

suite à une révolte des juifs, la Judée, qui était devenue une province romaine en l'an 6, mais avait conservé une certaine autonomie, perdit tout ce qui lui restait d'indépendance. Rome se rapprochait... La menace qu'il sentait peser sur son royaume explique sans doute que Rabbel II, le dernier roi nabatéen (70-106), ait tant fait pour renforcer les aspects arabes dans la culture et dans la religion nabatéennes, tout en les opposant aux valeurs gréco-romaines. Il déclara que Duchara, le dieu de Pétra, devenait aussi le dieu protecteur du roi et de tous les Nabatéens. D'anciens sanctuaires à ciel ouvert des Nabatéens acquirent une importance aussi grande, voire supérieure, à celle des temples et participèrent au rayonnement du pays.

Le retour à la vénération de dieux représentés sous la forme de bétyles se refléta alors dans le nom des dieux. Partout dans le royaume, tout Nabatéen pouvait «rencontrer» Duchara et le vénérer dans divers sanctuaires, même si ceux-ci étaient également consacrés à des dieux locaux. Rabbel II tentait ainsi de lier profondément les Nabatéens à Pétra et de transformer son royaume tribal en un véritable État.

Les Nabatéens ont-ils, comme les juifs, fomenté une révolte contre Rome? Le royaume nabatéen a-t-il voulu quitter son statut d'État client? Nous l'ignorons. Toujours est-il qu'en 106, deux légions marchèrent par surprise sur le royaume nabatéen et l'annexèrent. La conquête fut rendue officielle cinq ans plus tard seulement,

sans doute pour ne pas faire d'ombre à la victoire de l'empereur Trajan (98-117) sur les Daces. L'administration militaire romaine se mit toutefois aussitôt au travail. Des routes balisées de bornes kilométriques furent construites dans tout le pays, notamment le long de la nouvelle voie trajane reliant Bosra, en Syrie, à Ayla, sur le golfe d'Aqaba. Nombre de villages devinrent des villes. Les historiens de l'Antiquité restent muets sur le sort de la maison royale nabatéenne. Privée de ses élites politiques et du contrôle du commerce de l'encens, la tribu perdit rapidement son importance et se mélangea sans doute à d'autres populations arabes.

Pétra sut néanmoins s'adapter et semble être devenue la capitale de la nouvelle province (un doute subsiste, car Bosra, où était basée la légion romaine de la province, a également pu jouer ce rôle). Sur les monnaies de la ville, le couple royal nabatéen fut remplacé par le portrait de la déesse grecque de la Fortune, Tyche.

Pétra passe pour avoir été une ville romaine autonome, dotée d'un conseil municipal et d'une salle de conseil, que les archéologues pensent avoir découverte au centre de Pétra, dans le «grand temple». En 1997, ce complexe architectural monumental a livré un théâtre assez grand pour accueillir tous les membres d'un conseil de cette époque, soit 600 personnes. Qui plus est, à l'origine, ce complexe semble avoir été un temple ou un palais royal. Si cette interprétation est exacte, on aurait là un exemple exceptionnel de sanctuaire converti par les Romains en lieu de réunion pour l'administration municipale.

L'empereur Trajan tenta de renforcer le caractère romain de Pétra. L'ancienne voie processionnelle qui longeait le wadi Mousa fut transformée en voie à colonnade flanquée de trottoirs couverts et d'échoppes. Un escalier monumental menant à une terrasse supérieure, où se trouvait le marché, fut construit. Un arc portant une inscription datée de 114, par laquelle Pétra recevait le titre de «Métropole de l'Arabie», en marquait l'entrée. La porte du téménos (enceinte sacrée), construite au-dessus d'un monument plus ancien, fut érigée sous Trajan ou son successeur, Hadrien. Elle donnait accès, par trois baies qu'il était possible de fermer, à l'enceinte sacrée dans laquelle se dressait le temple prin-

La collecte des eaux de pluie

Comment une métropole a-t-elle pu naître et se développer dans un environnement aussi aride? Parce que les Nabatéens avaient une parfaite maîtrise des techniques hydrauliques. Plusieurs canalisations acheminaient le précieux liquide jusque dans le centre de la ville, depuis des sources pérennes jaillissant à plusieurs kilomètres de là, au pied des montagnes qui encadrent Pétra à l'Est et au Sud. L'une de ces canalisations captait la source de Moïse, située à l'entrée du village actuel de Wadi Mousa. Au moyen de canaux taillés dans le rocher et d'aqueducs, elle traversait le massif d'al-Khubtha et débouchait dans une citerne de 300 mètres cubes aménagée près du «tombeau à étages». Ce seul canal déversait environ 1,5 million de litres d'eau par an dans les citernes de la ville.

Deux autres canalisations, une de chaque côté du Siq, servaient par ailleurs à répartir les eaux stockées dans deux grandes citernes probablement alimentées, elles aussi, par la source de Moïse. On peut noter que celle de la rive droite est formée de tuyaux de poterie assemblés et posés sur un lit de mortier. Une autre canalisation amenait l'eau de la source Braq, au Sud-Est de la ville, jusqu'à un bassin situé non loin de la plate-forme bordée d'un bas-relief monumental en forme de lion au-dessus du wadi Farasah. Une seconde branche menait au secteur du Qasr al-Bint. Enfin, pour compléter leurs ressources en eau, les Nabatéens stockaient les eaux des pluies hivernales dans des citernes. L'eau ainsi collectée servait bien sûr aux besoins quotidiens des habitants de la cité, mais sa rareté même lui conférait une dimension religieuse : les divinités étaient remerciées partout où le précieux liquide vital suintait des fissures de la falaise.



Aqueduc (à gauche) faisant partie de la canalisation en provenance de la source de Moïse. Restes (à droite) de l'une des grandes citernes de Pétra.

à gauche : Robert Werning ; à droite : Laila Nehmé

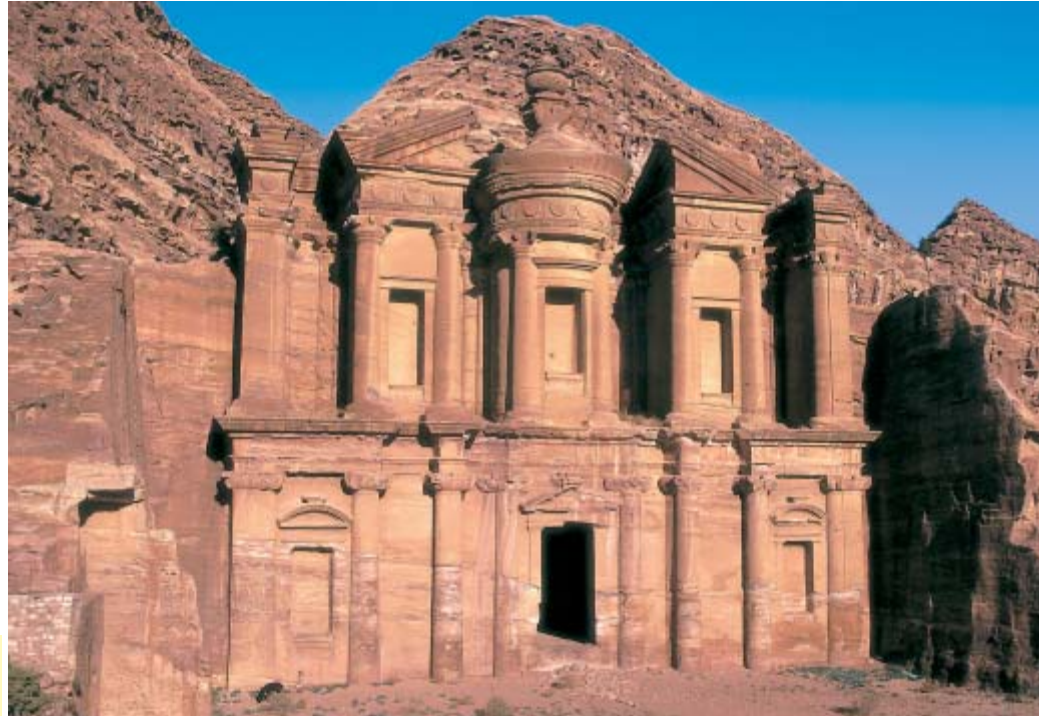
cipal de Pétra, le Qasr al-Bint (voir l'encadré de la page 39). Des bas-reliefs de divinités et de génies protecteurs en ornaient les pilastres.

Hormis ces monuments et un nymphée, les Romains ont laissé peu de traces à Pétra, ce qui est surprenant lorsqu'on considère l'importance de la ville comme centre administratif de la province. L'habitat lui-même resta traditionnel. Autre exemple de permanence des coutumes nabatéennes, le gouverneur romain de la province, Aninius Sextius Florentinus, se fit même inhumer en 127 dans un tombeau rupestre qui avait peut-être été occupé par une riche famille nabatéenne. Des dédicaces à des divinités romaines ainsi que des statues de dieux et d'empereurs romains témoignent de la domination des nouveaux maîtres. Sous leur autorité, Pétra demeura un centre économique important, mais une partie des bénéfices du commerce alimentait désormais soit d'autres villes, soit le fisc romain.

Au début du III^e siècle, lorsque les Sévères (lignée d'empereurs romains) se préoccupèrent de plusieurs villes des provinces orientales, Pétra fut peu gratifiée : elle n'obtint que la construction d'une fontaine et le statut fiscal avantageux de colonie romaine. La ville avait manifestement perdu son importance. Qui plus est, au déclin local s'ajoutèrent les effets de la crise économique générale qui touchait l'Empire romain. Lorsqu'un tremblement de terre ébranla la cité en 363, les moyens financiers furent insuffisants pour la reconstruire à l'identique.

Le déclin de Pétra

À la fin du III^e siècle, les réformes de Dioclétien eurent de graves conséquences pour Pétra, qui perdit son statut de capitale de province au profit de Bosra. Rien ne changea à partir de 330 avec l'effondrement de Rome et le passage de l'Arabie à la partie byzantine de l'Empire, dont la capitale était Constantinople. C'est en 358 seulement que Pétra retrouva un statut politique officiel avec la création de la province de *Palaestina Salutaris* (*Palaestina Tertia* à partir de 440), comprenant le Sud de la province d'Arabie et certaines parties du Néguev, dont elle devint la capitale. Élevé au rang de religion d'État dans l'Empire romain d'Orient par Constantin I^{er} (280-337), le christianisme fit son apparition à Pétra. Son statut de capitale, son appar-



4. EL DEIR, «le monastère», est situé sur un plateau. D'abord sanctuaire nabatéen, il fut ensuite utilisé par l'Église, ce qui explique son nom.

tenance à la «Terre Sainte» et surtout la présence de la tombe d'Aaron, le frère de Moïse, sur le jebel Haroun, justifiaient la conversion de la ville. On y envoya des évêques pour tenter d'en convertir les habitants, apparemment sans succès, puisque les dignitaires rapportèrent l'obstination avec laquelle ils restaient fidèles à leurs anciennes croyances. C'est vers le milieu du V^e siècle seulement que le christianisme commença à s'imposer. En 446, le tombeau d'un ancien roi nabatéen fut transformé en cathédrale par l'évêque Jason. Du milieu du V^e siècle datent également une basilique richement décorée de mosaïques et une église plus ordinaire, découvertes dans les années 1990 dans le centre urbain de Pétra, sur la rive Nord du wadi Mousa.

Dans la basilique furent mis au jour, en 1993, les restes calcinés d'un lot d'archives privées écrites en grec sur 152 rouleaux de papyrus. Ces documents, en cours d'étude, donnent des informations sur la situation économique de la cité et de ses environs au VI^e siècle. Contrairement à ce que l'on pensait, l'arrivée du christianisme s'est accompagnée d'un essor écono-

mique qui se serait poursuivi pendant tout le VI^e siècle. Cela n'empêche d'ailleurs pas Pétra d'être devenue, à l'époque, le lieu privilégié de déportation des criminels et des hérétiques. À la fin du VI^e siècle, la situation changea une fois de plus, comme en témoigne le fait que la nef Sud de la basilique servit provisoirement d'entrepôt. C'est au cours d'un incendie que les archives entreposées dans une chapelle latérale brûlèrent.

Même si elles n'ont pas laissé de traces tangibles de leur passage, on peut supposer que des populations bédouines se sont approprié les ruines antiques de Pétra, ont veillé sur elles pendant des siècles et en ont interdit l'accès aux étrangers. Leurs descendants ont quitté la ville antique il y a moins de 20 ans pour s'installer dans un village construit de toutes pièces à leur intention au sommet d'un col dominant le site. Devenus directeurs d'hôtels ou de cafés, artisans ou vendeurs de souvenirs, ils sont propriétaires des chevaux qui servent aujourd'hui de montures aux touristes. C'est l'héritage de l'une des premières grandes puissances arabes qui les fait vivre.

Robert WENNING est archéologue et mène ses recherches à l'Université catholique d'Eichstätt.

J. STARCKY, *Pétra et la Nabatène*, éditions H. Cazelle et A. Feuillet, *Dictionnaire de la Bible*, supplément 7, col. 886-1017, 1996.

L. NEHMÉ et F. VILLENEUVE, *Pétra, Métro-*

pole de l'Arabie antique, Le Seuil, 1999.

Chr. AUGÉ et J.-M. DENTZER, *Pétra, La cité des caravanes*, Découvertes Gallimard, 1999.

Pétra. Dernières nouvelles de la cité rose, in *Le monde de la Bible*, n° 127, mai-juin 2000.

J. HEALEY, *The Religion of the Nabataeans*, éditions Brill, Leiden, 2001.

Le vol des insectes

MICHAEL DICKINSON

Le vol stationnaire des insectes résulte d'une combinaison d'effets aérodynamiques élucidés par un modèle utilisant les lois de la similitude.

En 1934, dans l'introduction de son ouvrage *Le vol des Insectes*, l'entomologiste Antoine Magnan écrit : « Tout d'abord poussé par ce qui se fait en aviation, j'ai appliqué aux insectes les lois de la résistance de l'air, et je suis arrivé avec mon assistant André Sainte-Lagüe à cette conclusion que leur vol est impossible. » Cette conclusion hâtive était sans doute fondée sur le fait que la portance maximale théorique des ailes d'un bourdon est plus faible que son poids.

La portance est la force qui s'exerce sur un corps perpendiculairement à la direction de son mouvement ou de l'écoulement où il est plongé. Cette portance est généralement calculée pour une aile d'avion : la forme incurvée de l'aile impose que la vitesse de l'écoulement de l'air sur sa partie supérieure soit plus grande que le long de la partie inférieure. Selon le principe découvert par Daniel Bernoulli au XVIII^e siècle, l'augmentation de la vitesse du fluide s'accompagne d'une diminution de la pression : la pression étant plus forte sous l'aile qu'au-dessus, la poussée s'exerce vers le haut, la portance (voir la figure 6).

Depuis 1934, les ingénieurs et les mathématiciens ont fait des progrès et ont acquis suffisamment de connaissances pour mettre au point les ailes d'avions nécessaires au transport de centaines de passagers, telles celles de l'Airbus A380. La conception de ces avions repose sur le principe de stationnarité selon lequel l'écoulement de l'air autour des ailes et les forces qui en résultent sont stables dans le temps.

Tel n'est pas le cas des insectes dont le vol est longtemps resté une énigme, car ces animaux battent et tournent leurs ailes 20 à 600 fois par seconde. Les forces aérodynamiques et les écoulements d'air changent sans cesse et compliquent les analyses, mathématiques et expérimentales.

Pour comprendre la physique du vol stationnaire d'une mouche, nous avons mis au point un dispositif expérimental (voir la figure 3). Dans une cuve de deux tonnes d'huile bat doucement une paire d'ailes de 60 centimètres d'envergure. Mues par six moteurs commandés par un ordinateur, les ailes brassent le fluide et y créent un mouvement que révèlent des millions de bulles d'air injectées dans la cuve. L'ensemble est éclairé par des rayons de lumière laser et filmé par des caméras vidéo, tandis que des capteurs enregistrent en permanence les forces qui s'exercent sur les ailes.

Grâce à l'insecte mécanique, qui imite les mouvements des ailes à une vitesse 1 000 fois inférieure et à une échelle 100 fois plus grande, nous avons compris comment la mouche utilise les tourbillons, le décrochage retardé, la circulation de l'air autour des ailes et la capture de sillage. Détaillons ces phénomènes qui donnent aux insectes une telle aisance dans leur vol.

Un bruissement d'ailes

Les ailes d'insectes en mouvement apparaissent le plus souvent comme une image brouillée : le vol des insectes ne ressemble donc en rien à celui des avions. Les ailes de l'insecte ne sont pas animées d'une simple oscillation verticale : l'extrémité de chaque aile trace une courbe ovale fortement inclinée. De plus, les ailes changent d'orientation à chaque battement : la face supérieure d'une aile est orientée vers le haut lorsque l'aile est abaissée, et vers le bas lors de sa remontée.

Les premières tentatives d'analyse du vol des insectes appliquaient à ces mouvements complexes les lois de l'aérodynamique stationnaire, lois habituellement utilisées en aéronautique. Ces approches étaient toutefois moins naïves que celle qui avait conduit aux

premiers calculs du vol du bourdon, car elles tenaient compte de la variation de la vitesse des ailes au cours du temps.

Imaginons que nous figions l'aile de l'insecte dans chacune des positions successives qu'elle prend pendant un battement, que nous reproduisions en soufflerie l'écoulement correspondant à chacune de ses positions et que nous mesurions la portance associée. Si la théorie stationnaire était correcte, la force moyenne calculée par addition des forces associées à toutes les positions serait dirigée vers le haut et égale au poids de l'insecte.

À la fin des années 1970, les aérodynamiciens doutaient de la pertinence de cette analyse et, au début des années 1980, à partir des données disponibles, le physicien américain Charles Ellington a conclu que l'approche stationnaire ne pouvait expliquer les forces mises en œuvre. Les mécanismes d'écoulement non stationnaires qui gouvernent les battements d'ailes restaient à découvrir.



Photographies de T. Archibald

1. DES ROBOTS capables de voler imiteront la nature : ils devront plus aux insectes et aux effets aérodynamiques que ceux-ci exploitent, qu'aux techniques aéronautiques utilisées dans la construction des avions.