



**HAL**  
open science

# L'extraction des blocs en calcaire à l'Ancien Empire. Une expérimentation au ouadi el-Jarf

Franck Burgos, Emmanuel Laroze

## ► To cite this version:

Franck Burgos, Emmanuel Laroze. L'extraction des blocs en calcaire à l'Ancien Empire. Une expérimentation au ouadi el-Jarf. *The Journal of Ancient Egyptian Architecture*, 2020, 4, pp.73-95. hal-02555867

**HAL Id: hal-02555867**

**<https://hal.science/hal-02555867>**

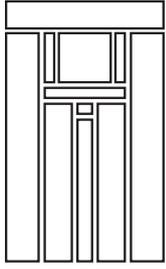
Submitted on 21 May 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0  
International License



The Journal of **Ancient Egyptian Architecture**

vol. 4, 2020

---

# L'extraction des blocs en calcaire à l'Ancien Empire. Une expérimentation au ouadi el-Jarf

Franck Burgos & Emmanuel Laroze

Cite this article:

F. Burgos & E. Laroze, 'L'extraction des blocs en calcaire à l'Ancien Empire. Une expérimentation au ouadi el-Jarf', *JAEA* 4, 2020, pp. 73-95.

---

JAEA

ISSN 2472-999X

Published under Creative Commons CC-BY-NC 2.0

[www.egyptian-architecture.com](http://www.egyptian-architecture.com)

## L'extraction des blocs en calcaire à l'Ancien Empire

### Une expérimentation au ouadi el-Jarf

Franck Burgos & Emmanuel Laroze<sup>1</sup>

#### *Abstract:*

*This article addresses the techniques used for the extraction of limestone blocks from quarries during the Old Kingdom. The study draws on the latest research conducted at the Wadi al-Jarf harbor complex, located on the western shore of the Gulf of Suez. Approximately one hundred extracted blocks have been discovered there in an unfinished state, along with tools such as ropes, wooden hammers, and pieces of copper chisels. The items found in and around the quarry have led to a better understanding of the methods used by the ancient stonecutters, to produce large-sized blocks. To study the processes in more detail, an experiment was carried out to extract a one cubic meter stone using replicas of the ancient tools found at the site, and to test new hypothetical reconstructions of the steps followed in the process. The information collected and the experience gained has yielded new understanding of the organization of labor and has resulted in cutting performance rates being estimated for the first time. Information about the use of water to soften the stone during cutting of extraction trenches has also been brought to light.*

La mission archéologique du ouadi el-Jarf s'intéresse à un complexe portuaire de la IV<sup>e</sup> dynastie (-2670 à -2450 av. J.-C.) installé dans une zone désertique sur la rive occidentale du golf de Suez.<sup>2</sup> Depuis 2011, date de la première campagne, les fouilles qui y sont conduites annuellement ont mis au jour de nombreuses constructions inédites. Si les premières installations sont datées de Snéfrou, le site sera essentiellement aménagé par son fils, Chéops. Son occupation demeurera cependant brève puisque à la mort de celui-ci, il sera immédiatement abandonné. Oublié pendant plusieurs millénaires, l'endroit n'a connu aucune réoccupation ultérieure. Ainsi, les vestiges sont demeurés dans un état de conservation remarquable. La découverte d'un lot exceptionnel de papyrus en 2014 a révélé que ces installations étaient très directement liées au chantier de la grande pyramide.<sup>3</sup> Cette documentation écrite nous informe en effet que les équipes qui œuvraient sur ce site travaillaient une partie de l'année à l'approvisionnement par voie fluviale du plateau de Gizeh en matériaux de construction. Autrement dit, les hommes qui ont travaillé dans le complexe du ouadi el-Jarf étaient composés de marins, mais aussi de spécialistes du bâti. Parmi les installations les plus remarquables, on distingue sur le littoral une jetée en L d'environ 200 m x 200 m et un immense bâtiment 'intermédiaire' en peigne de plus de 2000 m<sup>2</sup>. Les vestiges les plus intéressants pour notre étude relative aux techniques de taille de pierre se situent plus loin à l'ouest, à environ 3 km, où

- 
- 1 Franck Burgos (tailleur de pierre, CNRS) et Emmanuel Laroze (architecte, CNRS) sont rattachés au laboratoire Orient et Méditerranée (Umr 8167). Sauf mention contraire toutes les illustrations sont signées des auteurs.
  - 2 La mission du ouadi el-Jarf est dirigée par Pierre Tallet. Nous tenons à le remercier pour le soutien qu'il apporte à nos travaux ainsi que pour la grande liberté qu'il nous accorde dans leur conduite. Pour l'histoire de la découverte et la présentation du site voir Tallet, Marouard et Laisney (2012), pp. 399-446.
  - 3 Tallet (2017) ; Tallet (2014) pp. 25-49.

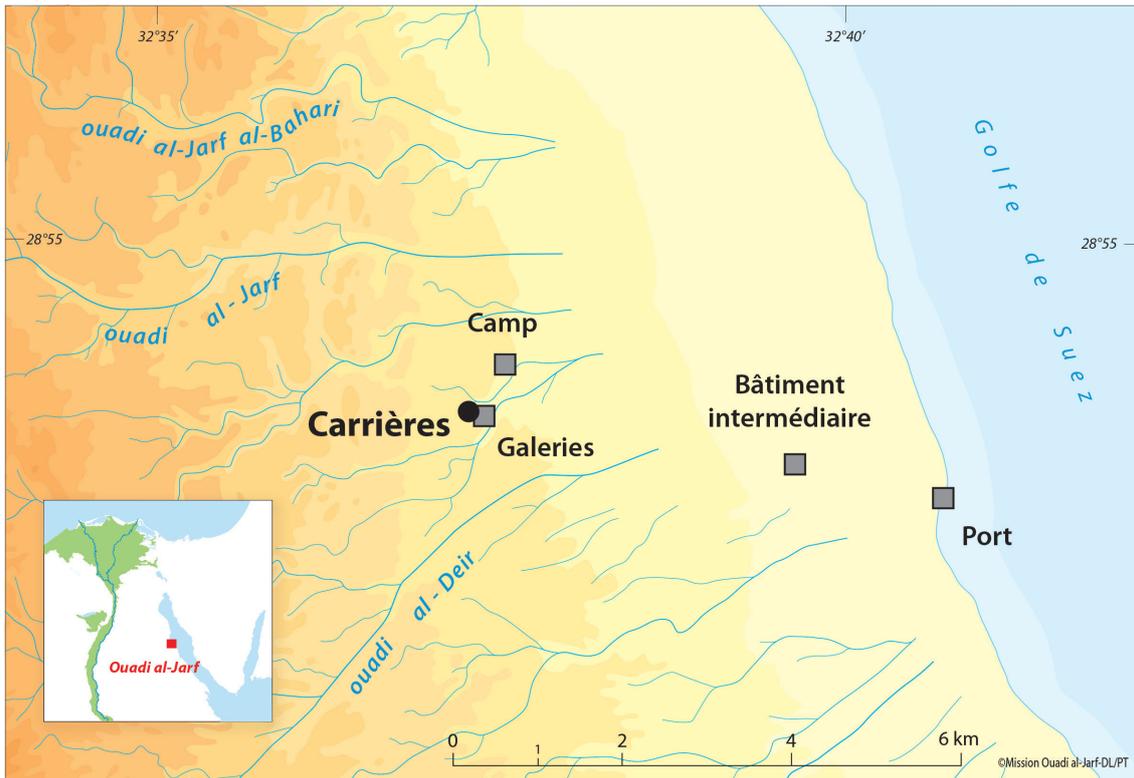
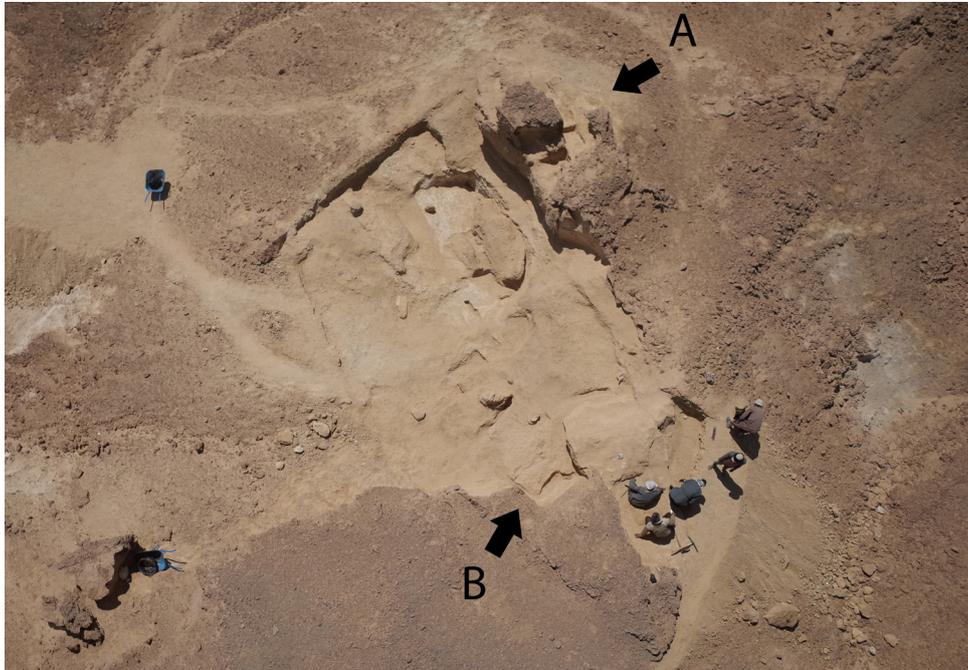


Fig. 1. Plan d'ensemble du site du ouadi el-Jarf (Laisney, CNRS).



Fig. 2. Le système de fermeture constitué de gros blocs devant l'entrée des galeries G5 et G6.

émergent les premiers escarpements du massif calcaire. Là, se trouve un ensemble de magasins composé d'une trentaine de galeries creusées dans la roche qui servaient à abriter des bateaux et du matériel expéditionnaire (fig. 1). Celles-ci étaient obstruées par des systèmes de fermeture étanche et particulièrement robuste constitués de très gros blocs.



**Fig. 3.** Vue aérienne de la carrière au terme des dégagements. A) bloc abandonné en cours d'extraction, B) empreinte d'un bloc extrait.

Rien qu'autour de l'éminence rocheuse du secteur 1 qui compte 17 galeries, ce sont 135 blocs de fermeture qui ont été inventoriés. Ces gros blocs aux dimensions variables ont en moyenne un volume de 3 m<sup>3</sup> et un poids de 5,8 t.<sup>4</sup> Si certains d'entre eux ont été altérés ou déplacés pour pouvoir sortir le matériel des galeries, ils sont demeurés en grande majorité dans leur position d'origine (fig. 2). La plupart sont dans un état brut de carrière, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas été retailés pour une installation particulière. Ceux-là conservent en effet sur leurs faces des traces d'outils, des fractures ou des ressauts caractéristiques de leur extraction. La carrière d'où ces blocs proviennent a par ailleurs été découverte en 2017 (fig. 3). L'observation des différentes empreintes, ainsi que celle d'un bloc resté en cours d'extraction, nous renseignent sur les procédés utilisés et l'organisation des équipes. Enfin, de nombreux outils ayant servi aux travaux – maillets, enclumes, percuteurs, pointes de broches en cuivre, cordes – ont été retrouvés. Leur confrontation avec les traces qu'ils ont laissées sur la pierre permet d'affiner nos interprétations. La richesse des informations livrées par le site et leur authenticité – rappelons qu'il n'existe aucune ambiguïté quant à la datation des traces ou du matériel retrouvé puisqu'il n'y a jamais eu de réoccupation – offrent des conditions exceptionnelles pour l'étude des techniques de construction de cette période. Dans ce contexte, il nous a paru intéressant de comparer nos observations et nos interprétations avec des mises en situation concrètes. Nous avons par conséquent entrepris l'extraction d'un bloc d'environ 1 m<sup>3</sup> selon les méthodes antiques. Par ce travail expérimental, il s'agissait de retrouver les gestes et les postures des carriers, mais aussi de mettre en lumière des difficultés voire les impossibilités qu'ils pouvaient

4 Leur poids est cependant assez variable puisqu'il s'échelonne entre 2 et 15 tonnes.

rencontrer pour certaines opérations. En utilisant des outils en cuivre comparables à ceux retrouvés sur le site, nous avons pu tester leur résistance ainsi que leur efficacité par rapport au calcaire local. Finalement, nous avons cherché à évaluer le temps et les effectifs nécessaires aux différentes tâches.

### Les techniques d'extraction à l'Ancien Empire

Nos connaissances sur l'extraction des blocs de calcaire à l'Ancien Empire sont limitées et sont essentiellement attachées au plateau de Gizeh où de nombreux gisements sont encore visibles. Sur le côté nord-ouest de la pyramide de Khéphren<sup>5</sup> (fig. 4) mais aussi à proximité de l'angle nord-ouest de la pyramide de Mykérinos, les fonds de tranchées qui dessinent une sorte de damier nous renseignent sur la méthode pratiquée à cette époque par les carriers. La chambre inachevée de la grande pyramide met en œuvre les mêmes techniques.<sup>6</sup> L'extraction s'effectuait en deux temps : le dégagement des faces verticales, puis le décollement le long de la face inférieure horizontale du bloc. Le calcaire est une roche sédimentaire, si bien qu'il existe un sens de clivage qui assure une cohésion plus forte dans un sens que dans l'autre. Les deux opérations mettaient donc en œuvre deux techniques différentes : la taille de tranchées dans le sens vertical et la *rupture par extension* dans l'autre sens, c'est-à-dire celui parallèle aux lits de la pierre.<sup>7</sup>

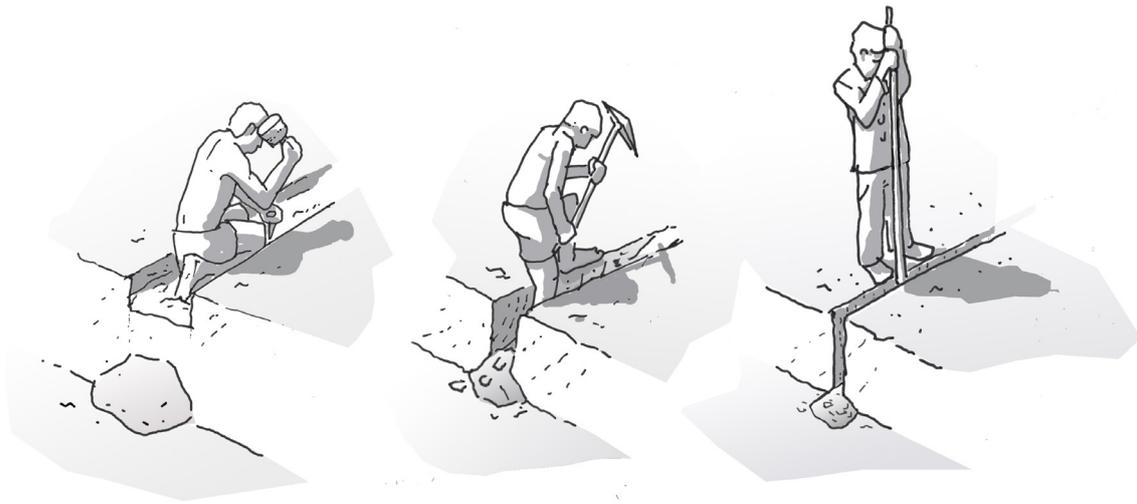


**Fig. 4.** Les fonds de tranchées d'extraction dans l'angle nord-ouest de la pyramide de Khéphren à Gizeh.

5 Vyse (1840), pp. 159-160 ; Arnold (1991), pp. 31-32, fig. 2.4 ; Clarke et Engelbach (1930), pp. 16-17, fig. 13 ; Isler (2001), p. 222, fig. 10.1 ; Hölscher (1912), pp. 33-34, fig. 19. Certains auteurs pensent toutefois que cette carrière maintes fois citée en exemple pourrait dater du Moyen-Empire: Goyon *et al.* (2004), pp. 149-150, fig. 158.

6 Lehner et Hawass (2017), pp. 425-426.

7 Noël (1968), pp. 310-311.



**Fig. 5.** Évolution de la technique du havage de l'Ancien Empire à nos jours : le développement d'outils de plus en plus longs et résistants a permis d'optimiser le creusement des tranchées qui se sont progressivement réduites en largeur. 1) Le ciseau et le maillet à l'Ancien Empire, 2) le pic de carrier (ou escoude) à la Période Romaine, 3) l'aiguille en acier durant la période moderne. Cette évolution met en lumière une réduction progressive des déchets de taille.

Le carrier attaquait la roche avec un ciseau en cuivre,<sup>8</sup> un maillet en bois et probablement des outils lithiques.<sup>9</sup> Le creusement des tranchées – appelé aussi havage – s'effectuait de haut en bas, l'outil posé perpendiculairement aux lits sédimentaires de la pierre. Le carrier tenait l'outil au niveau de ses pieds et travaillait donc en règle générale en position accroupie. Les tranchées verticales devaient être suffisamment larges pour qu'il puisse y travailler au fur et à mesure qu'il descendait à l'intérieur.<sup>10</sup> La largeur de la tranchée était inhérente à l'outil utilisé. Les capacités technologiques à l'Ancien Empire ne permettaient pas, semble-t-il, de produire de grandes pièces métalliques. Le ciseau, petit outil en cuivre, ne dépassait pas une vingtaine de centimètres et se tenait en main. La partie active était une sorte de prolongement de la main, qui était située à quelques centimètres de celle-ci seulement. Pour manipuler l'outil, le carrier devait donc l'accompagner dans la tranchée. Il est intéressant à ce propos de souligner que l'amélioration des performances de l'extraction au cours du temps, conditionnée par l'évolution des outils et de leur résistance, s'est accompagnée d'une diminution progressive de la largeur des tranchées (fig. 5). Avec des outils emmanchés qui seront lancés, comme les pics de carrier ou des escoudes, voire avec des ciseaux plus longs, les tranchées se réduiront à quelques centimètres seulement. De nos jours, cet espace ne mesure plus que quelques millimètres seulement, la largeur nécessaire pour que circulent des fils hélicoïdaux ou des haveuses (disques tranchants). À l'Ancien Empire, la nécessité de travailler à l'intérieur de la tranchée impliquait que celle-ci mesure plus d'une

8 Plusieurs exemplaires de cet outil de l'Ancien Empire, appelé aussi bédane, ont été retrouvés. Voir par exemple l'exemplaire découvert dans une carrière de diorite de Khéops publié dans Goyon (1977). Il est inutile de préciser qu'il s'agissait d'outils précieux et onéreux car leur fabrication mettait en œuvre une technologie avancée et une chaîne de production complexe (extraction du minerai, réduction, forge, etc...). À propos du cuivre, voir Odler (2016); Lucas (1927), pp. 162-170.

9 Voir pour la dolérite Kelany, Harrell et Brown (2010), pp. 127-148.

10 Ce type de tranchée large s'appelle un enjarrot. Voir Abdul Massih et Bessac (2009), p. 62; Noël (1968), p. 149. Cette technique élémentaire était utilisée sur d'autres terrains que l'Égypte, voir par exemple Bessac (2007b), p. 197 et fig. 1; Bessac (2014), p. 157.

cinquantaine de centimètres. Cette valeur était incompressible. Compte tenu de ce paramètre, les carriers avaient donc intérêt à détacher des blocs volumineux.<sup>11</sup> Autrement dit, plus ceux-ci étaient gros, plus leur taille était économique. Cette optimisation était toutefois contrariée par la question du transport dont la difficulté augmente avec le poids de la charge. Le dimensionnement optimum d'un bloc était donc contraint par ces deux facteurs.



**Fig. 6.** Bloc de fermeture posé en délit devant l'entrée d'une galerie. Les carriers ont de toute évidence exploité la strate marneuse (située ici à gauche) pour détacher facilement le bloc de son substrat.

La technique employée pour le détachement proprement dit, c'est-à-dire la séparation du bloc du banc rocheux selon un plan horizontal, est en revanche beaucoup moins bien connue. Cette opération devait en tout cas être la plus délicate à réaliser, en particulier en l'absence d'outils en acier. Les coins éclateurs prouveront plus tard leur grande efficacité pour cette opération. Mais en l'absence de traces manifestes de ces outils sur les gisements de l'Ancien Empire, il faut considérer qu'ils n'étaient pas encore utilisés à cette époque. La seule technique qui ait été avancée est celle de Reisner qui consistait à placer une grande pièce de bois à la base d'une des faces du bloc et à

<sup>11</sup> Deux exemples permettent d'évaluer cette différence de rentabilité pour un bloc isolé : avec des tranchées de 0,5 m de large et 1 m de hauteur, il faut creuser 3m<sup>3</sup> de roche pour dégager un bloc d'un 1 m de côté quand il faut tailler 5 m<sup>3</sup> de pierre pour extraire un bloc de 2 m de côté. La géométrie du bloc pouvait aussi avoir une incidence sur l'économie de la taille. Sur ce sujet voir Monnier, F., 'Le mégalithisme appareillé dans les pyramides de l'Ancien Empire' (en préparation).

l'arroser abondamment.<sup>12</sup> La force latérale exercée par le bois trempé aurait alors fait éclater la pierre, désolidarisant le bloc de son banc. Quoiqu'il en soit, de nombreux chercheurs s'accordent à dire que les carriers de l'Ancien Empire ont dans la mesure du possible exploité les propriétés géologiques du calcaire pour cette opération délicate. Celui-ci étant une roche sédimentaire, il est composé d'une succession de couches plus ou moins bien solidaires les unes des autres. Les strates argileuses, plutôt meubles, qui partagent certains bancs plus durs devaient donc être particulièrement recherchées car, une fois atteintes par les tranchées verticales, le bloc avait alors une faible adhérence avec la roche et pouvait par conséquent être retiré facilement. À ouadi el-Jarf, de nombreux blocs présentent sur une de leurs faces cette couche marneuse ou friable, signe qu'ils ont été détachés de cette manière (fig. 6).<sup>13</sup> Pour résumer, le procédé de l'extraction d'un bloc consistait à creuser des tranchées verticales depuis une plateforme et à fracturer la face inférieure. Ce principe demeurera à peu de choses près le même durant toute la civilisation égyptienne.<sup>14</sup>

### La carrière du ouadi el-Jarf : interprétation et matériel exhumé

En 2017, nous avons eu la chance de découvrir à ouadi el-Jarf une carrière d'où ont été extraits des blocs servant à la fermeture des galeries. Elle se situe à environ 400 m à l'ouest de la principale concentration des magasins antiques. Sa position dominante par rapport au site a certainement facilité l'évacuation des blocs. La carrière a été partiellement dégagée l'année suivante durant deux semaines. Cette zone d'extraction se remarque par une sorte de dépression délimitée par deux fronts de taille situés sur ses côtés ouest et nord. Elle se distingue d'autre part par la présence de trois diaclases parallèles au front nord. Celles-ci ont de toute évidence été déterminantes dans le choix de cette zone d'exploitation puisque ces particularités géologiques facilitent l'extraction. En effet, elles permettent de faire l'économie du creusement d'une tranchée sur un côté d'un bloc. C'est d'ailleurs le long d'une de ces diaclases dans la partie nord qu'on observe une intéressante empreinte d'extraction. Là, on constate que deux tranchées verticales seulement, perpendiculaires l'une à l'autre, ont été nécessaires pour détacher le bloc (fig. 3B et fig. 7). On remarque d'autre part que le fond de celles-ci est deux fois moins large qu'en partie supérieure. C'est probablement par souci d'économie que les carriers ont ainsi réduit la largeur de la tranchée : la base du bloc étant atteinte et délimitée, il était en effet inutile d'enlever le reste. De l'ensemble des traces conservées on comprend la méthode d'extraction. Une fois que le bloc a été désolidarisé de la roche sur ses 4 côtés, les carriers ont creusé en dessous afin de le détacher complètement de son banc.

Non loin de là, au sud-ouest de la zone dégagée, se trouve un bloc qui a été abandonné en cours d'extraction (fig. 3A et fig. 8). Bien qu'il ait été partiellement rongé par le vent et le sable, on distingue encore très nettement deux tranchées. Au fond de celles-ci, on observe plusieurs petites 'plateformes' d'environ 0,50 m x 0,50 m qui s'étagent à des hauteurs différentes. Chacune d'elles devait correspondre à un espace de travail. En fait, un homme devait avoir la charge de deux d'entre elles contiguës et devait les décaisser en alternance. Avec une telle organisation, on comprend que plusieurs carriers pouvaient travailler là simultanément.<sup>15</sup> Divers outils lithiques, qui s'apparentent souvent à de gros gallets, ont été trouvés dans cette zone d'extraction. La présence de vert de gris sur certaines pierres nous montre qu'elles ont été au contact du cuivre. Il s'agit là d'enclumes et de perceurs qui servaient à

12 Reisner (1931), p. 69 ; Goyon *et al.* (2004), p. 147 ; Arnold (1991), p. 33.

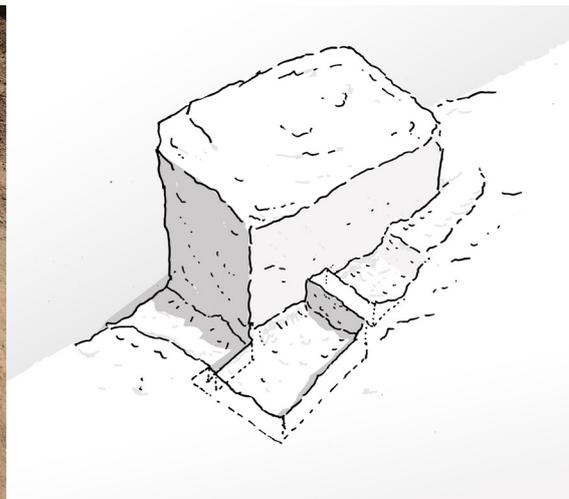
13 À Gizeh, Georges Goyon explique à ce propos que l'irrégularité des assises de la grande pyramide serait liée à l'exploitation des bancs de carrière, Goyon (1978), pp. 405-413. Voir aussi sur le même sujet l'article plus ancien de Tarrell et Petrie (1925), pp. 36-39.

14 Harrell et Storemyr (2015), pp. 19, 32, fig. 25.

15 L'organisation et les dimensions de ces espaces de travail sont tout à fait comparables à ceux visibles dans le fond des tranchées d'extraction des obélisques en granit à Assouan. Voir par exemple la restitution dans Goyon *et al.* (2004), p. 164, fig. 180 et 181.



**Fig. 7.** Empreinte d'extraction d'un grand bloc dans la carrière du ouadi el-Jarf.



**Fig. 8.** Bloc abandonné en cour d'extraction au ouadi el-Jarf. Deux tranchées perpendiculaires sont encore bien conservées. Dans le fond de celles-ci, on observe des sortes de caissons d'environ 0,50 x 0,50 m s'éta-geant à différentes hauteurs qui correspondent à des postes de travail.

rabattre le tranchant de l'outil. Ce procédé, qui devait être effectué fréquemment, permettait d'affûter la partie active de l'outil. Les plus gros cailloux devaient quant à eux servir de cale pour maintenir temporairement des blocs en hauteur ou pour que des leviers puissent y prendre appui, voire pour sécuriser des tranchées horizontales lorsqu'il s'agissait de travailler en sape. Quelques débris de bois, dont un reste de maillet usagé, ont aussi été découverts. La grande quantité de tessons de céramique qui jonchaient le sol témoigne d'un important besoin en stockage – on pense à l'eau bien entendu – dans cette zone. Celle-ci n'a été fouillée que partiellement lors d'une saison mais nous avons été surpris de ne pas trouver beaucoup d'éclats de taille qui caractérisent normalement les espaces où on travaille la pierre. En revanche, nous avons dégagé une grande quantité de substrat sableux. Nous comprendrons plus tard, grâce à l'expérimentation, qu'il s'agissait là des résidus de l'extraction. L'observation des traces laissées sur la pierre à ouadi el-Jarf et les instruments qui ont été retrouvés sur place permettent de restituer la 'caisse à outils' du carrier qui était somme toute rudimentaire (fig. 9) :

- Maillets en bois d'acacia.<sup>16</sup>

Cette essence de bois a la particularité d'être très dure et résistante. Les ressources de ce matériau ont par ailleurs toujours été très abondantes sur le territoire égyptien, ce qui était une réelle opportunité pour les tailleurs de pierre qui en faisaient une grande consommation. Les 'copeaux' ou les déchets de bois qu'on trouve en abondance sur le site indiquent que les maillets étaient soumis à rude épreuve et que leur altération nécessitait de les remplacer fréquemment.

- Outillage lithique.

Des galets en pierre dure servaient de marteaux et d'enclumes.

- Cordages.

Retrouvées en grandes quantités sur le site, les cordes servaient au déplacement des blocs mais aussi à solidariser des pièces entre elles. Celles qui étaient utilisées par les carriers devaient être à 3 brins et mesurer 3 cm de diamètre minimum comme l'indiquent les nombreuses empreintes laissées par celles-ci sur les angles des blocs (fig. 10). L'étude de Claire Newton a montré que celles-ci étaient faites, soit de lanières de tiges de papyrus (*Cyperus papyrus*), soit de tiges feuillées de halfa (*Desmostachya bipinnata* et/ou *Imperata cylindrica*).<sup>17</sup>

- Ciseaux en cuivre.

Il s'agissait d'outils précieux et durables. La dureté et l'affûtage de leur partie active était entretenue par un battage à froid à l'aide d'une pierre et d'une enclume. Seules quelques pointes brisées ont été retrouvées sur le site.

- Leviers et cales en bois.

Bien que nous n'ayons pas retrouvé d'exemplaires de ces outils à Jarf, ces instruments étaient indispensables pour la manipulation, le calage ou le décollement des blocs. Les mortaises taillées sur certains blocs pour les manipuler montrent que les leviers avaient des sections de 10 à 15 cm de côté.

Nos observations nous ont conduits à restituer une technique d'extraction convaincante qui paraît dans ses grandes lignes être conforme aux interprétations faites sur d'autres sites. Il restait à confronter notre état de la connaissance avec la pratique pour tenter d'apporter des informations quantitatives (délais, effectifs, usure des outils, etc) mais aussi d'ordre pratique (posture des ouvriers, pénibilité, compréhension de l'environnement de travail, etc).

<sup>16</sup> Claire Newton a pu identifier qu'il s'agissait majoritairement d'Acacia, probablement d'une ou plusieurs espèces disponibles localement (rapport d'étude archéobotanique de fin de mission, 2019, p. 15). Actuellement, les acacias les plus fréquents dans le désert côtier de la mer Rouge sont les deux sous-espèces d'Acacia *tortilis* (Forssk.), Hayne (*A. tortilis* subsp. *tortilis* et *A. tortilis* subsp. *raddiana*) et *A. ehrenbergiana* Hayne.

<sup>17</sup> *Ibidem*, p. 29.

## Mise en place de l'expérimentation : le choix de la zone d'extraction et la fabrication des outils

L'expérimentation a été conduite durant les campagnes de 2018 et 2019 et s'est concrétisée par l'extraction de deux blocs d'environ 1 m<sup>3</sup> chacun. La zone qui a été choisie se situe à environ 50 m au sud-ouest de la carrière antique. Cette proximité présentait plusieurs avantages. Outre son intérêt pour des questions d'accessibilité et de logistique, la facilité pour aller et venir entre les deux espaces était utile pour étudier et comparer les traces d'extractions. L'affleurement rocheux que nous avons choisi respectait également les critères requis : pierre tendre à légèrement ferme, une accessibilité tant pour le travail que pour l'évacuation des blocs par la suite, un banc homogène d'environ 1,5 m avec la présence d'une faille apportait une économie de travail. Les quatre ciseaux utilisés pour l'expérience ont été forgés en France à partir de segments de 22 cm de longueur et de 25 mm de diamètre de tube plein en cuivre (fig. 11). Le cuivre est un métal tendre qui a la particularité de durcir quand on le forge. Ce changement de propriété sous l'effet de sa déformation plastique s'appelle l'écrouissage. Comme il est ductile, il peut supporter un écrouissage important. Au cours de cette opération il convient toutefois à ne pas dépasser sa limite d'élasticité au risque d'obtenir un métal déstructuré. Pour la mise en forme des ciseaux plusieurs méthodes ont été testées :

- Méthode 1 : Le métal a été chauffé à la forge et mis en forme à chaud. Après refroidissement total, le cuivre a de nouveau été battu dans l'espoir de le durcir. Cette méthode n'a pas fonctionné, car la mise en forme du ciseau était trop avancée à la forge pour pouvoir être écrouie ensuite. Lors d'un essai sur une pierre ferme, la partie active du ciseau s'est écrasée et pliée.
- Méthode 2 : Le ciseau a été entièrement forgé à froid, sur l'enclume. Cela n'a pas fonctionné car la limite ductile du cuivre – le métal a commencé à se déstructurer – a été atteinte avant que le ciseau ne prenne sa forme définitive. Lors de l'essai sur la pierre, le ciseau s'est fendu en petites lamelles feuilletées.
- Méthode 3 : la forme du ciseau a été dégrossie à chaud sur la forge, en prenant soin de laisser suffisamment de métal à étirer pour obtenir un écrouissage à froid correct. Cette méthode s'est avérée fructueuse lors de l'essai sur la pierre ferme. L'outil, percuté sans retenue par le maillet, a bien attaqué la pierre sans s'abîmer.

Les outils que nous avons fabriqués sont légèrement plus gros que ceux qui ont été retrouvés au ouadi el-Jarf. La largeur de notre tranchant est approximativement de 1,6 cm tandis que les traces d'outils visibles sur les blocs antiques sont plutôt comprises dans une fourchette de 1 à 1,3 cm.<sup>18</sup> La forme de nos ciseaux est celle qui vient la plus naturellement sous la forge. C'est pour cette raison qu'elle est identique à celle des ciseaux en cuivre antiques.<sup>19</sup> Le cuivre qui a servi à forger nos outils n'est évidemment pas le même que celui produit durant l'antiquité. Mais il ne fait aucun doute que les anciens forgerons égyptiens avaient acquis une grande maîtrise pour la fabrication de leurs outils. Ils savaient rendre ce métal suffisamment dur – grâce à la forge mais aussi par leur composition avec l'ajout d'arsenic par exemple – et résistant pour tailler de la pierre tendre à légèrement ferme. De tels outils ne pouvaient pas être utilisés pour des pierres dures comme la calcite, le marbre, le quartzite, le schiste ou le granit. Les maillets ont, quant à eux, été tournés en Égypte dans un bois vert qui résiste bien aux impacts. Leur diamètre était d'environ 22 cm. Des essais avec des maillets

<sup>18</sup> Nous avons retrouvé quelques têtes d'outils : objets 282 et 283.

<sup>19</sup> Voir par exemple celui retrouvé par Lauer à Saqqara : Lauer (1936), p. 232, fig. 234. Le même outil est restitué dans Goyon *et al.* (2004) p. 379, fig. 489. Voir également, la planche XXII dans Petrie (1917), et les outils en cuivre exhumés dans Reisner et Fisher (1914), p. 251 et pl. XI, III, n°18. Les outils en bronze plus récents auront aussi la même forme.



**Fig. 9.** La 'caisse à outils' des carriers du ouadi el-Jarf : maillet en bois, pic en pierre, corde et ciseau en cuivre (ici pointe brisée). Matériel retrouvé en fouille sur le site (G. Pollin, IFAO).



**Fig. 10.** Empreinte sur l'angle d'un bloc et confrontation de celle-ci avec une corde exhumée.



**Fig. 11.** Maillet en hêtre et ciseaux en cuivre modernes utilisés lors de la première campagne.

de diamètre moindre, donc plus légers, et faits de bois plus sec ont montré qu'ils étaient moins résistants. L'expérimentation de ce chantier a été menée par 5 personnes qui se sont relayées à tour de rôle sur deux postes. La taille proprement dite mobilisait 4 d'entre elles ; l'évacuation des déblais et l'apport d'eau étaient dévolus à la cinquième. Il est utile de préciser que parmi les 5 personnes engagées sur cette expérience, seul Franck Burgos était un professionnel de la taille de pierre.



**Fig. 12.** Les premiers coups de ciseaux dans la zone d'extraction moderne : préparation du front de taille et du lit supérieur.

### Les vertus de l'eau

Une fois l'emplacement défini, la première étape a consisté à dessiner l'emprise du bloc sur le front de taille et le sommet de l'affleurement rocheux. À partir de là, trois tranchées verticales formant un U ont été implantées (fig. 12). Les quatre tailleurs de pierre se sont alors répartis sur différents postes comparables à ceux observés dans la carrière : trois étaient installés au sommet de chacune des tranchées, tandis que l'autre se tenait debout face au front de taille. Ce dernier avait la charge des extrémités des deux tranchées opposées. Les carriers 2 et 3 travaillaient dans le prolongement de chacune d'elles. Le quatrième était quant à lui installé dans la tranchée du fond. Une telle organisation avait l'intérêt de répartir équitablement le travail à un groupe d'hommes et de leur permettre de travailler simultanément. Que ce soit en position debout ou accroupie, l'espace de travail de chaque ouvrier correspond approximativement à une surface de 50 cm de large, soit la largeur minimale de la tranchée pour qu'un homme puisse y travailler, et de 50 cm environ de profondeur. Le rythme des tailleurs n'étant pas nécessairement le même, il s'est formé naturellement des paliers tout à fait comparables à ceux que nous avons vus autour du bloc inachevé dans la carrière antique.

Ces différences entre les hauteurs de paliers n'étaient pas contraignantes ; au contraire, elles augmentaient le confort du travail en équipe car ainsi les hommes se gênaient moins. Au fond de la tranchée, un homme accroupi avait peu de possibilités pour varier sa position de travail. Il devait le plus souvent travailler un pied à plat devant lui et le genou relevé, la fesse posée sur l'autre jambe. Il pouvait aussi travailler les deux genoux à terre, ce qui avait l'intérêt de projeter un peu plus le corps vers l'avant. Le carrier qui travaillait debout bénéficiait d'une posture plus confortable et avançait globalement plus vite que les autres.

Dès les premiers coups de maillets, le ciseau en cuivre s'est montré tout à fait résistant et efficace pour attaquer la roche. Le tranchant de la partie active a été maintenu en le rabattant régulièrement sur une enclume. En revanche la taille du calcaire s'est révélée laborieuse du fait de sa dureté. À chaque impact de l'outil, seuls quelques petits éclats étaient séparés de la roche. Le travail était de plus particulièrement difficile sur le premier centimètre de l'épiderme qui est couvert de calcin (carbonate de calcium).<sup>20</sup> Une fois le calcin retiré, la roche était plus tendre mais le débitage restait malgré tout long et la progression semblait peu vraisemblable au regard de l'estimation des 2,3 millions de blocs qui avaient été extraits pour construire la grande pyramide. La consommation de maillets en bois était d'autre part extrêmement dispendieuse. Après 3 jours de pénible labeur, l'avancement était dérisoire : seulement une vingtaine de centimètres avait été creusés. Sur un poste de travail d'une surface de 0,25 m<sup>2</sup> le décaissement était d'environ 20 cm en 15 h, soit 0,0033 m<sup>3</sup>/h ou 303 h/m<sup>3</sup>. Sachant que dans notre contexte il y avait 3 tranchées totalisant un volume de 2 m<sup>3</sup>, c'est presque 606 heures de travail qui auraient été nécessaires pour les creuser. Les deux jours durant lesquels fut poursuivie l'expérience nous convainquirent que la méthode n'était pas la bonne. Franck Burgos eut alors l'idée de mouiller la pierre. Il avait en effet remarqué que la roche du site était particulièrement salée. À l'entrée de certaines galeries, on peut d'ailleurs observer de nombreuses efflorescences de sel. De toute évidence, celui-ci avait contribué par un processus de lithification à la diagenèse de la pierre, en la rendant très cohérente. La forte concentration du sel contenu dans la roche était d'autre part maintenue par une faible pluviométrie dans la région. Comment la pierre allait-elle donc réagir au contact de l'eau sachant que le sel se dissout dans celle-ci ? Pour cela, il constitua une dépression à fond horizontal d'environ 50 x 50 cm et y versa environ deux litres d'eau. De manière inattendue, elle fut absorbée par la pierre en moins de 3 minutes et celle-ci changea littéralement de consistance et d'aspect (fig. 13). La pierre qui avait pris une teinte plus sombre s'était attendrie sur une profondeur d'environ 7 cm. L'action des ciseaux était alors plus efficace en détachant de plus gros éclats de roche (fig. 14). Sous les pieds, les résidus de taille qui s'amoncelaient avaient une apparence marneuse (fig. 15). Tant qu'ils étaient humides, ceux-ci pouvaient être agglomérés par pression. Cette matière ainsi compactée se désagrègeait toutefois après séchage. Concrètement, nous avons compris que l'eau dissolvait les sels mais agissait également sur les argiles contenues dans la roche.<sup>21</sup> Il était intéressant de remarquer qu'une roche qui avait été trempée ne retrouvait pas ses mêmes propriétés après séchage : elle demeurait plus tendre. En humidifiant la roche, nous avons constaté un important gain de productivité : la capacité d'extraction était d'environ 0,021 m<sup>3</sup>/h, soit presque 6 fois plus rapide qu'avec de la pierre sèche ! L'emploi de l'eau pouvait d'autre part engendrer des économies substantielles en matériaux. Les outils – ciseaux et maillets – étaient moins sollicités et leur consommation était réduite. Elle offrait

**20** Vu la dureté, il n'est pas impossible que cette épaisseur ait été attaquée jadis au moyen d'outils lithiques.

**21** L'absorption de l'eau par le calcaire local est surprenante tant elle est rapide. C'est sans doute à cette étrange propriété de la pierre que Barsanti a été confronté lors de sa fouille de la grande fosse de Zawiyet el-Aryan en mars 1905 : 'Une véritable trombe s'abattit sur la montagne de Zaouiét el-Aryân, et le puits fut inondé jusqu'à la hauteur de 3 mètres; vers minuit, l'eau baissa brusquement d'environ un mètre. Je ne puis expliquer ce phénomène qu'en supposant qu'elle s'engloutit dans quelque galerie souterraine, assez vaste pour contenir 380 mètres cubes d'eau' (Barsanti (1906), p. 286).



**Fig. 13.** Eau versée dans le fond de la tranchée. Après absorption, et une vraisemblable dissolution des sels, la roche devient plus tendre.



**Fig. 14.** Taille de la roche après qu'elle ait été humidifiée. Les impacts de l'outil deviennent beaucoup plus efficaces. Des fragments plus gros sont détachés. Le résidu de taille s'apparente à du sable grossier.



**Fig. 15.** Aspect des résidus générés par la taille sur pierre humide.

enfin des conditions moins éprouvantes pour les carriers. En contrepartie, il était nécessaire d'approvisionner la carrière en eau. Les 3 tranchées verticales totalisent un volume d'environ 2 m<sup>3</sup> ; en théorie, 300 litres d'eau étaient nécessaires.<sup>22</sup> Nous pensons toutefois qu'avec une meilleure gestion, ce chiffre pouvait être réduit de moitié. La progression dans les tranchées s'est poursuivie avec cette méthode jusqu'à la base du bloc (fig. 16).



**Fig. 16.** Synopsis de la première campagne d'expérimentation montrant le principe de progression de l'extraction.

À mi-chemin, nous avons traversé une couche de quelques centimètres plus dure qu'ailleurs qui nous a contraints à modifier notre protocole. La pierre, plus dense, avait une porosité plus faible, si bien que l'eau avait peu d'effets sur celle-ci. Les outils en cuivre étant alors peu efficaces, nous avons utilisé de l'outillage lithique : de simples galets de calcaire dur. Ceux-ci ont été très efficaces. On imagine que les pics à gorges (fig. 9) retrouvés sur le site pouvaient répondre à ce type de situation. Durant toute l'opération, il fallait veiller à bien respecter les aplombs des parois. En effet, une correction de ceux-ci après coup aurait entraîné un important surcoût de travail, car dans cette configuration l'eau doit être projetée sur les parois. En ruisselant, celle-ci imprègne mal la roche – 1 à 2 cm tout au plus – ce qui génère une plus grande consommation. La posture des carriers qui restent accroupis de haut en bas de la tranchée est très inconfortable et traumatisante pour les articulations (fig. 17). Comme ils ne pouvaient pas varier leurs positions, le travail était rythmé par des temps de récupération indispensables.

<sup>22</sup> Sur notre site, il existait deux possibilités d'approvisionnement en eau : la source, aujourd'hui dans le monastère Saint-Paul, situé à 10 km à l'ouest ou la mer, à 3 km à l'est. Nous n'avons pas expérimenté l'eau de mer mais il n'est pas exclu que cela fonctionne également. L'approvisionnement pouvait être assuré par des ânes dont la capacité de portage pouvait atteindre 100 kg.



**Fig. 17.** Position du carrier à l'intérieur de la tranchée.

Dans les faits, nous avons achevé la taille des 3 tranchées verticales en 6 journées de 6 heures par 5 personnes (quatre à la taille + une aide). Ce temps tient compte de nos hésitations, de nos réflexions et de notre apprentissage de la méthode. En théorie, la progression devait être plus rapide. Avec une progression moyenne quotidienne de 25 cm sur l'ensemble des tranchées (soit 4 m linéaires) la base du bloc serait atteinte en 4 jours. À ce terme, 2 m<sup>3</sup> de roche auraient été extraits. On calcule ainsi qu'un homme pourrait extraire 0,125 m<sup>3</sup> de roche par journée de 6 heures. Il s'agit là d'une base pour les estimations. Le rendement des carriers antiques était sans doute encore meilleur ; on peut raisonnablement penser qu'il était de 20 à 30 % supérieur à nos chiffres. Précisons enfin qu'il s'agit là de conclusions portées sur un calcaire local assez dur. Les chiffres pourraient donc varier sensiblement d'un site à l'autre en fonction de la qualité de la pierre.

### **Le décollement du bloc par fracturation**

Une fois que le bloc fut libéré sur ses 4 côtés, la dernière étape a consisté à détacher sa face inférieure qui le maintenait encore au banc. Nous l'avons vu, la méthode qui était employée est incertaine. À ouadi el-Jarf, nous n'avons retrouvé aucune trace au fond des tranchées d'extraction étayant la méthode du bois mouillé décrite par Reisner, ni aucune trace indiquant l'usage de coins d'ailleurs. Plus globalement, nous avons jugé que l'usage de bois trempé devait être compliqué en termes de logistique et qu'il devait exister d'autres solutions plus simples à mettre en œuvre. Le procédé le plus économique consistait à exploiter d'éventuelles opportunités géologiques, comme les couches argileuses par exemple, pour détacher le bloc. Dans ce cas, toute la difficulté consistait à choisir judicieusement son gisement au préalable. Quand cela était possible, les anciens carriers

devaient certainement privilégier cette méthode qui était la moins laborieuse. Sinon, il fallait procéder autrement en creusant une tranchée en sape, comme en témoigne le bloc dont nous avons découvert l'empreinte dans la carrière et dont le détachement n'avait profité d'aucun litage particulier. En fait, nous avons repéré sur cette face d'arrachement qu'une moitié de celle-ci portait des traces d'outils tandis que l'autre partie avait été fracturée (fig. 3B et fig. 7). C'est cette méthode, qui est la plus contraignante, que nous avons choisi d'expérimenter.



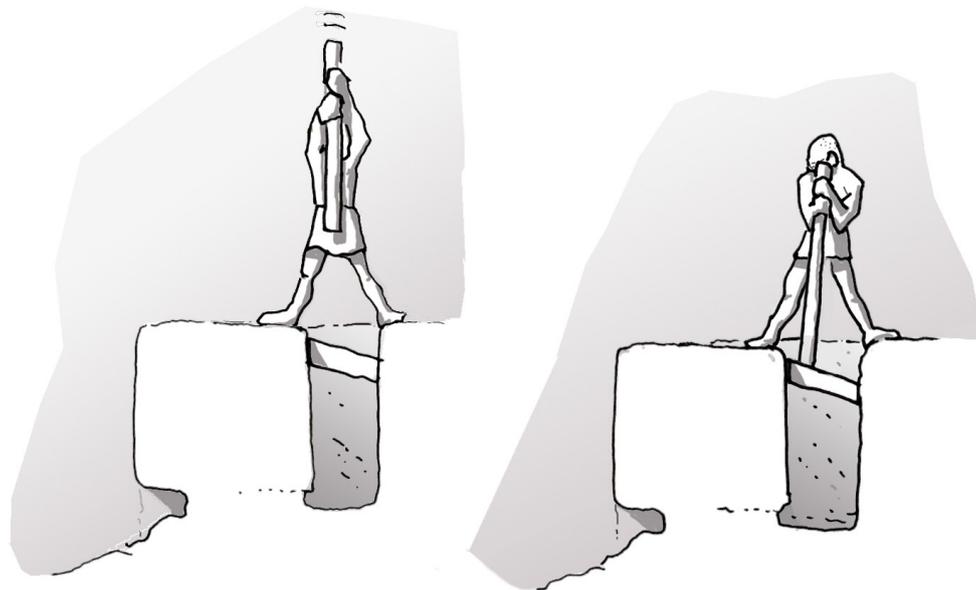
**Fig. 18.** Taille en sape d'une tranchée périphérique à la base du bloc avant son détachement par fracturation.

Pour décoller ainsi le bloc, il a tout d'abord été nécessaire d'amorcer une tranchée horizontale à la base du bloc (fig. 18). Une taille en sape a ainsi été réalisée sur une quarantaine de centimètres à l'avant de ce dernier. Sur les autres cotés, c'est-à-dire à l'intérieur des tranchées, le manque d'espace rendait la taille particulièrement difficile si bien que les saignées sous le bloc ne dépassaient pas une dizaine de centimètres. Le bloc ainsi préparé, nous avons tenté dans un premier temps de le détacher par fracturation à l'aide de leviers. Deux pièces de bois de section carrée de 10 cm et de 3 m de long ont été placées contre la face arrière. Les deux leviers étaient installés de manière à ce qu'ils prennent appui sur des cales elles-mêmes adossées sur le bord de la tranchée et que leur extrémité touche le bloc. Deux hommes par levier ont tiré pour tenter de détacher le bloc. Malheureusement, la tranchée était trop large et il était difficile de trouver un appui convenable si bien que la tentative se solda par un échec. Nous avons renouvelé l'expérience après avoir approfondi les tranchées sous le bloc mais celui-ci ne bougea pas d'avantage. Manifestement, les forces exercées par les leviers



**Fig. 19.** Mise en compression d'un buton en bois à l'arrière du bloc pour opérer la rupture, c'est-à-dire le détachement de son banc.

n'étaient pas suffisantes bien que ceux-ci aient été poussés à la limite de leur résistance. La manière – par à-coups – avec laquelle ont été manipulés les leviers n'était d'autre part pas efficace. Nous avons alors pensé à entrer en force une pièce de bois de 10 x 10 cm de section dans la tranchée arrière. Le buton, légèrement plus long que la tranchée elle-même, a été placé dans l'axe du bloc dans sa deuxième moitié supérieure. L'une de ses extrémités était située en partie haute contre le bloc tandis que l'autre prenait appui sur la paroi opposée. L'opération a ensuite consisté à mettre en pression la pièce de bois en frappant sur la partie haute à l'aide d'un madrier (fig. 19 et 20). Celui-ci, tel un marteau, était actionné verticalement par un homme dont les jambes prenaient appui sur le bloc et sur le bord de la tranchée. Après 5 minutes de mise en pression, le bloc céda et une fissure horizontale se dessina au fond de tranchée horizontale à la base du bloc. Cette technique telle que nous l'avons expérimentée s'est donc montrée très efficace et facile à mettre en place. Elle a l'intérêt d'engendrer de grandes pressions en continu. On imagine que sur le même principe plusieurs butons pouvaient être placés dans le fond de la fosse pour augmenter les poussées. La mise en compression se ferait par un martelage avec des outils lithiques – pic à gorges par exemple – en alternance d'un buton à l'autre comme on pourrait le faire avec des coins. En intercalant une grande pièce de bois entre les butons et le bloc les forces pourraient être encore mieux réparties sur celui-ci. Il est possible que la grande pression engendrée par ce système dans le sens de la sédimentation de la pierre puisse être suffisante pour détacher le bloc sans qu'il soit nécessaire de creuser de tranchées horizontales aussi profondes que celles que nous avons réalisées. Il s'agit là d'une piste de recherche car cette solution n'a pas encore été expérimentée.



**Fig. 20.** Restitution de la méthode de mise en pression des butons en bois telle que nous l'avons expérimentée. La pièce de bois qui est légèrement plus longue que la largeur de la tranchée est entrée en force par battage. Le principe est d'exercer des pressions parallèles au sens du lit de la pierre. La rupture, c'est à dire le détachement du bloc, est atteinte au-delà d'une certaine tension.

## Les mesures et estimations

Nos explorations menées à ouadi el-Jarf sur la taille du calcaire au moyen de ciseaux en cuivre et de l'utilisation de l'eau nous ont montré qu'on pouvait atteindre un rendement de 0,021 m<sup>3</sup>/h.<sup>23</sup> Dans notre configuration, l'extraction d'un bloc d'1 m<sup>3</sup> a nécessité le creusement de 3 tranchées verticales de 0,50 m de large qui totalisent un volume de 2 m<sup>2</sup>. Ce travail serait réalisé en 4 jours (de 6 heures) par 4 personnes – nous ne comptons pas là, la cinquième personne préposée à l'évacuation des déblais. La taille de la tranchée horizontale et le décollement du bloc ont, quant à eux, nécessité une journée supplémentaire à l'équipe. Ces estimations conduisent ainsi à un ratio d'un bloc pour 20 jours/homme soit 0,05 bloc/jour/homme. Ce chiffre concerne une extraction dans le contexte particulier du ouadi el-Jarf où les blocs étaient, semble-t-il, plutôt extraits en fonction des besoins et surtout de la proximité des gisements.<sup>24</sup> L'extraction que nous avons expérimentée s'appelle un défermage ; c'est un cas particulier qui consiste à retirer le premier bloc d'un front de taille et qui nécessite la découpe de 3 tranchées verticales. Dans une logique de production rationnelle, la moyenne du temps d'extraction peut baisser considérablement. Une exploitation intensive à l'instar de celle de la pyramide de Khephren par exemple (fig. 4) offre en effet des conditions d'extraction optimales. Dans ce cas – un découpage régulier sur une grande surface – le dégagement d'un bloc ne nécessite que la taille de deux tranchées verticales perpendiculaires l'une à l'autre ; chacune d'elles permet en effet de dégager deux faces de bloc. Si on reste sur le cas d'un bloc de 1 m<sup>3</sup>, cette organisation de la découpe implique le dégagement de 1,25 m<sup>3</sup> de pierre ce qui amène le ratio à 1/14, soit 0,071 bloc/jour/homme. Avec l'extraction de blocs plus gros, ce ratio peut encore être amélioré.

Ces résultats peuvent être confrontés à l'expérimentation NOVA<sup>25</sup> qui s'était intéressée à l'extraction des pierres pour la construction de la grande pyramide. Celle-ci ayant été réalisée avec des outils modernes en acier, la comparaison entre les deux expériences demeure toutefois très limitée. Il est rapporté qu'une équipe de 12 hommes ont produit 186 blocs en 22 jours, ce qui représente un rendement de 186/264 soit 0,70 bloc/homme/jour. Compte tenu de l'utilisation d'outils en acier, Mark Lehner pondère toutefois ce ratio à 322 blocs par jour pour 1212 hommes, soit un rendement à 0,26 bloc/homme/jour. Avec de telles performances, la grande pyramide qui est constituée d'environ 2,3 millions de blocs<sup>26</sup> pourrait être construite en 20 ans. Selon nos estimations, l'extraction nécessiterait des effectifs plus importants ; pour atteindre un rythme quotidien de 340 blocs, il faudrait 4788 hommes. Si on augmente la période du chantier de la pyramide à 27 ans, ce qui est tout à fait envisageable, la production journalière requise descendrait à 250 blocs, ce qui nécessiterait en théorie 3521 carriers.<sup>27</sup>

23 Dans un tout autre contexte et à titre d'exemple, le rendement avec des outils en acier à Pétra, dans du grès, à la période romaine, a été estimé à 0,066 m<sup>3</sup>/h (Bessac (2007a), p. 360).

24 Au ouadi el-Jarf, le nombre de blocs nécessaires à la fermeture des galeries n'était pas suffisant pour développer des zones en extension qui auraient été plus productives. Une exploitation des ressources à plus grande échelle aurait d'autre part eu un fort impact sur le paysage, ce qui aurait été en contradiction avec la vocation du complexe portuaire qui au contraire cherchait à dissimuler des galeries de stockage.

25 Lehner (1997), pp. 206-209 ; Lehner (1996), pp. 46-93.

26 Avec une base de 230,22 m de côté et une hauteur de 146,59 m, la pyramide a un volume total de 2 592 297 m<sup>3</sup>. Elle est partiellement construite sur un massif rocheux, qu'on estimera à 330 000 m<sup>3</sup>, si bien que le volume de la maçonnerie est d'environ 2 260 000 m<sup>3</sup>. Selon M. Lehner le bloc moyen mis en place dans la construction aurait un volume d'environ 1 m<sup>3</sup> (Lehner (1997), p. 207). Avec une hauteur moyenne de 0,73 m (146,59/201 hauteurs d'assises), le bloc parallélépipédique moyen mesurerait 1 x 1,36 m de côté. Si on soustrait les volumes de vides et les blocs spéciaux de dimension hors norme, on peut raisonnablement évaluer le nombre de blocs installés à 2 300 000. Petrie estime quant à lui que 500 blocs devaient être extraits et installés quotidiennement : Petrie (1930).

27 On raisonne ici sur le principe que la pyramide est entièrement bâtie avec des blocs. Rien n'interdit cependant qu'elle soit en partie construite avec des caissons remplis de moellons, de déchets de taille ou de sable.

Enfin, nous avons constaté que la méthode d'extraction que nous avons expérimentée générât une quantité considérable de déchets dont le ratio est d'environ 1 pour 1 voire supérieur : un volume de pierre extrait produit le même volume en déchet. En considérant que le coefficient de foisonnement de la roche calcaire soit d'environ 1,5 – ce ratio correspond à une moyenne basse du calcaire fragmenté ou une roche concassée – nous obtenons pour 1 m<sup>3</sup> de roche extraite 1,5 m<sup>3</sup> de gravats, un matériau compactable et très stable qui peut servir pour la réalisation de rampes ou d'échafaudages. Si on estime que 2 000 000 m<sup>3</sup> ont été extraits sur le plateau de Gizeh pour la construction de la pyramide, c'est près de 3 000 000 m<sup>3</sup> qu'il a fallu évacuer ou plutôt utiliser. Avec un tel volume de matière disponible qui était produit en continu au fur et à mesure de la production des blocs, on comprend qu'il était logique et évident de l'utiliser pour élever des rampes ou des échafaudages. Ce constat va ainsi à l'encontre de l'idée parfois avancée que des systèmes autres que les rampes aient pu être utilisés pour monter les blocs dans la construction. On imagine ainsi volontiers qu'une grande rampe frontale ait pu être construite progressivement à mesure que s'élevait la pyramide ; une hypothèse qui n'interdit pas non plus la présence de rampes annexes reliant différents gisements à celle-ci.<sup>28</sup> À la fin du chantier, les matériaux constituant les rampes pouvaient être nivelés et étendus en lieu et place des carrières ou pour corriger la topographie du site.

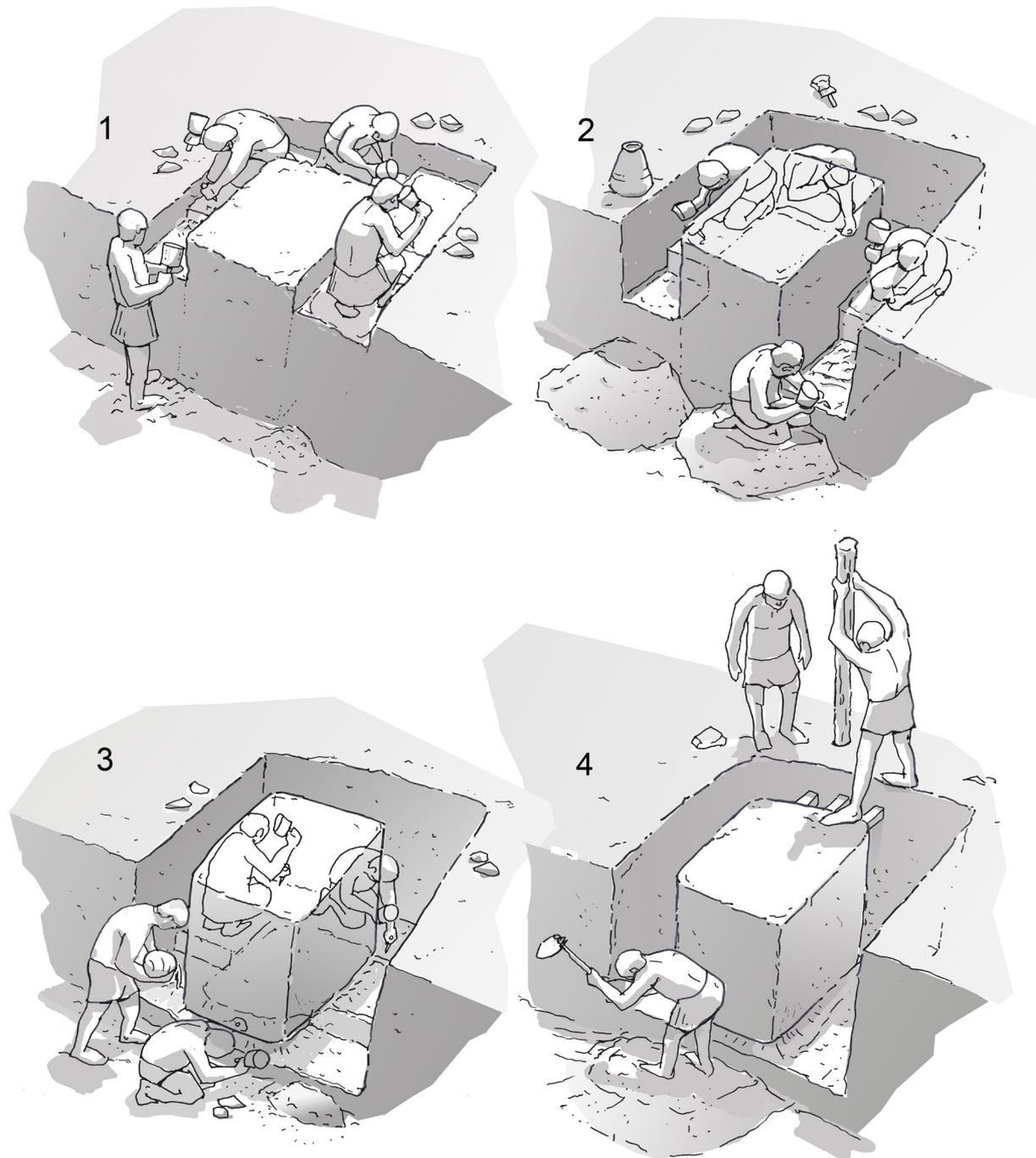
## Conclusion

La découverte d'une carrière et des outils associés à ouadi el-Jarf a livré de nombreuses informations inédites sur les procédés d'extraction à l'Ancien Empire (fig. 21). En confrontant les outils retrouvés sur place – pics à gorge, cordes, pointes de ciseau en cuivre, maillets, enclumes – avec les traces laissées par ceux-ci mêmes dans les fonds des tranchées, nous avons affiné notre connaissance sur les méthodes employées. L'expérimentation que nous avons entreprise sur place, dans les conditions identiques à celles d'autrefois, avec les outils comparables et avec la même roche, a quant à elle permis non seulement de retrouver les gestes et les postures des anciens carriers mais également de comprendre comment s'organisait le partage des tâches au sein des équipes. Rappelons ici les informations majeures mises en exergue par notre expérience :

- Une remarquable connaissance de l'environnement géologique de la part des carriers.
- L'indispensable battage à froid régulier des pointes des ciseaux en cuivre pour les affûter.
- L'humidification du calcaire pour l'attendrir.
- La technique de fracturation de la pierre à l'aide de pièces de bois entrées en force.
- L'énorme quantité de déchets générée par la méthode d'extraction.

Les gestes et les méthodes qui ont été opérés à ouadi el-Jarf et que nous restituons à travers notre expérimentation sont ceux d'hommes très qualifiés, réunis en équipes extrêmement soudées. Nos résultats rapportent la grande force du système managérial égyptien qui savait développer des synergies en divisant adroitement les tâches certes, mais en s'appuyant surtout sur une combinaison parfaite des compétences de ses ressources humaines. Le marquage systématique des outils, des blocs ou des jarres tel que nous l'observons à ouadi el-Jarf, témoigne de l'importance de l'organisation des effectifs au sein des équipes. C'est ce qu'atteste également l'exceptionnel papyrus de Merer découvert sur le site.

28 Sur l'hypothèse de la rampe frontale voir Lauer (2003), pp. 282-286. L'auteur estime qu'une telle rampe aurait un volume de 1 560 000 m<sup>3</sup> environ, soit en deçà de la masse de déchets générés par l'extraction.



**Fig. 21.** La restitution en 4 étapes de l'extraction d'un bloc à ouadi el-Jarf par une équipe de 4 personnes : 1) préparation du front de taille et mise en place des trois tranchées verticales ; 2) creusement des tranchées ; 3) poursuite du creusement des tranchées verticales et creusement d'une sape périphérique à la base du bloc ; 4) mise en tension de la pierre pour la fracturer à sa base à l'aide de butons en bois enfoncés en force.

## Bibliographie

- Abdul Massih J. et Bessac, J.-Cl. (2009), *Glossaire technique Trilingue de la Pierre. L'exploitation en carrière*, Guides Archéologiques de l'Institut Français du Proche-Orient 7, Damas.
- Arnold, D. (1991), *Building in Egypt, Pharaonic Stone Masonry*, New York : Oxford University Press.
- Barsanti, A. (1906), 'Fouilles de Zaouiét el-Aryân, 1904-1905', *ASAE* 7, pp.257-286.
- Bessac, J.-Cl. (2007a), *Le travail de la pierre à Pétra : technique, économie et culture*, Paris : ERC.
- Bessac, J.-Cl. (2007b), 'Étude technique et interprétations du monument rupestre de Qadamgah (Fars)', *Iranica Antiqua* 42, pp. 185-206.
- Bessac, J.-Cl. (2014), 'Le travail de la pierre à Aksum', *Annales d'Éthiopie* 29, pp. 147-178.
- Clarke, S. et Engelbach, R. (1930), *Ancient Egyptian Construction and Architecture*, Londres.
- Goyon, J.-Cl., Golvin, J.-Cl., Simon-Boidot, Cl. et Martinet, G. (2004), *La construction pharaonique du Moyen Empire à l'époque gréco-romaine*, Paris : Éditions Picard.
- Goyon, G. (1977), *Le secret des bâtisseurs des grandes pyramides*, Khéops, Paris : Éditions Pygmalion.
- Goyon, G. (1978), 'Les rangs d'assises de la Grande Pyramide', *BIFAO* 78, pp. 405-413.
- Harrell, J. A. et Storemyr P. (2015), 'Limestone and sandstone quarrying in Ancient Egypt: tools, methods and analogues', dans *Marmora, An international journal for archaeology, history and archaeometry of marbles and stones*, vol. 9, pp. 19-43.
- Hölscher, U. (1912), *Das Grabdenkmal des Königs Chephren*, 1912, Leipzig : J. C. Hinrichs'sche Buchhandlung.
- Isler, M. (2001), *Sticks, Stones, and Shadows, Building the Egyptian Pyramids*, Norma: University of Oklahoma Press.
- Kelany, A., Harrell, J. et Brown, V. M. (2010), 'Dolerite pounders: Petrology, sources and use', *Journal of Lithic Technology* 35/2, pp. 127-148.
- Lauer, J.-Ph. (1936), *La pyramide à degrés, l'architecture*, tome 1, Le Caire.
- Lauer, J.-Ph. (2003), 'Levage, bardage et transport de gros blocs de pierre dans l'Égypte ancienne', dans *Encyclopédie des Métiers, La maçonnerie et la taille de la pierre, tome 5 / Les outils*, pp. 278-286, Paris : Compagnons du Devoir.
- Lehner, M. (1996), 'The Pyramid', dans Barnes M., Brightwell R., Von Hagen A., Lehner M. et Page C., *Secrets of Lost Empires, Reconstructing the Glories of Ages Past*, Londres et New York, pp. 46-93.
- Lehner, M. (1997), *The complete pyramids*, London: Thames and Hudson.
- Lehner, M. et Hawass, Z. (2017), *Giza and the Pyramids. The Definitive History*. Chicago : University of Chicago Press.
- Lucas, A. (1927), 'Copper in Ancient Egypt', *JEA* 13, pp. 162-170.
- Monnier, F., 'Le mégalithisme appareillé dans les pyramides de l'Ancien Empire' (en préparation).
- Noël, P. (1968), *Technologie de la pierre de taille*, Paris : Société de diffusion des techniques du bâtiment et des travaux publics.
- Odler, M. (2016), *Old Kingdom Copper Tools and Model Tools*, Archaeopress Egyptology 14, Oxford.
- Petrie, F. (1917), *Tools and Weapons*, Londres.
- Petrie, F. (1930), 'The Building of the pyramid', *AncEg*, part II, june, pp. 33-39.
- Reisner, G. A. et Fisher, C. S. (1914), 'Preliminary report on the work of the Harvard-Boston Expedition in 1911-1913', *ASAE* 13, 1914, pp. 227-252.
- Reisner, G. A. (1931), *Mycerinus. Temples of the Third pyramid at Giza*, Cambridge: Harvard University Press.
- Tallet, P., Marouard, G. et Laisney, D. (2012), 'Un port de la IVe dynastie au Ouadi el-Jarf (mer Rouge)', *BIFAO* 112, pp. 399-346.
- Tallet, P., (2014), 'Des papyrus du temps de Chéops au ouadi el-Jarf (golfe de Suez)', *BSFE*, 188, pp. 25-49.
- Tallet, P., (2017), *Les papyrus de la mer Rouge I. Le journal de Merer (Papyrus Jarf A et B)*, *MIFAO* 136, Le Caire.
- Tarrell, J. et Petrie, F. (1925), 'The Great Pyramid Courses', *Ancient Egypt Part II*, June, pp.36-39.
- Vyse, H. (1840), *Operations Carried on at the pyramids of Gizeh in 1837 with an account of a voyage into Upper Egypt, and an appendix*, Vol. 1, London.