

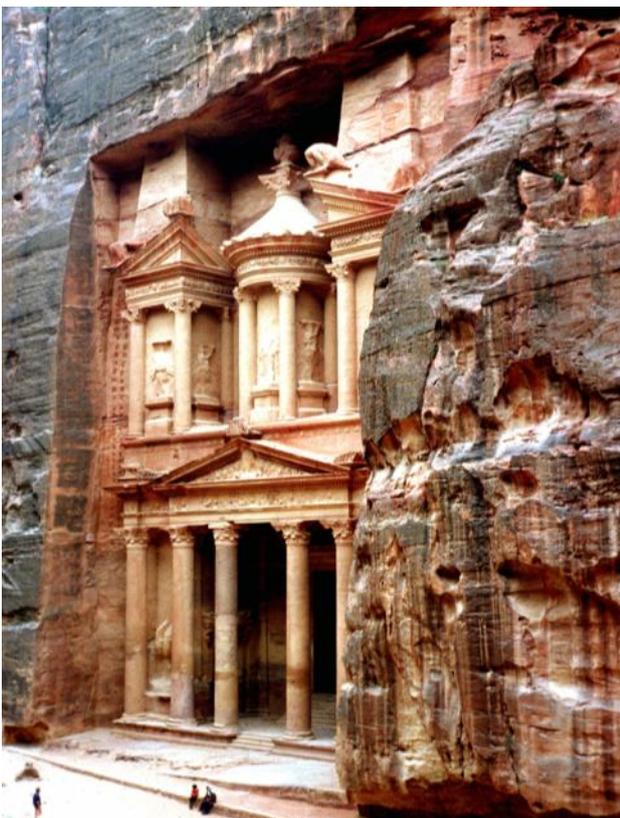
LES Puits NABATEENS DE MEDÂ'IN SÂLIH (Arabie saoudite)

Paul Courbon

Qsar el Bint (Le château de la fille) est le plus bel ensemble de tombes monumentales de Médâ'in Sâlih

Au sud de la Jordanie et aux confins du désert, Petra est un lieu extraordinaire. À partir du VI^e siècle avant notre ère, les Nabatéens y ont creusé dans les falaises de grès, de magnifiques temples et tombes monumentales. Le temple appelé el Khazne en est le monument le plus célèbre. En l'an 106 de notre ère, la prise de Petra par les Romains marque la fin de la civilisation nabatéenne. Peuple de commerçants, les Nabatéens avaient établi leur influence loin de Petra. En Arabie saoudite, 480 km au sud-est, le site de Madâ'in Sâlih, ou Hegra dans l'antiquité, en est le deuxième centre par son importance. Là, dans un magnifique paysage de ro-

El Khazneh, le monument le plus beau et le plus connu de Petra



chers et de sable, dominé par une belle montagne de basalte, les nabatéens ont sculpté les falaises de belles tombes monumentales aux façades décorées de sculptures. On en a recensé 128.

Le site avait été révélé au début du XX^e siècle par les Dominicains français Jaussen et Savignac de l'école biblique de Jérusalem qui avaient visité le Hijaz à dos de chameau. De 1907 à 1910, ils avaient fait une étude remarquable du site, dont l'impression nous a laissé deux gros volumes. Depuis 2001, les archéologues français ont eu à nouveau accès à ce site. Financées par le Ministère des Affaires Etrangères et sous l'égide du Vice-Ministère saoudien des Antiquités et Musées, les missions sont dirigées par Laïla Nehme chercheur au CNRS qui a su se faire admettre auprès des Saoudiens par sa personnalité et sa connaissance parfaite de l'Arabe. Les temps changent comme l'a chanté Dylan, même en pays wahabite!

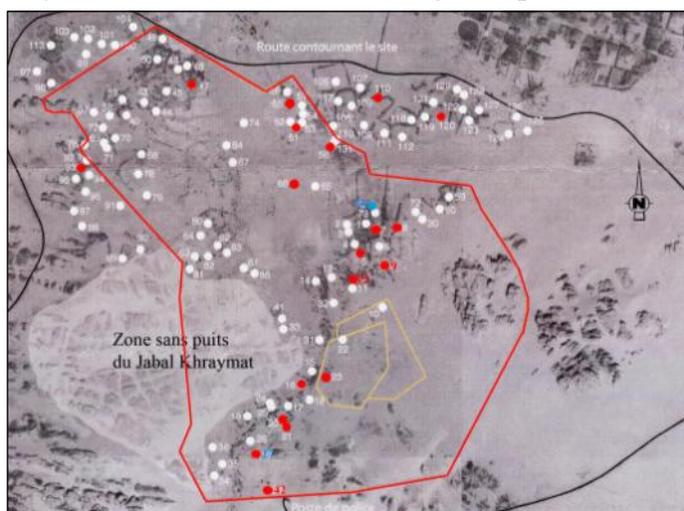
En 2003, j'étais contacté pour participer à ces missions en tant que topographe. Entre 2003 et 2010, je venais cinq fois à Madâ'in Sâlih. En 2003 et 2004, je me consacrais à un gros travail topographique, pour compléter ce qui avait été fait sur le vaste site et collationner tous les travaux antérieurs pour les rattacher à un système de coordonnées unique, UTM en l'occurrence. Je n'avais alors pas manqué de remarquer tous les puits creusés par les nabatéens pour subvenir à leurs besoins en eau.

En 2003 et 2004, les membres de la mission archéologique de Madâ'in Sâlih, principalement Th. Arnoux, avaient entrepris le recensement de ces nombreux puits s'ouvrant sur le site [10]. Leur positionnement au GPS, mesure de profondeur, description, croquis de surface et photographie avaient réalisés. Au total, 132 puits, de profondeur, de forme et de diamètre variables avaient été enregistrés et intégrés dans la base de données cartographiques du site. A la vue de ces vastes puits verticaux, bouches d'ombre exerçant sur moi un appel irrésistible, mon sang de spéléologue n'avait fait qu'un tour. En novembre 2005, avec l'accord de Laïla Nehme, j'entreprenais la descente de ceux qui paraissaient les plus intéressants, puis leur étude, notamment sur le plan hydrogéologique.

LES PUITTS NABATEENS

Si certains puits sont presque obstrués, ou si leur margelle s'est écroulée, de nombreux autres sont en parfait état de conservation et ont été remis en service à la période moderne. Cette réutilisation est attestée par certaines structures de levage et surtout par les vieilles pompes aspirantes abandonnées sur place quand, en 1978, le gouvernement saoudien a entouré le site archéologique d'une solide clôture et en a expulsé les occupants vers une nouvelle zone de culture. Cependant, après vingt-cinq ans d'abandon, du sable déposé par le vent, et des pierres venant de l'écroulement des margelles, sont venus s'amonceler au fond des puits dont le plus profond a été sondé à 17,8 m. Du fait de cette obstruction partielle, en 2005 aucun puits ne donnait accès à la nappe d'eau.

Nous savons que dans la période moderne, de nombreux puits avaient été curés, mais jamais approfondis. Creusés dans le grès, ils ont tous un fond rocheux ; seule la partie supérieure des puits, creusée dans les alluvions, possède un chemisage de maçonnerie. Mais, à partir du milieu des années 70, un autre problème est venu changer les conditions locales : dans la vaste zone plate d'Hijr qui jouxte le site, de nombreux forages en profondeur,



Les puits recensés par Th. Arnoux. En rouge, ceux visités par P. Courbon. Le polygone rouge correspond à la clôture du site, large de 5 km en est-ouest.

avec pompe immergée, ont permis une exploitation agricole beaucoup plus importante et intensive du secteur. La nappe phréatique étant vraisemblablement fossile, il était intéressant de mesurer l'impact de cette nouvelle exploitation et d'étudier une évolution entre l'ère nabatéenne et l'époque actuelle.

GEOMORPHOLOGIE DU SITE

Le site de Hégra se situe dans la gouttière naturelle qui recueille tous les écoulements venant des nombreux wadis qui entaillent la chaîne de Harrat al-'Uwayrid au sud-ouest et tous ceux venant des pentes de Hadb el-Ahmar, au nord-est. Le site s'inscrit de ce fait dans un espace idéal sur le plan aquifère. Cela explique à la fois pourquoi les Nabatéens l'ont choisi et pourquoi, juste à côté de l'occupation nabatéenne, de nombreux forages permettent aujourd'hui de le mettre en valeur. Il faut ajouter que dans le Wadi Hijr, qui prolonge le site d'Hégra vers le sud, se succèdent, sur plus de 30 km, de belles palmeraies à l'origine de la création de la ville d'Al 'Ula.

La direction de cette gouttière correspond à la direction générale des reliefs et des accidents de la zone. Elle est parallèle à la crête de Harrat al-'Uwayrid et aux diverses directions des éléments qui composent la carte géologique, eux même parallèles à l'axe de la mer Rouge, dont l'ouverture a créé des contraintes tectoniques qui ont affecté toute la région.

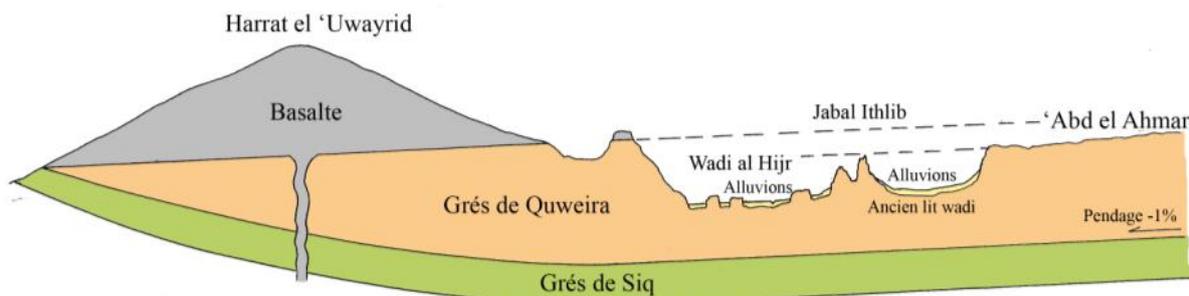
En amont de Madâ'in Sâlih, le bassin de réception aérien s'étend sur près de 70 km et a une surface d'environ 4 000 km², avec une pente moyenne de 1%. Le bassin de réception souterrain pourrait être plus étendu. L'examen des images satellites est révélateur.

Le Harrat al-'Uwayrid

De Madâ'in Sâlih, on ne peut qu'apercevoir la grande masse de ce massif qui culmine à 1720 m à la latitude du site et à 1830 m plus au nord. Comme son nom l'indique (du mot arabe Harr, chaud), le Harrat est recouvert par une vaste coulée de laves tertiaires dont la couleur noire tran-

Profils en travers du site, faisant apparaître la gouttière et la boutonnière d'al Hijr, creusée par le wadi et les alluvions qui s'y sont déposés.

COUPE GEOLOGIQUE AU SITE DE MEDAIN SALIH



Coupe de P. Courbon, à partir de la carte géologique 1/250.000

che avec le grès clair sous-jacent. Cette lave est peu épaisse sur le pourtour du massif mais elle est très épaisse au centre, où elle a été émise par des cônes volcaniques. Elle recouvre la couche de grès de Quweira, Ram et Umm Sahn, datée de l'ère primaire (cambrien et ordovicien) [8], dont les hauts escarpements bordent le site de Hégra. L'épaisseur de ce grès atteint 600 m ou plus, constituant une bonne réserve aquifère [5].

Une étude du massif de 'Uwayrid faite par le BRGM et publiée en 1977 [5], signale que ce secteur bénéficie d'une excellente perméabilité, porosité et capacité de stockage de l'eau. Les wadis qui entaillent la montagne vers Hégra sont vastes, encaissés et apparaissent comme des éléments majeurs de l'alimentation de la nappe qui descend vers al-'Ulâ après avoir traversé Madâ'in Sâlih. Une mesure de pendage du grès à l'intérieur de l'un de ces wadis a confirmé l'inflexion et la remontée de ce pendage pour former une gouttière.



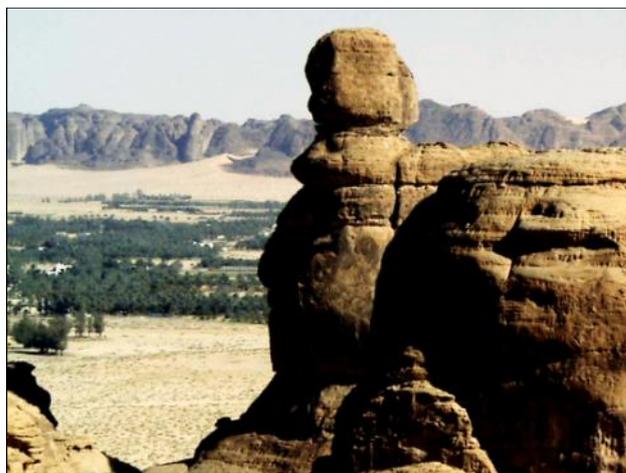
La bordure du Jabal al-'Uwayrid dominant Hégra. La coulée de basalte a préservé le grès de l'érosion qui l'a entamé ici d'une hauteur de 300m.

Le Hadb el-Ahmar

À l'opposé du Harrat al-'Uwayrid, les pentes douces (1%) qui remontent vers la route Taymâ-Hâil sont dénommées Hadb el-Ahmar. Elles sont constituées du grès de Quweira, Ram et Umm Sahn [8] et culminent à plus de 1 200 m d'altitude, à une cinquantaine de kilomètres au nord-est de Hégra. Au-delà de cette crête, toujours au nord-est, une vaste dépression recueille l'eau des wadis en cas de fortes pluies. Comme nous le verrons plus loin, la carte piézométrique de la nappe phréatique et la coupe représentant les forages en liaison avec cette nappe montrent la participation active du Hadb à l'alimentation de la nappe de Hégra.

Les sédiments quaternaires de Hégra

Du sable et des alluvions se sont déposés dans la gouttière constituée par les couches de grès. Ils forment une couche d'épaisseur variable, qui peut dépasser 10 m par endroits [8]. Quand ils sont suffisamment humidifiés par les crues, en maintenant de l'eau en contact avec le grès, ces alluvions permettent une meilleure absorption de l'eau par cette roche où le transit aquifère est plus lent. Des écoulements ou suintements peuvent se produire à la limite alluvions-grès pour se déverser dans les puits où ils sont absorbés jusqu'à équilibre avec le niveau de la nappe.



Au fond, les falaises de Hadb el-Ahmar. Devant la zone alluviale de l'ancien cours du Wadi al Hijr.

LE GRES

Les grès façonnent le paysage de Madâ'in Sâlih et ont conditionné le creusement des tombes monumentales de Hégra. Sur de grandes surfaces, le grès n'est pas une roche très homogène. On y trouve de très nombreux litages où la taille et la cimentation des grains de sable sont différents. Dans certaines zones, le grès est dur et compact tandis que dans d'autres, il est altéré et beaucoup plus friable. Ces différences sont visibles localement dans les tombes monumentales et dans les tombes creusées dans le sol. Certaines tombes au sol sont bien conservées alors que d'autres sont fortement attaquées par la désagrégation de la roche qui peut atteindre 50 à 60cm en 2.000 ans.

Après désagrégation, le grès se délite pour redonner le sable dont il est issu. Cette désagrégation, très inégale, a laissé subsister, en relief, des zones plus dures, comme le Jabal Ithlib, ou de multiples dents ou rognons rocheux tels que le Qasr el-Bint ou le Qasr el-Farid. L'examen du Jabal Ithlib sur des images satellites fait apparaître de nombreuses fractures ou fissures qui sillonnent la roche dans trois directions privilégiées, issues des contraintes tectoniques de l'ouverture de la mer Rouge. Ces fractures sont des lignes de faiblesse le long desquelles l'altération est plus forte.

Le Qsar el Farid, livre ouvert sur le désert, sculpté dans un rognon de grès témoignant du manque d'homogénéité de cette roche.



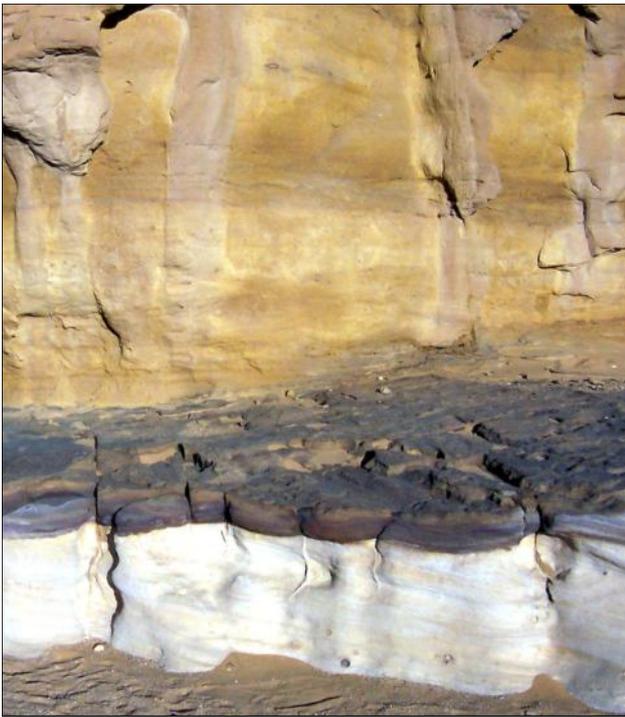


Image montrant l'hétérogénéité du grès dans le détail. Outre les différences de couleur, l'érosion a fait apparaître les différentes duretés des matériaux qui composent la roche.

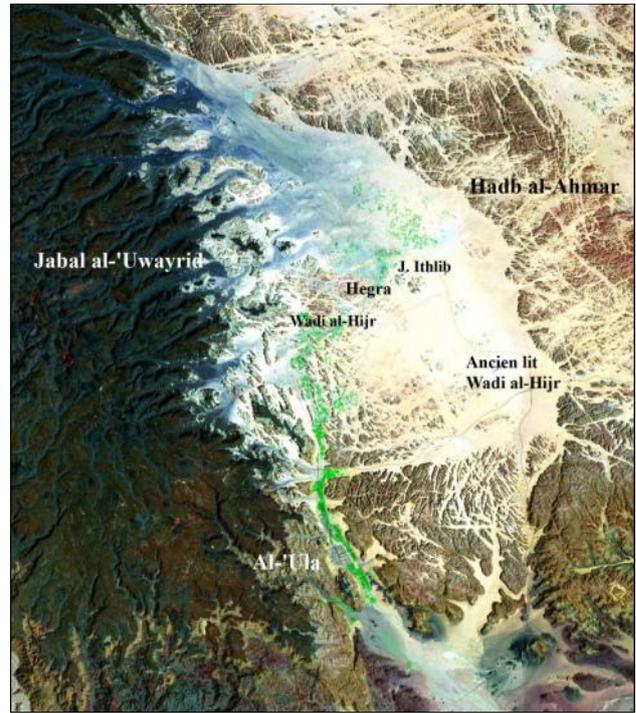
La boutonnière d'al-Hijr

Dans le Harrat lui-même, le grès, protégé depuis l'ère tertiaire par la couche de lave qui le recouvre, n'a subi aucune altération ni érosion. Là où le grès ne dispose pas de cette couverture protectrice, son niveau a pu s'abaisser de près de 300 m depuis le tertiaire (14 Ma).

Mais, si la couverture de lave du Harrat al-'Uwayrid explique la protection du grès et la formation d'abrupts en bordure du massif quand cette protection cesse, on comprend mal la formation d'autres falaises au nord-est du site, du côté de Hadb al-Ahmar en particulier. La plaine d'al-Hijr est entourée de toutes parts de falaises, sauf à l'arrivée et à la sortie du wadi qui la traverse. A première vue, on pourrait penser qu'elle soit un effondrement entre les deux reliefs. Mais, l'examen attentif du terrain et de la carte géologique exclut tout effondrement.

L'explication est venue de l'examen de l'image Landsat où les courbes de la falaise bordant le Hadb font penser aux circonvolutions d'un cours d'eau. On peut alors penser qu'il y a très longtemps, le Wadi al-Hijr se trouvait en bordure du Hadb où il s'est enfoncé en creusant de belles falaises. Cet ancien passage du wadi se continuait par l'est pour ressortir cinq ou six kilomètres au sud-est d'al-'Ula dans la vaste vallée en aval de la ville. Cela est confirmé par la présence des alluvions argilo-sableux sous Hadb al-Ahmar.

Plus tard, par suite d'une capture, le wadi a pris un itinéraire plus à l'ouest, au pied du Harrat al-'Uwayrid, laissant en témoin les Jabal Ithlib dont la hauteur avoisine celle des falaises du Hadb al-Ahmar. Cette boutonnière a son importance car elle conditionne et abrite toute la riche zone d'exploitation agricole d'al-Hijr.



L'image Landsat met en évidence la boutonnière d'al-Hijr. L'ancien tracé du wadi passait contre Hadb-al-Ahmar et ressortait au sud d'al-'Ula. Le tracé actuel est marqué par la coulée verte à gauche.

LES AQUIFERES

L'image du monde souterrain donnée par les spéléologues, avec ses vastes rivières, ses lacs, galeries ou fissures noyées, fausse notre idée sur les eaux souterraines et les aquifères en général. Cette image nous fait oublier qu'une grande partie des réserves d'eau souterraine est constituée par la porosité interstitielle de la roche encaissante qui seule peut expliquer, autour de la Méditerranée par exemple, l'alimentation de nombreuses sources en période de sécheresse prolongée [3].

La porosité du grès

Le grès est constitué de grains de sable siliceux qui, à une époque ancienne, se sont déposés au fond de la mer ou de lacs. Là, ils ont été cimentés, le plus souvent par du calcaire, pour former la roche que nous connaissons. Ce ciment calcaire a pu ne pas combler tout le vide entre les grains. De plus, suite à l'altération du grès, une partie de ce ciment interstitiel a pu disparaître, laissant un vide entre les grains de sable. La conséquence de ces vides est que le grès perd son imperméabilité. Il devient poreux et « perméable en petit » permettant alors à l'eau de le traverser et de s'y emmagasiner.

La porosité de la roche varie selon la grosseur des grains qui constituent le grès. Plus les grains sont gros, plus il y a d'espace entre eux pour emmagasiner de l'eau. Plus les grains sont petits, plus la porosité et la perméabilité sont faibles. On estime qu'en dessous de 1/100 mm de diamètre, les grains ne permettent plus de porosité et la roche devient imperméable [3].

Les bons aquifères gréseux ont une porosité totale qui peut atteindre 25 à 30 %. Leur porosité utile, qui conditionne le taux de prélèvement possible, est de l'ordre de 2 % à 3 % du volume de la

roche [3]. Cela peut paraître faible mais c'est suffisant pour autoriser une importante exploitation, à condition de disposer d'une épaisseur de roche de plusieurs centaines de mètres s'étalant sur de grandes surfaces.

Il faut rappeler que cette porosité ne permet qu'un lent mouvement des eaux à l'intérieur de la masse rocheuse. Dans les forages artésiens de Paris, certaines eaux, venant du pourtour du Bassin parisien à plusieurs centaines de kilomètres des forages, sont des eaux fossiles vieilles de 8 000 ans. Dans les forages d'al-Hijr, après arrêt de la pompe, il est nécessaire d'attendre plusieurs heures, le plus souvent une longue nuit, pour que l'eau retrouve son niveau. .

Les puits et forages dans le grès

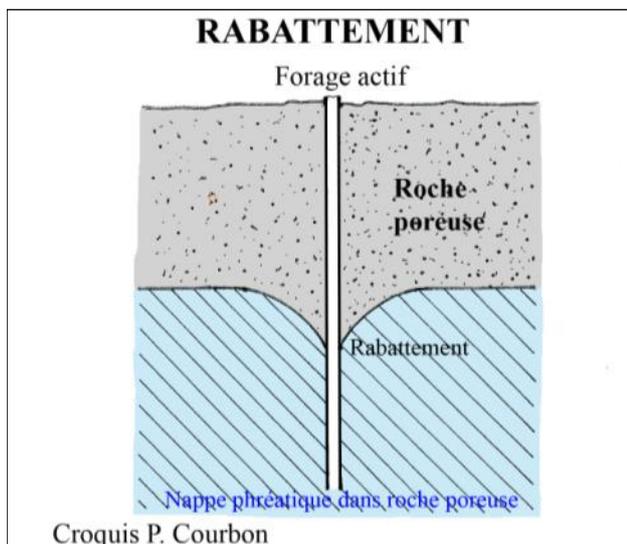
Dans le cas de nappes libres, comme celle de Madâ'in Sâlih, lors du creusement d'un puits, l'eau commence à apparaître quand on atteint la partie supérieure de la nappe phréatique. Cependant, juste à la surface de la zone noyée, l'eau n'est pas sous pression et sourd très lentement sur les parois. Lors du creusement, on comprend qu'il était difficile de descendre très bas en dessous de la limite supérieure de l'eau.

L'accroissement de l'arrivée d'eau et de la réserve constituée au fond du puits s'obtenait par l'augmentation de la surface du fond du puits. A Bir en-Nabati, le diamètre de 7 m du fond du puits permet en outre d'avoir une réserve d'eau trois fois plus importante avant puisage ou pompage.

Dans les forages modernes, le problème est différent car les pompes immergées permettent de descendre bien en dessous du niveau supérieur de la nappe phréatique (100 à 150 m à el Hijr) et ainsi d'atteindre des zones où la forte pression et, éventuellement, une porosité plus grande du grès permettent d'obtenir un débit beaucoup plus important.

Le rabattement, c'est-à-dire la baisse du niveau de la nappe phréatique après pompage, définit la qualité d'un aquifère [3]. En effet, lorsque l'eau est pompée en abondance, il arrive un moment où la vitesse d'écoulement de l'eau dans l'a-

Le rabattement ou dépression de la nappe phréatique due au pompage se résorbe après un arrêt suffisant.



quifère devient insuffisante et elle n'arrive plus en surface. Il est alors nécessaire d'arrêter de pomper sur une durée qui varie selon la qualité de l'aquifère, de manière à permettre à l'eau souterraine de retrouver son niveau.

PLUVIOMETRIE

A l'époque moderne

Une étude du BRGM, publiée en 1977 [5], mentionne la moyenne des pluies de 1968 à 1973. Cette moyenne s'établit à 46 mm par an pour al-'Ulâ, avec deux extrêmes à 100 et à 2 mm ! Considérant l'irrégularité des pluies en région désertique, une moyenne sur 30 ans aurait sans doute été plus significative. On peut cependant supposer que les sommets montagneux de Harrat al-'Uwayrid doivent recueillir une quantité d'eau supérieure.

Au cours de la campagne 2005, nous avons pu consulter les relevés pluviométriques établis par le Ministère de l'Agriculture saoudien entre 1998 et 2004. Ces enregistrements font état de pluies encore moins abondantes, avec une moyenne de 29 mm par an sur 8 ans. L'année la plus pluvieuse accuse 53 mm et la moins pluvieuse 18 mm. De nombreuses pluies sont inférieures à 7 mm, ce qui signifie qu'elles humidifient seulement la surface du sol et qu'elles n'y pénètrent pas profondément. Sur cette période, seulement quatre épisodes pluvieux avoisinent ou dépassent 20 mm. Les dernières grosses pluies à avoir mis en crue le wadi traversant Madâ'in Sâlih remontent à 1985 et 2008. Cette rareté des crues expliquerait le faible alluvionnement (1 m) constaté par J.B. Rigot sur 2 000 ans.



En 2008 est tombée la plus forte pluie depuis vingt ans. Le résultat est irréel!

A l'époque nabatéenne, étude des paléoclimats

Le paléoclimat du Proche-Orient méditerranéen a été déterminé à partir de fines lamelles de stalactites et de stalagmites prélevées en 1996 dans la Grotte de Soreq [1], située à 700 km environ au nord-ouest d'al-'Ulâ. Ces lamelles de concrétions calcaires (stalactites), coupées perpendiculairement à la longueur, montrent les différents cernes de calcite qui se sont déposés au cours des années et en ont accru le diamètre. Ces cernes sont des témoins privilégiés de l'évolution de l'environnement au cours du temps et en particulier du climat. On les appelle spéléothèmes.

Leur étude montre qu'entre 7 000 et 1 000 ans avant le présent (B.P.), les conditions climatiques étaient peu différentes de ce qu'elles sont au-

aujourd'hui. Il y a eu seulement deux petits pics d'humidité entre 6 000 et 5 000 ans et il y a 3 000 ans. Il semblerait donc que le climat au temps des Nabatéens ait été assez semblable à ce qu'il est aujourd'hui. D'autres études, réalisées en Syrie sur des pollens et limons organiques font état à l'époque romaine d'une légère augmentation de la pluviosité qui aurait rechargé les nappes phréatiques les plus superficielles.

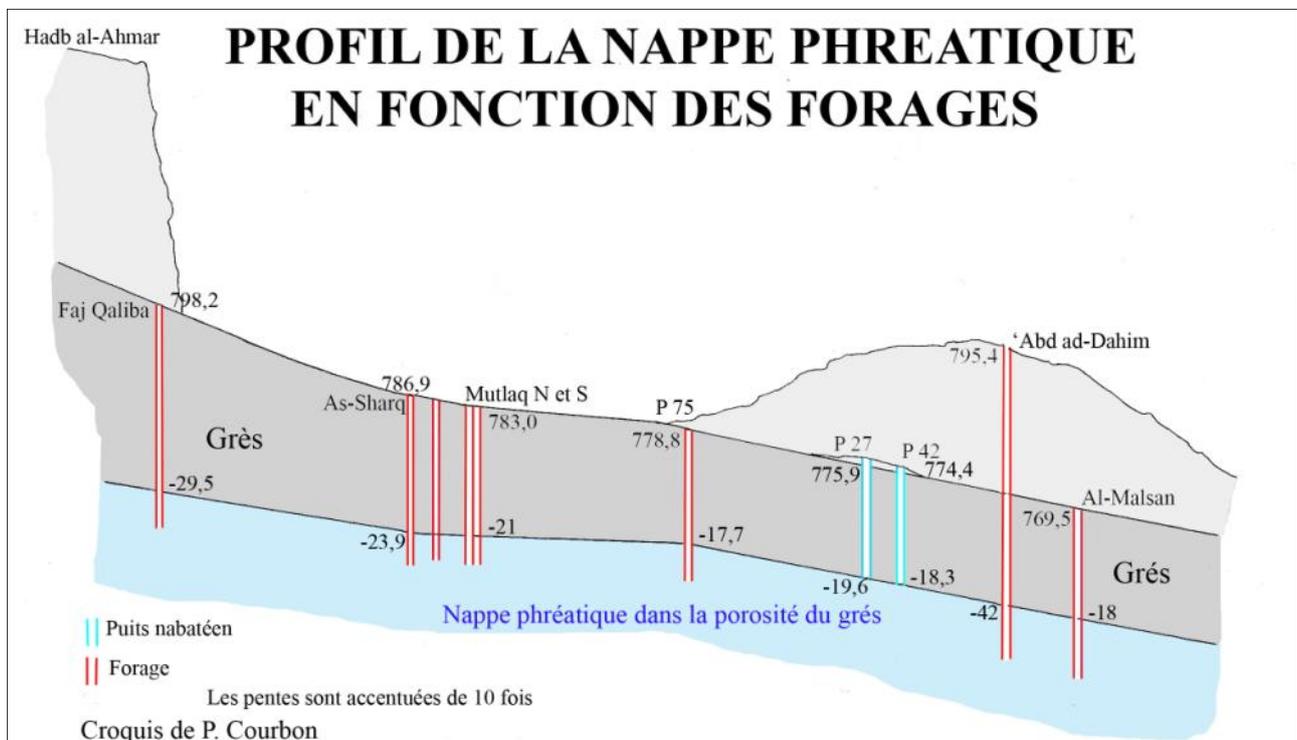
Absorption de l'eau de pluie

Dans le désert, les pluies sont généralement violentes et de courte durée, ce sont rarement des pluies fines qui tombent durant des journées entières et qui, de ce fait, peuvent pénétrer profondément le sol. Ces pluies sont caractérisées par un fort ruissellement qui met les wadis en crue, lesquels vont se perdre dans des cuvettes ou vastes zones plates. De ce fait, en dehors des wadis et de leur zone d'épandage, l'absorption est plus faible. Quant à l'évapotranspiration, elle est bien plus forte que dans les latitudes tempérées. Sans mesures précises, il est difficile de déterminer la quantité

d'eau qui alimente la nappe phréatique : 20 % ou moins ? A Madâ'in Sâlih cela ne représenterait que 1 cm par an, pouvant être annulé par les remontées capillaires. De ce fait, la nappe phréatique de Madâ'in Sâlih est une nappe fossile, quasiment non régénérée. Pour les chercheurs du BRGM Les eaux des grès du Saq dateraient de 15000 ans. Il s'agit bien d'une eau fossile dans le sens où c'est une eau infiltrée dans des conditions climatiques humides fort différentes de celles qui prévalent aujourd'hui et c'est une eau qui ne se renouvelle pas.

ETUDE DE LA NAPPE PHREATIQUE

Au fond de tous les puits explorés, s'était accumulé du sable amené par les vents. Impossible de voir s'il y avait encore de l'eau. La mission avait l'acquisition d'une tarière à main pour descendre dans cette couche de sable jusqu'au lit de grès. Pour savoir quel puits choisir, il fallait déterminer l'altitude des puits et de leur fond sableux, puis tracer des courbes piézométriques grâce aux mesures faites dans les forages alentour.



Grâce au profil de la nappe phréatique que nous avons déduit de l'altitude et la profondeur des forages, nous avons su que nous retrouverions de l'eau dans les puits n° 27 et 42.

Les forages et les courbes piézométriques (isopièzes)

En novembre 2005, nous avons recherché des forages encadrant bien le site et situés sur une zone assez vaste. Nous en avons retrouvé cinq qui n'étaient pas encore en service, ce qui nous a permis d'y mesurer facilement le niveau de l'eau. A ces cinq forages s'en sont ajoutés trois en activité : deux dont les propriétaires ont accepté d'interrompre le pompage 14 heures avant la prise de mesure et un troisième qui ne travaillait pas le jour de notre passage. Le plus intéressant des forages non en service se trouve au milieu du site, c'est un forage expérimental. Notre soin a été de déterminer la profondeur et l'altitude de tous ces forages.

Du nord au sud, ces forages s'étendent sur 14,5 kilomètres. Dans deux d'entre eux, l'eau se trouvait à 18 m de profondeur mètres alors que dans le plus profond, elle était à 42 m. L'ensemble des mesures nous a permis de dresser le profil de la nappe phréatique en novembre 2005.

La mesure de l'altitude de ces huit forages nous a permis de dresser une carte des isopièzes ou courbes piézométriques. Parallèlement à ces mesures, nous avons déterminé l'altitude et mesuré la profondeur de différents puits nabatéens. Cela nous a permis de choisir les plus intéressants pour effectuer un carottage dans le sable qui s'y était accumulé, en vue de rechercher la présence d'eau.

Evolution du niveau de la nappe

L'un des forages mesurés, a été fait il y a 30 ans, c'est-à-dire au moment de l'expulsion des exploitants agricoles du site de Hégra. Son propriétaire, M. Mutlaq al-Mutlaq, digne de foi, nous a affirmé qu'au moment de son creusement, l'eau était apparue vers 17 m de profondeur, au lieu de 21 m aujourd'hui. Ce qui signifierait qu'en 30 ans, le niveau de la nappe a baissé d'environ quatre mètres. Comme nous le verrons plus loin, ce chiffre est cohérent avec les observations que nous avons faites dans les puits nabatéens de Hégra.

Cette baisse n'est pas étonnante quand on voit les orangers, palmiers, champs de luzerne et autres cultures, d'un vert irréel, alimentés en permanence par d'abondants arrosages, qui s'étendent sur plusieurs centaines d'hectares. L'évolution des techniques de pompage a permis ce mirage qui aura une fin avec l'épuisement des nappes fossiles, peut-être avant l'épuisement des gisements de pétrole de l'Arabie.

Le pompage par pompes aspirantes

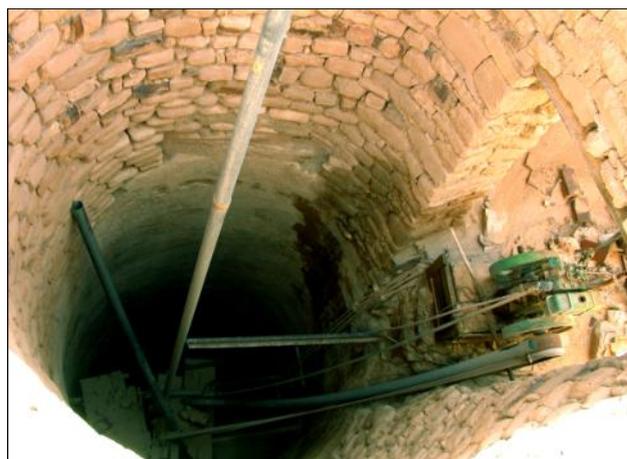
Dans la mesure où la pression de l'air est de 1kg/cm^2 au niveau de la mer, on peut théoriquement, à cette altitude, aspirer jusqu'à une profondeur de 10 m. Cependant, si on tient compte des pertes dues aux défauts d'étanchéité des pompes et de la nécessité d'avoir un minimum de débit, à 800 mètres d'altitude, on ne peut guère dépasser 7 mètres avec une pompe aspirante.

À l'intérieur de tous les puits nabatéens qui ont été remis en service, à partir des années 1950, en vue d'une exploitation par ce type de pompe, on remarque la présence des rails de chemin de fer qui supportaient une pompe aspirante, dont de nombreux exemplaires sont encore en place. Or, ces rails sont logiquement scellés dans la paroi entre 5 à 7 mètres au-dessus de ce qui devait être le niveau

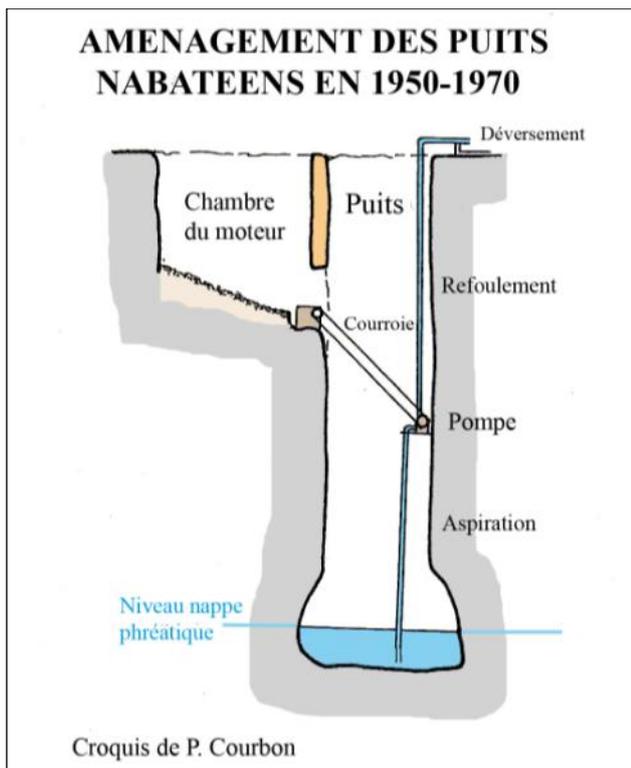
de l'eau. Quelques mètres plus haut encore, une ouverture pratiquée dans la maçonnerie des puits permettait d'accéder à une salle des machines, dans laquelle un moteur fonctionnant au carburant était relié aux pompes par une longue courroie. Le volume d'eau puisé par ces pompes était limité parce qu'elles aspiraient l'eau à la surface de la nappe qui, faute de pression, ne se renouvelait que lentement. On constate d'ailleurs que les bassins qu'elles remplissaient étaient de dimensions modestes, atteignant rarement 1 m^3 , alors que de nombreux bassins actuels, alimentés par les forages, dépassent 10 m^3 .



On voit les rails qui soutenaient la pompe. A gauche, la tranchée creusée pour les courroies liant la pompe au moteur. (Photo I. Sachet)
En bas, un moteur encore en place, avec la courroie descendant vers la pompe (Photo Th. Arnoux).



Lors de nos mesures, il nous a donc paru intéressant de déterminer l'altitude de ces pompes pour voir à quelle distance elles se trouvaient par rapport au niveau de la nappe phréatique de novembre 2005. Les mesures, effectuées sur 13 pompes, donnent une moyenne de 10 m, ce qui confirmerait la baisse de 4 mètres de la nappe constatée dans le forage M. al-Mutlaq. Nous avons exclu du calcul de la moyenne, la pompe du puits 21, qui présente une anomalie puisqu'elle se trouverait à





Associé à la pompe aspirante, un bassin-réserve de quelques centaines de litres (Ph.Th. Arnoux).

13 m au dessus de la nappe. Cela est d'autant plus étonnant que ce puits se trouve à 90 m seulement du puits n°20, dans lequel la pompe n'est qu'à 9 m au-dessus de la nappe. Il est dommage que la descente du puits 21 se soit révélée trop dangereuse pour être tentée et étudier cette anomalie. Nous avons constaté une discordance moins grave entre les puits 26 et 27.



Le puits 21 était le mieux placé au point de vue altitude et profondeur. Mais, c'était le plus dangereux et le courage nous a manqué pour y descendre!

Les pompes immergées

Les pompes modernes, alimentées par un câble électrique, sont profondément immergées. Bien que l'eau se trouve à 20 ou 25 mètres de profondeur, les forages descendent souvent à plus de 150 m, ce qui permet un débit plus important. A certains endroits, les pompes fonctionnent pendant quatre heures et s'arrêtent pendant quatre heures pour permettre à la nappe de se recharger. A d'autres endroits, les pompes travaillent toute la journée, ne s'arrêtant que la nuit. Les premiers forages furent faits à titre expérimental en 1967 et ils se généralisèrent à partir du milieu des années 1970. Celui de M. al-Mutlaq, qui a servi dans nos mesures, date de 1975.

ETUDE DES PUIITS

Notre question fut : *tous les puits de Hégra sont-ils antiques et quelle a été leur utilisation au cours des âges ?* Il est certain que tous les puits ne sont pas nabatéens, depuis 2000 ans d'autres puits ont pu être creusés en fonction des fluctuations de



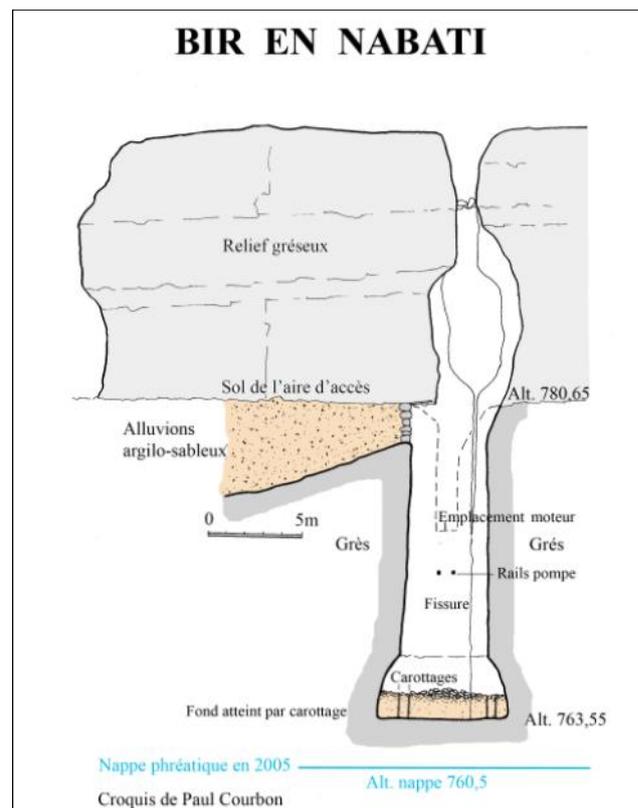
Les pompes immergées ont permis l'exploitation intensive de nouvelles terres qui jouxtent Hégra.

l'occupation humaine. Certains puits sont plus petits et leur maçonnerie diffère de celle des grands puits que nous avons descendus. De nombreux puits, abandonnés à une certaine période ont été réutilisés, comme le montrent les pierres de réemploi de leur maçonnerie.

Après avoir déterminé la carte des isopièzes de la nappe phréatique, une vingtaine de puits, qui semblaient favorables à la vérification des hypothèses hydrogéologiques, ont été sélectionnés. Comme vu précédemment, leur altitude ainsi que la profondeur des rails supportant les anciennes pompes aspirantes, nécessaire pour estimer le niveau de l'eau dans les puits en 1975, ont été déterminés. Sept d'entre eux ont ensuite été explorés et quatre ont fait l'objet de carottages. Voyons, ci-après, ces quatre derniers.

Bîr an-Nabati

Compte tenu de l'altitude de ce puits et du niveau de la nappe phréatique, nous savions que nous n'atteindrions pas l'eau avec un carottage par tarière à main. Ce puits est le plus spectaculaire et le seul dont l'accès soit aménagé pour que les touristes puissent le regarder. En faisant un carottage



dans le sable tombé au fond, il était intéressant de connaître la profondeur réelle du puits, jusqu'à son fond rocheux.

Six carottages ont donc été réalisés, les 23 et 24 novembre, en des points différents du puits pour s'assurer de sa profondeur constante. Ils se sont échelonnés entre 1,10 et 1,20 m. Il faut souligner que dans ces carottages, les 10 centimètres précédant le roc contenaient tous une argile collante et humide. Il s'agissait donc bien du fond du puits où un dépôt d'argile s'est formé pendant l'exploitation. Le fond rocheux atteint par la tarière se trouve à 763,7 m d'altitude. Nous étions donc 2,5 m au dessus de la nappe phréatique 2005. L'humidité de l'argile au fond du puits vient peut-être des pluies, mais aussi d'une remontée de l'humidité par capillarité.



Au fond des puits, le changement de couleur de la roche peut indiquer l'ancien remplissage de l'eau.

En bas, carottage à la tarière à main, avec un godet de 80mm de diamètre.



Il faut ajouter que la couleur de la paroi change 0,6 m au dessus du fond sableux actuel, ce qui ajouté au 1,2 m de notre carottage, indique vraisemblablement une zone noyée sur une hauteur de 1,8 m quand le puits était exploité. Hauteur nécessaire pour constituer une bonne réserve d'eau (env. 70 m³) et permettre un bon pompage. Le total de 2,5+1,8 nous donnait une différence de 4,3 m par rapport à la nappe phréatique en 2005, cohérente avec la baisse du puits Mutlaq.

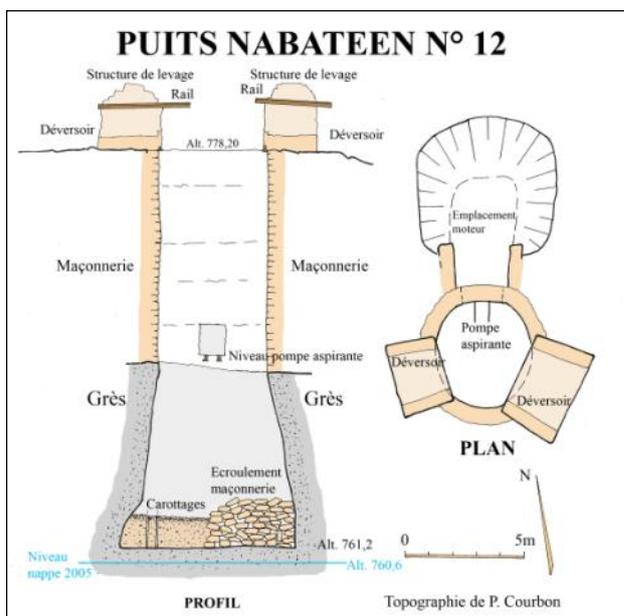
Puits 12

Les raisons qui ont motivé le choix de ce puits sont les suivantes : il est aussi profond que le Bir an-Naba'î et il est 2,5 m plus bas en altitude. Cela nous donnait donc une chance d'atteindre ou de frôler la nappe phréatique.

On observe tout d'abord que les 4,3 m supérieurs de la maçonnerie ont été rebâties à l'époque moderne, sans doute à la suite d'un éboulement. Plutôt que de remonter tous les blocs tombés au fond du puits, les nouveaux exploitants les ont vraisemblablement entassés sur une moitié de puits, laissant libre l'autre moitié, où arrive d'ailleurs la tuyauterie de pompage.

Au fond du puits, il nous était impossible d'effectuer un carottage dans la partie encombrée de blocs. Les deux carottages réalisés dans la moitié libre du puits sont marqués par une forte présence d'argile (vraisemblablement la terre venue de l'éroulement de la salle des machines latérale). Ils ont par ailleurs atteint le socle rocheux au bout de 1,30 et 1,27 m. Les vingt centimètres précédant le socle ont donné une argile très humide et crémeuse (beaucoup plus humide que celle de Bir an-Nabati). La comparaison d'humidité avec les puits 27 et 42 (voir plus loin) montre que la nappe phréatique 2005 était très proche, ce qui était confirmé par l'altitude du fond du puits (761m).

L'absence d'évasement sur une moitié du fond du puits montre son inachèvement. Sur l'autre moitié, cet évasement ne débute qu'à une cinquantaine de centimètres du sol terreux, soit à environ 1,80 m du fond rocheux. Cela est largement moins haut que dans d'autres puits, puisqu'on relève un





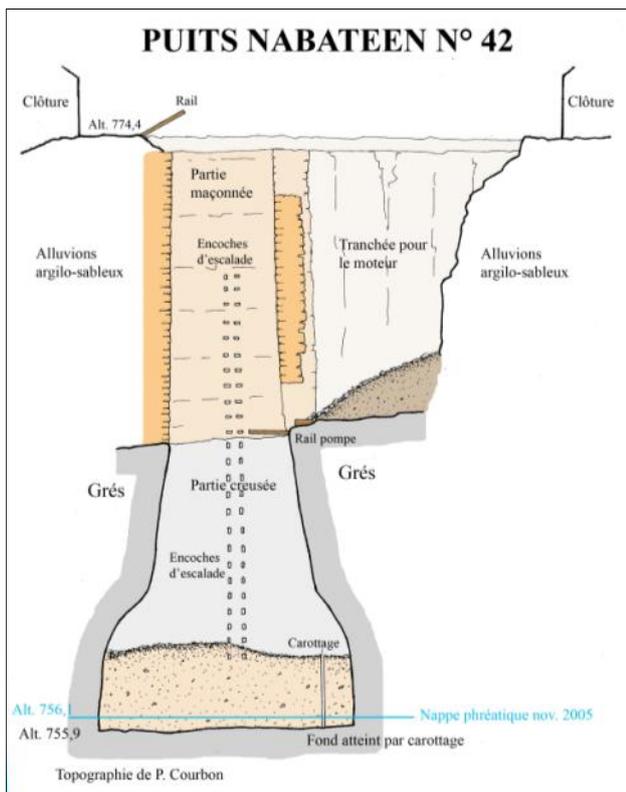
Le puits 12 avec ses deux structures de levage à droite et à gauche. Devant le creux de la salle du moteur. (Photo Laila Nehme)

évasement à 3,50 m au-dessus fond rocheux, dans le Bîr an-Nabaîf et dans le puits 42.

Puits 42

Ce puits a été choisi en raison de l'altitude de sa margelle (774,4m) et de sa profondeur (16,2 m). Le carottage à partir du fond ensablé (alt. 758,2m) a révélé à faible profondeur un sable légèrement humide, sans doute en raison des remontées capillaires. A 2 m de profondeur, l'humidité était très importante, et à 2,10 m c'était de la terre mélangée à de l'eau. A 2,3 m, le socle rocheux était atteint et le godet de la tarière, bouché à son fond par la glaise, était plein d'eau. La nappe phréatique se trouvait donc à 756,2m d'altitude, ce qui confirmait et complétait la pente du niveau de cette nappe, fournie par les mesures prises dans les forages.

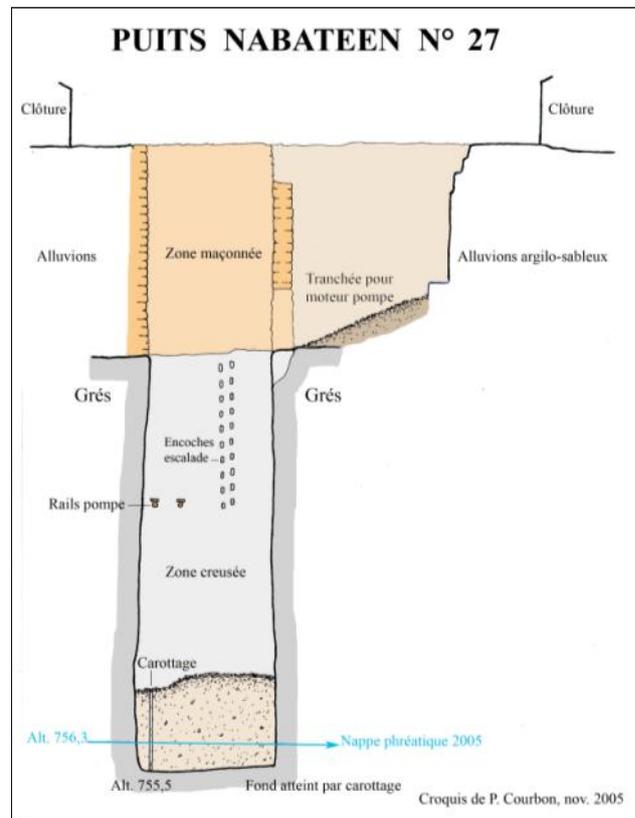
Les encoches d'escalade franchissent le surplomb de l'évasement et arrivent au sol actuel.



Un sondage à la pelle montre que la dernière encoche était à 0,68 m plus bas, soit 1,6 m avant le fond rocheux. À 0,7 m au dessus du sol sableux, la couleur de la paroi devient beaucoup plus claire, comme si elle avait été lavée. Cette différence traduit-elle le niveau de l'eau il y a quarante ans ? Si oui, il y aurait pu y avoir 3 m d'eau ce qui paraît beaucoup pour le creusement. Mais ne nous donne qu'une baisse de 3m de la nappe, au lieu de 4. Nous verrons au puits 27 ce qu'on peut en penser.

Puits 27

Avec une profondeur de 17,80 m, c'est le puits le plus profond du site. Cette profondeur, combinée avec son altitude, nous donnait de grandes chances d'y trouver de l'eau. Le carottage fut effectivement positif, l'eau se trouvant à 756,35 m d'altitude. Cette altitude est cohérente par rapport à celle du puits 42, situé un peu plus de 400 m en aval. La surprise est plutôt venue de l'épaisseur de l'eau avant le fond rocheux : 80 cm ! Après curage, le puits aurait pu être remis en service.



Ces résultats soulèvent une question: vu la baisse de niveau de la nappe phréatique et les traces sur la paroi, la profondeur de l'eau devait donc être proche de 4 m à l'époque nabatéenne, donnant une réserve de 50 m³. Cela prouverait que les nabatéens (comme les Mauritaniens à l'époque moderne) arrivaient à pomper l'eau assez rapidement pendant que les puisatiers creusaient au fond!

On constate, comme au puits 42, que la nappe n'aurait baissé ici que de 3m, au lieu de quatre mètres dans les zones plates situées plus en amont. On pourrait envisager que cette différence, soit dû à la rupture de pente de la nappe constaté sur le profil piézométrique.

Autres constatations : il n'y a pas d'évasement à la base du puits et les encoches d'escalade

s'arrêtent à 7 mètres du fond ! N'y a-t-il pas d'éva-
sement parce que les Nabatéens ont réussi à creuser
plus bas qu'ailleurs sous le niveau de la nappe ou
parce que ce puits n'est pas terminé ?

UTILISATION DES PUIITS

Dans le désert, les points d'eau ne sont ja-
mais complètement abandonnés, ils servent au
moins aux pasteurs nomades. Dans l'œuvre monu-
mentale de Jausen et Savignac [9], les puits sont
traités très sommairement. Voici ce que l'on trouve
dans le tome I, page 305 : « ... il existe de vieux
puits qui méritent une mention spéciale. Autrefois,
ils devaient être nombreux à cause des plantations
de palmiers qui formaient une véritable forêt au
milieu de la plaine. Aujourd'hui encore, outre celui
du qala'ah, on en compte six avec de l'eau ; plu-
sieurs autres sont reconnaissables et pourraient
facilement être remis en état[...]. Il est impossible
que tous les anciens puits aient disparu, à aucune
époque même très courte, car Medain Salih est un
point d'eau très important dans le désert. Tous ne
peuvent pas non plus avoir été remplacés successi-
vement, car on a toujours meilleur compte à entre-
tenir les anciens qu'à en créer de nouveaux.
La plupart des puits actuellement existant ont subi
des réparations [...]»

**Quand il est source de vie, on n'abandonne jamais un
puits dans le désert!**



Enfin, dans le même volume (p. 133), Jaus-
sen et Savignac attribuent les ruines de bâtiments
en brique crue, repérées entre la voie ferrée et le
Jebel al-Mahjar, à des habitants de Taymâ qui au-
raient tenté de remettre en valeur la plaine au mi-
lieu du XIX^e siècle, faisant ainsi écho aux remar-
ques de Doughty [7] sur cette tentative d'exploita-
tion (*Travels in Arabia Deserta*).

Nous rappelons qu'à l'époque moderne,
dans les années 1950-70, lors de la mise en exploi-
tation des puits nabatéens avec pompes aspirantes,
les anciens habitants questionnés affirment qu'ils
furent curés mais pas approfondis. Les pompes
permirent une exploitation plus intensive des
puits, accroissant les zones d'arrosage. L'exa-
men des photos IGN de 1978 montre que les
haies de tamaris, abondantes et bien fournies,
avaient plus de vingt ans à l'époque où ont été
pris les clichés, donc qu'elles dataient au
moins des années 1950.



Cette photographie IGN de 1978, montre la structure
radiale des cultures autour d'un puits. La margelle
du puits est surélevée par rapport au terrain. L'am-
pleur des haies montrent un arrosage ancien.



Les stries de corde sur des pierres situées plus bas
que la margelle indiquent un réemploi au cours de la
restauration du puits à l'époque moderne.

Les structures de levage et l'utilisation de rails

Douze puits (n° 7, 8, 12, 51, 52, 53, 55, 58,
59, 93, 110, 120) présentent en surface des installa-
tions de levage en pierres jointes par du mortier de
terre [10]. Ce type d'installation est caractéristique
du paysage par des chameaux. L'utilisation des rails
de chemin de fer dans ces structures est lié à l'a-
bandon de la voie ferrée du Hijaz, joignant Damas
à la Mecque. Il faut rappeler que la voie ferrée du
Hijaz a eu une vie très courte. Le sultan ottoman
'Adb al Hamid décida de sa construction en 1900.
Les travaux, dirigés par l'ingénieur allemand
Meissner Pacha se terminèrent en septembre 1908,
date de l'ouverture de la ligne. Durant la première
guerre mondiale, la Turquie, alliée de l'Allemagne,
dut faire face à la révolte arabe et aux actions de

Utilisation de rails, pour supporter une poulie.



Laurence d'Arabie. Entre 1916 et 1918, la voie subit de nombreux dommages. Dès la fin de la guerre, la Turquie perdit le contrôle de la région et l'exploitation de la voie fut définitivement abandonnée vers 1924. Les rails ont donc pu être utilisés dans les structures de levage dès 1924 et certains puits ont été exploités à l'aide de chameaux jusqu'à l'apparition des pompes aspirantes.

Dans les structures de levage, la longueur de la poutre ou du rail qui soutenait les poulies dépasse souvent 2,50 m. Avec une telle largeur entre les murs supportant la structure, deux ou trois chameaux pouvaient travailler simultanément à tirer les outres pleines d'eau. Dans le puits 12, les deux structures visibles ne sont placées que sur deux tiers de la margelle. On peut donc supposer qu'il en existait une sur le troisième tiers et qui a disparu lors du creusement de la salle latérale des moteurs.

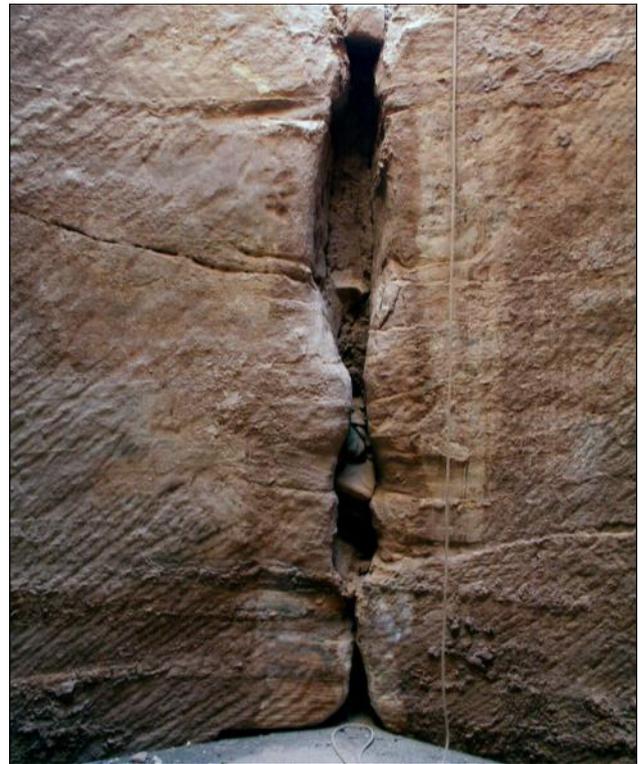
Au moment de l'arrivée des pompes aspirantes, les rails ont aussi servi à créer, à 6 ou 7 mètres du fond, un pont sur lequel étaient fixées ces pompes. Elles ont été abandonnées sur place lors de l'expulsion des exploitants agricoles, peu avant 1978.

Rails utilisés pour fixer les pompes aspirantes, 6 ou 7 m au dessus de l'eau (Photo Kh. El Haïti).



L'hypothèse des puits-citernes

Le diamètre important des puits et leur évasement dans le fond ont fait émettre l'hypothèse de « puits-citernes » [10]. Cette hypothèse ne peut être retenue pour une raison très simple : le grès étant une roche poreuse, elle permet non seulement la formation de réserves d'eau souterraine mais aussi, sa circulation. Bien que cette circulation soit lente, l'eau de pluie récupérée dans ces « puits-citerne » aurait vite fait de rejoindre le niveau de la nappe phréatique, vidant en une semaine ou deux la réserve constituée. De plus, pour qui a vu les wadis en crue lors d'orages, la collecte des eaux de pluies aurait provoqué un apport de détritiques et de boue nuisible à l'entretien du puits. D'ailleurs, bien que de nombreux puits voisinent les wadis, ils ne se trouvent pas au point bas de passage des eaux. La margelle de plusieurs d'entre eux est surélevée pour permettre l'irrigation par gravité des terrains avoisinants (n° 5 et 12 entre autres).



Cet exemple de fissure grossièrement colmatée pour empêcher les arrivées de terre, exclue toute étanchéité et la fonction « puits-citerne »

Force est également de constater que les parois des vraies citernes, comme celle qui se trouve dans le Jabal Ithlib [6], ou celles de Petra, sont toujours recouvertes d'un enduit destiné à les rendre étanches. Or les puits ne présentent aucune trace d'un tel enduit. Dans plusieurs puits, les fissures dans la roche excluent toute étanchéité. Le seul ouvrage hydraulique de Madâ'in Sâlih qui puisse être considéré comme une citerne est la citerne du Jabal Ithlib, alimentée par un vaste système de canaux chargés de collecter l'eau de ruissellement s'écoulant le long des flancs rocheux du ravin.

Dans ce contexte, l'évasement constaté au fond des puits n'a d'autre but que d'accroître la surface de contact avec la nappe, ce qui permet à l'eau d'arriver plus rapidement et de constituer une réserve plus importante avant les pompages, comme cela a été dit précédemment.

Le second argument qui avait été invoqué en faveur de la thèse des puits citernes concerne le diamètre des puits (4 m en moyenne), qui aurait permis d'emmagasiner beaucoup d'eau. Il est plus raisonnable de penser que ce diamètre permettait de faire travailler simultanément, plusieurs chameaux, imitant en plus petit le système mis en place au Bîr Haddaj de Tayma. Au puits 12 deux structures de 2,60 m et 1,75m de large font penser que cinq chameaux pouvaient y travailler en même temps.

La construction des puits

Il est vraisemblable que la technique utilisée dans la partie rocheuse des puits est la même que celle qui a été mise en œuvre dans les tombes et dans les carrières, décrite par le spécialiste J.-Cl. Bessac [2]. Il y avait creusement de tranchées d'extraction et détachement des blocs limité par ces tranchées à l'aide de coins. Les traces de pic visi-



Creusement par tranchées d'extraction à Ksar el Farid.

bles dans les parois sont les mêmes que celles que l'on retrouve dans les tombes monumentales. Il faut préciser que les premiers fers acérés étaient apparus plusieurs siècles auparavant.

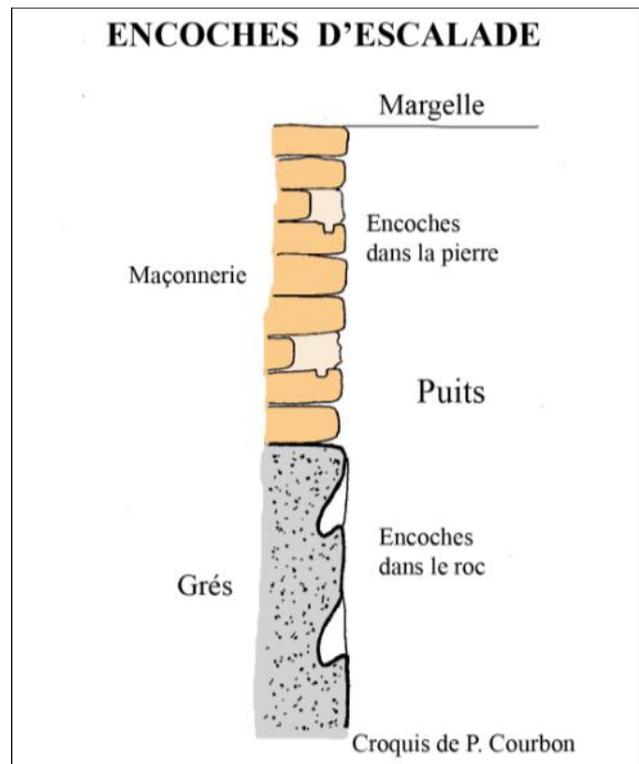
Reste le problème de la continuation du creusement lorsque le niveau de l'eau est atteint, comme nous l'avons vu au puits 27. Henri Paloc avait dressé en 1960 la carte hydrogéologique du Trarza (Mauritanie du sud), dans le cadre du BRGM. Il rapporte que les puisatiers pouvaient creuser le grès bien en dessous du niveau de l'eau en la faisant puiser rapidement par des chameaux au cours de leur travail.

Pour la partie supérieure creusée dans les alluvions et chemisée ensuite de blocs de grès, le problème est différent car le danger vient du risque d'effondrement de la masse de terre qui entoure le creusement. L'observation des salles latérales des moteurs, dont certaines ont été creusées il y a plus de quarante ans, montre qu'en réalité, les risques d'effondrement sont minimes. Dans le puits 27, par exemple, la salle descend à près de 7 m de profondeur et ses parois terreuses, bien que ravinées par endroits, sont restées parfaitement verticales. On pourrait multiplier les exemples. Le chemisage à l'aide de blocs intervenait bien évidemment avant de commencer le creusement du grès, en dessous.

Les systèmes d'accès au fonds

Des encoches, ont été signalées dans les parois des puits par J.B. Rigot, Th. Gonon et Th.

Encoches d'escalades dans le P. 27. Elles ont été creusées dans le roc et aménagées dans la maçonnerie.



Arnoux qui les décrivent ainsi : « *presque tous les puits mixtes présentent dans leur partie rupestre deux séries d'encoches destinées à faciliter l'accès au fond. Ces encoches, très répandues dans le domaine nabatéen, sont tout à fait semblables à celles que l'on retrouve à Petra en bordure des fonds de carrières et des façades de certaines tombes monumentales, ainsi que dans les tombes dites à puits. Elles permettaient, tout simplement, de faciliter la descente et la remontée des puits* » [10]. Il faut ajouter que ces encoches se retrouvent aussi dans les parties maçonnées, comme je l'ai vu au puits 42, où des espaces sont aménagés entre les pierres avec le creusement d'une prise dans la pierre inférieure.

Dans certains puits, le n°42 par exemple, les encoches vont presque jusqu'au fond, elles franchissent le surplomb de l'évasement. Dans d'autres puits, les encoches s'arrêtent au niveau du surplomb de l'évasement. Dans le puits 9, le fond du puits se trouve est 3,4 m plus bas que la dernière encoche. Les puisatiers avaient-ils aménagé un tas de pierre pour atteindre le surplomb, toujours difficile à franchir malgré les encoches ? Dans le puits 27, le problème devient plus ardu, car les encoches s'arrêtent 7 m avant le fond sableux actuel, soit plus de 9 mètres avant le fond rocheux ancien !

A propos de la répartition des puits

L'emplacement des puits a été naturellement choisi dans les zones plates, à une altitude peu différente de celle du Wadi el-Hijr. Il est tout à fait normal qu'on n'en retrouve pas dans les zones sableuses ou sur les pentes remontant vers les massifs. Le seul puits (n° 66) situé dans une zone sableuse se trouve en fait sur le long et plat soubassement terreux où quelques langues de sable de faible hauteur (3 m), ne méritant pas le nom de dunes et maintenant fixées par la végétation, sont venues perturber la platitude des lieux.

CONCLUSIONS

Jean-Baptiste Rigot, puis surtout Thomas Arnoux avaient réalisé consciencieusement un gros travail de recensement des puits. L'étude que j'ai entreprise était la suite naturelle et logique de ce recensement auquel elle donnait toute sa signification.

Je pense que j'ai eu beaucoup de chance en attaquant ce travail en novembre 2005. Lors des missions de 2008 et 2010, le forage P 75 était à sec et les mesures faites dans les forages de M. Mutlaq al-Mutlaq montraient une baisse du niveau de la nappe phréatique de près de 1 m par an. Cette baisse est celle qui a été constatée par le BRGM dans les études menées dans des zones proches. Notre étude a donc été menée in-extremis, car ne pas trouver d'eau ne lui aurait pas donné la même valeur !

Indépendamment de la curiosité intellectuelle et de l'esprit de recherche, je n'aurais pu entreprendre cette étude sans ma qualité de topographe et plus de 50 ans de pratique assidue des explorations souterraines, me donnant une meilleure approche de l'environnement des puits. Il a permis de préciser certains éléments et d'éliminer certaines hypothèses erronées émises précédemment.

La topographie, avec les nombreuses mesures que nécessitait la détermination sérieuse du niveau de la nappe phréatique et de l'altitude des puits a été la base essentielle de cette étude.

Les mesures d'altitude, à partir des sommets rocheux, a été l'élément primordial de notre travail. Il y a des lieux moins magnifiques pour travailler!



NOTES ARCHEOLOGIQUES

L'étude que nous venons de réaliser s'est attachée principalement à l'aspect géomorphologique et hydrogéologique des puits. Elle s'est aussi attachée à la technique de leur creusement et à leur utilisation.

Mais, elle a échappé à l'étude archéologique classique: une fouille minutieuse du fond des puits, avec l'établissement d'une stratigraphie rigoureuse et la recherche de poteries, ou artefacts divers.

Deux éléments s'y sont opposés :

- Parmi les 132 puits recensés, de nombreux étaient presque complètement obstrués, ou il l'é-

taient sur une grande hauteur. Vu le diamètre moyen des puits (4 m) et leur élargissement à la base, leur désobstruction et leur fouille aurait demandé un travail considérable, avec un équipement important, qui outre le temps, aurait demandé un investissement trop conséquent.

- Quant aux puits encore en bon état et peu obstrués, ils avaient subi une exploitation régulière jusqu'à l'expulsion des habitants d'Hegra en 1975. Ayant été l'objet d'une exploitation régulière, ils étaient régulièrement nettoyés et curés. Toute fouille y aurait été illusoire !

- Dans Bir en-Nabati, le seul puits, où je me sois longuement attardé et où je sois revenu à plusieurs reprises, j'avais effectué 6 carottages. Vu la faible profondeur de l'ensablement (1.1 m), j'avais creusé un petit sondage qui ne révéla que le sable apporté par le vent et quelques pierres tombées de la maçonnerie.

- La seule fouille se prêtant aux exigences de l'archéologie se firent dans la citerne d'Al-Hijr qui a été mentionnée précédemment.

Zone urbaine du site

Les puits que nous avons étudiés avaient, comme nous l'avons vu, un usage agricole.

L'étude de la zone urbaine du site, recouverte d'une épaisse couche d'alluvions, n'a commencé qu'après le recensement et l'étude des tombes monumentales et structures apparentes.

En 2010, lors de ma dernière intervention sur le site, les fouilles entreprises n'avaient pas encore dégagé de margelles de puits. Situés dans un environnement urbain, avec des conditions d'usage différentes, les puits auraient-ils eu le même aspects et les mêmes caractéristiques?

Thibaud Fournet me signale l'existence de deux puits dans l'enceinte de Petra. Situés dans des temples, ils avaient sans doute un usage religieux, tel que les ablutions. Ils sont beaucoup moins larges et ont un aspect différent de ceux que nous venons d'étudier. Notre réétude devra certainement être étendue !

Pour clore cette étude : malgré l'invasion d'Hijr par le modernisme et ses techniques, certaines scènes du désert n'ont pas changé depuis le temps des nabatéens! (Ph. I. Sachet)





Les djinns et autres surprenantes silhouettes de pierres du jebel Ithlib, ont-ils inspiré l'occupation humaine et les multiples tombes sculptées d'Hegra ?

REMERCIEMENTS

- Je dois en premier lieu remercier Laïla Nehme pour sa grande ouverture d'esprit et la confiance qu'elle m'a accordée.
- M. Mutlaq al-Mutlaq qui nous a permis de visiter plusieurs forages. Il a fait interrompre son propre forage et celui de la ferme « Aïn esh-Sharq » pendant quatorze heures pour que nous puissions faire nos mesures. Il nous a aussi permis d'obtenir du Ministère de l'Agriculture les relevés des pluies de 1998 à 2004 sur al 'Ulâ.
- M. Henri Paloc et M. Denis Vaslet, géologues au BRGM, le premier pour ses conseils en hydrogéologie, le second pour les documents fournis.
- M. Philippe Audra, Maître de conférence en géomorphologie à l'Université de Nice pour ses conseils en géomorphologie.
- M. Morhange, chercheur au Cerege d'Aix-en-

Provence pour ses indications concernant la documentation sur les paléo-climats.

•M. Sanlaville, géomorphologue en retraite qui a étudié le paléo-environnement au Moyen-Orient, pour ses renseignements sur le climat du temps des romains.

•M. Thibaut Fournet, architecte CNRS, qui m'a fourni des éléments sur les puits de Petra.

Contacts : paul.courbon@yahoo.fr

BIBLIOGRAPHIE

- (1) BAR-MATTHEWS M. and AYALON A., 1997, Late quaternary paleoclimate in the eastern Mediterranean region from stable isotope analysis of speleothems at Soreq Cave, Quaternary Research, University of Washington.
- (2) BESSAC J.-Cl., 2008, Le travail de la Pierre à Petra – techniques et économie de la taille rupestre, ed. Recherche sur les civilisations, Paris-Sorbone, 360 p..
- (3) CASTANY G., 1960, Traité pratique des eaux souterraines, Dunod.
- (4) COURBON Paul, 2008, Les puits nabatéens de Médain Salih (Arabie saoudite), Arabian Archeology and Epigraphy, n° 19, Blackwell Publishing Ltd, Edinburgh.
- (5) BRGM, 1977, Orientation map for groundwater exploration related to mineral investigations in the Arabian shield – 77 JED 13.
- (6) DENTZER J.-M., 2008, Les nabatéens et l'eau : technologie et culture. La conduite d'eau du Jebel Ithlib à Medaïn Salih, Syria 85, pp. 5-18
- (7) DOUGHTY C., 1888, *Travels in Arabia Deserta*, Cambridge University Press.
- (8) HADLEY Donald G., 1987, Explanatory notes to the geological map of Sahl el Matran quadrangle sheet 26C, U.S.Geological survey. Cette note comporte une importante bibliographie géologique.
- (9) JAUSSEN et SAVIGNAC, réédition de 1997, Mission archéologique en Arabie, Institut Français d'Archéologie Orientale. La première édition date de 1911.
- (10) NĒHME L., Arnoux Th., Bessac J.-Cl., Braun J.-P., Dentzer J.-M., Kermorvant A., Rigot J.-B., Sachet I. &Tholbecq, 2006, Mission archéologique de Madâ'in Sâlih (Arabie Saoudite) :Recherches menées de 2001 à 2003 dans l'ancienne Hijra des Nabatéens. Arabian Archaeology and Epigraphy 17: 41–124.
