
Apports de la technologie et de la pétrographie pour la caractérisation des meules

*Annick SCHOUMACKER**

RÉSUMÉ

L'objet de cette communication est de présenter une nouvelle méthodologie pour l'étude des meules préhistoriques. Étant donné la variabilité morphologique et pétrographique des outils de meulage préhistoriques, j'ai pensé que les roches utilisées possédaient des caractéristiques abrasives spécifiques. A partir de l'analyse des méthodes de fabrication industrielle des meules actuelles observées à la Norton SA, j'ai tenté de dégager les paramètres pertinents de ces outils. Ensuite, j'ai cherché à mettre en relation les caractéristiques d'abrasivité des matériaux et les caractéristiques pétrographiques des roches, en vue de l'étude du matériel archéologique.

ABSTRACT

The aim of this communication is to present a new methodology for the study of prehistoric grindstones. In view of the morphological and petrographic variability of prehistoric grinding tools, I thought that the rocks used had specific abrasive characteristics. From the analysis of methods of manufacturing present grinding stones observed in the Norton SA, I tried to draw the relevant parameters of those tools. Then, I attempted to relate the abrasive characteristics of materials and the petrographic characteristics of rocks, with a view to examining the archaeological remains.

Les vestiges archéologiques regroupés sous le terme de « meules » sont divers dans leurs fonctions potentielles autant que dans leurs matières premières. Dans les définitions du langage courant (Petit Robert), deux types sont rassemblés sous ce mot : d'une part les meules à broyer ou moudre et d'autre part les meules à aiguiser ou polir. Archéo-

logiquement, cette catégorie d'outils est mal définie, et l'on utilise plusieurs termes. On peut les regrouper dans deux catégories : les outils fonctionnant par percussion, qui effectuent un concassage (broyeur, pilon, mortier, percuteur), dont il ne sera pas question ici, et les outils fonctionnant par frottement, effectuant soit un broyage

(meule, molette = matériel de broyage), soit un polissage (polissoir, aiguiseur). Les critères de classification sont de type morphologique ou fondés sur l'observation des traces macroscopiques.

Pétrographiquement, les matières premières peuvent être très variées dans un même ensemble archéologique et aller du galet de quartz au basalte en passant par une quantité de roches plus ou moins grenues telles que la rhyolite, le granite, les grès plus ou moins fins, les calcarénites...

Les différences morphofonctionnelles, typologiques et pétrographiques au sein d'un même ensemble archéologique reflètent vraisemblablement un choix délibéré des hommes préhistoriques en fonction des ressources et des besoins. Pour mettre en évidence ce choix, j'ai tenté de comprendre l'impact des divers paramètres qui entrent en jeu dans un matériau abrasif. Les meules sont des outils couramment utilisés de nos jours pour une grande quantité de travaux divers tels que l'usinage de pièces métalliques, la taille du cristal, le défibrage du bois pour la fabrication du papier, les soins dentaires, le broyage des graines de moutarde... Actuellement, les meules sont agglomérées, c'est-à-dire fabriquées artificiellement avec deux éléments principaux : les grains d'abrasif et l'agglomérant. Je me suis donc adressée à une entreprise fabriquant des meules agglomérées et des matériaux abrasifs, la Norton SA, qui m'a accueillie dans son service-laboratoire de l'usine de la Courneuve pendant une quinzaine de jours. Je tiens à remercier cette entreprise pour tous les renseignements présentés ici.

La chaîne de fabrication :

- Les abrasifs et les agglomérants sont livrés séparément à l'usine et contrôlés, puis ils sont sélectionnés en fonction de la meule que l'on désire fabriquer et de sa future fonction.

Cette phase pourra permettre de comprendre les propriétés pertinentes des matériaux constitutifs.

- Les matières premières sont mélangées dans des proportions diverses selon les caractéristiques que l'on désire obtenir pour la meule finie. On doit donc déterminer les proportions des constituants qui vont entrer en jeu dans le mélange.

Ce stade permettra de voir le rôle de chaque élément dans l'association et l'influence sur le type de travail à effectuer.

- Les éléments sont malaxés pour donner un mélange homogène de manière à éviter les défauts de répartition des éléments et de cohérence dans

la meule finie qui risqueraient d'induire une rupture.

Cette phase est trop étroitement liée aux contingences industrielles actuelles pour que l'on puisse en tirer des informations applicables aux problèmes archéologiques, si ce n'est pour soulever le problème des matériaux hétérogènes rencontrés sur les sites.

- Le mélange est ensuite pressé dans des moules sous des presses hydrauliques pour acquérir la forme et les dimensions voulues ainsi que leur compacité définitive.

A ce stade, on pourra appréhender le rôle des pores et de la compacité.

- On peut ensuite avoir un préusinage à cru pour améliorer la forme.

Cette phase n'a pas d'implications archéologiques.

- La meule est ensuite cuite dans un four tunnel pour devenir solide par vitrification de l'agglomérant.

Cette phase donnera des renseignements quant à la température de cuisson et aux transformations qui s'opèrent permettant d'interpréter les cas de chauffe du matériel archéologique.

- Les meules sont ensuite usinées pour acquérir la forme et les dimensions définitives désirées par le client.

Cela permettra d'appréhender le rôle de la morphologie et de la surface de travail. Pour usiner les meules, ce sont d'autres meules qui sont utilisées ; on pourra alors avoir des éléments sur la vitesse d'usure, la formation du lustrage et le dressage.

- Les produits finis sont ensuite contrôlés avant l'expédition. Un certain nombre de caractéristiques sont alors vérifiées.

Cette phase nous permettra de déterminer les possibilités de mesure sur des produits finis et les propriétés déterminant les caractéristiques pertinentes d'un matériau abrasif.

Les meules sont ensuite utilisées pour diverses tâches comme l'usinage de pièces métalliques : dans ce cas, l'outil est un disque ou un cylindre qui tourne sur lui-même et contre lequel on applique la pièce à travailler. Dans d'autres cas, comme celui des meules à moutarde, ce sont deux éléments qui tournent en sens inverse entre lesquels on place l'élément à broyer.

Archéologiquement, on peut comparer ces deux catégories respectivement aux familles des

polissoirs et du matériel de broyage. Cela permettra de comprendre les choix des meules lorsqu'on recherche une utilisation précise.

Cette chaîne ne sera pas décrite phase par phase, mais les problèmes seront abordés dans trois parties : la spécification, l'utilisation et les contrôles.

La spécification

Les meules possèdent une spécification, c'est-à-dire une série de paramètres intrinsèques qui caractérisent leurs capacités abrasives. L'utilisateur peut alors choisir la meule adaptée à la fonction qu'il désire. Sont pris en compte : la nature de l'abrasif, la grosseur du grain, le type d'agglomérant, le grade et la structure.

Nature de l'abrasif

Les abrasifs sont des corps cristallisés durs qui, par une action mécanique de type frottement sur des corps moins durs, sont capables de découper dans ceux-ci des petits copeaux (Norton, 1972 : 7). Ils sont caractérisés par la dureté, la résistance à la fracture et la morphologie. L'association de ces trois paramètres définit un type de grain.

La *dureté* est « la résistance d'un minéral à la destruction mécanique de sa structure » (Foucault, Raoult, 1984) et se traduit « par sa capacité à rayer d'autres corps » (Norton, 1972 : 7). Le grain d'abrasif doit toujours être choisi plus dur que la matière à travailler ; en effet, le grain ne pourra enlever de la matière et agir comme un rabot que s'il est plus dur. Si les duretés sont équivalentes, il y aura usure concomitante des éléments par écrasement des minéraux les uns contre les autres, ce qui n'est pas valable pour des questions de rendement. Pour évaluer ces relations de dureté, il existe des échelles comparatives comme l'échelle de Mohs, fondée sur le fait que les minéraux se raient entre eux ; on obtient dix graduations qualitatives. L'échelle de Knoop est quantitative, elle utilise des mesures prises par pénétration d'un élément de référence dans chaque matériau, c'est une échelle de « duretés proportionnelles » (Norton, 1972 : 7).

On utilise actuellement des abrasifs fabriqués (artificiels) dont on cherche constamment à améliorer la dureté pour travailler des matières indus-

trielles de plus en plus dures. La catégorie des minéraux pouvant servir d'abrasifs est située au sommet de l'échelle de dureté, et les abrasifs artificiels sont recherchés toujours plus durs. Cependant, le diamant reste de loin la matière la plus dure. Pour le travail des matières tendres comme le bois, on utilise des abrasifs naturels sur papier (silex, quartz) qui sont amplement suffisants. Les alundums (alumine), de dureté 9, seront utilisés pour l'usinage des aciers ordinaires et des aciers spéciaux, mais aussi dans le cas des meules à moutarde. Les crystalons (carbure de silicium), de dureté 9,2, seront utilisés dans le cas de matières dures et cassantes ou de matières tendres et élastiques.

En archéologie, les types d'abrasifs ne seront pas aussi variés, mais on peut supposer que les mêmes propriétés de dureté ont été recherchées. La présence fréquente du quartz à l'état naturel – sables, grès, quartzites, roches endogènes acides... – et sa grande dureté (7) en font un abrasif potentiel important. Les feldspaths possèdent eux aussi une dureté compatible avec une utilisation comme abrasif et sont fréquents dans beaucoup de roches. L'émeri et le corindon de dureté 9 sont des éléments naturels plus rares dans la nature, et leur utilisation ancienne n'est attestée que rarement : la présence du corindon a été déterminée sur le site syrien de Ras Ibn Hani par J.-C. Échallier (Bordreuil *et alii*, 1983 : 413) ; son utilisation est présumée sur le site mésopotamien de Larsa (Schoumacker, sous presse).

La *résistance à la fracture* ou la fragilité traduit la capacité du grain à renouveler ses arêtes. Le grain d'abrasif au travail est en contact avec la matière et subit des efforts qui peuvent l'amener à la rupture. Un grain possédant une trop grande résistance va s'user et s'émousser et va perdre les qualités de coupe pour lesquelles il a été choisi. Un grain possédant une résistance trop faible va se fragmenter et disparaître rapidement : la meule s'usera trop vite. Une fragilité permettant la formation constante d'arêtes vives sans usure exagérée de la meule sera recherchée. Cet aspect est important dans l'industrie, où le choix de la fragilité du grain est possible. Archéologiquement, le choix d'une roche à dominance feldspathique (exemple des arkoses), avec des feldspaths possédant de nombreux plans de clivages (zones de fragilité), ou d'une roche à dominance quartzreuse n'aura vraisemblablement pas la même signification.

La *morphologie* du grain est importante pour la capacité d'attaque de la matière. En effet, un grain présentant des arêtes vives aura une capacité de coupe plus importante qu'un grain arrondi. Lorsqu'on observe à la loupe les morphologies des grains d'abrasifs Norton, on se rend compte que les grains présentent des angles plus ou moins aigus. Leur morphologie étant liée à leur comportement à la fracture, un grain qui se présente avec des arêtes aiguës aura tendance à les renouveler à chaque fracture soit au cours du concassage pour les amener à la grosseur désirée, soit au cours du travail. Chaque type d'abrasif Norton correspond à des types de travaux différents. Après observation à la loupe binoculaire, j'ai tenté de construire des groupes morphologiques pour les comparer à leurs propriétés. Selon le résultat que l'on veut obtenir – enlever beaucoup de matière sans se préoccuper de l'état de surface final –, on choisira un grain peu coupant (travail de dégrossissage) ; si la quantité de matière à enlever est en quantité moins importante mais que le travail doit être plus propre, on choisira un grain coupant.

Archéologiquement, le choix d'une roche détritique ou non détritique pourra être adapté à des utilisations diverses. Dans une roche détritique, les grains seront plus ou moins arrondis alors que dans une roche non détritique les grains seront sous leur forme cristalline avec des arêtes vives.

Le grain représente l'outil élémentaire, et ses dimensions ont donc une importance capitale dans le type de travail qui doit être accompli. La dimension des grains est symbolisée par un nombre pouvant varier de 8 à 900. Il indique le nombre de mailles au pouce de tamis à travers lequel passe le grain qui est arrêté par le tamis suivant. Au-delà de 240, la calibration est effectuée par lévigation (variation du temps mis par des corps de même densité mais de volume différent pour atteindre le fond d'un récipient rempli de liquide).

La régularité du travail dépend de l'homogénéité de la granulométrie, c'est-à-dire qu'un mélange de grains de tailles diverses doit être évité. On considère trois critères pour le choix de la grosseur du grain : la quantité de matière à enlever, le fini désiré et les propriétés de la matière à travailler. Un grain grossier permettra d'enlever davantage de matière, donnera un fini irrégulier et attaquera des matières tendres et élastiques. Si la matière à travailler est dure et cassante, elle ne permet pas le

départ de copeaux profonds, et il faudra alors utiliser un grain plus fin.

Dans le cas des meules à moutarde, on veut réduire en poudre des graines de moutarde, matière tendre ; on recherchera un bon mordant et donc un grain grossier de 36 à 46. Archéologiquement, cette information est importante car pour un travail de meunerie le problème est équivalent. De plus, on sait que « le travail du meunier consiste, tout en conservant le germe, à détacher l'amande farineuse du son en broyant le grain. C'est ainsi que l'on obtient la farine » (CIFAP, sans date). La séparation doit se faire par cisaillement en diminuant le rôle de la composante compressive (encyclopédie Larousse) ; une granulométrie grossière permettra de coincer la graine et de jouer sur la plus grande élasticité de l'enveloppe (fig. 1 : A et B). Pour le travail de décorticage des grains de céréales vêtues, il ne faut surtout pas qu'il y ait écrasement des graines ; le travail ne doit donc s'effectuer que par cisaillement, sans composante compressive (fig. 1 : C) : la meule et la molette doivent donc conserver au cours du travail une certaine distance d'écartement. Cela est difficile à contrôler dans le cas des meules néolithiques à mouvement linéaire, c'est pourquoi on peut penser que cette phase s'effectuait par un autre moyen, dans un mortier de bois par exemple, comme dans les descriptions ethnographiques ; des vestiges archéologiques de mortiers et pilons en bois sont signalés par P. et A.-M. Pétrequin sur les sites de Chalain et Clairvaux.

On peut penser que l'homogénéité de granulométrie n'est pas prépondérante dans le cas du blé, mais pour un polissoir, par exemple, ce type de caractéristique devait être important. Il est vraisemblable qu'une pierre à polir devait être choisie pour sa granulométrie homogène et selon la grosseur de grain désirée pour le type de fini envisagé. Le choix dans le milieu naturel d'un matériau grenu homogène ne pose pas de problèmes majeurs. En effet, les roches endogènes possèdent des cristaux dont la dimension dépend de la vitesse de refroidissement lors de leur formation, c'est-à-dire que ces roches possèdent une certaine homogénéité de granulométrie, sauf dans quelques cas particuliers. En revanche, les roches exogènes détritiques possèdent des éléments qui ont subi un certain transport ; selon l'agent de migration, ces éléments seront triés ou non. Dans les dépôts gréseux, en fonction des variations des

apports et des variations climatiques, il existera des lentilles de granulométrie différente et de classement différent.

Un choix varié de matières premières en ce qui concerne la nature des grains est donc possible.

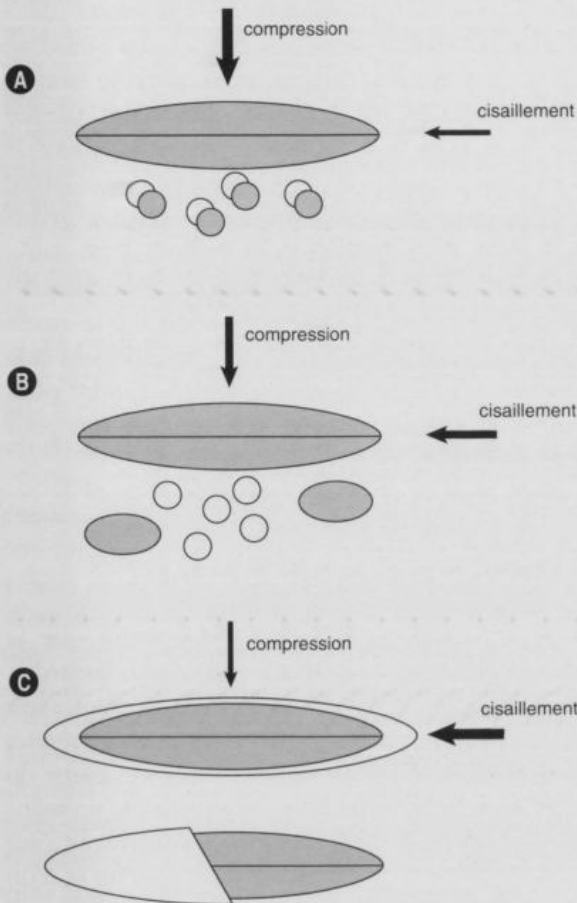


Fig. 1. Le broyage. A. Farine et son mélangés. B. Farine et son triés. C. Décorticage.

L'agglomérant

L'agglomérant retient les grains d'abrasifs en les maintenant entre eux par de petits piliers (fig. 2). De nos jours, il existe trois familles d'agglomérants, qui seront choisis en fonction des dimensions de la meule, des efforts qu'elle aura à subir, de sa vitesse de rotation... On peut citer les agglomérants métalliques utilisés pour les meules diamant, les agglomérants organiques (résinoïdes, latex, schellac...) et les agglomérants vitrifiés, qui sont les plus communs. Les premiers essais de fabrication de meules agglomérées ont été effectués en 1873 dans une ancienne poterie avec de l'argile comme

agglomérant. Aujourd'hui, les agglomérants vitrifiés sont constitués par un mélange d'argile, de feldspath, de quartz, de chaux... dans des proportions choisies. La phase de cuisson est délicate, elle donne à l'agglomérant une structure amorphe proche de celle du verre. En général, les meules sont cuites à 1 250° C, et la cuisson dure 120 heures. Si la température est inférieure ou si les proportions des composants de l'agglomérant sont mauvaises, l'agglomérant cristallise au lieu de se vitrifier, et la meule sera moins solide à cause des plans de clivages générés par la cristallisation.

Lorsqu'on trouve des fragments de meules archéologiques chauffées, les compositions minéralogiques des roches étant souvent proches des compositions des meules vitrifiées (dans le cas des grès, par exemple, on retrouve la structure abrasif-agglomérant, c'est-à-dire grains-ciment constituée de quartz, feldspath, argile, calcaire...), on pourrait imaginer un traitement thermique volontaire pour vitrifier le ciment.

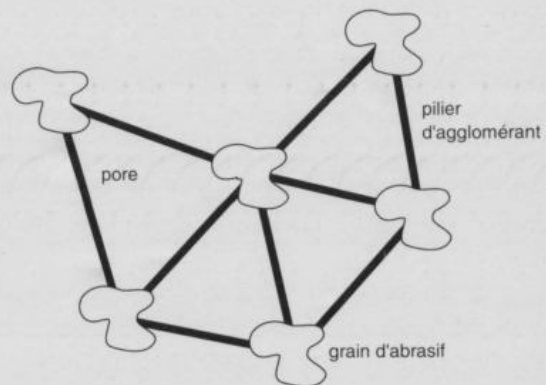


Fig. 2. Structure d'une meule agglomérée.

Cependant, la cuisson est un stade très délicat (température et temps de cuisson, proportions des composants de l'agglomérant) ; lorsqu'elle n'aboutit pas à la création d'une phase vitreuse, les propriétés ne sont pas améliorées.

La structure

La structure est l'indice de tassement des grains d'abrasif. Quand les grains sont espacés, la structure est ouverte, et, inversement, quand les grains sont serrés, la structure est fermée. Elle est caractérisée par un chiffre qui augmente quand le

pourcentage d'abrasif diminue. En pratique, la structure s'obtient lors du pressage de la meule mais toutes les structures ne sont pas faisables.

Archéologiquement, cette notion de structure ne sera pas abordée car les matières premières sont naturelles et la compaction diagénétique ne peut être appréhendée. De plus, la notion de compacité est directement traduite par le pourcentage de pores et sera donc abordée en même temps que le grade. Les notions de structure et de grade sont étroitement liées.

Le grade

La cohésion

Le grade est une notion empirique complexe. Il traduit la ténacité de la meule : les grains seront plus ou moins englobés et plus ou moins tenus par l'agglomérant, qui doit maintenir fermement le grain en position de coupe et doit le libérer après un travail suffisant. Le grade est un indicateur de la force avec laquelle l'agglomérant maintient en place les grains d'abrasif. Il indique la dureté de la meule. A quantité d'abrasif égal, une plus grande quantité d'agglomérant permettra de mieux retenir les grains. La variation du grade est liée à une variation des piliers d'agglomérant et donc à une variation du pourcentage de pores. Il est désigné par une lettre, du plus tendre, A (force de cohésion la plus faible), au plus dur, Z (force de cohésion la plus forte). La désignation du grade n'est pas le fruit d'une expression mathématique, elle provient de l'expérience. Mais cette notion intuitive est traduite mathématiquement par le pourcentage de pores ; il existe donc deux définitions du grade : l'une intuitive (indice de la force avec laquelle l'agglomérant maintient en place les grains d'abrasif), l'autre permettant une interprétation mathématique (valeur du pourcentage de pores en supposant les conditions de cuisson identiques) qui limite sa signification.

Dans le cas d'une roche, « la dureté traduit la résistance à l'usure qui se fait surtout par arrachement des grains (un grès mal cimenté est une roche tendre, bien que formée de quartz, minéral dur) » (Foucault, Raoult, 1984). La définition géologique de la dureté d'une roche se rapproche donc beaucoup de la notion de grade. Archéologiquement, cette notion paraît primordiale selon le travail que

l'on désire effectuer. En effet, pour le broyage et la réduction en poudre, il ne faut pas qu'une trop grande quantité d'abrasif se détache et se mélange, surtout si la poudre doit être consommée.

Les pores

Le rôle des pores est très important dans l'utilisation d'une meule. En effet, si les grains ne sont pas complètement englobés dans le liant ils auront plus de mordant. De plus, si la quantité d'agglomérant est faible, et par conséquent la quantité de pores forte, les grains s'évacueront facilement après usure, et les nouveaux grains apparaîtront en relief et prêts au travail. En outre, les pores permettent l'évacuation des copeaux : cette évacuation est facile dans le cas d'une meule tendre, ce qui permet d'éviter l'échauffement et le lustrage. On choisira donc un grade tendre pour travailler une matière dure et un grade dur pour travailler une matière tendre.

Conclusion

On peut donc aisément s'apercevoir que le choix d'une meule ne s'effectue pas au hasard et que des paramètres qui pouvaient sembler avoir une importance relative sont en fait de tout premier ordre. Il est, de plus, inconcevable de partir du principe que ces paramètres n'ont pas été ressentis par les hommes préhistoriques. La découverte sur un même site archéologique d'un grès fin et d'un fragment de granite aura des conséquences importantes sur l'interprétation fonctionnelle. Comme les classifications typologiques morphologiques de cette gamme d'outil n'ont jusqu'à présent pas donné de résultats fondamentaux, on est en droit de penser que la morphologie de ce type d'outillage n'est pas la variable prépondérante.

Le choix s'effectue aussi par la recherche des caractéristiques mécaniques des roches à partir des possibilités d'approvisionnement de chaque site.

Utilisation

Dureté d'action

Lors de l'utilisation un certain nombre de paramètres complémentaires dépendant des con-

ditions d'utilisation viennent s'ajouter à ceux qui sont déjà évoqués. Ils sont regroupés sous la notion de dureté d'action, qui correspond au comportement plus ou moins dur de la meule au travail. En effet, lors de l'utilisation, la dureté de la meule ne sera pas la même selon la vitesse de rotation, la dimension de la surface active et la profondeur de passe. On pourrait définir la dureté d'action comme la dureté apparente différente de la dureté intrinsèque et de la dureté des grains. Cette propriété est complètement intuitive, et les paramètres qui la gouvernent ne sont ni tous bien définis, ni quantifiés.

La profondeur de passe

La profondeur de passe correspond à l'épaisseur de la couche de matière enlevée (fig. 3 : A) ; elle est liée à la pression avec laquelle la meule est en contact avec la matière.

Dans l'industrie, on peut décider de la profondeur de passe et l'on se rend compte que si cette valeur augmente, à surface de contact égale, les efforts tangentiels subis par chaque grain seront d'autant plus importants. Les grains s'arracheront alors plus facilement et la meule se comportera comme si elle était plus tendre.

Pour des meules manuelles de type pré-historique, le paramètre de la profondeur de passe dépend de la pression avec laquelle on travaille. Cela signifie que les roches très dures devront être utilisées avec une force manuelle de frottement plus importante pour agir et renouveler les grains. Dans le cas d'un travail de polissage, les outils devront être dans des roches du type des grès, relativement tendre pour limiter la force nécessaire au travail. Dans le cas d'un travail avec deux éléments du type meule-molette, le problème est différent car il ne s'agit pas d'enlever une certaine quantité de matière mais d'écraser un élément pour le réduire en poudre. L'effort à produire n'est donc pas du même ordre, il est plus lié à des problèmes de mordant (cf. *Les pores*).

La surface de contact

La surface active de travail a un rôle important sur l'échauffement et sur la dureté d'action. En ce qui concerne l'échauffement, j'ai déjà parlé du rôle des pores, qui permettent l'évacuation des copeaux et facilitent la circulation d'un lubrifiant (dans le

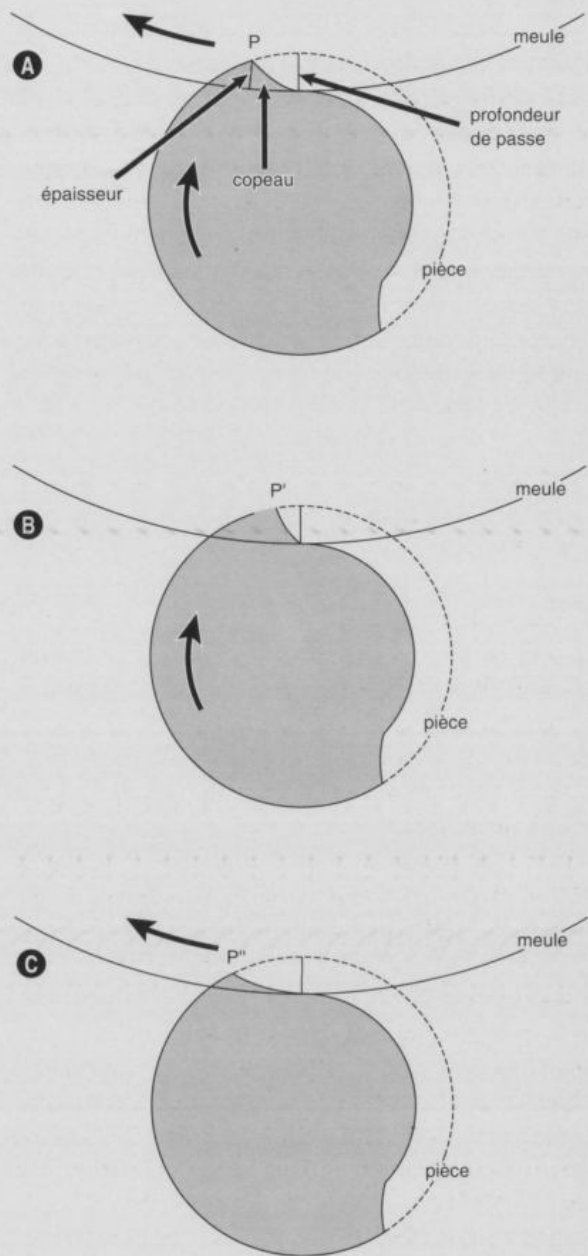


Fig. 3. Rôle de l'utilisation. A. Comportement standard. B. Augmentation de la vitesse de la pièce sur la meule. C. Augmentation de la vitesse de la meule sur la pièce.

cas d'un travail à sec, il faudra utiliser une meule plus tendre). Si la surface de contact augmente, le problème de l'échauffement sera plus aigu, et l'utilisation d'un liquide d'arrosage deviendra nécessaire.

Archéologiquement, l'utilisation d'un lubrifiant comme de l'eau ou de l'huile a pu s'avérer indispensable dans le cadre d'un travail de polissage lorsque l'objet à polir était de grandes dimensions.

La surface de contact joue également un rôle dans la répartition de la pression. En effet, la pression est répartie sur l'ensemble des grains qui composent la surface, ce qui signifie que, lorsque la surface augmente, la pression reçue par chaque grain est moindre. Les efforts tangentiels sont donc moins importants, et l'arrachement se fait moins facilement : la meule se comportera alors comme si elle était plus dure. Si la surface active est plus grande, il faudra choisir une meule plus tendre ou une meule à grains plus grossiers et plus espacés pour diminuer le nombre de points de contact et augmenter ainsi la pression sur chaque grain.

La vitesse d'utilisation

La vitesse d'utilisation est sensible au niveau de la dimension du copeau enlevé par chaque grain. En effet, plus la vitesse de l'objet sur la meule sera grande, plus le chemin parcouru par le grain dans le même laps de temps sera grand, et plus le copeau sera épais (fig 3 : B). En revanche, si la vitesse de la meule augmente, le même copeau sera enlevé plus rapidement et il sera plus petit (fig 3 : C). Selon la vitesse d'utilisation, les dimensions du copeau vont varier et les efforts seront différents. Si le copeau est grand, les efforts seront importants et les grains se détacheront plus facilement, la meule se comportera alors comme si elle était plus tendre.

Archéologiquement, dans le cas d'un polissage manuel, la vitesse d'utilisation n'aura vraisemblablement pas d'implications. Pour les meules à deux éléments, type meule-molette, on peut différencier les meules à mouvement « linéaire » de celles qui sont à mouvement « rotatif », deux types de vitesses seront alors à envisager. Dans le cas de meules à mouvement linéaire enchâssées, les vitesses et les pressions que l'on pourra exercer seront plus importantes.

L'usure

La notion de dureté d'action évoquée ci-dessus est en liaison étroite avec l'usure. En effet, lorsque la meule se comporte comme si elle était plus tendre, cela signifie qu'elle s'use plus rapidement puisque les grains sont facilement et rapidement évacués. Une meule bien adaptée à son travail, la meule idéale, serait une meule ni trop dure ni trop

tendre, dont les grains sont éliminés dès qu'ils sont usés et renouvelés par les suivants. Mais ce cas n'est pratiquement jamais réalisé et la meule subit soit une usure trop rapide, soit un lustrage progressif. Le phénomène de lustrage est dû à l'usure des grains, qui s'émoussent sans s'éliminer, et à l'encrassement des pores, qui se chargent de copeaux. Dans ce cas, il est nécessaire d'effectuer un dressage de la meule dont le procédé diffère selon le travail à effectuer. La meule peut être dressée au diamant, les grains sont alors arasés et se retrouvent à niveau avec l'agglomérant. Mais elle peut aussi être dressée à la molette, ce qui provoque des fractures par pression sur l'agglomérant et déchausse les grains. La surface de travail est formée, en fin de dressage à la molette, d'une couche abrasive irrégulière où des grains d'abrasifs intacts font saillie à des hauteurs différentes. Ce deuxième procédé sera choisi dans le cas où l'on recherche un gros débit sans précision.

Archéologiquement, cela soulève deux remarques : tout d'abord, dans le cas où la meule est parfaitement bien adaptée à son travail, les traces de poli ne doivent pas pouvoir s'observer puisque les grains sont évacués au fur et à mesure. L'étude des traces d'usage sur une meule est possible à condition qu'elle soit relativement mal adaptée, ce qui est un peu paradoxal. Cependant, il faut préciser que le choix d'une matière première s'effectue dans une gamme de roches naturelles qui ne permettent pas la maîtrise de tous les paramètres. Il est donc certain qu'aucune meule archéologique ne sera idéale.

Ensuite, le procédé de dressage à la molette est tout à fait assimilable au piquetage archéologique ou ethnologique de réavivage des surfaces actives. Ce piquetage permet de rendre à la meule le mordant nécessaire et en quelque sorte de la « réattendrir ». Il semble y avoir une liaison entre la grosseur de grain et le type de dressage. En effet, un grain grossier et un dressage à la molette sont adaptés à un travail grossier.

Le phénomène de lustrage est d'autant plus fréquent et tangible que cette adaptation est mauvaise ; le nombre des dressages en sera augmenté. La fréquence des réavivages dépendra de l'habileté de l'opérateur, ce qui fait entrer en jeu encore une fois l'expérience et l'habitude.

Ethnologiquement, on remarque également que les fréquences de réavivage varient selon les utilisateurs et peuvent s'effectuer à des stades diffé-

rents dans une certaine marge. En effet, le piquetage demande du temps et de l'énergie, et le choix du moment précis où il devient nécessaire dépend de l'appréciation de celui qui utilise la meule.

Bilan économique

Industriellement, le critère économique est « le seul critère objectif qui doit orienter, après essais, le choix de la meule la plus rentable » (Norton, 1929 : 11). Une meule tendre s'use vite, et, pour augmenter la rentabilité, on recherchera toujours la limite supérieure du grade admissible, car le meilleur rendement correspond en général à la meule dont le grade est le plus élevé. Cependant, il ne faut pas choisir un grade trop dur pour éviter un lustrage trop fréquent. « On sait en effet que les meules s'usent essentiellement au cours des dressages » (Norton, 1929 : 12). La recherche sera donc orientée vers une meule qui se lustre le moins possible.

Pour évaluer la meule la plus rentable, on effectue des essais comparatifs pour déterminer les coûts :

- coût de la meule par unité produite pendant sa durée de vie ;
- coût de la main d'œuvre et de l'entretien par unité produite ;
- coût du dressage ;
- coûts annexes de gestion des stocks, de contrôle et des machines.

Le pouvoir de coupe doit assurer :

Avantages	Objectifs
Débit important	Grande productivité Rapidité de fabrication
Coupe froide (pas d'échauffement)	Bonne qualité des pièces Peu de contrôle
Tenue de forme	Grande durée de vie de la meule Grande durée de vie de l'outil de réaffûtage Peu de renouvellement des meules Peu de contrôle
Polyvalence	Peu de stocks Peu de rotation

Archéologiquement, on est en droit de penser que des objectifs économiques semblables étaient importants, outre les contraintes culturelles. En effet, le choix de la meule par les hommes préhistoriques devait être adapté aux objectifs fonction-

nels mais aussi aux ressources en matière première. Pour la matière première, il faut prendre en compte le coût de la recherche selon les disponibilités, les coûts de l'extraction et du transport, en particulier lorsqu'il s'agit de blocs lourds. L'investissement de fabrication sera différent en fonction de la forme sous laquelle se présente la matière première : galet, bloc ou affleurement. En outre, selon les caractéristiques de la roche, la dépense d'énergie nécessaire à la mise en forme ne sera pas la même pour une roche de grade dur ou de grade tendre.

Lors de l'utilisation, la force de travail nécessaire et la fréquence des dressages demanderont de l'énergie. De plus, comme nous l'avons vu, c'est essentiellement au cours des dressages que la meule s'use, tout cela entrera donc forcément dans le choix d'une matière première.

On peut supposer que les matières premières recherchées seront, dans l'ordre de la chaîne opératoire :

- les plus proches et les plus facilement transportables ;
- celles qui sont naturellement préformées ;
- celles adaptées à un effort d'utilisation moindre ;
- celles nécessitant une faible fréquence de réavivage ;
- celles donnant une bonne qualité du produit fini.

Toutes ces contraintes n'entreront pas en compte au même degré, elles dépendront aussi des disponibilités naturelles, des contraintes culturelles et du niveau technologique de la population. Il y aura des priorités dans les choix des hommes préhistoriques, et il existera notamment une évolution chronologique ; à l'époque romaine par exemple, les meules en basalte vacuolaire pouvaient circuler sur de longues distances.

Les contrôles

Divers types de contrôles sont effectués dans l'usine, permettant de vérifier les qualités des produits tant à l'amont qu'à l'aval de la chaîne de fabrication. Les méthodes de contrôle font toujours intervenir des étalons de référence connus. Les contrôles sont effectués sur les matières premières avant la fabrication de la meule et sur les produits finis avant la vente. D'après ce que j'ai vu, il semble

qu'il ne soit pas nécessaire de mettre en œuvre une technique complexe d'observation pour l'étude du matériel archéologique. Il me semble en effet suffisant d'observer une surface sciée ou polie à la loupe binoculaire de chaque vestige archéologique pour évaluer les caractéristiques physiques. Ce type d'observation est courant en sédimentologie pour comprendre les milieux de dépôt des roches détritiques. Il existe donc des chartes visuelles permettant d'évaluer de manière reproductible les pourcentages de grains (fig. 4 : A), leur forme (fig. 4 : B) et leur classement (fig. 4 : C) dans la roche. Ces chartes peuvent également être utilisées à l'inverse pour évaluer le pourcentage de pores. De plus, la détermination pétrographique en lames minces de quelques échantillons raisonnablement sélectionnés permettra de connaître les minéraux et leurs duretés.

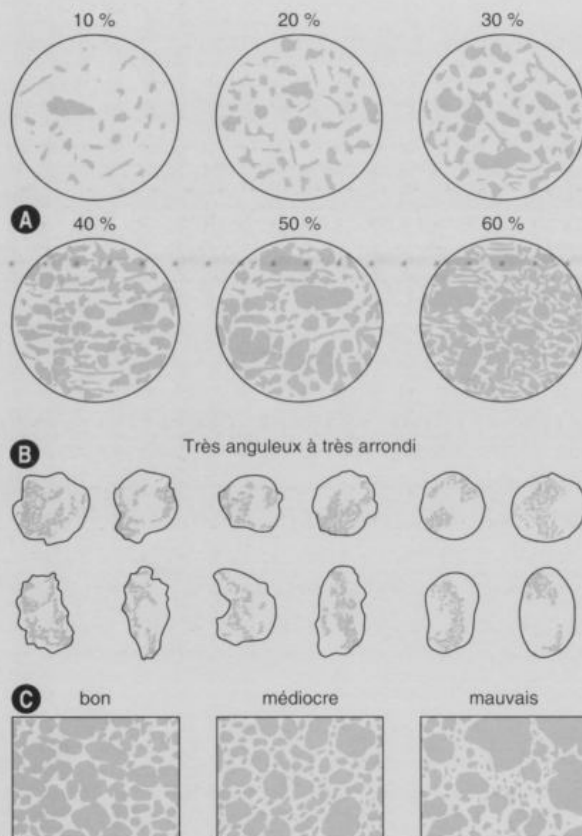


Fig. 4. Chartes visuelles de sédimentologie. A. Estimation du pourcentage de grains. B. Estimation de la forme des grains. C. Estimation du classement des grains.

Conclusion

Sur les sites archéologiques, la variabilité pétrographique est réelle et peut être observée

dans les collections et dans les travaux bibliographiques. Les typologies utilisées sont souvent morphofonctionnelles mais le lien avec la pétrographie et les caractéristiques physiques qui en découlent est rarement effectué. Les roches que l'on rencontre couramment dans les milieux naturels sont diverses, et j'ai tenté d'effectuer une classification des roches les plus fréquentes.

- Les *grès* sont des roches détritiques formées de grains de quartz de dureté 7, plus ou moins arrondis, de tailles variables et maintenus par un ciment. Selon la nature du ciment, calcaire ou siliceux, et sa quantité, les grades seront plus ou moins durs. Si ces grès possèdent un ciment siliceux très induré ou s'ils sont métamorphisés, ils donnent des quartzites (quartzites sédimentaires ou quartzites métamorphiques) dont le grade est très dur. Si les fragments feldspatiques sont nombreux, on a des grès arkosiques puis des arkoses. Ces dernières possèdent une grande proportion de feldspaths, de dureté 6, à nombreux plans de clivages. La famille des grès présente une gamme variée de possibilités qui lui permettent d'être adaptés à n'importe quelle utilisation, du point de vue des capacités physiques de travail. Leur étude nécessitera donc de prendre en compte tous les paramètres vus précédemment.

Il existe en sédimentologie une classification des grès selon la dimension des grains qu'ils contiennent (CSRPPGN, 1974) :

- lutites : de 0 à 50-62 microns ;
- grès fins : de 50-62 à 500 microns ;
- grès moyens : de 0,5 à 1 mm ;
- grès grossiers : de 1 à 2 mm ;
- rudites : plus de 2 mm.

L'utilisation d'une classification de ce genre, qui peut être assouplie pour l'archéologie, permet de faire des comparaisons valides entre sites. En effet, la détermination de fin ou grossier est trop souvent influencée par l'échantillonnage des roches présentes sur le site à la suite de la sélection effectuée par les hommes préhistoriques.

- Les *calcaires* sont des roches sédimentaires constituées de fragments calcitiques d'origine diverse, très fréquents dans les formations géologiques. Les cristaux de calcite ont une dureté de 3, la dimension de ces grains peut varier, mais dans l'ensemble la granulométrie reste fine ; ce sont des roches de grade tendre. Elles vont s'user rapidement et demander de fréquents dressages si on

veut un peu de mordant. Cependant, dans le cas des calcarénites, le grain est plus grossier, le mordant est donc meilleur et les dressages pourront être un peu moins fréquents ; la vitesse d'usure liée à l'utilisation reste équivalente mais celle qui est due aux ravivages sera diminuée.

- Les *roches magmatiques* proviennent du refroidissement du magma, on peut citer par exemple les granites et les basaltes. Elles sont classées selon deux critères : leur teneur en silice exprimée sous forme de quartz (acidité) et leur texture, qui dépend de la vitesse de refroidissement et traduit la granulométrie. Le précis de pétrographie de Jung (1963) définit la texture grenue comme la caractéristique d'une « roche entièrement cristallisée dont les éléments sont de même dimension, sensiblement celle d'un grain de blé ». On aura donc des familles de textures : texture grenue puis microgrenue, microlitique et vitreuse par diminution de la dimension des grains jusqu'à une structure amorphe, pour chaque famille de composition chimique. On peut citer trois familles :

Pôle riche en silice	→	Pôle pauvre en silice
granite microgranite rhyolite obsidienne		diorite microdiorite andésite obsidienne
		gabbro microgabbro ou dolérite basalte tachylite

La structure des roches magmatiques peut être homogène comme dans le cas des granites, schisteuse ou gneissique, c'est-à-dire présentant des lits de minéraux de duretés différentes (cas des roches métamorphiques de type gneiss ou micaschiste), ou bien vacuolaire comme certains basaltes ou les ponces. Ces dernières sont formées de bulles séparées par de minces parois de verre. Les roches vacuolaires permettent le renouvellement automatique du mordant en évitant le piquetage.

Chaque type de roche présente donc des caractéristiques de granulométrie et de grade précis. Or nous savons maintenant qu'un grade tendre permettra un polissage rentable et qui sera amélioré par des grains durs et coupants. Selon la granulométrie, le fini sera plus ou moins fin et pourra donc correspondre à des phases différentes du travail : dégrossissage, polissage...

Un grade tendre permettra également une mise en forme et un entretien, par bouchardage ou piquetage, facile puisque les éléments qui retien-

nent les grains ensemble sont facilement cassés. Mais l'usure sera également plus rapide.

De plus, pour un travail de broyage, de nombreux grains de la roche vont se détacher et se mélanger à la poudre. Dans ce type de travail, une granulométrie fine ne sera pas très favorable car le mordant ne sera pas suffisant. Il faudra y suppléer par un piquetage répétitif de façon à mettre en relief des groupes de petits grains équivalant à une granulométrie plus grossière. La vitesse d'usure en sera accentuée.

Un grade dur aboutira à un lustrage de la meule qui nécessitera un dressage et usera la meule, mais permettra une réduction du nombre de fragments rocheux mêlés à la poudre. Cependant, la mise en forme et l'entretien seront plus difficiles. Une roche naturellement vacuolaire évitera les dressages et l'usure qu'ils engendrent.

Au cours de ce stage, j'ai pu remarquer que l'empirisme et l'habitude avaient un rôle très important. De plus, en archéologie, l'étude porte le plus souvent sur le stade de rejet de l'outillage, en fin de chaîne opératoire, ce qui inverse la démarche. C'est pourquoi l'étude de ce matériel doit être liée à un programme expérimental visant à tester les caractéristiques définies théoriquement. De plus, cette phase du travail permettra des comparaisons de traces, autre approche nécessaire à l'analyse de cette catégorie d'outils complexes. Les premières expérimentations effectuées ne permettent pas encore d'avancer des résultats, mais confirment de manière évidente les variations des capacités de travail des différentes matières premières.

Malgré les différences entre les contraintes culturelles et techniques préhistoriques et celles du contexte technologique actuel, ces informations d'ordre physique et mécanique sont utilisables en archéologie.

Remerciements

Je tiens tout particulièrement à remercier la Société Norton et tout le personnel de l'usine de La Courmeuve pour leur accueil et pour la patience dont cadres et ouvriers ont fait preuve à mon égard.

Je suis également reconnaissante à P. Anderson, S. Beyries, D. Binder, J. Courtin et J.-C. Échallier pour leurs conseils.

* CRA-CNRS, Sophia Antipolis,
06560 Valbonne, France.

Bibliographie

- ANONYME, (s. d.).— *Instructions pour les essais et analyses*.
- ANONYME, (s. d.).— *Instructions pour le contrôle*.
- ANONYME, (s. d.).— *La rectification cylindrique extérieure*. Paris, Norton SA, 157 p.
- ANONYME, 1929.— *Étincelles Norton*, mars-avril 1929, vol. 3, n° 2. Paris, Norton SA, 15 p.
- ANONYME, 1966.— *Comment choisir une meule*. Paris, Norton SA, 71 p.
- ANONYME, 1970.— *Tronçonnage : le tronçonnage à la meule*. Paris, Norton SA, 36 p.
- ANONYME, 1972.— *Formulaire aide-mémoire des utilisateurs de meules*. Paris, Norton SA, 300 p.
- BORDREUIL (P.), LAGARCE (J.), LAGARCE (E.), BOUNNI (A.), SALIBY (N.), 1984.— Les découvertes épigraphiques de Ras Ibn Hani (Syrie) en 1983 : un lot d'archives administratives. *Académie des inscriptions et belles lettres*, avril-juin 1984, p. 411-414.
- CAILLEUX (A.), 1976.— *Géologie générale*. Paris, Masson, 346 p.
- CHAMBRE SYNDICALE DE LA RECHERCHE ET DE LA PRODUCTION DU PÉTROLE ET DU GAZ NATUREL, 1974.— *Méthodes modernes de géologie de terrain, 1, principes d'analyses sédimentologiques*. Paris, Technip, 95 p.
- CENTRE D'INFORMATION DES FARINES ET DU PAIN, (s. d.).— *Le blé la farine le pain*. Paris, Sepsac, 21 fiches.
- FOUCAULT (A.), RAOULT (J.-F.), 1984.— *Dictionnaire de géologie*. Paris, Masson, 347 p.
- JUNG (J.), 1969.— *Précis de pétrographie : roches sédimentaires métamorphiques et éruptives*. Paris, Masson, 332 p.
- PÉTREQUIN (P.), PÉTREQUIN (A.-M.), 1988.— *Le Néolithique des lacs : préhistoire des lacs de Chalais et de Clairvaux*. Paris, Errance, 281 p.
- SCHOUMACKER (A.), (sous presse).— Les ateliers de roches dures. In : J.-L. Huot (Éd.), *Larsa, travaux de 1987-1989*. Paris, Recherche sur les civilisations.