

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'în 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.

affleurent au fond des dépressions qui séparent les dunes modelées par le vent. On prélève des carottes de sédiments, et l'on reconstitue la végétation grâce aux grains de pollen que l'on y retrouve. On connaît alors le climat qui régnait sur cette région de la végétation reconstituée : les précipitations, les températures ou encore l'évaporation.

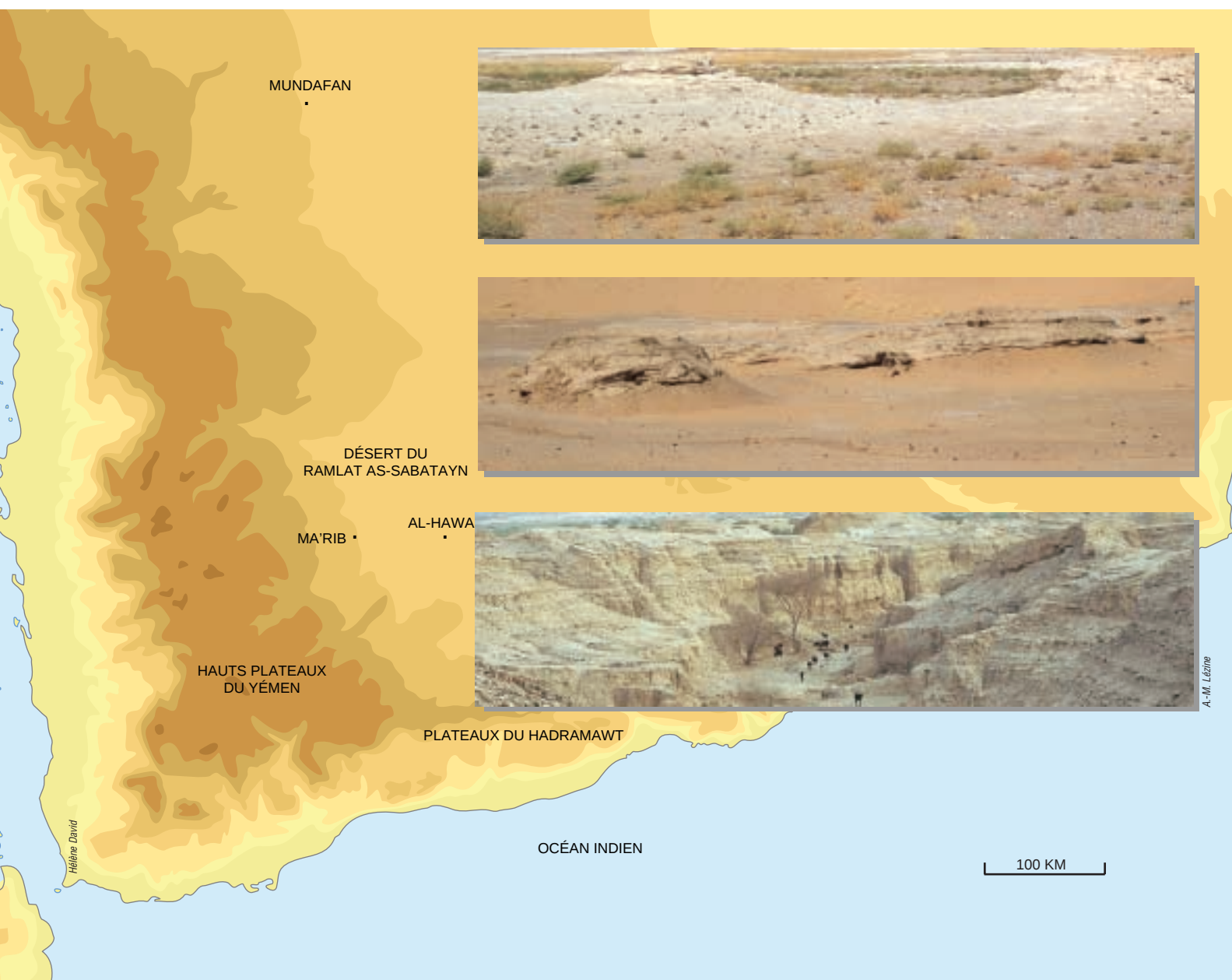
Les pluies que reçoit aujourd'hui le Yémen tombent au cours de deux saisons : en mars-avril, puis en juillet-août. Elles atteignent, en moyenne annuelle, 800 à 1 000 millimètres à 2 200 mètres d'altitude sur les hauts plateaux yéménites, mais ne dépassent pas 100 millimètres dans le désert du Ramlat as-Sab'atayn, au pied des hauts plateaux qui bordent la côte. Dans ce secteur, les températures élevées, responsables d'une très forte évaporation, rendent plus difficiles encore les conditions de vie. Les plantes qui

y poussent aujourd'hui sont des arbres et des arbustes épineux, tels l'acacia et des tamaris, dont les rares représentants se concentrent en bordure des wâdîs ou au pied des escarpements, où ils recueillent les eaux de ruissellement des hauts plateaux environnants. Quant à l'arbre à encens, *Boswellia sacra*, quelques pieds isolés subsistent en bordure du plateau du Jawl. Les plantes herbacées forment une steppe semi-désertique ; certaines colonisent les dunes, d'autres les sols salés des sebkas.

Les témoins lacustres de l'Arabie heureuse

Les phases humides résultant de l'accentuation des flux de la mousson indienne au-dessus de l'Arabie méridionale ont abouti à la mise en place d'un réseau hydrographique. À partir de 8 700 ans avant le présent (cer-

taines dates seront données par rapport au «présent», c'est-à-dire en utilisant la convention qui pose 1950 comme date de référence) et pendant près de 1 000 ans, des vents de mousson particulièrement violents ont poussé, chaque été, de l'air humide jusqu'aux montagnes qui bordent le Yémen, une partie de cette masse d'air humide franchissant même la barrière montagneuse (voir l'encadré de la page 56). Les pluies étaient abondantes, non seulement sur les montagnes, mais aussi sur les espaces aujourd'hui désertiques du Yémen et de l'Arabie saoudite, jusqu'à proximité du tropique du Cancer. On le sait grâce à l'examen topographique de la région, où l'on observe, notamment, des amas de sédiments riches en matière végétale décomposée dans les wâdîs, des sédiments calcaires, ou travertins, et des terrasses fluviales, qui représentent les restes du lit d'anciens cours d'eau.



La mousson indienne

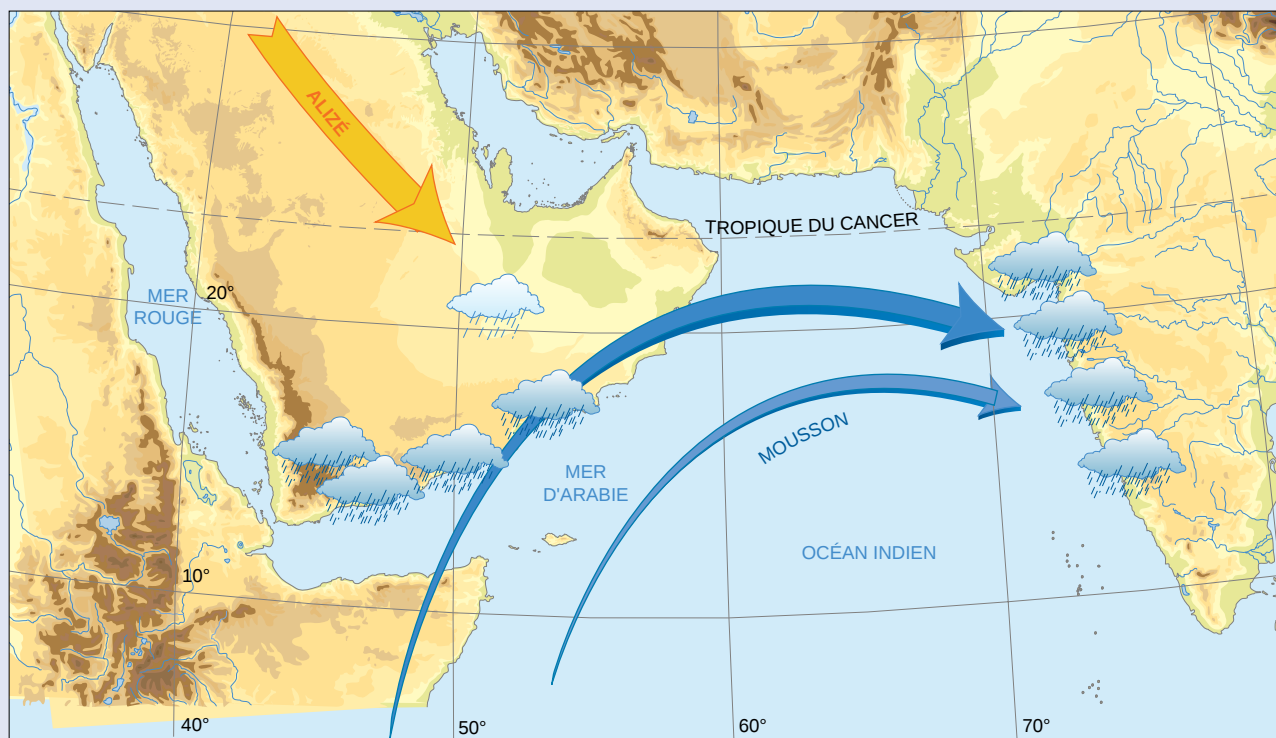
En été, sur l'hémisphère Nord, une masse d'air chaud de terre (l'alizé) circule du Nord-Ouest vers le Sud-Est et se heurte à une masse d'air froid ayant balayé les océans (la mousson). À la rencontre de ces deux masses d'air, vers 30 degrés de latitude Sud, un important flux d'air humide de surface se forme : il traverse l'Océan Indien du Sud-Ouest vers le Nord-Est. Ce flux, chargé de précipitations se heurte aux hauts plateaux du Yémen et de l'Hadramawt (jusqu'à 3 700 mètres), qui bordent à l'Ouest et au Sud la péninsule arabique. Il est dévié vers le sous-continent indien, où il pénètre. Cette masse d'air humide franchit rarement les hauts reliefs, de sorte que l'intérieur de la péninsule arabique est généralement soumis aux vents secs et chauds de l'alizé du Nord-Ouest. En hiver, le renversement de gradient des températures et des pressions entre la mer et la terre modifie la direction des vents : c'est alors la mousson sèche de Nord-Est qui domine.

Depuis environ trois millions d'années, l'intensité des pluies de la mousson indienne d'été a varié notablement selon qu'il s'agissait d'une période glaciaire ou interglaciaire. Les cycles glaciaires-interglaciaires ont été reliés, dès 1924, par le mathématicien serbe Milutin Milankovitch, aux variations de l'insolation, c'est-à-dire de la quantité de chaleur reçue au sommet de l'atmosphère terrestre. L'insolation dépend de trois paramètres : l'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport au plan de son orbite, la position des équinoxes et des solstices sur l'orbite elliptique de la Terre (la précession des équinoxes), enfin, la longueur

de l'ellipse que la Terre décrit autour du Soleil (l'excentricité de l'orbite) ; chacun de ces paramètres varie selon une périodicité propre, respectivement égale à 41 000 ans, de 19 000 à 23 000 ans et de 100 000 à 400 000 ans.

D'après la composition des foraminifères contenus dans les sédiments de la mer d'Arabie, la période de la mousson indienne varie de 19 000 à 23 000 ans, comme la précession des équinoxes : l'insolation dans l'hémisphère Nord est maximale quand la Terre passe au plus près du Soleil au moment du solstice d'été ; dans ces conditions, les différences de température et de pression entre les continents et les océans sont maximales, et la circulation de mousson est renforcée. D'autres facteurs, tels que la couverture de glace aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord, la température de surface des océans ou l'agencement des reliefs montagneux, notamment du plateau tibétain, modifient la périodicité des moussons, entraînant des fluctuations mineures.

Ainsi, au cours des périodes interglaciaires, la mousson indienne a été particulièrement active : pour les périodes les plus proches, de fortes moussons ont eu lieu il y a environ 125 000, 103 000 et 80 000 ans, puis au début de l'Holocène, avec un maximum il y a 8 500 ans. Lors de ces moussons exceptionnelles, les puissants vents de mousson franchissaient la barrière montagneuse des hauts plateaux du Yémen et de l'Hadramawt : les pluies étaient importantes sur la montagne. De surcroît, les nuages élevés franchissaient les cimes, apportant des pluies sur le désert d'Arabie.



Les pluies de la mousson indienne sont apportées par les vents du Sud-Ouest, chargés d'eau. Ils sont repoussés vers l'Est par les vents alizés de terre qui soufflent du Nord-Ouest. En période de mousson normale, les vents de mousson se heurtent aux reliefs de la côte Sud du Yémen et ne les franchissent pas. Les pluies tombent sur la côte Ouest de l'Inde. En période de moussons exceptionnelles,

les vents de mousson sont plus puissants, de sorte qu'ils franchissent les reliefs du Sud du Yémen : les pluies sont abondantes sur le relief. Qui plus est, la fraction supérieure de la masse d'air humide franchit le relief apportant des pluies à l'intérieur du Yémen. Les lacs aujourd'hui asséchés étaient alimentés par l'eau de pluie et par l'eau de ruissellement venant des montagnes.

Des lacs d'eau douce se sont également formés, alimentés par les rivières ou par les nappes souterraines. Lorsque la période de moussons exceptionnelles s'est achevée, les lacs se sont asséchés, et les sédiments qui s'étaient déposés sur leur fond ont été dégagés par l'érosion : seules des buttes témoins subsistent. Des échantillons qui y ont été prélevés ont été étudiés en laboratoire : on a analysé les sédiments, leur composition géochimique et leur contenu en grains de pollen.

Il y a environ 8 500 ans, pendant l'Holocène, les pluies de mousson étaient très fortes. Les sédiments lacustres découverts très récemment sur le site d'al-Hawa, dans le désert du Ramlat as-Sab'atayn, datent de cette période. Ce site était inaccessible avant la réunification du Yémen du Nord et du Yémen du Sud, qui eut lieu en 1990 ; en outre, on ne disposait d'aucune carte précise, ce qui rendait l'étude du site d'al-Hawa particulièrement difficile.

Les photographies satellitaires et aériennes analysées par Bruno Marcolongo, à l'Université de Padoue, ont permis aux archéologues d'identifier le site, ainsi qu'un important réseau hydrographique aujourd'hui disparu. Le désert du Ramlat as-Sab'atayn est aujourd'hui un vaste bassin formé de grandes dunes allongées d'environ 60 kilomètres de long et de 500 mètres de large, orientées en arc de cercle du Sud-Ouest au Nord-Est et séparées les unes des autres par de vastes couloirs atteignant jusqu'à trois kilomètres de large. Ce bassin recueille les rares eaux des wâdîs alimentés par l'eau de ruissellement des montagnes, tels Jawf, Markha, Bayhan ou Dhana, qui viennent des hauts plateaux environnants, convergent vers le centre du bassin et finissent par se perdre dans le massif des dunes.

Étant donné toutes les informations tirées de la répartition et de l'analyse des sédiments, ainsi que de l'examen des relevés satellitaires, nous pensons qu'à l'époque des moussons exceptionnelles, le débit des wâdîs était suffisant pour former un fleuve rejoignant le cours du wâdî Hadramawt, en direction de l'océan Indien. L'épaisseur de certains dépôts alluviaux, dans les couloirs qui séparent les dunes, confirme une notable activité fluviale passée, dont il nous faudra confirmer l'âge. Nous avons également retrouvé des dépôts qui indiquent la présence d'un grand lac asséché, le paléolac d'al-Hawa, et d'autres vestiges de lacs disparus. Les



2. LA PREMIÈRE DIGUE DE MA'RIB a été construite, il y a plus de 4 000 ans, à la sortie d'un défilé de montagne. Progressivement perfectionnée par des écluses et des canaux, elle a été entretenue, voire régulièrement reconstruite (*en haut*), jusqu'à la fin du VI^e siècle ; elle assurait l'alimentation en eau d'une vaste oasis (environ 22 kilomètres de long et 8 de large). À son apogée, la ville de Ma'rib comptait près de 50 000 habitants. Le temple de Bar'an (*en bas*) a été construit à proximité. Les fouilles sont dirigées par Burkhard Vogt, du Centre archéologique allemand de Sana'a.

vestiges de ces lacs sont des dépôts de calcaires lacustres blancs et de sédiments indurés où abondent les diatomées et les coquilles du mollusque d'eau douce *Melania tuberculata* ; aujourd'hui, ces témoins des paléolacs se présentent sous la forme de quelques affleurements disséminés, de quelques mètres d'épaisseur. À al-Hawa, ils surmontent une couche meuble de sédiments riches en matière organique.

Par la méthode de datation par le carbone 14, on a déterminé que ces sédiments ont été déposés entre 8 700 et 7 200 avant le présent, l'épisode lacustre ne commençant qu'après 7780. Entre 8 700 et 7 800 avant le présent, la composition minéralogique des sédiments témoigne d'une alternance de phases d'humidité et d'assèchement, ce qui est confirmé par l'extrême altération des grains de pollen exposés à l'air. Après 7780 avant le présent, le lac d'al-Hawa s'est formé, et les grains de pollen amassés indiquent la présence

d'une végétation riveraine dense de fougères et de roseaux de type *Typha*.

La végétation passée

En reliant les variations de l'extension des roseaux et celles des mesures du rapport isotopique de l'oxygène et du carbone réalisées sur les carbonates, on suit les oscillations du niveau des paléolacs. Lorsque l'évaporation est intense, le niveau du lac s'abaisse, et l'eau s'enrichit en isotope lourd de l'oxygène (oxygène 18). Les roseaux qui poussent sur les vastes zones marécageuses dégagées sur les bords du lac provoquent alors une augmentation du dioxyde de carbone (celui-ci est libéré par la respiration des végétaux et par la décomposition de la matière organique) : la concentration en carbone 13 dans les sédiments diminue. Les valeurs des concentrations en oxygène 18 et en carbone 13 dans les carbonates s'inversent lorsque le niveau du lac est haut.

La végétation des environs du paléolac al-Hawa était celle d'écosystèmes steppiques semi-désertiques, tout à fait semblables à ceux qui caractérisent aujourd'hui le désert du Ramlat as-Sab'atayn. Les dunes étaient fixées par la végétation herbacée ; en revanche, les arbres, tel l'acacia, étaient rares. Ce résultat est surprenant, car, à la même époque, en Afrique du Nord, on observe une extension quasi générale des savanes de type tropical jusqu'à proximité du tropique, en Mauritanie, au Niger et au Soudan.

En Arabie, si l'augmentation des pluies de la mousson indienne a permis la recharge des nappes phréatiques

et l'extension de grands lacs, elle n'a pas eu d'influence notable sur la couverture végétale, qui est restée la même qu'aujourd'hui. Les hauts plateaux du Yémen et de l'Hadramawt ont vraisemblablement fonctionné comme une barrière écologique, interdisant la migration des espèces végétales tropicales. Celles-ci sont restées cantonnées sur l'étroit littoral de l'océan Indien et de la mer Rouge. L'importance de l'évaporation liée à la permanence de vents du Nord peut aussi expliquer en partie la persistance de ces écosystèmes subdésertiques.

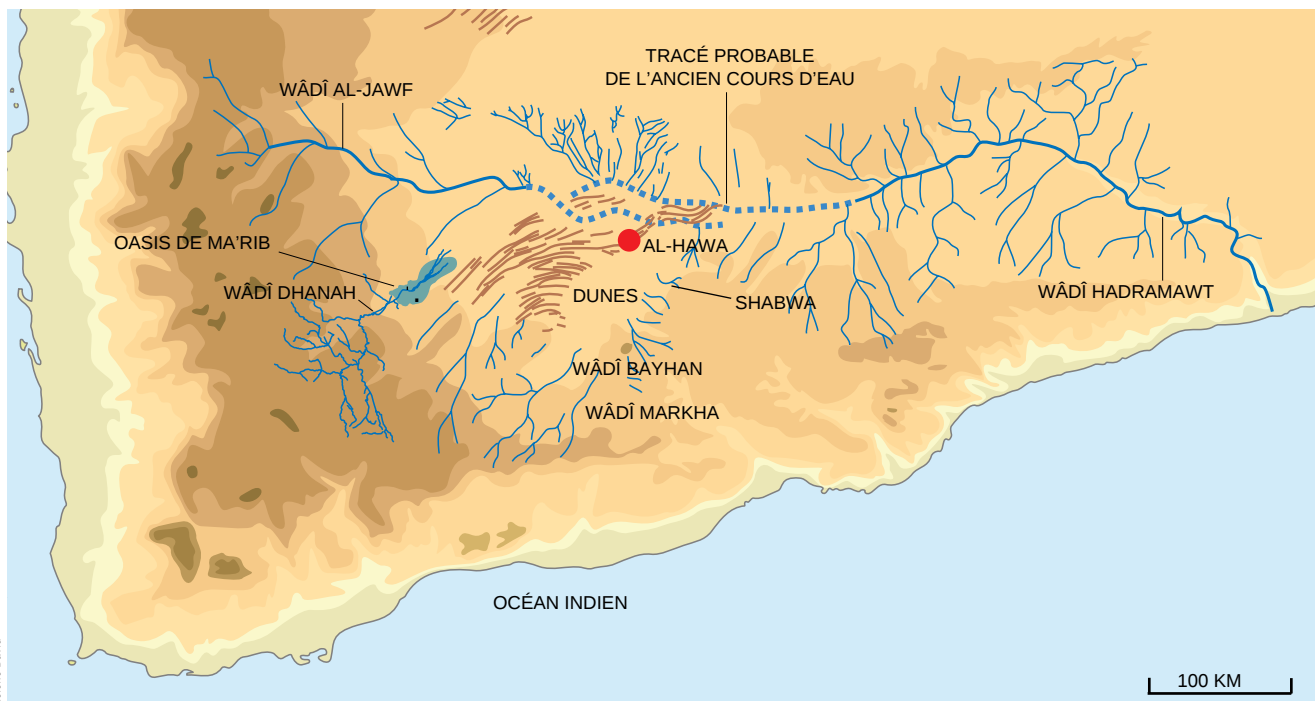
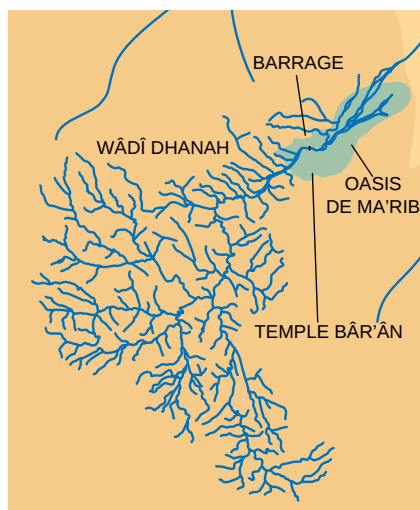
Certains grains de pollen contenus dans les sédiments du paléolac d'al-Hawa proviennent de plantes qui appartiennent aux écosystèmes tempérés ou d'altitude localisés au Nord ou à l'Est de la péninsule arabique, au Moyen Orient ou dans les monts Zagros : c'est le cas du cèdre, du chêne, du hêtre, du bouleau et du charme. Ces essences n'ont jamais poussé au Yémen, mais les vents du Nord étaient suffisamment violents pour les transporter sur plusieurs milliers de kilomètres.

Un paléoréseau

D'autres paléolacs ont été trouvés, plus au Nord, notamment sur le site lacustre de Mundafan, dans le désert du Rub al-Khali, en Arabie saoudite. Ce site a

été étudié par Harold McClure, de l'Université de Londres, et par Ann El Moslimany, de l'Université de Washington. Malheureusement, les grains de pollen y ont été très mal conservés. En revanche, la datation des sédiments de ce site par le carbone 14 a révélé que l'épisode lacustre holocène a duré près de 3 000 ans. Ainsi, à al-Hawa, les vestiges que nous avons recueillis ne représentent qu'un épisode incomplet de cette longue période humide. Les travaux en cours sur ce site et ceux que l'on prévoit dans le secteur de Shabwa, un autre site lacustre situé à quelques dizaines de kilomètres au Sud-Est d'al-Hawa, devraient nous permettre de combler cette lacune, mais aussi de rechercher les traces de fortes moussons antérieures. Selon Franck Sirocko et ses collègues de l'Université de Kiel et du CNRS, qui ont étudié des sédiments en mer d'Arabie, les pluies de mousson ont commencé à augmenter il y a 14 000 ans. Nous espérons retrouver la trace de cette augmentation sur le continent, sous la forme de paléolacs ou d'apports de sédiments par les rivières venant des hauts plateaux.

Quelle était la configuration du réseau hydrographique qui, 3 000 ans durant, alimentait ces étendues lacustres ? Un grand système hydrographique semble avoir existé dans cette région. Il aurait sillonné la péninsule



3. UN PALÉOFLEUVE traversait sans doute le désert du Ramlat as-Sab'atayn : les cours actuels des deux wādīs Jawf et Hadramawt auraient été reliés par un bras aujourd'hui asséché (la zone en pointillés). Le tracé de ce paléofleuve a été reconstruit par B. Marcolongo, de l'Uni-

versité de Padoue, d'après les amas de sédiments, témoins d'écoulements fluviaux passés. Tous ces wādīs sont secs la plupart du temps et ne sont en eau qu'au moment des moussons. Le réseau des wādīs qui alimentaient la retenue de Ma'rib est détaillé dans l'image supérieure.

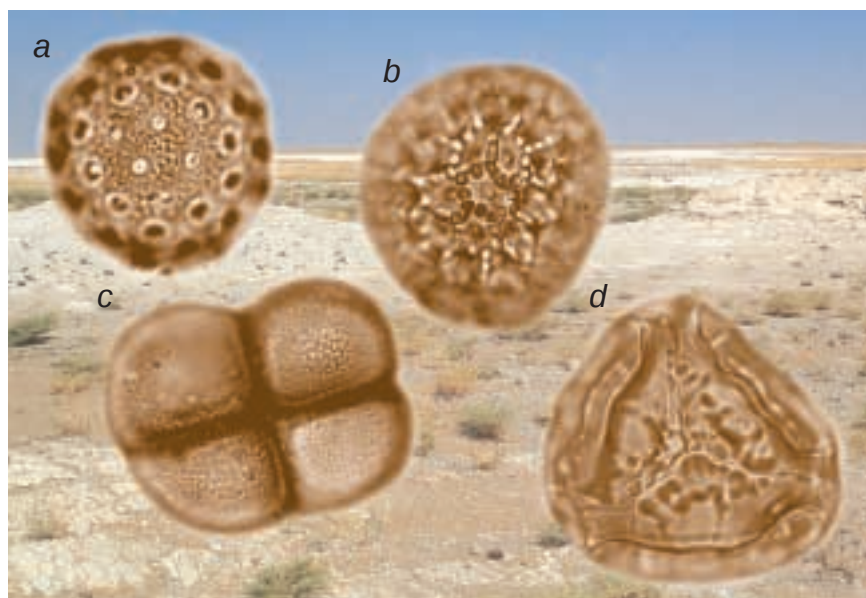
arabique d'Ouest en Est. Prenant naissance à l'Ouest du désert du Ramlat as-Sab'atayn, le Al-Jawf aurait formé un long fleuve unique avec l'Hadramawt, se jetant dans le golfe d'Aden. Aujourd'hui, ces deux fleuves sont séparés par le désert, mais des dépôts sédimentaires semblent indiquer qu'un tronçon de fleuve disparu les aurait reliés. Ce grand fleuve aurait été alimenté par tout le réseau des wâdîs venant des hauts plateaux voisins. La datation des sédiments fluviaux est difficile, car le fleuve entraîne des particules arrachées aux montagnes, dont on ne sait évaluer ni l'origine ni l'âge.

D'après les vestiges que nous avons retrouvés, les lacs semblent disparaître d'Arabie méridionale il y a environ 6 000 ans. Après cette date, l'aridité domine, interrompue seulement par quelques épisodes humides mineurs ou par de fortes pluies saisonnières. Pour repousser l'environnement désertique qui progressait, les habitants des royaumes Sud-arabiques ont élaboré d'importants dispositifs d'irrigation. Ils collectaient les eaux de ruissellement issues des pluies de mousson qui s'abattaient sur les hauts plateaux. La digue de Ma'rib illustre cet effort d'une société très élaborée, tournée vers l'agriculture et les échanges commerciaux.

La digue de Ma'rib

Cette digue de terre fut construite il y a environ 4 000 ans à la sortie d'un défilé ; elle était longue de 680 mètres. La retenue était alimentée par le wâdî Dhana et collectait les pluies d'un bassin versant d'environ 10 000 kilomètres carrés. Elle assurait l'irrigation d'une oasis, au Nord, de 4 300 hectares, et d'une autre, au Sud, de 5 300 hectares. L'eau s'élevait jusqu'au niveau du champ supérieur et irriguait d'un coup toute l'oasis ; le champ inférieur recevait l'excès d'eau du champ supérieur. Les champs étaient submergés d'une lame d'eau qui s'infiltrait lentement dans le sol. Un système d'écluses, de déversoirs et de canaux réglait les débits. De surcroît, la digue retenait les limons, de sorte que le sol était enrichi, et la production agricole améliorée. L'oasis de Ma'rib aurait nourri jusqu'à 50 000 personnes.

Ce système a fonctionné pendant plusieurs millénaires, avant d'être progressivement abandonné. Une des principales raisons de cet abandon



4. LES GRAINS DE POLLEN et les spores contenus dans les sédiments déposés au fond des lacs disparus du Yémen informent sur la flore passée. On y retrouve des grains de pollen de plantes herbacées poussant en milieu sec et salé, tels *Amaranthaceae* (a) et *Tribullus* (b), en milieu humide *Chenopodiaceae*/*Amaranthaceae* (près des étendues d'eau douce), tel le roseau *Typha* (c). On trouve également des spores de fougères (d).

est l'accumulation des limons : en 1 000 ans, le niveau des champs s'était élevé de 10 mètres. La pression des limons faisait régulièrement céder la digue, qui fut reconstruite sans relâche jusqu'à la fin du VI^e siècle. Le Coran relate ainsi la destruction définitive du barrage, vers 580 : « Certes, les Sabâ' dans leur habitat, avaient un signe. [C'était] deux jardins à dextre et senestre. "Mangez de l'attribution de votre Seigneur et soyez-lui reconnaissants ! [Ce pays est] un pays délicieux. [Allah] est un seigneur absolu." Les Sabâ' se détournèrent [cependant de nous]... Nous déchaînâmes contre eux l'inondation d'al-'Arim et, au lieu de leurs deux jardins, Nous leur donnâmes deux jardins poussant [des végétaux aux] fruits amers, des tamaris et de rares baies de jujubier. Cela, Nous leur avons donné en prix de ce qu'ils furent incrédules » (Sourate 34, 15-17).

Peu d'équipes multidisciplinaires regroupant archéologues, géologues spécialistes des milieux lacustres, de l'environnement et du climat du passé travaillent au Yémen, surtout dans son désert intérieur, le Ramlat as-Sab'atayn. Les études menées sur le site d'al-Hawa montrent à quelles difficultés les habitants ont été – et sont encore – confrontés pour pratiquer l'agriculture et l'élevage dans un écosystème aride. Différentes civilisations se sont succédé et ont évolué en fonction de leur capacité à maîtriser et à gérer les pluies et l'irrigation.

L'histoire de la civilisation disparue du Yémen soulève la question de l'adaptation de l'homme aux changements du climat et nous permettra de déterminer dans quelle mesure ces changements ont influé sur la prospérité, puis sur la décadence des civilisations. Enfin, les recherches menées sur les écosystèmes d'Arabie, parce qu'elles nous permettent de reconstituer les climats et les écosystèmes du passé, nous seront utiles pour valider les modèles du climat global de demain.

Anne-Marie LÉZINE est directeur de recherche au CNRS, dans le Laboratoire de paléontologie et stratigraphie de l'Université Paris VI.

A.-M. LÉZINE, *West African Paleoclimats during the Last Climatic Cycle from Atlantic Deep Sea Pollen Record*, in *Quaternary Research*, vol. 35, pp. 456-463, 1991.

A.-M. LÉZINE, J. CASANOVA, *Correlated Oceanic and Continental Records Demonstrate the Past Climate and Hydrology of North Africa (0-140Kyr)*, in *Geology*, vol 19, pp. 307-310, 1991.

A.-M. LÉZINE et al., *Holocene Lakes from Ramlat As-Sab'atayn (Yemen) Illustrate the Impact of Monsoon Activity in Southern Arabia*, in *Quaternary Research*, sous presse.

M.-L. INIZAN et al., *Paléolacs et peuplements holocènes du Yémen : le Ramlat as-Sabatayn*, in *Paléorient*, sous presse.

