

La mousson indienne

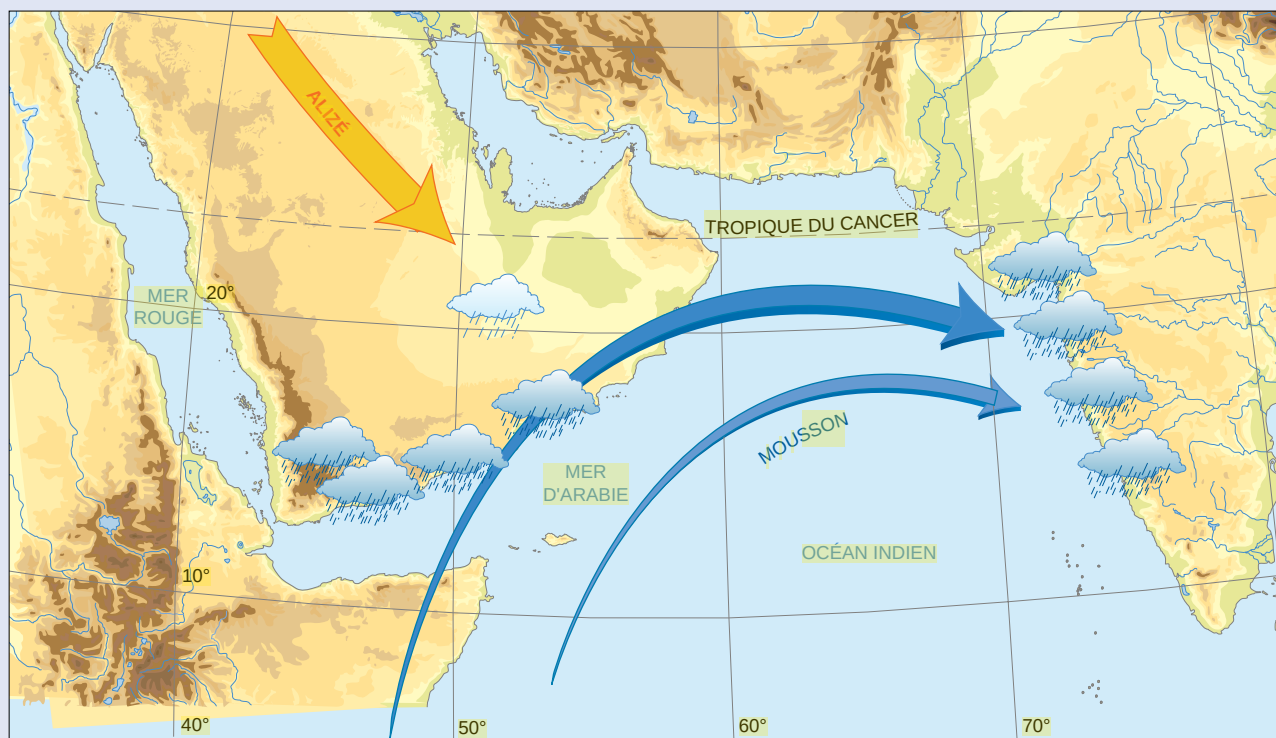
En été, sur l'hémisphère Nord, une masse d'air chaud de terre (l'alizé) circule du Nord-Ouest vers le Sud-Est et se heurte à une masse d'air froid ayant balayé les océans (la mousson). À la rencontre de ces deux masses d'air, vers 30 degrés de latitude Sud, un important flux d'air humide de surface se 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.

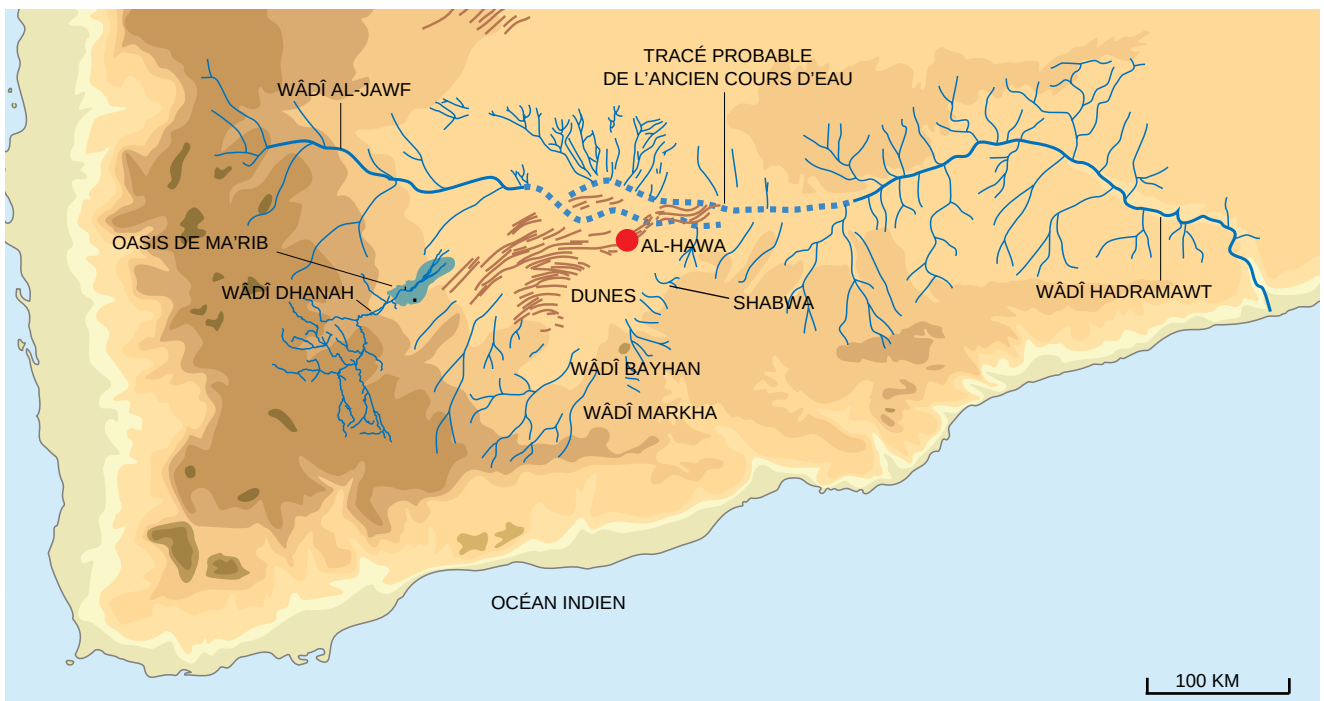
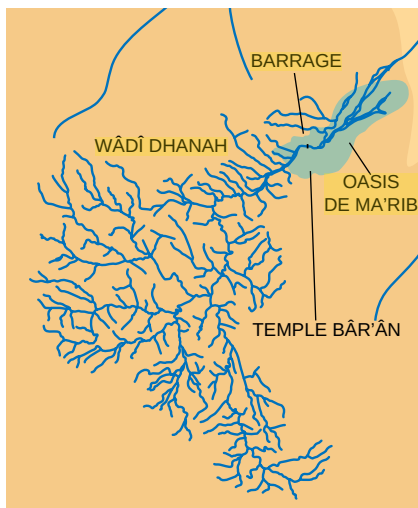
Certains grains de pollen contenus dans les sédiments du paléolac d'al-Hawa proviennent de plantes qui appartiennent aux écosystèmes tempérés ou d'altitude localisés au Nord ou à l'Est de la péninsule arabique, au Moyen Orient ou dans les monts Zagros : c'est le cas du cèdre, du chêne, du hêtre, du bouleau 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



Hélène David

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.