasar. En 1997, les astronomes pointèrent le spectrographe pour objets faibles du télescope spatial Hubble vers le cœur de M87, qui émet un jet d'électrons très rapides. La lumière d'un côté du noyau était décalée vers le bleu, et celle de l'autre côté était décalée vers le rouge (*à droite*) : un disque de gaz chaud tournerait autour du centre de la galaxie à la vitesse de 550 kilomètres par seconde (près de deux millions de kilomètres par heure). Cette vitesse élevée indique la présence d'un trou noir massif, qui a peut-être fourni son énergie à un quasar, voici quelques milliards d'années.

La rareté des quasars semble indiquer que les trous noirs supermassifs (de masse supérieure à 10^7 fois la masse du Soleil) sont absents de la plupart des galaxies classiques. Pourtant en combinant des observations de *Hubble* avec des mesures de spectres réalisées par des télescopes au sol, des astronomes ont montré que, sur 27 galaxies proches de la Voie lactée, 11 abritent des corps massifs sombres, probablement des trous noirs.

En outre, certains de ces trous noirs massifs furent peut-être des quasars. En 1994, un groupe d'astronomes examina le cœur de M87, une galaxie elliptique géante de l'amas de la Vierge, à environ 50 millions d'années-lumière de la Terre. Le noyau actif de M87 a le même type d'émission, dans une large gamme de longueurs d'onde, que les quasars, mais d'intensité 1 000 fois inférieure. Les astronomes ont découvert que la lumière émanant d'un côté du noyau était décalée vers le bleu (indiquant que la source se rapproche de la Terre), tandis que la lumière de l'autre côté était décalée vers le rouge (indiquant une récession de la source) : les astronomes interprètent cette observation comme un disque de gaz chaud en rotation. De surcroît, le disque tournait si vite que sa cohésion ne pouvait être assurée que par un trou noir de masse au moins égale à trois milliards de masses solaires : le même genre d'objet que l'on pense être la source de l'énergie des quasars. Autrement dit, le noyau de M87 fut peut-être un quasar il y a quelques milliards d'années.

La quête des quasars

L'ensemble des observations récentes conduit à une théorie qui stipule que la plupart des galaxies contiennent des trous noirs massifs ; dans des circonstances très particulières, ces trous noirs libéreraient des quantités d'énergie considérables. Dans le quasar, les étoiles tombent sur le trou noir à un débit supérieur à une masse solaire par an. Ce débit résulte le plus souvent, mais pas toujours, de collisions galactiques ou d'interactions avec des galaxies proches. À l'époque où la densité en galaxies était supérieure, les quasars étaient plus nombreux.

Quelle est la durée de vie de ces objets ? Les observations révèlent que les galaxies hôtes n'ont pas été endommagées par les quasars, car ces derniers n'ont pas rayonné suffisamment longtemps. Le grand nombre de galaxies

hôtes en interaction et la durée des interactions indique une longévité des quasars inférieure à 100 millions d'années.

L'existence de trous noirs massifs dans la plupart des galaxies suggère que des quasars étaient déjà actifs il y a très longtemps. Le petit nombre de quasars observés – un pour 1 000 galaxies pendant leur ère la plus abondante – montre alors qu'un quasar vit au plus dix millions d'années. Si ce nombre est correct, le phénomène du quasar représente une brève phase transitoire dans les dix milliards d'années de la vie d'une galaxie et, bien que la puissance d'un quasar soit considérable, ce dernier émet une énergie totale qui ne représente que dix pour cent de l'énergie émise par une galaxie au cours de son existence.

Nous l'avons vu, les galaxies hôtes lointaines échappent pour le moment à l'observation, de sorte que l'échantillon observé est biaisé. Manifestement, des observations supplémentaires sont nécessaires pour tester la théorie. Les astronomes espèrent faire de nouvelles découvertes à l'aide de deux dispositifs récemment installés sur le télescope spatial *Hubble* : la caméra infrarouge proche et spectromètre multi-objet (NICMOS), qui permettra l'observation de noyaux galactiques obscurcis par des nuages de poussières, et le spectrographe imageur du télescope spatial (STIS). En 1999, la NASA installera une nouvelle caméra munie d'un coronographe de haute résolution qui pourra détecter les galaxies hôtes des quasars.

Sur le plan théorique, nous devons comprendre comment et quand les trous noirs massifs se sont formés. Ont-ils précédé ou suivi la formation de leurs galaxies hôtes ? Pour l'instant, aucun modèle physique convaincant n'explique comment les trous noirs transforment la matière incidente en un rayonnement qui s'étend des rayons gamma aux ondes radio. Ces études théoriques sont difficiles : l'étude des quasars ressemble à l'observation du gaz d'échappement d'une voiture éloignée ; à partir du gaz analysé, on doit déduire ce qui se passe dans la voiture.

Michael DISNEY enseigne l'astronomie à l'Université de Cardiff, en Grande-Bretagne.

Les trous noirs, Dossier Pour la Science, juillet 1997.

S. VEILLEUX, G. CECIL et J. BLAND-HAWTHORN, *Des explosions au cœur des galaxies*, in *Pour la Science*, avril 1996.

PRIX DE THÈSE SPECIF

Specif, l'association des universitaires et chercheurs en informatique de France, crée un prix scientifique récompensant chaque année une excellente thèse en informatique. Un jury d'universitaires et chercheurs, présidé par Gilles Kahn, membre de l'Académie des Sciences, sélectionnera parmi les thèses soutenues au cours de l'année universitaire, celle qui recevra ce prix.

En outre, le jury pourra également distinguer, s'il le souhaite, d'autres thèses en plus de celle à laquelle le prix sera décerné.

La remise officielle du prix se fera au cours de l'Assemblée Générale de SPECIF le 10 décembre 1998 à Paris. À cette occasion, le récipiendaire se verra remettre un chèque de 10 000 FF. Il sera également invité, ainsi que les éventuels autres lauréats, à présenter ses travaux à l'ensemble de la communauté informatique.

CALENDRIER 1998

Recevabilité des candidatures :

Peut candidater tout étudiant ayant soutenu son doctorat d'informatique entre le 01/09/1997 et le 31/08/1998.

Dates clés :

15/09/1998 : date limite de dépôt des candidatures.

16/11/1998 : Notification des résultats.

10/12/1998 : Remise officielle du prix lors de l'Assemblée Générale de Specif.

Dossier de candidature :

Renseignements disponibles sur <http://www.lsv.ens-cachan.fr/~petit/specif/prix-these-specif.html>
<http://www.lsv.ens-cachan.fr/~petit/specif/prix-these-specif.ps>

Le Yémen désertique : une ancienne région humide

ANNE-MARIE LÉZINE

Il y a 8 500 ans, grâce à des pluies de mousson particulièrement abondantes, de grands lacs se sont formés dans ce qui est aujourd'hui le désert intérieur du Yémen. Des populations néolithiques, à l'origine des grandes civilisations Sud-arabiques, s'y sont alors installées.

Elle donne au roi cent vingt talents d'or, des aromates en multitude, beaucoup, et des pierres précieuses. Il n'était pas venu encore autant d'aromates que la reine de Saba donna au roi Salomon.

Extrait du premier livre des Rois

Ainsi sont contées dans la Bible la visite de la reine de Saba à Salomon, roi d'Israël, et la magnificence de ses présents. Cette opulence témoigne de la richesse d'une région, aujourd'hui très aride, que l'on situe au pied des hauts plateaux du Yémen et du Hadramawt, en bordure du vaste désert intérieur du Ramlat As-Sab'atayn. De Ma'î'n à Shabwa se sont épanouis, dès le VIII^e siècle avant notre ère, de grands royaumes Sud-arabiques, tels ceux de Saba, de Qataban et d'Hadramawt, dont la richesse était issue de la culture de l'arbre à encens et du balsamier : les habitants faisaient commerce de l'encens et de la myrrhe qui en étaient respectivement issus.

Ces royaumes ont laissé l'empreinte de leur grandeur, sous la forme de cités qui jalonnent les pistes caravanières de la route de l'encens (Shibâm, Shabwa, Ma'rib, etc.) et de temples, tel celui de Bâhrân, à Ma'rib. L'homme a sans doute habité cette région depuis le Néolithique, il y a quelque 8 500 ans : le plus ancien foyer retrouvé dans le wâdî Markha (un wâdî est un cours d'eau temporaire, où l'eau ne coule qu'après les grosses averses) date de cette période. Des outils préhistoriques d'un type plus ancien encore, retrouvés dans l'Hadramawt, témoignent même d'une

présence antérieure (remontant, selon certaines estimations, à 700 000 ans). Pourquoi cette région, aujourd'hui sub-désertique, a-t-elle été le foyer d'une riche civilisation ? Notamment parce que des pluies de la mousson indienne ont favorisé l'extension de grands lacs et le développement d'un réseau fluvial qui les alimentait ; quand les pluies se raréfièrent, l'homme a construit des systèmes d'irrigation élaborés. La mousson indienne, particulièrement forte pendant environ 8 000 ans, a apporté suffisamment d'eau pour favoriser l'implantation de l'homme pendant plusieurs millénaires en Arabie méridionale.

Tout ce réseau fluvial et lacustre est aujourd'hui asséché, mais il a été révélé par des observations de terrain, par des photographies aériennes, par les images obtenues grâce aux satellites et, enfin, par l'analyse des sédiments et des grains de pollen fossiles qui y sont préservés. Avec les équipes qui travaillent sous la direction de Marie-Louise Inizan, au Yémen, dans le cadre des programmes archéologiques du CNRS et du ministère des Affaires étrangères, avec le soutien du Centre français d'études yéménites et de l'Organisme général des antiquités, des musées et des manuscrits, à Sana'a, nous avons retrouvé la trace d'anciens lacs, aujourd'hui asséchés, et avons reconstitué le réseau de fleuves issus des montagnes environnantes qui les alimentaient.

La végétation était dense autour des lacs, comme en témoignent les grains

de pollen et les spores contenus dans les sédiments déposés au fond des lacs. Les grains de pollen et les spores émis par les végétaux sont protégés par une enveloppe externe très résistante, qui se conserve sans s'altérer, à l'abri de l'air, au fond des lacs, des tourbières ou des océans, pendant des millions d'années.

Des pollens pour comprendre le climat

Les caractères morphologiques de chaque grain de pollen forment la carte d'identité de la plante qui l'a produite. Ainsi, les palynologues utilisent les grains de pollen et les spores contenus dans les sédiments anciens pour reconstituer la composition du couvert végétal et les conditions climatiques locales au moment où ils se sont déposés.

Aujourd'hui, la zone des anciens lacs est un désert, et les sédiments

1. LE YÉMEN, au Sud de la péninsule arabe, est séparé de la mer par une barrière montagneuse. Le désert du Ramlat as-Sab'atayn fut jadis une région humide : des accumulations de sédiments prouvent que des lacs (les amas de calcaire, en haut à droite) parsemaient la région et qu'un fleuve (les sédiments, au milieu) la traversait. Des traces de paléolacs ont été retrouvées notamment à al-Hawa et à Mundafan. Lorsque le climat est devenu plus aride, les habitants ont construit des digues qui recueillaient les rares pluies tombant sur les montagnes du Sud Yémen. La digue de Ma'rib aurait été construite il y a environ 4 000 ans et utilisée jusque vers 580. Elle irriguait une vaste oasis et retenait des limons (en bas), qui fertilisaient le sol.